FEBRUARI 1996 ECN-C--95-050

MILIEUGERICHTE LEVENSCYCLUSANALYSES VAN WINDTURBINES

I.C. KOK

Verantwoording

Deze case-studie is uitgevoerd in het kader van het ENGINE-programma Integraal Ketenbeheer. Dit programma staat bij ECN geregistreerd onder nummer 7138. Naast de case-studie windturbines is ook onderzoek verricht naar een gesmolten carbonaat brandstofcel met externe reforming technologie (ER-MCFC), een stoom- en gasturbine (STEG) en een kolenvergassing stoom- en gasturbine (KV-STEG). De resultaten van deze case-studies zijn in een hoofdrapport geïntegreerd om de toepasbaarheid van ketenanalyse in energie-gerelateerde onderzoeksplanning te bepalen.

De auteur maakt tevens van de gelegenheid gebruik maken om B.J. de Smet te bedanken voor zijn medewerking aan de inventarisatie van windturbines.

Abstract

This report presents an environmental life cycle assessment of wind turbines. The aim of this investigation is to determine environmental aspects of (i) upscaling of both onshore and offshore turbines and (ii) offshore versus onshore placement of turbines. Attention has also been paid to a couple of waste processing options in order to obtain a responsible disposal of dismissed wingblades of wind turbines. Shortcomings of the followed procedure for life cycle assessments are pinpointed in the field of the software package, the inventory and the normalization of effect scores both for classification and evaluation.

Upscaling from a 300 kW wind turbine to a 500 kW wind turbine results in a decrease (20-50%) of all environmental impacts considered in this study both for an onshore and an offshore situation. This is caused by the fact that the increase of materials use turns out to be lower than de increase in energy production. However, smaller differences in electricity production between the two types of wind turbines - depending on wind climate and design - than assumed in this study will result in a lower decrease or even an increase in environmental impacts. Offshore placement leads to considerably higher environmental impacts compared to onshore placement (5-180%). However, offshore placement offers important advantages in the field of noise pollution, adverse effect on landscape and level of electricity production.

INHOUD

SAMENVATTING 5

1. INLEIDING 7

2. DOELBEPALING 9
   2.1 Doelstelling 9
   2.2 Diepgang van de studie 9
   2.3 Definitie van de studie 11

3. INVENTARISATIE WINDTURBINES 13
   3.1 Inleiding 13
   3.2 Inventarisatie milieufactoren 13
      3.2.1 Globale aanpak 13
      3.2.2 Produktieketen 14
      3.2.3 Exploitatie en afvalverwerkingsketen 18

4. CLASSIFICATIE EN EVALUATIE 21
   4.1 Inleiding 21
   4.2 Milieuprofielen 21
      4.2.1 Algemeen 21
      4.2.2 Opschaling van onshore en offshore windturbines 28
      4.2.3 Offshore versus onshore plaatsing 31
   4.3 Evaluatie 33
   4.4 Tekortkomingen van de uitkomsten 35

5. CONCLUSIES 41

REFERENTIES 43

BIJLAGE A. Effectscores 47

BIJLAGE B. Milieu-ingrepen 49

BIJLAGE C. Weegfactoren 57

BIJLAGE D. Normalisatie 65

SAMENVATTING

Het ENGINE (ENergy Generation In the Natural Environment) ontwikkelingsprogramma is een initiatief van het Energieonderzoek Centrum Nederland binnen het streven naar duurzaam gebruik van energie en materialen. In het kader van ENGINE is een aantal milieugerichte levenscyclusanalyses (LCA's) van energieconversiesystemen uitgevoerd. De case-studies hebben betrekking op een gesmolten carbonaat brandstofcel met externe reforming (ER-MCFC), twee referentie-windturbines, een stoom- en gasturbine (STEG) en een kolenvergassing stoom- en gasturbine (KV-STEG). De resultaten van deze case-studies zijn in het hoofdrapport [1] geïntegreerd om de toepasbaarheid van ketenanalyse in energie-gerelateerde onderzoeksplanning te bepalen. In dit rapport staan windturbines centraal.

Het doel van deze studie is om milieuaspecten van (i) opschaling van zowel onshore als offshore windturbines en (ii) offshore versus onshore plaatsing van windturbines te onderzoeken. Daarnaast is aandacht besteed aan een aantal afvalverwerkingsmogelijkheden om tot een verantwoorde afvalverwerking van afgedankte rotorbladen, waarin veelal glasvezelversterkte kunststoffen worden toegepast, te komen. Met behulp van een milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA) zijn milieurelevante factoren in kaart gebracht en milieu-effecten gekwantificeerd. De bewerking en interpretatie van het milieuprofiel is uitgevoerd met het software-pakket SimaPro 2.1 (Systeem voor Integrale MilieuAnalyse van PROdukten). Tekortkomingen van de toegepaste LCA-methode zijn gesignaleerd op het gebied van de inventarisatie, de normering van effectscores in zowel de classificatie- als de evaluatiefase[1] en het software-pakket.

Bij opschaling van een 300 kW naar een 500 kW windturbine blijkt de toename van materialengebruik lager te zijn dan de toename in elektriciteitsproduktie. Dit leidt tot een netto daling (20-50%) van alle milieu-effecten[2]. Als de verschillen in jaarlijkse elektriciteitsproduktie kleiner zijn dan aangenomen, resulteert dit echter in een kleinere afname in effectscore of zelfs in een lichte toename in effectscore. Bij offshore plaatsing neemt 'overall' de milieubelasting aanzienlijk toe ten opzichte van onshore plaatsing. Deze netto toename in milieubelasting voor een offshore turbine met een betonnen fundering dan wel stalen eenpaalsfundament varieert van ongeveer 5 tot 180%. Normalisatie van de effectscores, op grond van het Nederlandse energie- en grondstoffengebruik en de Nederlandse emissiefactoren, wijst uit dat de energie-gerelateerde milieu-effecten gering zijn. Met betrekking tot de rotorbladen bestaan reeds concept en techniek om het glasvezelversterkt polyester te recyclen. De bijdrage van afgedankte rotorbladen van één 300 kW of 500 kW windturbine is echter beperkt ($1 \cdot 10^{-6}$-$2 \cdot 10^{-6}$%) ten opzichte van de totale hoeveelheid vast afval in Nederland. Per 1200 MW aan geïnstalleerd vermogen is dit voor de 300 W en 500 kW turbines respectievelijk $0{,}4.10^{-3}$ en $0{,}5.10^{-3}$%.

[1] Zie voor nadere uitleg van deze standaardbegrippen het hoofdrapport [1].

[2] Energiegebruik, broeikaseffect, verzuring, vast afval, vermesting, oxidantia, humane toxiciteit, berekeningsvarianten humane toxiciteit voor lucht en water, aquatische en terrestrische ecotoxiciteit (water/bodem).

1. INLEIDING

De huidige energieconsumptie gaat gepaard met een tweetal problemen, namelijk: a) uitputting van grondstoffen en niet-vernieuwbare energiedragers en b) gevolgen van het energiegebruik voor het milieu en de volksgezondheid (bijvoorbeeld klimaatverandering en verzuring). De toekomstige energievoorziening zal in toenemende mate aan eisen met betrekking tot duurzaamheid, milieu-effecten, veiligheid en kosten voor de samenleving moeten voldoen. In het licht hiervan heeft het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) een programma gestart met de naam ENGINE: ENergy Generation In the Natural Environment [2,3]. Met ENGINE wordt beoogd bouwstenen te leveren voor het ontwerp van een toekomstig energiesysteem voor een duurzame samenleving.

In het kader van het ENGINE-programma Integraal Ketenbeheer is - in vervolg op een interne programmeringsstudie [4] - aan de hand van een aantal verkennende case-studies de toepasbaarheid van ketenanalyse in energie-gerelateerde onderzoeksplanning onderzocht. De resultaten van dit onderzoek zijn vastgelegd in het hoofdrapport [1]. De case-studies hebben naast twee referentie-windturbines ook betrekking op een gesmolten carbonaat brandstofcel met externe reforming (ER-MCFC) [5], een stoom- en gasturbine (STEG) [6] en een kolenvergassing stoom- en gasturbine (KV-STEG) [6]. Hierbij is gebruik gemaakt van een milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA) om de milieurelevante factoren van genoemde energieconversiesystemen in kaart te brengen en opties ter verbetering van de milieuprofielen te analyseren.

In deze analyse wordt de opschaling van zowel onshore als offshore windturbines onderzocht. Daarnaast wordt aandacht besteed aan offshore versus onshore plaatsing van windturbines. Tenslotte wordt ook een aantal afvalverwerkingsmogelijkheden vermeld om tot een verantwoorde afvalverwerking van afgedankte rotorbladen, waarin veelal glasvezelversterkte kunststoffen worden toegepast, te komen. Alhoewel het aanbod van afgedankte windturbinebladen in de toekomst steeds groter zal worden, moet wel gerealiseerd worden dat het aantal van afgedankte rotorbladen beperkt is ten opzichte van de totale hoeveelheid kunststofafval. Met andere woorden: het is geen maatschappelijk groot probleem, maar wel een interessant aandachtspunt.

De doelbepaling van dit onderzoek wordt uiteengezet in hoofdstuk 2. De milieurelevante factoren in de gehele keten van de windturbines worden in hoofdstuk 3 geïnventariseerd. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de milieuprofielen (classificatie) en een totaalbeoordeling van de windturbines op zijn potentiële milieu-effecten (evaluatie). Ten slotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies gepresenteerd.

2. DOELBEPALING

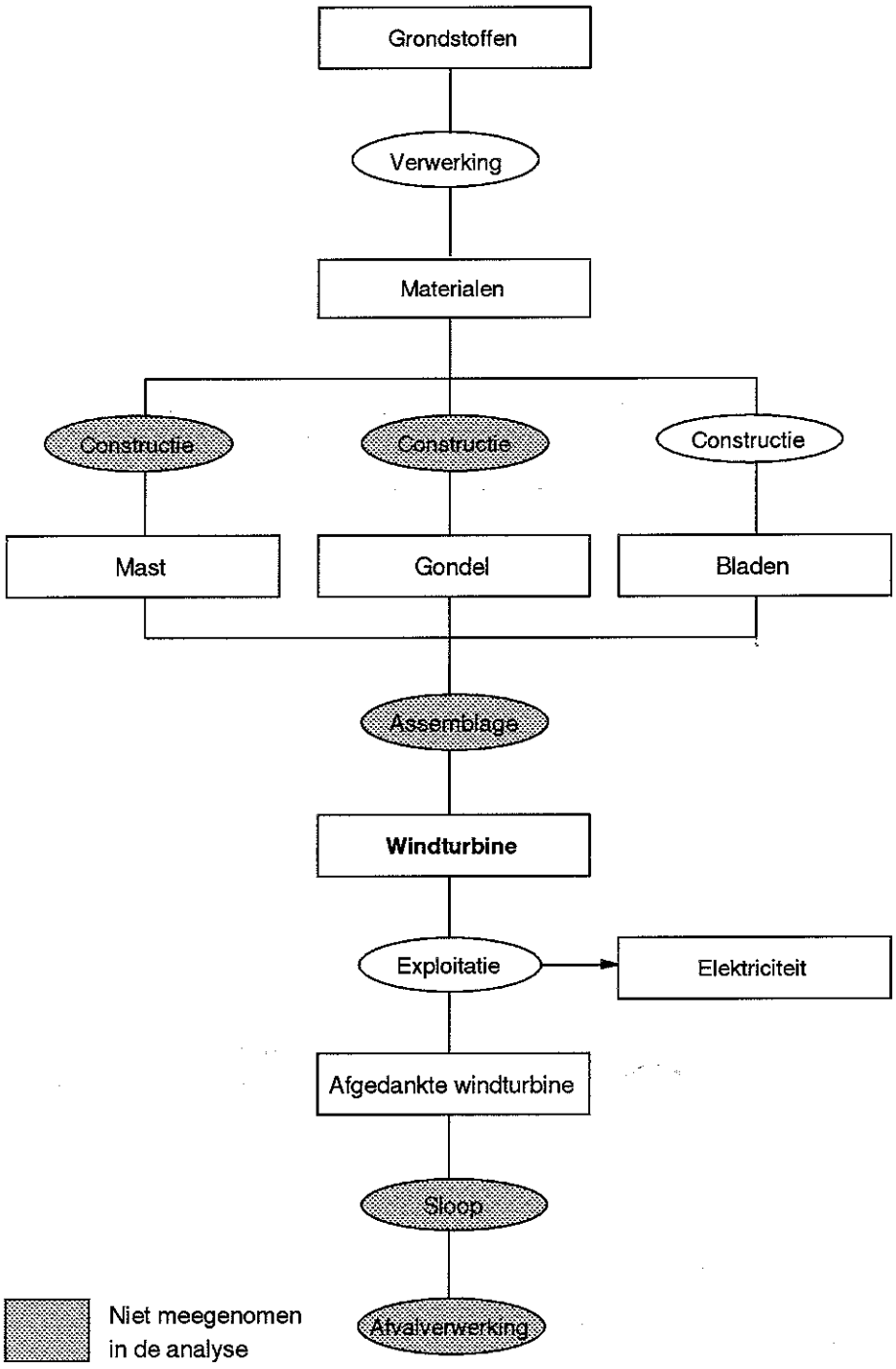
2.1 Doelstelling

Het doel van deze studie is milieuaspecten van (i) opschaling van zowel onshore als offshore windturbines en (ii) offshore versus onshore plaatsing van windturbines te onderzoeken. Met behulp van een milieugerichte levenscyclusanalyse (LCA) worden milieurelevante factoren in kaart gebracht en milieu-effecten gekwantificeerd. Mogelijkheden voor recycling van windturbinebladen worden kort aangestipt. In dit onderzoek wordt in grote lijnen de LCA-methodiek gehanteerd die ontwikkeld en beschreven is door het Centrum voor Milieukunde van de Rijksuniversiteit Leiden [8,9]. Deze methodiek is voor energietechnologieën verder uitgewerkt in het protocol van de Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving van de Universiteit Utrecht [10]. De bewerking en interpretatie van het milieuprofiel vindt plaats met het software-pakket SimaPro 2.1, wat staat voor Systeem voor Integrale MilieuAnalyse van PROdukten [11]. Voor meer informatie over de gevolgde methodiek inclusief een overzicht van de weegfactoren wordt verwezen naar het hoofdrapport [1].

2.2 Diepgang van de studie

De levenscyclusanalyses zijn gestroomlijnd uitgevoerd, wat betekent dat niet alle factoren even nauwkeurig zijn meegenomen. Zo zijn bijvoorbeeld alleen continue emissies beschouwd (en is er dus geen rekening gehouden met incidenten en calamiteiten, de zogenaamde incidentele emissies!). Deze analyses beschikken dan ook niet over een brede gedetailleerdheid en diepgang, en zijn derhalve voor verbetering vatbaar. In ieder geval zijn alle relevant geachte onderdelen in de ketenanalyse[3] beschouwd. Ter verduidelijking van de systeemgrenzen wordt in figuur 2.1 een processchema weergegeven. De door donkere ovalen weergegeven processen zijn niet meegenomen in de analyse. Voorts is doelbewust voorbijgegaan aan het kostenaspect. Ondanks het feit dat de economische beschouwingen achterwege gelaten zijn, zijn de referentie-turbines zo zorgvuldig en realistisch mogelijk gekozen.

[3] In de analyse wordt zoveel mogelijk rekening gehouden met het transport van grondstoffen en materialen. Afvalverwerking wordt voorlopig buiten beschouwing gelaten, omdat op dit moment nog geen goede methode beschikbaar is om de milieu-effecten te kwantificeren. Zo worden bijvoorbeeld bij in de huidige praktijk uitgevoerde LCA-studies de uitloging van vast afval en de produktie van stortgas niet meegenomen in het geval van storten. Hierdoor neemt alleen de effectscore van het milieuthema 'vast afval' toe. Daarnaast vertoont ook het software-pakket SimaPro 2.1 tekortkomingen op het gebied van afvalverwerking (zie paragraaf 4.4).



Figuur 2.1 *Schema van de ketenanalyse voor windturbines*

2.3 Definitie van de studie

In deze studie worden twee onshore referentie-turbines beschouwd die over een generator met een vermogen van respectievelijk 300 kW en 500 kW beschikken. De subsystemen van de windturbines zijn de fundering, toren, gondel en bladen. De 300 kW en 500 kW turbines tellen respectievelijk drie en twee bladen. Er wordt uitgegaan van de Nederlandse situatie en een levensduur van 20 jaar [12]. Opschaling van een 300 kW naar een 500 kW windturbine alsook buitengaatse plaatsing staan centraal in dit onderzoek. Daarnaast wordt kort aandacht geschonken aan de afvalverwerkingsmogelijkheden voor glasvezelversterkte polyester windturbinebladen. De functionele eenheid is 1 GWh. Dit betekent dat de milieu-effecten van de windturbines per geproduceerd GWh worden gepresenteerd.

3. INVENTARISATIE WINDTURBINES

3.1 Inleiding

Medio 1995 is in Nederland een vermogen van circa 200 MW aan windturbines geïnstalleerd. Een groot aandeel van het vermogen dat nu geïnstalleerd is, wordt geleverd door windturbines in de klasse 250-350 kW. Het aandeel van de windturbines in de klasse 400-600 kW groeit echter sterk, zodat de levenscyclus assessment voor referentie-turbines van beide klassen wordt uitgevoerd. In de toekomst zal de trend zich voortzetten naar windturbines met een vermogen van 1 MW of zelfs groter. Prototypes van deze windturbines zijn al gebouwd, maar omdat gegevens van serieproduktie nog niet voorhanden zijn kan nog geen LCA van deze windturbines worden uitgevoerd. Het streven is dat in het jaar 2000 een vermogen van 1000 MW zal zijn geïnstalleerd met een groei tot 2000 MW in het jaar 2010 [13,14]. Om deze doelstelling te bereiken zijn echter forse inspanningen nodig [15,16]. Zo heeft EnergieNed het streven naar het totaal opgesteld vermogen van 1000 MW in 2000 teruggeschroefd naar 450 MW [16]. Vooralsnog wordt in de politiek nog wel aan de oorspronkelijke doelstelling vastgehouden.

In dit hoofdstuk worden de relevante milieufactoren van twee referentiewindturbines uit de vermogensklassen 300 kW en 500 kW beschreven. De voornaamste kenmerken van de 300 kW en 500 kW referentie-turbines worden weergegeven in tabel 3.1 [17].

Tabel 3.1 *Voornaamste kenmerken 300 kW en 500 kW referentie-turbines*

Kenmerk		
Vermogen	300 kW	500 kW
Elektriciteitsproduktie onshore[4]	325 MWh/jaar	850 MWh/jaar
Elektriciteitsproduktie offshore[3]	450 MWh/jaar	1000 MWh/jaar
Technische levensduur	20 jaar	20 jaar

3.2 Inventarisatie milieufactoren

3.2.1 Globale aanpak

In de inventarisatie worden de milieurelevante factoren gedurende de levensduur van de windturbines in kaart gebracht. Door deze milieurelevante factoren van alle betrokken processen te aggregeren, worden de milieuingrepen voor de gehele keten bepaald. De keten van een windturbine wordt opgesplitst in drie levensstadia, te weten produktie, exploitatie en

[4] In een gunstig windklimaat kunnen deze waarden hoger uitvallen. Naast het windklimaat is de elektriciteitsproduktie ook afhankelijk van het ontwerp. Momenteel kunnen geavanceerde turbines 2000 vollasturen per jaar beschikbaar zijn.

afvalverwerking. De voornaamste factoren, welke invloed hebben op de milieu-effecten zijn:

a. winning/produktie van grondstoffen, produktie van materialen, constructie van windturbine(onderdelen);
b. lokatie van leveranciers, produktiefaciliteiten, windturbine;
c. transport: soort, netto lading, gemiddelde afstand;
d. energiedrager en energiegebruik (zowel thermisch als elektrisch);
e. emissiefactoren naar water, lucht en bodem voor zowel proces als transport;
f. levensduur van windturbine(onderdelen);
g. elektriciteitsproduktie tijdens exploitatie;
h. methode van afvalverwerking.

Over vervoersafstanden zijn in deze studie veronderstellingen gemaakt, omdat er nog geen gegevens zijn over lokaties en transportroutes. Voor de toegepaste procesgegevens wordt verwezen naar een aparte bijlage [7].

3.2.2 Produktieketen

Windturbinebladen van een 300 kW windturbine

De lengte van een blad is ongeveer 12 meter en het gewicht bedraagt circa 750 kg. De windturbinebladen worden vervaardigd van glasvezelversterkt polyester. Deze kunststof wordt bereid volgens de 'hand-lay-up' methode [18-20] door een glasvezeldoek te impregneren met onverzadigde polyester hars (enigszins visceuze thermoharder)[5]. Het aanbrengen van polyurethaancoat en polyester gelcoat geschiedt handmatig. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de benodigde materialen met bijbehorend vast afval bij de produktie van één windturbineblad [17]. Aangenomen wordt dat het styreengehalte van de hars toegepast in een turbineblad 1,5% bedraagt. Naast het ontstane vaste afval treedt er dan naar schatting een styreenemissie van 400 gram per windturbineblad op. De styreenemissiefactoren zijn voor de 'hand-lay-up' methode en coating respectievelijk ongeveer 1.1 en 3,8 gram per kg hars. Deze emissiefactoren zijn afgeleid uit [18] door het styreengehalte van 40% naar 1,5% om te rekenen. Verder wordt 70 liter methyleenchloride als schoonmaakmiddel (laminaatontvetter) gebruikt, waarvan 70% wordt herverwerkt en 30% wordt geëmitteerd. Bij het aanbrengen van een polymere urethaanlaag op een windturbineblad wordt in dit onderzoek uitgegaan van het oplosmiddel aceton. Voor het aanbrengen van een polymere urethaanlaag wordt de emissiefactor van het oplosmiddel gesteld op gemiddeld 550 gram/kg coating [18]. De emissiefactor van aceton bedraagt dan 2,9 kg aceton per windturbineblad.

[5] Door rollen en kloppen worden de glasvezels verzadigd met hars en wordt de ingesloten lucht verwijderd. Dit procédé wordt herhaald tot de gewenste materiaaldikte is bereikt. Er komt een reactie op gang die leidt tot het uitharden van de hars. Eenmaal uitgehard is de hars niet meer smeltbaar. De benodigde verwerkingstijd van het polyester is afhankelijk van de reactiviteit, de soort en hoeveelheden van de toegevoegde stoffen, de temperatuur van het harsmengsel en de hoeveelheid harsmengsel. Nadat de hars voldoende is uitgehard, wordt het vormstuk van de mal gelost en zonodig nabewerkt.

Tabel 3.2 *Benodigde materialen en afval bij de produktie van een 300 kW windturbineblad*

Materiaal	Gewicht [kg]	Afval [kg]
E-glasvezel	232	12
Teraftale zure hars	235	20
Polyurethaan coat	5	0,2
Polyester gelcoat	25	2
Gietstaal	250	onbekend
PVC-schuim	5	1

Het elektriciteitsverbruik voor de produktie van een 300 kW windturbineblad is circa 500 kWh. Bij de produktie wordt gebruik gemaakt van mallen, waarvan de samenstelling is weergegeven in tabel 3.3 [17]. Per mal worden gemiddeld 100 windturbinebladen geproduceerd. Bij de vervaardiging van een dergelijke mal treedt per 300 kW windturbinemal naar schatting een emissie van 5,0 gram styreen en 11,2 kg aceton op door respectievelijk uitharden van de Low-Styrene-Emission (LSE) epoxy hars en het aanbrengen van een epoxy coating. De emissiefactoren van styreen en aceton zijn respectievelijk 9 gram/kg LSE epoxy hars en 350 gram/kg epoxy coating [18].

Tabel 3.3 *Benodigde materialen en afval bij de produktie van een mal voor een 300 kW windturbineblad*

Materiaal	Gewicht [kg]	Afval [kg]
Staal	200	15
Hout	500	
Epoxy	500	50
E-glasvezel	400	10
Epoxy coating	30	2

Windturbinebladen van een 500 kW windturbine

De lengte van dit blad is ongeveer 25 meter en het gewicht bedraagt circa 2350 kg. De windturbinebladen worden vervaardigd van glasvezelversterkt polyester. Deze kunststof wordt bereid volgens de 'hand-lay-up' methode [18-20] (zie ook *windturbinebladen van een 300 kW windturbine*). Het aanbrengen van de polyester coating geschiedt handmatig. Tabel 3.7 geeft een overzicht van de benodigde materialen met bijbehorend vast afval bij de produktie van één windturbineblad. Aangenomen wordt dat het styreengehalte van de hars toegepast in een turbineblad 1,5% bedraagt. Er treedt naar schatting een styreenemissie van 340 gram per windturbineblad op, rekening houdend met Low-Styrene-Emission (LSE) hars. De styreenemissiefactoren van deze hars voor hand-lay-up en coating zijn respectievelijk ongeveer 0,3 en 1,9 gram per kg hars. Deze emissiefactoren zijn afgeleid uit [18] door het styreengehalte van 40% naar 1,5% om te rekenen. Tijdens de produktie wordt 140 liter methyleenchloride als schoonmaakmiddel (laminaatontvetter) gebruikt, waarvan 70% wordt herverwerkt en 30% wordt geëmitteerd.

Tabel 3.7 *Benodigde materialen en afval bij de produktie van een 500 kW windturbineblad*

Materiaal	Gewicht [kg]	Afval [kg]
E-glasvezel	745	30
Teraftale zure hars	670	30
Polyester coating	50	5
Staal	870	
PVC-schuim	13	2

Het elektriciteitsverbruik voor de produktie van een 500 kW windturbineblad is circa 1000 kWh. Bij de produktie wordt gebruik gemaakt van mallen, welke een samenstelling hebben als weergegeven in tabel 3.8 [17]. Per mal worden gemiddeld 100 windturbinebladen geproduceerd. Bij de vervaardiging van een dergelijke mal treedt per 500 kW windturbinemal naar schatting een emissie van 8,1 gram styreen en 22,4 kg aceton op door respectievelijk uitharden van de Low-Styrene-Emission (LSE) epoxy hars en het aanbrengen van een epoxy coating. De emissiefactoren van styreen en aceton zijn respectievelijk 9 gram/kg LSE epoxy hars en 350 gram/kg epoxy coating [18].

Tabel 3.8 *Benodigde materialen en afval bij de produktie van een mal voor een 500 kW windturbineblad*

Materiaal	Gewicht [kg]	Afval [kg]
Staal	500	
Hout	700	
Epoxy	800	80
E-glasvezel	700	18
Epoxy coating	60	4

Gondel en mast

De materialen die gebruikt zijn bij de produktie van de gondel en mast van zowel een 300 kW als 500 kW windturbine worden gespecificeerd in respectievelijk tabel 3.12 en 3.13 [17].

Tabel 3.12 *Benodigde materialen bij de produktie van de gondel (inclusief naaf) voor een 300 kW en 500 kW windturbine*

Materiaal	Gewicht [kg] 300 kW turbine	Gewicht [kg] 500 kW turbine
Staal	15795	24300
Koper (kabels en generator)	500	1000
Glasvezelversterkt polyester (behuizing)	405	600
Coating op gondel	10	20
Rubber	300	500

Tabel 3.13 *Benodigde materialen bij de produktie van de mast voor een 300 kW en 500 kW windturbine*

Materiaal	Gewicht [kg] 300 kW turbine	Gewicht [kg] 500 kW turbine
Staal	12910	30500
Koper (kabels)	160	320
Coating op mast	130	225

Fundering en transport

De fundering voor een 500 kW windturbine is circa 200 ton. De hoeveelheid benodigd beton voor een 300 kW windturbine wordt geschat op 150 ton [17]. Verder dient het benadrukt te worden dat de hoeveelheid beton sterk afhankelijk is van de locatie.

In tabel 3.14 worden de gemiddelde transportafstanden van de verschillende 300 kW en 500 kW windturbinecomponenten weergegeven [17]. Het transport van alle onderdelen (inclusief windturbineblad vanwege de afmetingen!) geschiedt met vrachtwagens die zwaarder zijn dan 10 ton [17].

Tabel 3.14 *Gemiddelde transportafstand van de verschillende onderdelen van een 300 kW en 500 kW windturbine*

Onderdeel	Afstand [km] 300 kW turbine	Afstand [km] 500 kW turbine
Blad	180	180
Gondel	200	200
Mast	200	200

Offshore windturbines

In het geval van offshore windturbines worden naast een vergelijking met onshore turbines ook twee verschillende soorten fundering bestaande uit respectievelijk gewapend beton [21] en staal [23-25], beschouwd. Aangenomen wordt dat de diepte ongeveer 6 meter [21,25] is. Er treden bij een offshore voornamelijk twee veranderingen op, te weten de fundering en de kabels. De overige windturbineonderdelen blijven onveranderd. Voor een betonnen fundering wordt uitgegaan van de gegevens die beschikbaar zijn voor het Vindeby windturbinepark in Denemarken [21,22]. Aan de hand van het constructieontwerp [22] werd berekend dat voor een 500 kW windturbine circa 730 ton gewapend beton en 370 ton ballast (zand/grind) vereist is. Beschouwd wordt voor een stalen fundering een - in de bodem te heien - 500 kW eenpaalsfundament van 28 meter en 3,5 meter doorsnede, die toegepast wordt in het eerste buitengaatse turbinepark in het IJsselmeer bij Medemblik [23-25]. Het gewicht van dit fundament bedraagt dan ongeveer 80 ton [26]. Verondersteld wordt dat voor de fundering van een 300 kW offshore turbine 25 procent minder materiaal benodigd is. De *extra* hoeveelheid kabel die nodig is voor aansluiting op het 50 kV-station bij Medemblik bedraagt circa 560 meter [25]. Verder wordt aangenomen dat een nationaal binnenvaartschip wordt aangewend om de turbines te transporte-

ren. Aangenomen wordt dat de vervoersafstand tot de kust circa 2 km [21,27] is. Voor dit transport wordt echter 2,5 km in beschouwing genomen. Verder wordt verondersteld dat voor de benodigde materialen van een betonnen fundering 50 km extra wegtransport moet worden afgelegd. Voor het vervoer van staal wordt uitgegaan van 50 km wegtransport. Het wegtransport van de extra hoeveelheid koperen kabel wordt gesteld op 200 km. Hoewel er uitgegaan wordt van Medemblik, betreft dit onderdeel van de studie nog steeds een gemiddelde turbine waarbij is uitgegaan van de maximale elektriciteitsproduktie en is in feite *niet* plaatsgebonden. Zo wordt bijvoorbeeld verwacht dat de elektriciteitsproduktie per jaar op het IJsselmeer, 2 km ten noorden van Medemblik, 875 MWh (zie paragraaf 3.2.3) in plaats van 1000 MWh voor een 500 kW turbine zal bedragen [17].

3.2.3 Exploitatie en afvalverwerkingsketen

De levensduur van een windturbine is, uitgaande van de bladen, 20 jaar. De gemiddelde elektriciteitsproduktie van een windturbine is sterk afhankelijk van de locatie en ontwerp. De gemiddelde jaarlijkse elektriciteitsproduktie van een 300 kW en een 500 kW 'onshore' windturbine wordt verondersteld respectievelijk 325 en 850 MWh te zijn. Voor de jaarlijkse energieopwekking van 'offshore' turbines worden de maximale waarden van bovenstaande gemiddelden gehanteerd [17]. Dit komt neer op een elektriciteitsproduktie van 450 en 1000 MWh voor respectievelijk een 300 kW en een 500 kW turbine.

Tijdens de exploitatiefase wordt jaarlijks de erosiebescherming bijgewerkt op epoxy basis. Dit jaarlijks bijwerken is echter verwaarloosbaar. Verder wordt na 10 jaar de gelcoat overgeschilderd met een polyurethaan coating. Voor onderhoud en eventuele bediening wordt verondersteld dat jaarlijks 500 km met een personenwagen moet worden afgelegd.

Momenteel is niet duidelijk wat er in de toekomst met afgedankte windturbinebladen zal gebeuren. In deze studie wordt er van uitgegaan dat ze worden gestort. De hoeveelheid afgedankte rotorbladen is echter klein ten opzichte van de totale hoeveelheid kunststofafval[6].

De afvalverwerkingsmogelijkheden voor glasvezelversterkte kunststoffen bestaan uit a) hergebruik van gegranuleerd materiaal (ERCOM-proces); b) pyrolyse; c) hydrogeneren en d) verbranding [29,30]. Momenteel bestaan concept en techniek om glasvezelversterkt polyester te recyclen. Scheiding is echter duur in verband met de beperkte hoeveelheid rotorbladen en op korte termijn zal deze toepassing, mede met het oog op de lage stortkosten, nog niet aan de orde zijn. Bovendien zijn hoge technische specificaties vereist waardoor recycling bemoeilijkt wordt en hergebruik in een andere richting zou moeten worden gezocht. Voor meer informatie wordt verwezen naar het ECN-rapport 'Evaluatie van de mogelijkheden voor recycling van windturbinebladen' [29].

[6] Per jaar wordt in Nederland 10^6 ton kunststofafval geproduceerd [27].

De gondel en mast worden na afdanking verschroot. Voor koper en staal wordt een recyclingspercentage van 95% verondersteld. De resterende 5% wordt toegerekend aan de stort. Voor de recycling wordt bij de produktie van staal en koper niet gecorrigeerd, omdat de rekenmethode daarvoor niet geschikt is. De recycling heeft dan ook geen invloed op bijvoorbeeld de uitputting van koper.

Voor de overige afgedankte materialen wordt ook uitgegaan van stort. Opgemerkt moet worden dat slechts stort van de afgedankte materialen niet realistisch is. Zo wordt bijvoorbeeld recycling van beton (fundering) buiten beschouwing gelaten, terwijl het sloopmateriaal van de betonnen constructie verwerkt kan worden tot betongranulaat (afzet in de wegenbouw en betonbranche). Daarnaast kunnen de fundering en de stalen componenten ook weer hergebruikt worden voor een nieuwe turbine.

In deze studie wordt overigens alleen de invloed op de vaste afvalstroom meegenomen en niet die op de milieuthema's terrestrische (bodem) humane toxiciteit en terrestrische ecotoxiciteit. Zo wordt de bijdrage van 'gestort' koper aan deze milieuthema's niet meegenomen. Gekozen is om slechts de vaste afvalstroom zichtbaar te maken, omdat op dit moment nog geen goede methode beschikbaar is om de milieu-effecten te kwantificeren.

4. CLASSIFICATIE EN EVALUATIE

4.1 Inleiding

Classificatie van de volgende thema's heeft plaatsgevonden: energiegebruik, ozonlaagaantasting, broeikaseffect, verzuring, vast afval, uitputting, vermesting, fotochemische oxydantvorming, humane toxiciteit en ecotoxiciteit [8-10]. De classificatie binnen een aantal milieuthema's (bijvoorbeeld ecotoxiciteit, humane toxiciteit, fotochemische oxydantvorming) is nog niet bevredigend, aangezien een aantal objectief bepaalde weegfactoren ontbreken. Om een beter inzicht in het milieuthema humane toxiciteit te verkrijgen, zijn twee extra berekeningsvarianten voor lucht en water toegevoegd, te weten (a) MAC-waarden [31] voor lucht en (b) standaardwaarden van het Waterleidingbesluit [32] voor water. Ter verduidelijking worden tevens de weegfactoren voor de bodem van het milieuthema humane toxiciteit die bepaald zijn door het CML [8], afzonderlijk weergegeven. In het hoofdrapport [4] wordt de methodiek waarmee de effectscores van de bovenstaande (sub)thema's werden berekend, beschreven. De weegfactoren van de bovenstaande milieuthema's zijn opgenomen in de bijlage van dit hoofdrapport. Voor de totale effectscores per milieuthema en de milieu-ingrepen[7] van zowel onshore als offshore windturbines van 300 kW en 500 kW per functionele eenheid wordt verwezen naar respectievelijk bijlage A en B. De weegfactoren toegepast op de milieu-ingrepen zijn opgenomen in bijlage C.

In paragraaf 2 van dit hoofdstuk worden aan de hand van milieuprofielen de opschaling van zowel onshore als offshore windturbines en offshore versus onshore plaatsing behandeld. De resultaten worden geëvalueerd in paragraaf 3. Ten slotte worden in paragraaf 4 de tekortkomingen van de uitkomsten uiteengezet.

4.2 Milieuprofielen

4.2.1 Algemeen

Alle milieu-effecten kunnen vrijwel volledig toegeschreven worden aan de produktieketen van de windturbines. Tijdens de exploitatie vindt namelijk slechts transport plaats voor bediening en onderhoud. In de afvalverwerkingsketen wordt uitgegaan van storten, wat alleen zijn weerslag heeft op de hoeveelheid vast afval. Daar er op dit moment nog geen goede methode beschikbaar is om de milieu-effecten van afvalverwerking te kwantificeren, wordt het stortafval voor de betreffende case alleen vermeld en *niet* meegenomen in het milieuprofiel.

[7] Een milieu-ingreep wordt gedefinieerd als een direct door menselijk handelen veroorzaakte verandering van het milieu [8]. Dit betreft in deze studie onttrekkingen van grondstoffen en emissies van stoffen naar de verschillende milieucompartimenten.

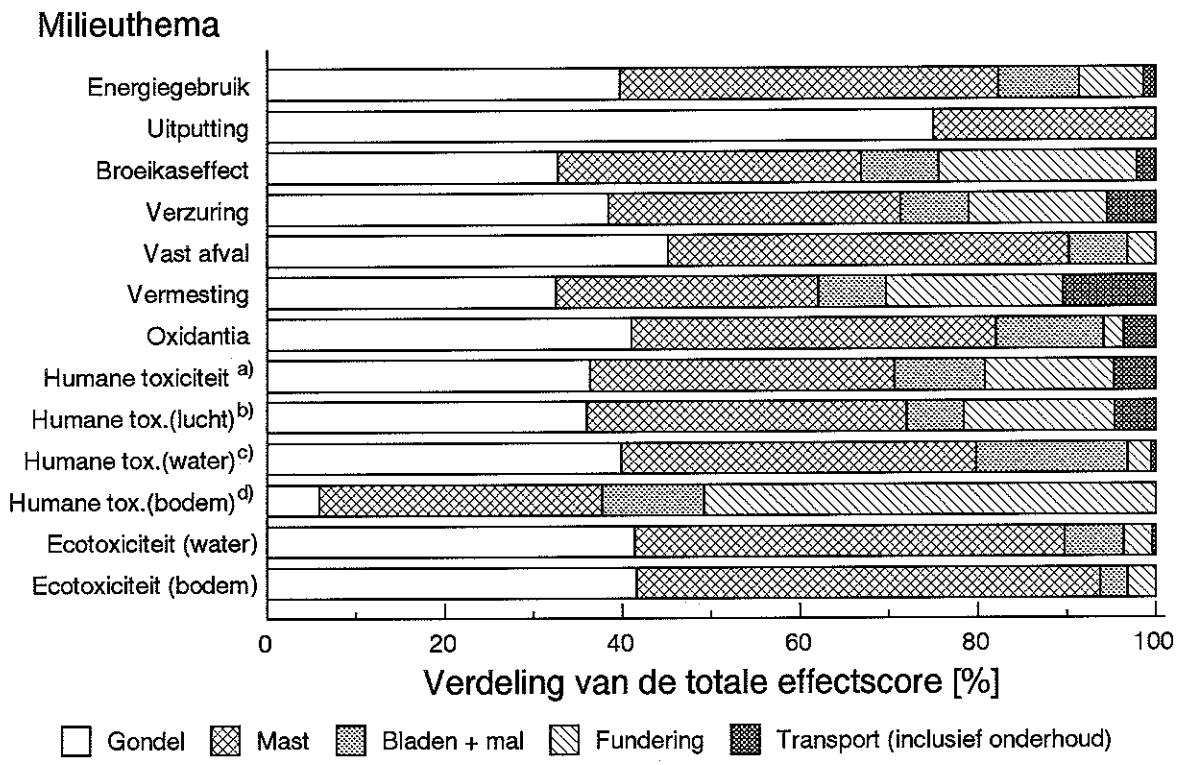
Alvorens de referentie-turbines met elkaar te vergelijken is het onontbeerlijk om enig inzicht te krijgen welke onderdelen van de produktieketen als belangrijk moeten worden beschouwd. Hiertoe wordt de relatieve bijdrage van windturbineonderdelen (bladen, gondel, mast en fundering), transport en eventuele benodigde extra kabels aan de totale effectscore van de milieuthema's in de figuren 4.1 (500 kW onshore turbines) en 4.2 (500 kW offshore turbines met een betonnen fundering dan wel stalen eenpaalsfundament) weergegeven. In deze figuren worden alleen de relatieve bijdragen van 500 kW turbines geïllustreerd, omdat het verschil met de relatieve bijdragen van 300 kW turbines zeer klein is. Daarnaast worden de milieuingrepen, waarvan de bijdrage aan de totale effectscore niet kleiner is dan 5%, voor elke turbine afzonderlijk in de bij de figuren behorende tabellen 4.1, 4.2 en 4.3 weergegeven. Tevens wordt in de tabellen het proces of windturbineonderdeel vermeld waardoor de milieu-ingreep hoofdzakelijk dan wel geheel veroorzaakt wordt. In alle cases is er geen sprake van ozonlaagaantasting. Dit milieuthema komt dan ook niet voor in de milieuprofielen van de windturbines. Verder is voor de stikstofoxyden (nog) geen classificatiefactor binnen het milieuthema oxidantia gedefinieerd, terwijl fotochemische oxydantvorming tot stand komt door reacties tussen stikstofoxyden (NO_x) en vluchtige organische stoffen (VOS). Voor de volledigheid worden in deze paragraaf voor elke turbine de hoeveelheden NO_x en VOS per functionele eenheid (GWh) vermeld. Ten slotte zullen ook de bijdrage van turbinebladen aan de stort van afgedankte materialen/onderdelen per functionele eenheid behandeld worden, aangezien de aandacht enigszins uitgaat naar de problematiek rondom een windturbineblad. Hierbij wordt voor de aan de stort toe te rekenen hoeveelheid staal en koper een recyclingspercentage van 95% verondersteld.

In het geval van onshore windturbines blijken de effectscores, op één uitzondering na, met name bepaald te worden door de gondel en de mast. Voor de effectscore van het subthema humane toxiciteit (bodem) geldt echter dat de fundering en de mast toonaangevend zijn. Uit tabel 4.1 blijkt dat de produktie van staal een aanzienlijke bijdrage levert aan de effectscores van de milieuthema's met uitzondering van uitputting en humane toxiciteit (bodem). De milieu-effecten uitputting en humane toxiciteit (bodem) kunnen respectievelijk grotendeels toegeschreven worden aan de onttrekking van koper respectievelijk produktie van cement. Door toename van de elektriciteitsopwekking bij opschaling van 300 kW naar 500 kW daalt de uitstoot VOS en NO_x van respectievelijk 62 kg en 32 kg naar respectievelijk 41 kg en 21 kg. De bijdrage van de turbinebladen aan de stort per functionele eenheid is voor een 300 kW en een 500 kW turbine respectievelijk circa 1% (340 kg) en 2% (280 kg). Indien het gewapend beton hergebruikt kan worden, nemen echter 300 kW bladen 48% en 500 kW bladen 56% van de stort voor hun rekening.

De effectscores van buitengaats geplaatste turbines kunnen met name toegeschreven worden aan fundering, mast en gondel. Het relatieve belang van de mast en de gondel is wel afgenomen vergeleken met onshore turbines. Uitputting kan echter vrijwel volledig worden toegeschreven aan de kabels.

Uit tabel 4.2 komt naar voren dat bij offshore turbines met een betonnen fundering in tegenstelling tot onshore turbines naast het staal produktieproces, ook de produktie van koper[8] en cement voorname processen zijn. De hoeveelheden VOS en NO_x zijn voor een 300 kW turbine respectievelijk 62 kg en 62 kg, en voor een 500 kW turbine respectievelijk 44 kg en 39 kg. De bijdrage van de turbinebladen aan de stort per functionele eenheid ligt in de orde van 0,5%. Indien het gewapend beton hergebruikt kan worden nemen de 300 kW en 500 kW turbinebladen in dit geval respectievelijk 50% (250 kg) en 59% (240 kg) van de stort voor hun rekening.

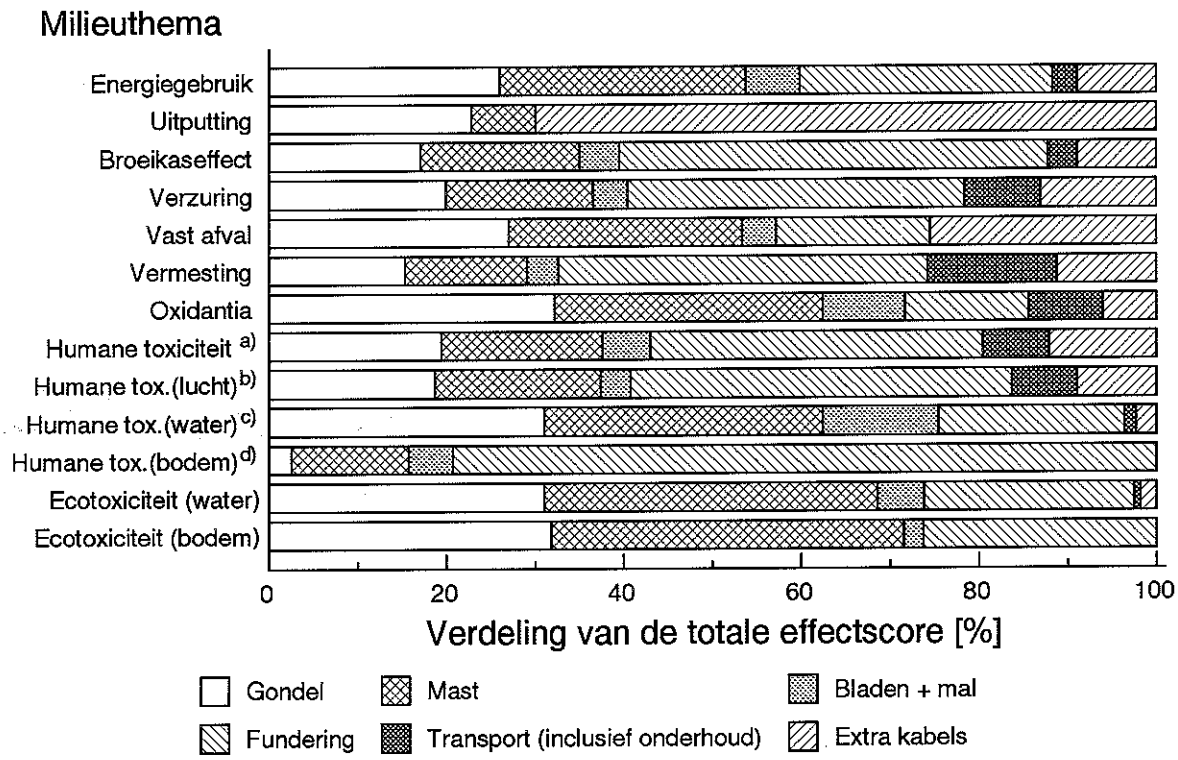
In het geval van offshore turbines met een stalen eenpaalsfundament laat tabel 4.3 zien dat de produktie van staal en koper de belangrijkste processen zijn. De hoeveelheden VOS en NO_x zijn voor een 300 kW turbine respectievelijk 87 kg en 44 kg, en voor een 500 kw turbine respectievelijk 59 kg en 28 kg. De 300 kW en 500 kW turbinebladen nemen per functionele eenheid respectievelijk 30% (250 kg) en 37% (240 kg) van de stort voor hun rekening.



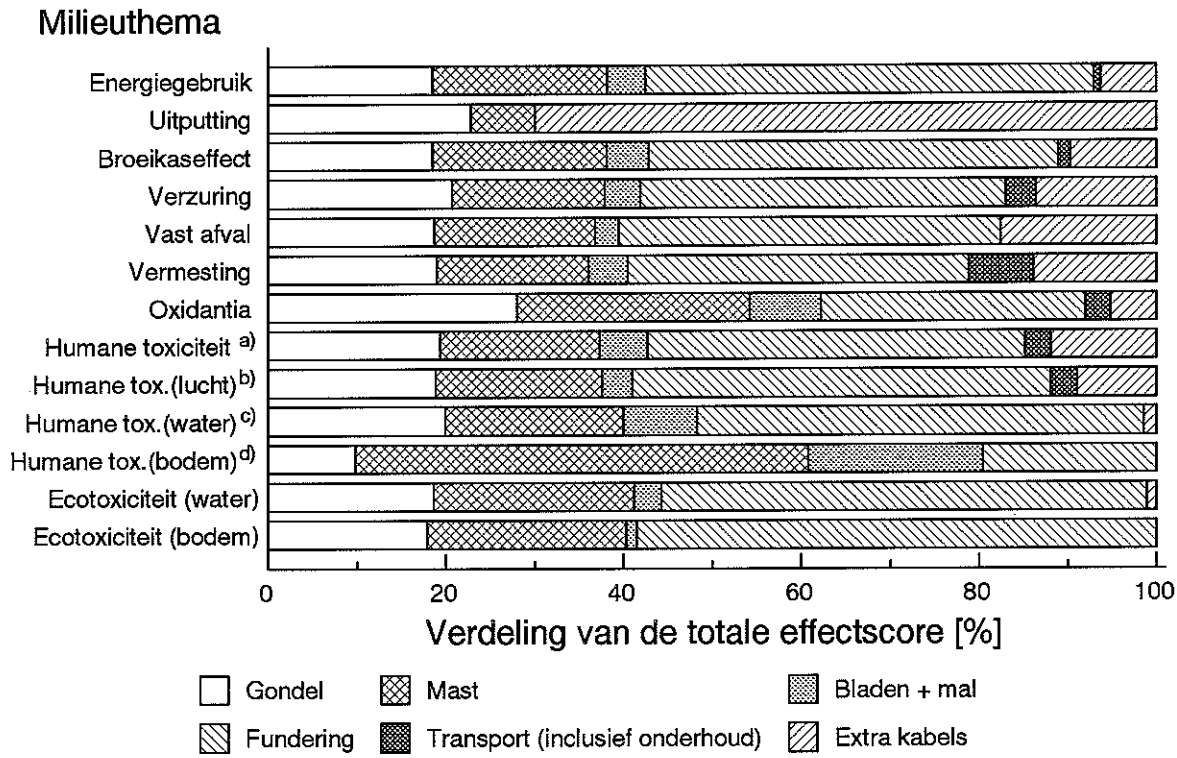
Figuur 4.1 *Relatieve bijdrage van gondel, mast, bladen, fundering en transport aan de totale effectscore van de milieuthema's voor een 500 kW onshore windturbine*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

[8] In deze studie is alleen rekening gehouden met emissiefactoren die betrekking hebben op het energiegebruik om koper te produceren. Overige emissiefactoren ontbreken.

a. 500 kW offshore windturbine met een betonnen fundering



b. 500 kW offshore windturbine met een stalen eenpaalsfundament



Figuur 4.2 *Relatieve bijdrage van gondel, mast, bladen, fundering en transport aan de totale effectscore van de milieuthema's voor een 500 kW offshore windturbine*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

Tabel 4.1 *Voornaamste bijdragen aan de totale effectscore van milieuthema's voor onshore windturbines van 300 en 500 kW*

Milieuthema	Milieu-ingreep	Bijdrage aan effectscore [%] 300 kW	500 kW	Voornaamste proces of turbineonderdeel
Energiegebruik	Steenkool	48	49	Staal
	Niet gespecificeerd	17	17	Staal
	Aardolie	17	16	Staal/polyesterhars/koper
	Aardgas	16	15	Staal/polyesterhars
Uitputting[1]	Kopererts	100	100	Kabels
Broeikaseffect	CO_2[4]	95	95	Staal/cement
Verzuring[1]	SO_2/SO_x[4]	57	59	Staal/cement/koper
	NO_x[4]	43	41	Staal/cement/koper
Vast afval (produktie)	Niet gespecificeerd	87	88	Staal/koper
Vast afval (stort)[2]	Gewapend beton	97	96	Fundering
Vermesting	NO_x	91	89	zie verzuring
	Kjeldahl-N[5]	9	10	Staal
Oxidantia	Koolwaterstoffen[4]	48	52	Staal/polyesterhars
	Aceton	24	22	Epoxy/PUR coating
	Styreen	15	13	Polyesterhars
	VOS (algemeen)	7	6	Polyesterhars
Humane toxiciteit (CML)	SO_2/SO_x	50	52	zie verzuring
	NO_x	35	33	zie verzuring
Humane toxiciteit (lucht)[3,a]	NO_x	35	33	zie verzuring
	SO_2/SO_x	26	27	zie verzuring
	CO[4]	22	24	Staal
	Stof	8	7	Cement/staal
	CO_2[4]	5	5	zie broeikaseffect
Humane toxiciteit (water)[3,b]	IJzer	31	32	Staal
	PAK	15	16	Staal
	Kjeldahl-N	10	10	Staal
	E-glas polymeercoating	9	9	E-glasvezel
	Olie	7	7	Polyesterhars/staal/ rubber
	Koolwaterstoffen	5	5	Polyesterhars/rubber/ staal
Humane toxiciteit (bodem)	Afgewerkte olie	56	50	Cement
	Toxische chemicaliën	36	41	(Poly)vinyl chloride
	Zinkrijke reststof	7	9	Staal
Ecotoxiciteit (water)	Kwik	47	46	Staal
	Cadmium	18	18	Staal
	Olie	7	7	zie humane tox. (water)
	Koolwaterstoffen	6	5	zie humane tox. (water)
	Zink	5	6	Staal
	Lood	5	5	Staal
	Koper	5	5	Staal
Ecotoxiciteit (bodem)[1]	Zinkrijke reststof	100	100	Staal

[1] Bijdragen van andere dan genoemde verbinding(en) zijn verwaarloosbaar.
[2] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.
[3] Extra berekeningsvarianten gebaseerd op (a) MAC-waarden en (b) standaardwaarden van het Waterleidingbesluit.
[4] Emissiefactor wordt voornamelijk veroorzaakt door verbranding van energiedragers.
[5] Waterverontreiniging.

Tabel 4.2 *Voornaamste bijdragen aan de totale effectscore van milieuthema's voor offshore windturbines van 300 en 500 kW met een betonnen fundering*

Milieuthema	Milieu-ingreep	Bijdrage aan effectscore [%] 300 kW	500 kW	Voornaamste proces of turbineonderdeel
Energiegebruik	Steenkool	45	47	Staal
	Aardolie	22	20	Staal/koper
	Niet gespecificeerd	15	15	Staal/cement
	Aardgas	13	13	Staal/koper/polyester-hars/cement
Uitputting[1]	Kopererts	100	100	Kabels
Broeikaseffect	CO_2[4]	96	97	Cement/staal/koper
Verzuring[1]	SO_2/SO_x[4]	53	54	Staal/koper/cement
	NO_x[4]	47	46	Cement/staal/koper
Vast afval (produktie)	Niet gespecificeerd	92	92	Staal/koper
Vast afval (stort)[2]	Gewapend beton	99	99	Fundering
Vermesting	NO_x	95	93	zie verzuring
	Kjeldahl-N[5]	5	6	Staal
Oxidantia	Koolwaterstoffen[4]	61	62	Staal/koper/polyesterhars
	Aceton	17	17	Epoxy/PUR coating
	Styreen	11	10	Polyesterhars
	VOS (algemeen)	5	5	Polyesterhars
Humane toxiciteit (CML)	SO_2/SO_x	49	50	zie verzuring
	NO_x	41	39	zie verzuring
Humane toxiciteit (lucht)[3,a]	NO_x	41	39	zie verzuring
	SO_2/SO_x	26	26	zie verzuring
	CO[4]	15	18	Staal
	Stof	10	9	Cement/staal
Humane toxiciteit (water)[3,b]	IJzer	32	33	Staal
	PAK	16	16	Staal
	Kjeldahl-N	10	10	Staal
	Olie	8	7	Staal/polyesterhars/koper
	E-glas polymeercoating	6	7	E-glasvezel
	Koolwaterstoffen	5	5	Polyesterhars/rubber/ staal/koper
Humane toxiciteit (bodem)	Afgewerkte olie	80	76	Cement
	Toxische chemicaliën	15	17	(Poly)vinyl chloride
Ecotoxiciteit (water)	Kwik	46	46	Staal
	Cadmium	18	18	Staal
	Olie	8	7	zie humane tox. (water)
	Zink	5	6	Staal
	Koolwaterstoffen	5	5	zie humane tox. (water)
	Lood	5	5	Staal
	Koper	5	5	Staal
Ecotoxiciteit (bodem)[1]	Zinkrijke reststof	100	100	Staal

[1] Bijdragen van andere dan genoemde verbinding(en) zijn verwaarloosbaar.
[2] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.
[3] Extra berekeningsvarianten gebaseerd op (a) MAC-waarden en (b) standaardwaarden van het Waterleidingbesluit.
[4] Emissiefactor wordt voornamelijk veroorzaakt door verbranding van energiedragers.
[5] Waterverontreiniging.

Tabel 4.3 *Voornaamste bijdragen aan de totale effectscore van milieuthema's voor offshore windturbines van 300 en 500 kW met stalen eenpaalsfundament*

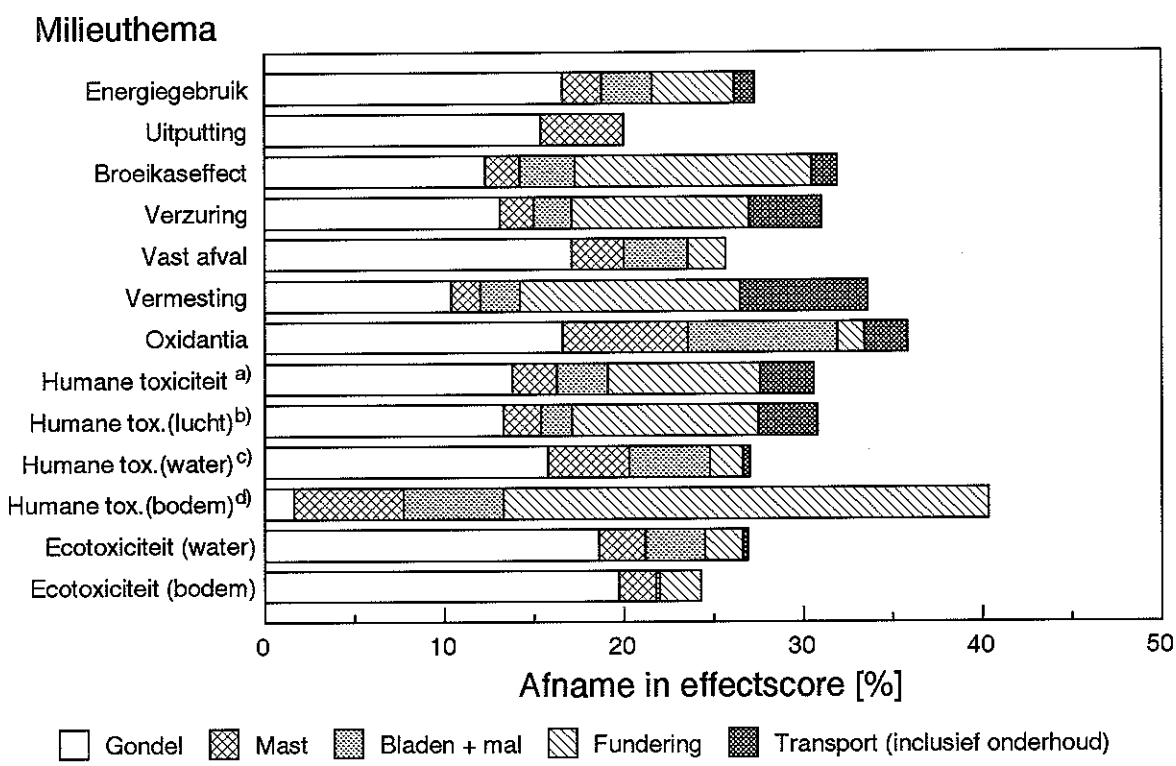
Milieuthema	Milieu-ingreep	Bijdrage aan effectscore [%] 300 kW	500 kW	Voornaamste proces of turbineonderdeel
Energiegebruik	Steenkool	54	54	Staal
	Niet gespecificeerd	17	17	Staal
	Aardolie	16	15	Staal/koper
	Aardgas	10	10	Staal/koper
Uitputting[1]	Kopererts	100	100	Kabels
Broeikaseffect	CO_2[4]	94	95	Staal/koper
Verzuring[1]	SO_2/SO_x[4]	64	64	Staal/koper
	NO_x[4]	36	35	Staal/koper
Vast afval (produktie)	Niet gespecificeerd	92	92	Staal/koper
Vast afval (stort)[2]	Staal[5]	58	53	Fundering/mast
	Turbinebladen	30	37	Bladen
	Polyester (glasvezelversterkt)	5	5	Gondel
Vermesting[1]	NO_x	87	86	zie verzuring
	Kjeldahl-N[6]	13	14	Staal
Oxidantia	Koolwaterstoffen[4]	63	64	Staal/koper/polyesterhars
	Aceton	15	15	Epoxy/PUR coating
	Styreen	10	9	Polyesterhars
	Methaan	5	5	Kolenwinning
	VOS (algemeen)	5	5	Polyesterhars
Humane toxiciteit (CML)	SO_2/SO_x	57	57	zie verzuring
	NO_x	30	29	zie verzuring
Humane toxiciteit (lucht)[3,a]	SO_2/SO_x	30	30	zie verzuring
	NO_x	30	29	zie verzuring
	CO[4]	28	29	Staal
Humane toxiciteit (water)[3,b]	IJzer	38	38	Staal
	PAK	19	19	Staal
	Kjeldahl-N	12	12	Staal
	Olie	5	5	Staal/polyesterhars/koper
	E-glas polymeercoating	<5	5	E-glasvezel
Humane toxiciteit (bodem)[1]	Toxische chemicaliën	66	68	(Poly)vinyl chloride
	Zinkrijke reststof	34	32	Staal
Ecotoxiciteit (water)	Kwik	50	49	Staal
	Cadmium	20	20	Staal
	Zink	6	6	Staal
	Lood	5	5	Staal
	Koper	5	5	Staal
	Olie	5	5	zie humane tox. (water)
Ecotoxiciteit (bodem)[1]	Zinkrijke reststof	100	100	Staal

[1] Bijdragen van andere dan genoemde verbinding(en) zijn verwaarloosbaar.
[2] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.
[3] Extra berekeningsvarianten gebaseerd op (a) MAC-waarden en (b) standaardwaarden van het Waterleidingbesluit.
[4] Emissiefactor wordt voornamelijk veroorzaakt door verbranding van energiedrager.
[5] Recyclingspercentage van staal is gesteld op 95%.
[6] Waterverontreiniging.

4.2.2 Opschaling van onshore en offshore windturbines

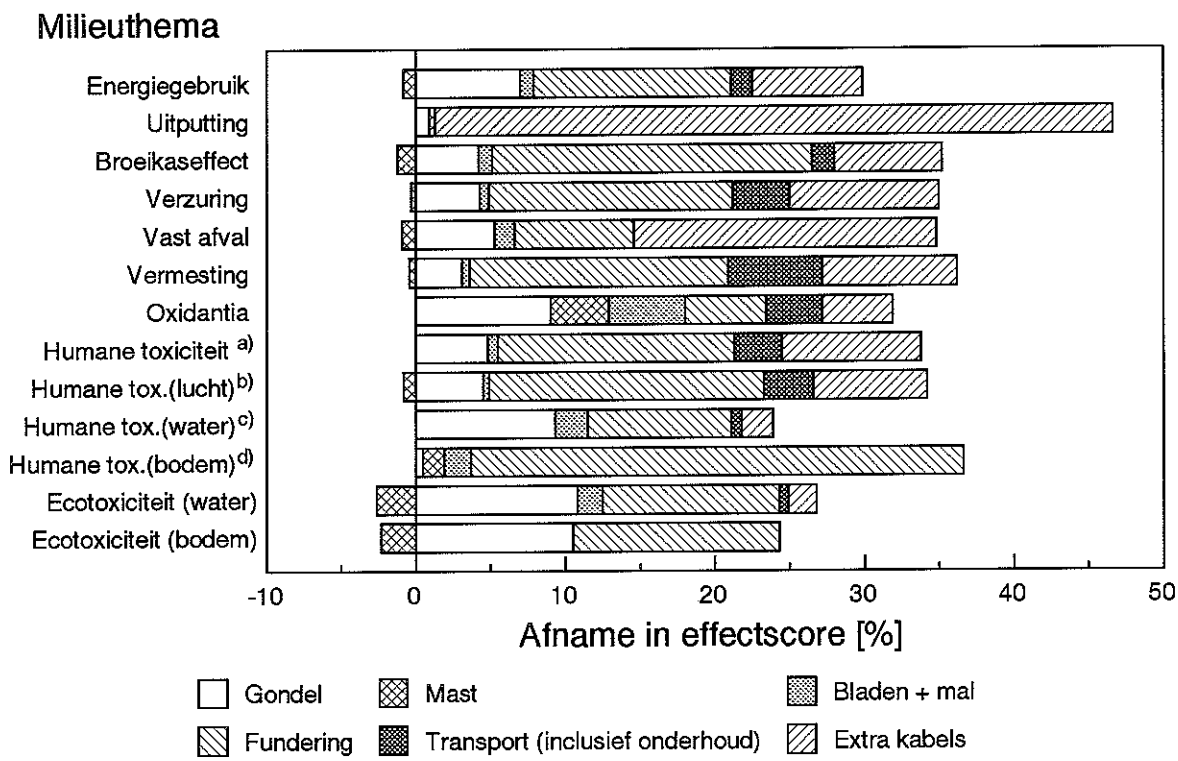
Uit de analyse naar opschalingseffecten van een 300 kW naar een 500 kW turbine blijkt dat opschaling van zowel onshore als offshore turbines leidt tot een daling van alle milieu-effecten. Dit resulteert uit het feit dat de toename van materialengebruik lager uitvalt dan de toename in elektriciteitsproduktie. In de figuren 4.3, 4.4 en 4.5 wordt de afname in effectscore per milieuthema voor respectievelijk onshore turbines, offshore turbines met betonnen fundering en offshore turbines met een stalen eenpaalsfundament geïllustreerd. In deze figuren worden de relatieve effectscores opgesplitst naar windturbineonderdelen (bladen, gondel, mast en fundering), transport en eventuele benodigde extra kabels. De waargenomen effecten kunnen herleid worden uit de tabellen 4.1, 4.2 en 4.3 (paragraaf 4.2.1).

Uit figuur 4.4 blijkt dat de opschaling van het vermogen bij onshore turbines leidt tot een daling van alle milieu-effecten variërend van ongeveer 20 tot 40%. Verder laat deze figuur zien dat de verlaging van de milieubelasting voor de opschaling van onshore windturbines in het produktiestadium voornamelijk bepaald wordt door de gondel en fundering. Bij de milieu-effecten uitputting, vast afval, fotochemische oxydantvorming, aquatische humane toxiciteit en zowel aquatische als terrestrische ecotoxiciteit speelt de fundering echter nauwelijks dan wel geen rol. Voorts levert de gondel een geringe bijdrage aan het milieu-effect terrestrische humane toxiciteit.

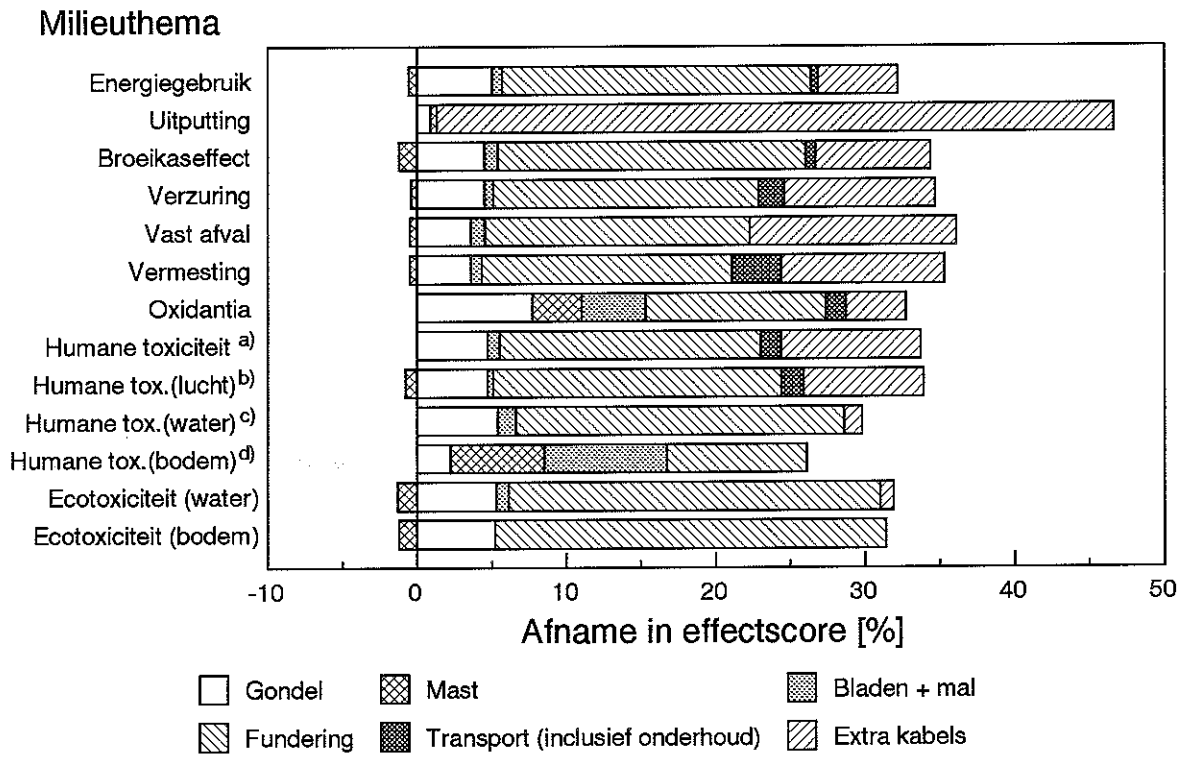


Figuur 4.4 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW ten opzichte van een 300 kW windturbine*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

Voor opschaling van offshore turbines met een betonnen dan wel stalen eenpaalsfundament bedraagt de reductie van de milieubelasting respectievelijk ongeveer 20-50%. In het geval van offshore plaatsing komt deze afname in effectscores hoofdzakelijk tot stand door de fundering en de benodigde hoeveelheid kabels. Naast de bijdragen van de fundering en kabels, voorziet ook de gondel in een redelijke afname in effectscore van alle milieuthema's met uitzondering van uitputting (alleen geringe bijdrage van kabels aanwezig in gondel) en terrestrische humane toxiciteit. In tegenstelling tot de bovengenoemde afnemingen in de effectscores vindt er bij deze buitengaatse turbines in de produktieketen van de mast een geringe toename in effectscore van de milieuthema's met uitzondering van uitputting, fotochemische oxydantvorming en humane toxiciteit voor zowel water [32] als bodem [8] plaats.



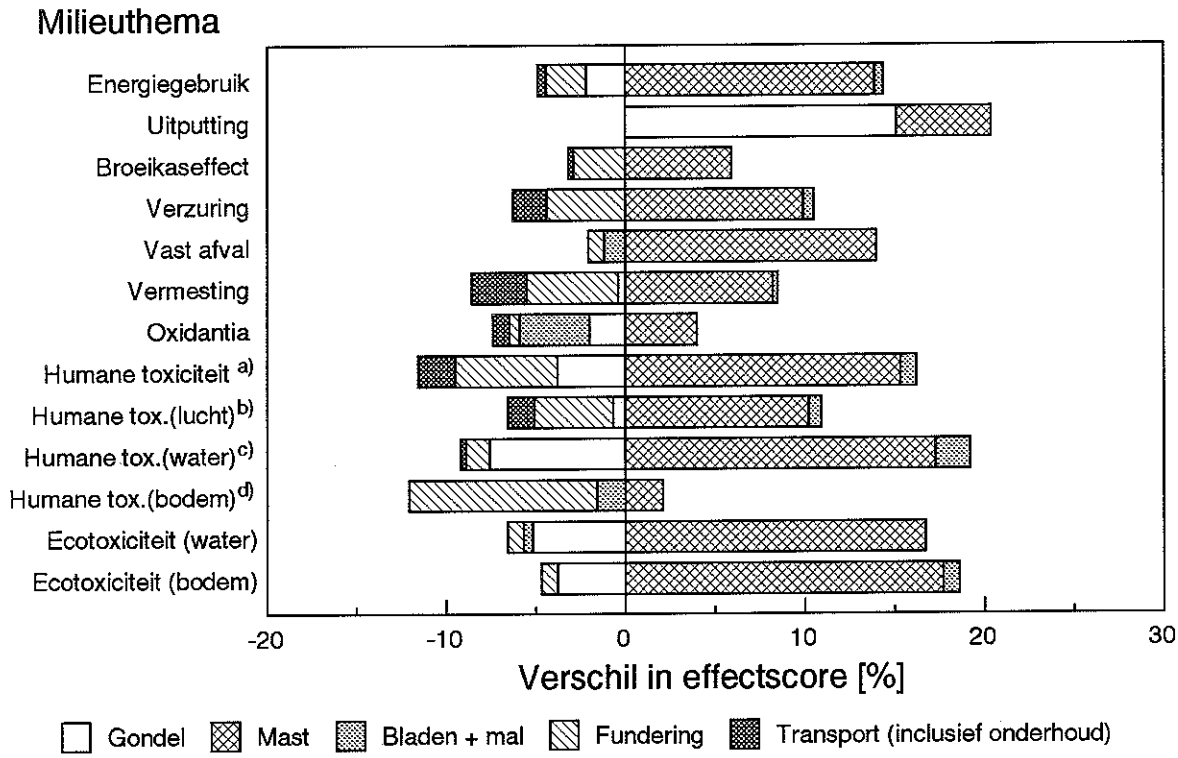
Figuur 4.4 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW ten opzichte van een 300 kW offshore windturbine met een betonnen fundering*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]



Figuur 4.5 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW ten opzichte van een 300 kW offshore windturbine met een stalen eenpaalsfundament*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

Geringere verschillen in jaarlijkse elektriciteitsproduktie tussen de twee typen windturbines - afhankelijk van windklimaat en ontwerp - dan in deze studie verondersteld resulteren echter in een kleinere afname in effectscore of zelfs in een lichte toename daarin, gaande van een 300 kW naar een 500 kW turbine. Ter illustratie wordt het verschil in milieuprofiel bij onshore turbines met 2000 vollasturen per jaar in figuuur 4.6 weergegeven. De jaarlijkse elektriciteitsproduktie is dan voor een 300 kW en een 500 kW onshore turbine respectievelijk 600 MWh en 1000 MWh in plaats van 320 MWh en 850 MWh (zie paragraaf 3.1).

Uit figuur 4.6 blijkt dat het verschil in milieuprofiel bij onshore turbines met 2000 vollasturen een stijging van de milieu-effecten met uitzondering van de milieu-thema's fotochemische oxydantvorming en terrestrische humane toxiciteit tot circa 20% laat zien. Aan deze omslag levert de mast een grote bijdrage, voor het milieuthema uitputting levert de gondel de grootste bijdrage. De toename in effectscore wordt echter grotendeels gecompenseerd door de afname in effectscore van fundering, gondel en transport. De effectscores en milieu-ingrepen zijn niet opgenomen in de bijlagen A en B, maar kunnen wel aangepast worden door vermenigvuldiging met een correctiefactor. Deze correctiefactor bedraagt voor de 300 kW en 500 kW turbine met 2000 vollasturen respectievelijk 320/600 en 850/1000.



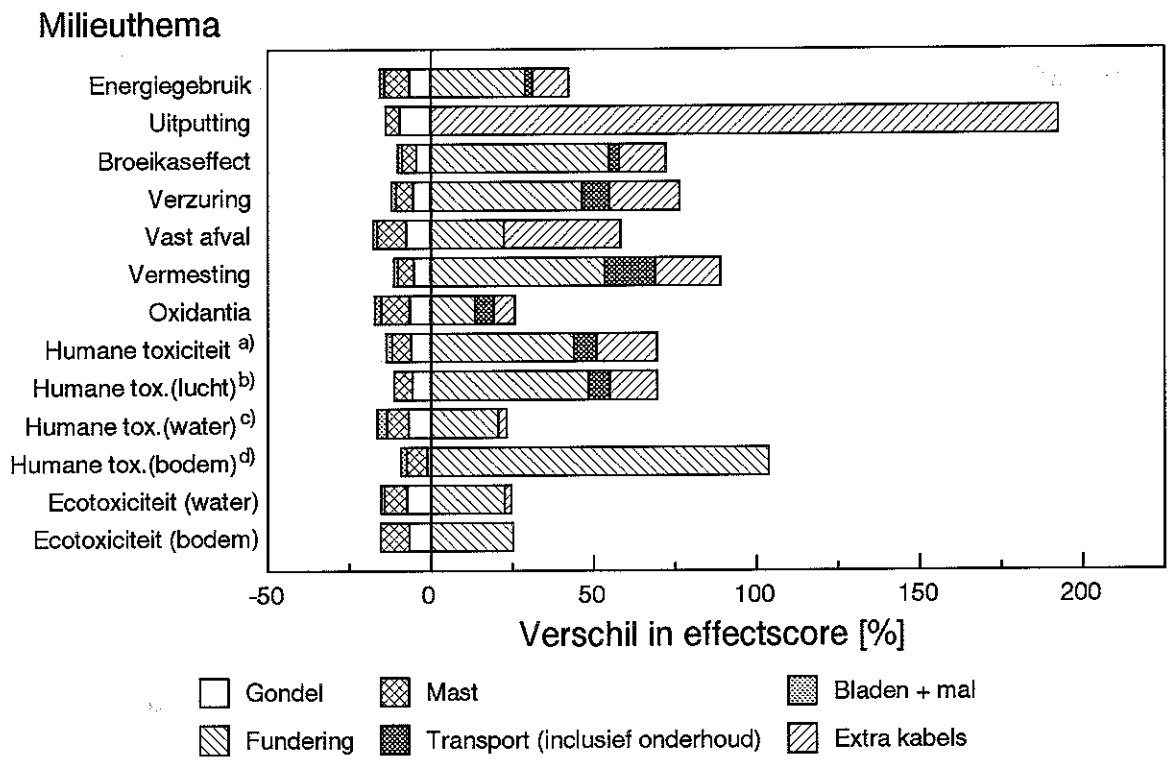
Figuur 4.6 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW ten opzichte van een 300 kW onshore windturbine met 2000 vollasturen*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

4.2.3 Offshore versus onshore plaatsing

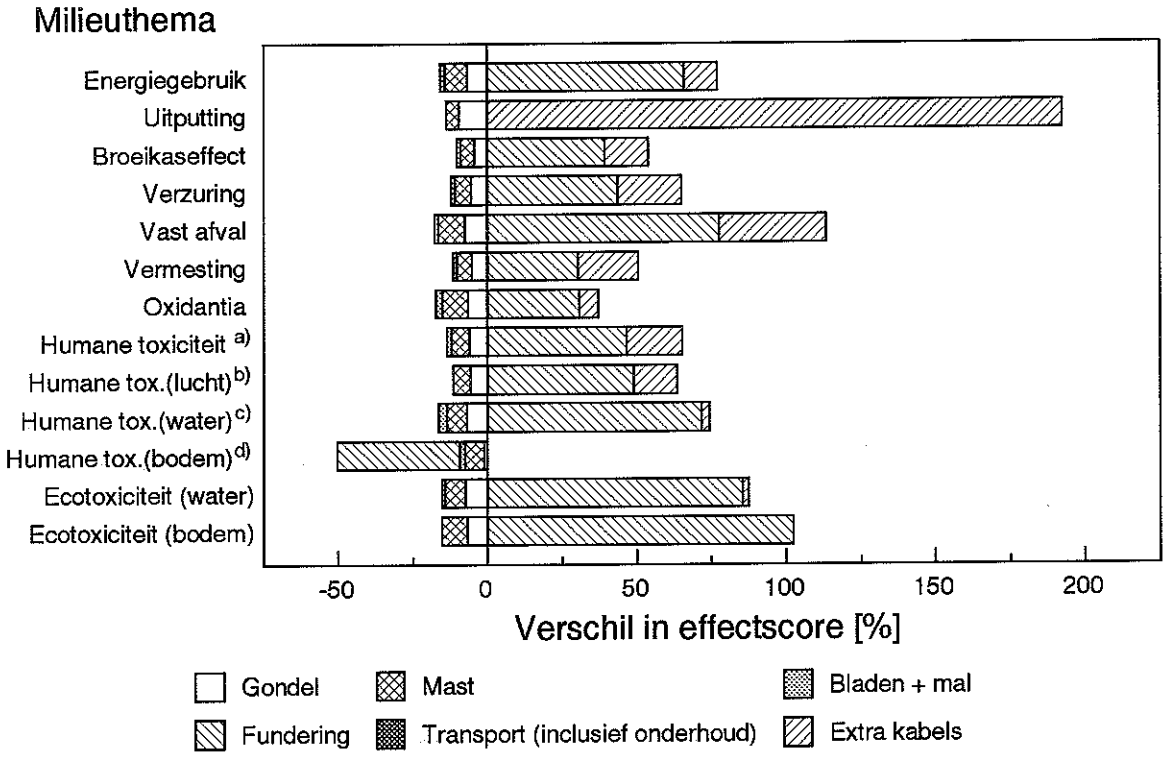
Voor de vergelijking van offshore versus onshore plaatsing wordt alleen een 500 kW windturbine gepresenteerd. Dit, omdat analyses van zowel een 300 kW als een 500 kW offshore versus onshore turbine hebben aangetoond dat het patroon van de relatieve effectscores in beide situaties vrijwel identiek zijn. Bovendien belast een 500 kW windturbine per eenheid opgewekte elektriciteit het milieu in mindere mate dan een 300 kW windturbine. De relatieve effectscores van een 500 kW onshore versus offshore windturbine worden gepresenteerd in figuren 4.7 en 4.8. In deze figuren 4.7 en 4.8 worden de effectscores die kleiner zijn dan 1% verwaarloosd.

De vergelijking van offshore ten opzichte van onshore turbines illustreert dat 'overall' de effectscores voor elk milieuthema toeneemt. Een uitzondering vormt echter het milieuthema terrestrische humane toxiciteit in het geval van een offshore turbine met een stalen eenpaalsfundament: de effectscore neemt circa 50% af door het gebruik van staal als fundering in plaats van beton. De netto toename in milieubelasting voor een offshore turbine met een betonnen fundering dan wel een stalen eenpaalsfundament varieert van ongeveer 5 tot 180%. Bij deze netto toename in effectscores spelen met name de fundering en de hoeveelheid extra kabels een belangrijke rol. Daarentegen nemen de effectscores van de gondel, mast en bladen af.

Ondanks de toename van alle milieu-effecten per functionele eenheid door offshore plaatsing staan er een aantal belangrijke voordelen tegenover. Er is namelijk geen sprake meer van geluidsoverlast en aantasting van het landschap zal als gering worden ervaren. Daarnaast is de wind gelijkmatiger en krachtiger waardoor meer elektriciteit kan worden opgewekt. Het is mogelijk dat de elektriciteitsproduktie van buitengaatse turbines hoger is dan in deze studie wordt verondersteld resulterend in een geringere toename van alle milieu-effecten per functionele eenheid. Daarnaast kan de hoeveelheid benodigde extra kabels verminderd worden door een groot turbinepark op te stellen.



Figuur 4.7 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW offshore turbine met een betonnen fundering ten opzichte van een 500 kW onshore windturbine*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]



Figuur 4.8 *Verschil in milieuprofiel van een 500 kW offshore turbine met een stalen eenpaalsfundament ten opzichte van een 500 kW onshore windturbine*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

4.3 Evaluatie

Momenteel ontbreekt een milieu-index om de thema's te aggregeren naar één milieumaat [1]. De effectieve verlaging van de milieubelasting voor opschaling en offshore plaatsing kan dus niet worden berekend. Wel kunnen voorlopig op grond van het Nederlandse energie- en grondstoffengebruik en de Nederlandse emissiefactoren de effectscores van de vijf belangrijktse milieuthema's (energiegebruik, uitputting, broeikaseffect, verzuring en vast afval) worden genormaliseerd volgens het protocol van de vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving [10]. Dit protocol geeft aan dat effectscores kunnen worden genormaliseerd door per thema het quotiënt van de effectscore (systeem) en effectscore (referentie) te vermenigvuldigen met een willekeurige factor, zodat de uitkomsten in de buurt van 1 liggen. Op deze manier wordt de vergelijkbaarheid van de verschillende milieuthema's vergroot en kan een indicatie van de prioriteit van deze milieueffecten worden verkregen. In deze studie worden de Nederlandse effectscores en de factor ((Nederlands elektriciteitsverbruik/elektriciteitsproduktie) x 100) als uitgangspunten genomen. De genormaliseerde effectscores worden berekend met behulp van vergelijking 4.1.

$$\text{Effectscore}_{(\text{genormaliseerd})} = \text{effectscore}_{(\text{turbine})}/\text{effectscore}_{(\text{Nederland})} \times \text{Nederlands elektriciteitsverbruik/elektriciteitsproduktie}_{(\text{turbine})} \times 100 \qquad (4.1)$$

waarbij het Nederlandse elektriciteitsverbruik in 1992 79.930 GWh [33] bedraagt. De elektriciteitsproduktie van de turbine is gelijk gesteld aan de functionele eenheid, 1 GWh.

In deze paragraaf worden alleen de uitkomsten van de normalisatie van de verschillende 500 kW windturbines gepresenteerd, aangezien het patroon van de relatieve effectscores voor een 300 kW en een 500 kW windturbine vrijwel identiek zijn. Daarnaast is een 500 kW turbine per functionele eenheid minder milieu belastend. In tabel 4.4 worden de effectscores van de belangrijkste milieuthema's voor de verschillende 500 kW turbines per functionele eenheid (GWh) en de Nederlandse situatie[9] per jaar [34-37] weergegeven. Hieruit blijkt tevens dat de omvang van afgedankte rotorbladen beperkt is ten opzichte van de totale hoeveelheid vast afval in Nederland. De bijdrage van rotorbladen van één 300 kW of 500 kW windturbine aan het afval in Nederland is - rekening houdend met een levensduur van 20 jaar - namelijk respectievelijk $1 \cdot 10^{-6}$% en $2 \cdot 10^{-6}$%[10]. Per 1200 MW aan geïnstalleerd vermogen is dit voor de 300 kW en 500 kW windturbines respectievelijk $0{,}4.10^{-3}$ en $0{,}5.10^{-3}$%. De genormaliseerde waarden van de 500 kW windturbines zijn opgenomen in tabel 4.5. Voor de genormaliseerde waarden van de verschillende 300 kW windturbines wordt verwezen naar bijlage D.

Tabel 4.4 *Effectscores van zowel onshore als offshore 500 kW windturbines per functionele eenheid [GWh] en de Nederlandse situatie per jaar*

Milieuthema	Eenheid	Onshore	Offshore met betonnen fundering	Offshore met stalen fundering	Nederland
Energiegebruik	GJ	130	170	220	$2.750 \cdot 10^6$
Uitputting[1]	10^3	20	57	57	$110 \cdot 10^6$
Broeikaseffect[2]	kg	6.800	11.000	9.800	$206 \cdot 10^9$
Verzuring[3]	kg	37	60	56	$988 \cdot 10^6$
Vast afval	kg				$1.090 \cdot 10^6$
- produktie	kg	260	370	510	
- inclusief stort[4]	kg	13.000	37.000	1.200	

[1] Dimensieloos als gevolg van de weegfactor (1/voorraad (kg)).
[2] In CO_2-equivalenten (Global Warming Potential 100) [8].
[3] In SO_2-equivalenten (Acidification Potential) [8].
[4] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.

Uit tabel 4.5 blijkt dat voor turbines met een betonnen fundering (zowel onshore als offshore) het milieuthema vast afval (inclusief stort) de hoogste prioriteit heeft, gevolgd door het milieuthema uitputting. Voor de offshore turbine met een stalen eenpaalsfundament heeft het milieuthema uitputting de hoogste prioriteit, terwijl vast afval (inclusief stort) minder relevant is wegens recycling van staal. De milieu-effecten vast afval en uitputting worden veroorzaakt door respectievelijk de betonnen fundering en koperen kabels. Deze normering geeft voor een windturbine in het algemeen een redelijk overzicht wat aan het verwachtingspatroon voldoet. Dit, omdat

[9] De Nederlandse effectscore is gebaseerd op de basisjaren 1990 en 1991 [34-37].
[10] Het gewicht van drie 300 kW en twee 500 kW rotorbladen bedraagt respectievelijk 2250 kg en 4700 kg. De jaarlijkse totale hoeveelheid vast afval is $1{,}09.10^{10}$ kg (zie tabel 4.4).

broeikaseffect en verzuring met name worden veroorzaakt door de verbranding van energiedragers. Daar de elektriciteit uit een duurzame bron wordt opgewekt, is er geen sprake van gebruik en verbranding van energiedragers tijdens de exploitatie resulterend in een lage prioriteit voor de milieueffecten energiegebruik, broeikaseffect en verzuring.

Tabel 4.5 *Genormaliseerde waarden van zowel onshore als offshore 500 kW windturbines*

Milieuthema	Onshore	Offshore met betonnen fundering	Offshore met stalen fundering
Energiegebruik	0,39	0,49	0,63
Uitputting	1,5	4,1	4,1
Broeikaseffect	0,27	0,43	0,38
Verzuring	0,30	0,49	0,45
Vast afval			
- produktie	0,19	0,27	0,38
- inclusief stort[1]	9,4	27	0,85

[1] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.

4.4 Tekortkomingen van de uitkomsten

Tekortkomingen zijn geconstateerd op het gebied van het software-pakket, de inventarisatie en de normering in zowel de classificatie- als de evaluatiefase [1]. In deze studie zijn met name de knelpunten in het software-pakket en de inventarisatiefase van belang.

Software-pakket SimaPro 2.1

De voornaamste beperking van het software-pakket SimaPro 2.1 is gelegen in de incomplete opties voor afvalverwerking (stort, verbranding, recycling, hergebruik). Zo kan bij uitvoering van een levenscyclusanalyse een percentage voor deze afvalverwerkingsopties ingevoerd worden, maar dit percentage wordt dan wel toegepast op *alle* benodigde materialen die opgenomen zijn in de betreffende 'assemblies' [11]. De nieuwe versie SimaPro 3.0 beschikt echter over een verbeterde aanpak van de afvalverwerkingsopties [38]. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse slecht uitvoerbaar, omdat dit software-pakket geen mogelijkheden biedt om op een eenvoudige manier een aantal scenario's met verschillende processamenstellingen te vergelijken. De oorzaak hiervan is een door de vele aftakkingen onoverzichtelijke procesboom, zodat elk proces op een eventuele aanpassing gecontroleerd moet worden.

Inventarisatie

Het databestand is de meest cruciale tekortkoming in deze studie. Voor veel processen zijn namelijk geen dan wel verouderde (kwalitatieve) gegevens beschikbaar. Huidige (en toekomstige) milieumaatregelen bij deze processen worden dan ook niet altijd meegenomen. Ook zijn soms alleen de energiekentallen bekend en worden de overige emissiefactoren buiten beschouwing gelaten (bijvoorbeeld de produktie van koper). Daarnaast is het moeilijk om exacte gegevens over bijvoorbeeld windturbineonderdelen

te achterhalen vanwege geheimhoudingsverplichting. Voorts kunnen de uitkomsten beïnvloed worden door veronderstellingen/afbakeningen zoals vervoersafstanden, keuze van (een gewogen mix) produktieprocessen en benodigde materialen. Ten slotte vormt de allocatie van emissiefactoren bij meervoudige processen een probleem (bijvoorbeeld de produktie van staal).

Uit de analyse blijkt dat staal een belangrijke rol speelt bij windturbines. Derhalve volgen in het onderstaande een aantal kanttekeningen die betrekking hebben op het produktieproces van staal, deels in de vorm van een gevoeligheidsanalyse. Dit produktieproces met bijbehorende gevoeligheidsanalyse heeft tevens een voorbeeldfunctie voor een aantal van bovengenoemde hiaten in de inventarisatiefase.

Ten eerste wordt in deze studie uitgegaan van één soort staal, terwijl er meerdere soorten staal bestaan. Voorts wordt in de analyse verondersteld dat het staal afkomstig is van Hoogovens, terwijl ook importstaal tot de mogelijkheden behoort. Daarnaast kan het staal geproduceerd zijn met behulp van het 'elektrolytische staal produktieproces' [39]. Dit is een relatief schoon proces, waarbij gebruik wordt gemaakt van gerecycled staal als grondstof. Het produkt is overigens wel laagwaardiger dan het oxystaal (Hoogovens). Het marktaandeel van oxystaal bedraagt echter 95%, terwijl dit voor elektrostaal slechts 5% is.

In een gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van elektrostaal geproduceerd door Nedstaal [40]. De milieu-ingrepen, waarbij de bijdrage aan de totale effectscore niet kleiner zijn dan 5%, worden voor de 300 kW en 500 kW turbine in tabel 4.6 weergegeven. Ter vergelijking van het gebruik van elektrostaal met oxystaal worden de genormaliseerde effectscores van de belangrijkste milieuthema's (energiegebruik, uitputting, broeikaseffect, verzuring en vast afval) in tabel 4.7 weergegeven. De genormaliseerde effectscores voor 500 kW onshore turbines waarin elektrostaal wordt toegepast, wijzen uit dat de prioteiten (vast afval en uitputting: zie paragraaf 4.3) gelijk zijn aan de 500 kW onshore turbines waarbij gebruik gemaakt wordt van oxystaal. Deze genormaliseerde waarden zijn op dezelfde manier berekend als beschreven in paragraaf 4.3. Voor de effectscores per functionele eenheid van de 300 kW en 500 kW onshore turbines waarin elektrostaal wordt toegepast, wordt verwezen naar bijlage D. De effectscores en genormaliseerde waarden van de 500 kW onshore turbine waarbij gebruik gemaakt wordt van oxystaal, worden in respectievelijk tabel 4.4 en 4.5 van paragraaf 4.3 weergegeven. Het verschil in effectscores van 500 kW onshore turbines waarbij het gebruik van elektrostaal met oxystaal wordt vergeleken, wordt geïllustreerd in figuur 4.9. Effecten die kleiner zijn dan 1,5% zijn niet waarneembaar in deze figuur. Logischerwijs worden alle verschillen in effectscores hoofdzakelijk door de gondel en mast veroorzaakt, aangezien deze onderdelen grotendeels uit staal bestaan. Uit deze figuur blijken de effectscores van de milieu-effecten aquatische humane toxiciteit en ecotoxiciteit aanzienlijk toe te nemen. Daarentegen wordt een relatief hoge afname van de milieu-effecten terrestrische ecotoxiceit en vast afval geconstateerd. Het verschil in effectscore van het milieuthema uitputting is nihil vanwege het feit dat dit milieu-effect vrijwel volledig kan worden toegeschreven aan de produktie van koper.

Ten slotte is er bij de produktie van oxystaal sprake van allocatieproblemen. Momenteel is de allocatie van emissiefactoren op een aantal punten dan ook niet correct:

a. Hoeveelheid stikstof afkomstig van de luchtscheidingsfabriek wordt afgenomen door de Gasunie.
b. Een gedeelte van het geproduceerde cokesoven- en en hoogovengas wordt afgenomen door de elektriciteitscentrale te Velsen (het oxygas wordt gebruikt om het hoogovengas te verrijken).
c. Afzet van reststromen met een energie-inhoud (bijvoorbeeld teer).
d. Afzet van herbruikbaar vast afval (bijvoorbeeld slak).

In het navolgende wordt beschreven op welke manier getracht is om de niet-gealloceerde emissiefactoren te compenseren.

Ad a, b en c

Door de onderstaande, deels fictieve situatie te veronderstellen, kon voorbijgegaan worden aan het alloceren van de luchtzijdige procesemissies die toegepast moeten worden wegens punten a, b en c. Om dit te bereiken werd voor de energiekentallen van Hoogovens aangenomen dat het netto energiegebruik van primaire en secundaire brandstoffen overeenkomt met de energieproduktie (5,9 GJ/ton staal) bij Hoogovens. Een dergelijke procesintegratie kan verondersteld worden doordat op het terrein van Hoogovens stoom en heet water (sinterfabriek/hoogovens), hoogovengas en elektriciteit (hoogovens), cokesovengas (cokesfabriek) en oxygas (oxystaalfabriek) geproduceerd wordt. Daarbij komt nog dat in 1991 een aardgasgestookte STEG-eenheid in bedrijf is genomen en er een verbetering qua procesintegratie heeft plaatsgevonden [41]. In deze optimale procesintegratie wordt echter de energie-inhoud van kolen achterwege gelaten, omdat het aandeel van deze primaire brandstof te groot is om deze te verrekenen met de energieproduktie op het terrein (hoogovens, cokesfabriek). Tevens wordt de energie-inhoud van aardgas in een aantal gevallen ook niet meegenomen, te weten het in de hoogovens gebruikte gasmengsel aardgas, koolmonoxide en kool wat verondersteld wordt voor 20% uit aardgas te bestaan, de aardgasgestookte continue gietmachines en de aardgasgestookte warmbandwalserij. Met de produktieketen[11] van deze energiedragers (kolen en gas) wordt echter wel rekening gehouden, aangezien deze energiedragers niet meegenomen worden in bovenstaande fictieve procesintegratie.

Deze onvolledige allocatie voor energiedragers beïnvloedt de milieu-effecten broeikaseffect, verzuring, vermesting, fotochemische oxydantvorming en humane toxiciteit (lucht). Zo is de geringe toename van het broeikaseffect in de gevoeligheidsanalyse te verklaren. Deze toename is met name toe te rekenen aan de elektriciteitsopwekking voor het elektrostaal proces. In [39] komen de CO_2-kentallen van het oxy- en elektrostaal produktieproces echter neer op respectievelijk 1704 kg en 373 kg per ton geproduceerd staal. Dit verschil valt af te leiden uit de correctie die in deze analyse is uitgevoerd op het energiegebruik wegens allocatieproblemen.

[11] Verbrandingsemissies zijn reeds verdisconteerd in de emissiefactoren van het gehele proces.

Ad d

Daar staal in dit proces de economische hoofdstroom is, worden afgezette en/of hergebruikte vaste reststromen niet meegenomen bij de milieuthema's vast afval, terrestrische humane toxiciteit en terrestrische ecotoxiciteit en worden aan deze produkten ook geen emissiefactoren toegekend. De vaste afvalstroom van Hoogovens bestaat hierdoor alleen uit zinkrijke reststof (opslag) en secundair afzuigstof (stort/opslag).

Normering (classificatie/evaluatie)

Ondanks het feit dat aggregatie van de milieu-effecten naar één milieumaat nog steeds een probleem is, geven de genormaliseerde effectscores van de belangrijkste milieuthema's (zie paragraaf 4.3) een redelijk overzicht wat aan het verwachtingspatroon voldoet. In ieder geval wordt in deze studie een indruk van de relatieve bijdrage per levensfase aan de totale milieubelasting van een windturbine verkregen, ook al staan er classificatiefactoren binnen een aantal milieuthema's (nog) ter discussie [1].

Tabel 4.6 *Voornaamste bijdragen aan de totale effectscore van milieuthema's voor onshore windturbines van 300 en 500 kW waarin elektrostaal is toegepast*

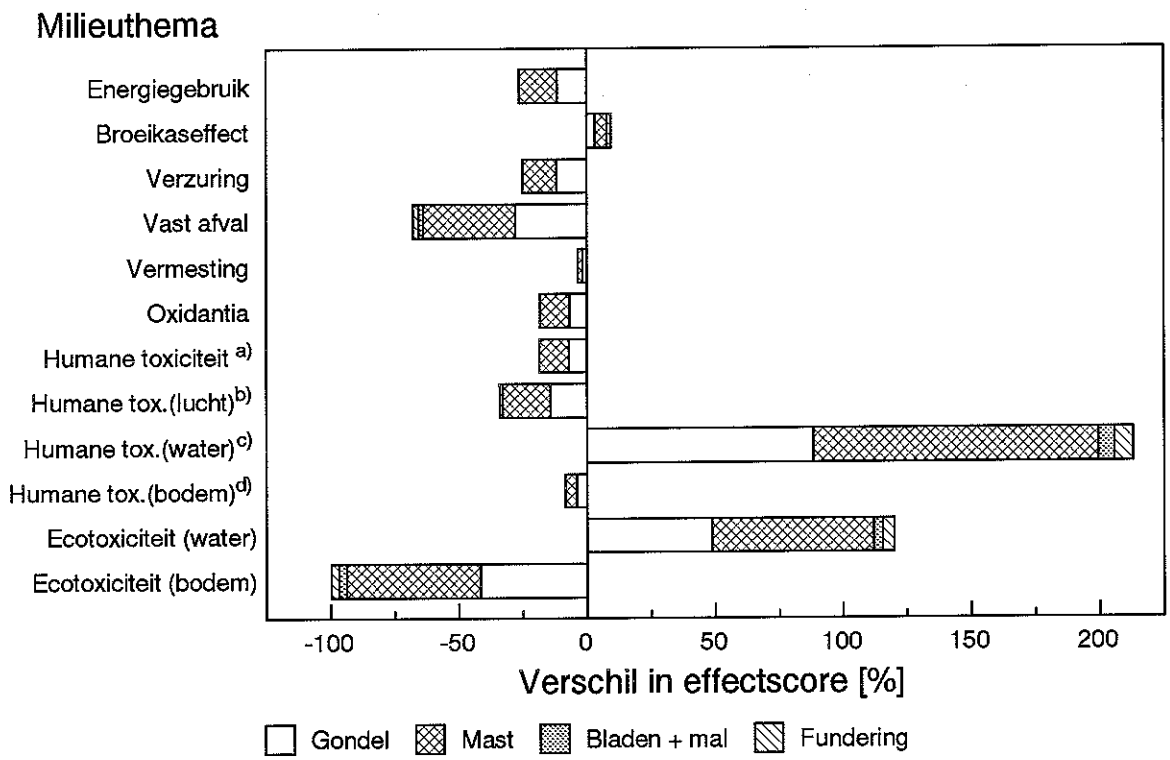
Milieuthema	Milieu-ingreep	Bijdrage aan effectscore [%] 300 kW	500 kW	Voornaamste proces of turbineonderdeel
Energiegebruik	Aardgas	50	52	Staal/polyesterhars
	Steenkool	27	26	Staal/cement/polyester hars/koper
	Aardolie	15	13	Polyesterhars/koper/-staal/rubber
	Uraniumerts	7	7	Staal/koper/cement
Uitputting[1]	Kopererts	100	100	Kabels
Broeikaseffect	CO_2[5]	95	95	Staal/cement/koper
Verzuring[1]	NO_x[5]	59	58	Staal/cement/koper
	SO_2/SO_x[5]	41	42	Staal/cement/koper
Vast afval (produktie)	Niet gespecificeerd	70	75	Koper/staal
	Polyesterhars	8	5	Turbineblad
	Mineraal afval	5	5	Gaswinning/chloor/ benzeen
	Metaalslib	5	5	Staal
Vast afval (stort)[2]	Gewapend beton	97	96	Fundering
Vermesting	NO_x	99	99	zie verzuring
Oxidantia[3]	Koolwaterstoffen[5]	40	43	Staal/polyesterhars
	Aceton	28	27	Epoxy/PUR coating
	Styreen	18	16	Polyesterhars
	VOS (algemeen)	8	8	Polyesterhars
Humane toxiciteit (CML)	NO_x	45	43	zie verzuring
	SO_2/SO_x	34	34	zie verzuring
	Mangaan[6]	8	9	Staal
Humane toxiciteit (lucht)[4,a]	NO_x	54	54	zie verzuring
	SO_2/SO_x	21	22	zie verzuring
	Stof	10	9	Cement/staal
	CO_2[5]	7	8	zie broeikaseffect
Humane toxiciteit (water)[4,b]	IJzer	70	70	Staal
	Olie	11	11	Staal/polyesterhars
Humane toxiciteit (bodem)	Afgewerkte olie	60	54	Cement
	Toxische chemicaliën	39	44	(Poly)vinyl chloride
Ecotoxiciteit (water)	Koper	43	44	Staal
	Chroom	22	22	Staal
	Olie	16	16	zie humane tox. (water)
	Zink	6	6	Staal
	fenol	5	5	Elektriciteitsopwekking
Ecotoxiciteit (bodem)	Toxische chemicaliën	61	61	(Poly)vinyl chloride
	Kwik	23	26	Staal
	Chemisch afval	16	13	Cement

[1] Bijdragen van andere dan genoemde verbinding(en) zijn verwaarloosbaar.
[2] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.
[3] De hoeveelheden VOS en NO_x per functionele eenheid zijn voor een 300 kW turbine respectievelijk 45 kg en 34 kg, en voor een 500 kW turbine respectievelijk 28 kg en 22 kg.
[4] Extra berekeningsvarianten gebaseerd op (a) MAC-waarden en (b) standaardwaarden van het Waterleidingbesluit.
[5] Emissiefactor wordt voornamelijk veroorzaakt door verbranding van energiedragers.
[6] Luchtverontreiniging.

Tabel 4.7 *Genormaliseerde waarden van onshore 500 kW windturbines waarin oxystaal dan wel elektrostaal wordt toegepast*

Milieuthema	Onshore turbine (oxystaal)	Onshore turbine (elektrostaal)
Energiegebruik	0,39	0,29
Uitputting	1,5	1,5
Broeikaseffect	0,27	0,29
Verzuring	0,30	0,22
Vast afval		
- produktie	0,19	0,062
- inclusief stort[1)]	9,4	9,2

[1] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.



Figuur 4.9 *Opsplitsing van de relatieve effectscores van het milieuprofiel van 500 kW onshore windturbines waarbij het gebruik van elektrostaal met oxystaal wordt vergeleken, naar gondel, mast, bladen en fundering*
[a] [8], [b] [31], [c] [32], [d] [8]

5. CONCLUSIES

Rekening houdend met de tekortkomingen op het gebied van het softwarepakket, de inventarisatie en de normering in zowel de classificatie- als de evaluatiefase kunnen met betrekking tot deze LCA-studie de volgende conclusies worden getrokken. De resultaten geven voornamelijk een indruk van de relatieve bijdrage aan de totale milieubelasting van een windturbine.

- Het onderzoek wijst uit dat opschaling van een 300 kW naar een 500 kW onshore dan wel offshore windturbine leidt tot een netto daling van alle milieu-effecten[12]. Deze afname van de effectscores varieert van 20 tot 50% en is met name toe te rekenen aan de gondel, fundering en benodigde kabels. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij de opschaling de toename van materialengebruik lager is dan de toename in elektriciteitsproduktie. Als de verschillen in jaarlijkse elektriciteitsproduktie kleiner zijn dan aangenomen, resulteert dit echter in een kleinere afname in effectscore of zelfs in een lichte toename daarin.

- Bij buitengaatse plaatsing nemen 'overall' de effectscores per functionele eenheid van de hier beschouwde milieuthema's aanzienlijk toe ten opzichte van onshore plaatsing. Een uitzondering vormt echter het milieuthema terrestrische humane toxiciteit in het geval van een offshore turbine met een stalen eenpaalsfundament: de effectscore neemt circa 50% af door het gebruik van staal als fundering in plaats van beton. De netto toename in milieubelasting voor een offshore turbine met een betonnen fundering dan wel een stalen eenpaalsfundament varieert van ongeveer 5 tot 180%. Hierbij spelen met name de fundering en de benodigde hoeveelheid kabels een rol. Deze toename zou enigszins beperkt kunnen worden bij een hogere elektriciteitsproduktie van buitengaatse turbines dan in deze studie is verondersteld. Een belangrijk voordeel van buitengaatse plaatsing is dat er een groter maatschappelijk draagvlak zal zijn, aangezien de geluidsoverlast en de aantasting van het landschap minimaal zullen zijn.

- De normalisatie van de effectscores, op grond van het Nederlandse energie- en grondstoffengebruik en de Nederlandse emissiefactoren, wijst uit dat de milieuthema's vast afval (inclusief stort[12]) voor de turbines met een betonnen fundering en uitputting als prioriteit moeten worden beschouwd. Er is per slot van rekening geen sprake van gebruik en verbranding van energiedragers tijdens de exploitatie resulterend in een lage prioriteit voor de milieu-effecten energiegebruik, broeikaseffect en verzuring. De milieu-effecten vast afval en uitputting worden veroorzaakt door respectievelijk de betonnen fundering en koperen kabels.

---

[12] Energiegebruik, broeikaseffect, verzuring, vast afval, vermesting, oxidantia, humane toxiciteit, berekeningsvarianten humane toxiciteit voor lucht en water, aquatische en terrestrische ecotoxiciteit (water/bodem). De twee extra berekeningsvarianten voor humane toxiciteit zijn toegevoegd om een beter inzicht in dit milieuthema te verkrijgen. Deze berekeningsvarianten zijn gebaseerd op MAC-waarden [31] voor lucht en standaardwaarden van het Waterleidingbesluit [32] voor water.

- De hoeveelheid afgedankte rotorbladen is beperkt ten opzichte van de totale hoeveelheid vast afval in Nederland. De bijdrage van afgedankte rotorbladen van één 300 kW of 500 kW windturbine aan het afval in Nederland is namelijk respectievelijk $1 \cdot 10^{-6}$% en $2 \cdot 10^{-6}$%. Per 1200 MW aan geïnstalleerd vermogen is dit voor de 300 kW en 500 kW turbines respectievelijk $0{,}4.10^{-3}$ en $0{,}5.10^{-3}$%. In ieder geval bestaan momenteel reeds het concept en de techniek om glasvezelversterkt polyester te recyclen. In deze studie naar windturbines nemen de turbinebladen voor turbines met een betonnen fundering circa 50 tot 60% van de stort[13] voor hun rekening, indien het gewapend beton van de fundering wordt hergebruikt. Voor offshore windturbines met een stalen eenpaalspaalsfundament is dit circa 30 tot 40% van de stort.

- De gestroomlijnde levenscyclusanalyse die nu in het software-programma SimaPro beschikbaar is, kan gebruikt worden voor vergelijking met andere elektriciteitsproduktieprocessen of voor het doorrekenen van andere dan de hier genoemde verbeteranalyses. Gedacht kan worden aan hergebruik (recycling) van bepaalde materialen (bijvoorbeeld stalen componenten), substitutie in aard en hoeveelheid van gebruikte materialen en updates op basis van meer recente gegevens.

[13] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.

REFERENTIES

[1] I.C. Kok: *Milieugerichte levenscyclusanalyses in energie-gerelateerde onderzoeksplanning, Hoofdrapport van vier case-studies toegespitst op energieconversiesystemen.* Petten, ECN, ECN-C--95-048, februari 1996.

[2] R. Blackstone, R.C.J. de Vos (red.): *Energieonderzoek Centrum Nederland Jaarverslag 1993.* Petten, ECN, 1994.

[3] *ENGINE: Het ECN-programma gericht op een schone, veilige en duurzame energievoorziening.* Petten, ECN, ECN-B--91-001, 1991.

[4] F.M.J.A. Diepstraten: *Integraal Ketenbeheer, Een verkenning.* Petten, ECN, ECN-I--93-022, juni 1993.

[5] I.C. Kok: *Milieugerichte levenscyclusanalyse van een gesmolten carbonaat brandstofcel, Een analyse van een ER-MCFC voor elektriciteitsopwekking.* Petten, ECN, ECN-C--95-049, februari 1996.

[6] I.C. Kok, P. Lako, R. van Ree: *Milieugerichte levenscyclusanalyse van STEG en KV-STEG.* Petten, ECN, ECN-C--95-051, februari 1996.

[7] I.C. Kok: *Procesgegevens van uitgevoerde milieugerichte levenscyclusanalyses.* Petten, ECN, februari 1996 (bijlage).

[8] R. Heijungs et al.: *Handleiding Milieugerichte levenscyclusanalyses van produkten.* Leiden, Centrum voor Milieukunde, NOH rapport 9253, oktober 1992.

[9] R. Heijungs et al.: *Achtergronden Milieugerichte levenscyclusanalyses van produkten.* Leiden, Centrum voor Milieukunde, NOH rapport 9254, oktober 1992.

[10] M. van Brummelen, B. van Engelenburg, E. Nieuwlaar: *Methodology for the Life-Cycle Assessment of Energy Technologies.* Utrecht, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving, Universiteit Utrecht, rapport 94024, 1994.

[11] M.J. Goedkoop et al.: *Handleiding SimaPro 2.0.* Amersfoort, PRé Consultants, juli 1993.

[12] H.J.M. Beurskens, R. de Bruijne: *Het perspectief van windenergie in Nederland.* Energie- en Milieuspectrum, nr. 5, mei 1994, p. 26-29.

[13] *Nota Energiebesparing.* Den Haag, Ministerie van Economische Zaken, kamerstuknummer 21570 nrs. 1-2, juni 1990.

[14] *Vervolgnota Energiebesparing.* Den Haag, Ministerie van Economische Zaken, kamerstuknummer 23561 nrs. 1-2, december 1993.

[15] J.M. Bais, R.J. Oosterheert (red.): *Energie Verslag Nederland 1993.* Petten, ECN, 1994, 67-69.

[16] R. Rossing: *EnergieNed verlaagt doel wind: 450 MW.* Duurzame energie, nr. 2, april 1994, p. 31-32.

[17] Persoonlijke communicatie B.J. de Smet, ECN, eerste kwartaal 1994.

[18] *Emissiefactoren: Kunststof- en rubberverwerkende industrie.* Den Haag, Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Publikatiereeks Emissieregistratie nr. 11, augustus 1993.

[19] A.A. Watts (red.): *Commercial opportunities for advanced composites.* Philadelphia, USA, American Society for Testing and Materials, ASTM stp. 704, 1980.

[20] B.S. Johansen, H. Lilholt, Aa. Lystrup: *Wingblades of glass fibre reinforced polyester for a 630 kW windturbine design, fabrication and materials testing.* in: A.R. Bunsell et al. (red.): *Advances in composite materials,* vol. 2, 3rd international conference on composite materials, Parijs, Frankrijk, 26-29 augustus 1980.

[21] G. Nielsen: *The world's first off-shore windfarm.* Caddet Renewable Newsletter, nr. 1, januari 1994, p. 4-6.

[22] K. Dyre Jespersen: *The first off-shore windfarm in the Danish wind power programme.* in: W. Palz (red.): *European community wind energy conference,* proceedings of an international conference, Madrid, Spanje, 10-14 september 1990, p. 641-644.

[23] G. le Belle: *Bouw offshore-park in IJsselmeer.* Duurzame energie, nr.2, april 1994, p. 30.

[24] *Windturbinepark Lely: Een eerste stap naar off shore Windenergie in Nederland* (brochure PEN).

[25] J. van der Schot: *Matige wind; aan zee en boven het IJsselmeer krachtig.* Intermediair jrg. 30, nr. 36, 9 september 1994, p. 33.

[26] Informatie PEN vierde kwartaal 1995.

[27] *Eerste windturbines buitengaats.* Energie- en milieuspectrum, nr. 8, augustus 1994, p. 5.

[28] Persoonlijke communicatie D.J. Gielen, ECN-Beleidsstudies, derde kwartaal 1993.

[29] W.G. Haije: *Evaluatie van de mogelijkheden voor recycling van windturbinebladen.* Petten, ECN-Energie Engineering 6206-GR1, juni 1994.

[30] Persoonlijke communicatie H. Kelderman, DSM Resins bv, 15 april en 6 juli 1994.

[31] *Grenswaarden ademhalingslucht.* in: D. van de Berg en G.C.M. Korstjens (red.): *ARBO jaarboek 1994.* Amsterdam, NIA/Kluwer, ISBN 90-312-1049-8, 1994, p. 279-323.

[32] *Waterleidingbesluit.* Staatsblad van het koninkrijk der Nederlanden, stb. 220, april 1984.

[33] *Elektriciteit in Nederland 1993.* Arnhem, Sep/EnergieNed, maart 1994.

[34] *De nederlandse energiehuishouding jaarcijfers 1994, Energiebalansen.* Den Haag, Centraal Bureau voor de Statistiek, 1995.

[35] *Algemene milieu (jaar)statistiek.* Den Haag, Centraal Bureau voor de Statistiek, 1992.

[36] *Emissies in Nederland 1990.* Den Haag, Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Publikatiereeks Emissieregistratie nr. 13, september 1993.

[37] M. van Brummelen, E. Nieuwlaar: *Life cycle assessment of roof integrated solar cell systems.* Utrecht, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving, Universiteit Utrecht, rapport 94023, december 1994.

[38] *Informatie SimaPro 3.0.* Amersfoort, PRé Consultants, oktober 1994.

[39] P.M.H. Lardinois: *Elektrische ovens en hergebruik van metalen in de staalindustrie.* Petten, ECN-beleidsstudies, april 1994 (afstudeeropdracht van de faculteit Elektrotechniek van de Technische Universiteit te Eindhoven).

[40] J.A. Annema: *Procesbeschrijvingen Industrie: Produktie van secundair staal.* Den Haag, SPIN nr. 151, RIVM rapport 773006151, juni 1993.

[41] B. Holwerda: *Hoogovens heeft eerste tien procent al bijna binnen.* PolyTechnisch tijdschrift, nr. 8, augustus 1993, p. 24-26.

BIJLAGE A. EFFECTSCORES

In deze bijlage worden de totale effectscores per milieuthema van de verschillende windturbines per functionele eenheid weergegeven. Deze effectscores worden berekend door milieu-ingrepen (bijlage B) met de betreffende weegfactor binnen een bepaald milieuthema (bijlage C) te vermenigvuldigen. In het hoofdrapport [1] wordt de classificatiemethode toegelicht. Humane toxiciteit (lucht) en humane toxiciteit (water) zijn in deze studie opgenomen als berekeningsvariant op het milieuthema humane toxiciteit.

Tabel A.1 *Effectscores van zowel een 300 kW als een 500 kW onshore windturbine per functionele eenheid [GWh]*

Milieuthema	Weegfactor[2]	Eenheid	300 kW	500 kW
Energiegebruik	MJ	GJ	180	130
Uitputting	1/voorraad	10^3	26	20
Broeikaseffect	GWP 100	kg	10.000	6.800
Verzuring	AP	kg	53	37
Vast afval	kg			
- produktie		kg	350	260
- inclusief stort[1]		kg	24.000	13.000
Vermesting	NP	g	4.700	3.100
Ozonlaagaantasting	ODP	kg	0	0
Oxidantia	POCP	g	7.200	4.600
Humane toxiciteit	HCL,HCW,HCB	kg	72	50
Humane toxiciteit (lucht)	1/MAC	10^6 m^3	23	16
Humane toxiciteit (water)	1/OvD	m^3	4.100	3.000
Humane toxiciteit (bodem)	HCB	g	790	470
Ecotoxiciteit (water)	ECA	10^{-3} m^3	39	29
Ecotoxiciteit (bodem)	ECT	kg	20	15

Tabel A.2 *Effectscores van zowel een 300 kW als een 500 kW offshore windturbine met een betonnen fundering per functionele eenheid [GWh]*

Milieuthema	Weegfactor[2]	Eenheid	300 kW	500 kW
Energiegebruik	MJ	GJ	240	170
Uitputting	1/voorraad	10^3	110	57
Broeikaseffect	GWP 100	ton	17	11
Verzuring	AP	kg	92	60
Vast afval	kg			
- produktie		kg	560	370
- inclusief stort[1]		kg	61.000	37.000
Vermesting	NP	g	8.500	5.500
Ozonlaagaantasting	ODP	kg	0	0
Oxidantia	POCP	g	7.400	5.000
Humane toxiciteit	HCL,HCW,HCB	kg	120	78
Humane toxiciteit (lucht)	1/MAC	10^6 m^3	38	25
Humane toxiciteit (water)	1/OvD	m^3	4.200	3.200
Humane toxiciteit (bodem)	HCB	g	1.400	920
Ecotoxiciteit (water)	ECA	10^{-3} m^3	42	32
Ecotoxiciteit (bodem)	ECT	kg	21	16

Tabel A.3 *Effectscores van zowel een 300 kW als een 500 kW offshore windturbine met een stalen eenpaalsfundament per functionele eenheid [GWh]*

Milieuthema	Weegfactor[2]	Eenheid	300 kW	500 kW
Energiegebruik	MJ	GJ	320	220
Uitputting	1/voorraad	10^3	110	57
Broeikaseffect	GWP 100	kg	15.000	9.800
Verzuring	Ap	kg	85	56
Vast afval	kg			
- produktie		kg	800	510
- inclusief stort[1]		kg	1.600	1.200
Vermesting	NP	g	6.600	4.300
Ozonlaagaantasting	ODP	kg	0	0
Oxidantia	POCP	g	8.200	5.500
Humane toxiciteit	HCL,HCW,HCB	kg	110	76
Humane toxiciteit (lucht)	1/MAC	10^6 m^3	36	24
Humane toxiciteit (water)	1/OvD	m^3	6.800	4.800
Humane toxiciteit (bodem)	HCB	g	320	230
Ecotoxiciteit (water)	ECA	10^{-3} m^3	71	50
Ecotoxiciteit (bodem)	ECT	kg	40	28

Tabel A.4 *Effectscores van zowel een 300 kW als een 500 kW onshore windturbine waarin elektrostaal is toegepast per functionele eenheid [GWh]*

Milieuthema	Weegfactor[2]	Eenheid	300 kW	500 kW
Energiegebruik	MJ	GJ	140	99
Uitputting	1/voorraad	10^3	26	20
Broeikaseffect	GWP 100	kg	11.000	7.500
Verzuring	AP	kg	41	28
Vast afval	kg			
- produktie		kg	120	85
- inclusief stort[1]		kg	23.000	13.000
Vermesting	NP	g	4.500	3.000
Ozonlaagaantasting	ODP	kg	0	0
Oxidantia	POCP	g	6.100	3.800
Humane toxiciteit	HCL,HCW,HCB	kg	60	41
Humane toxiciteit (lucht)	1/MAC	10^6 m^3	16	11
Humane toxiciteit (water)	1/OvD	m^3	13.000	9.500
Humane toxiciteit (bodem)	HCB	g	740	430
Ecotoxiciteit (water)	ECA	10^{-3} m^3	85	63
Ecotoxiciteit (bodem)	ECT	g	31	21

[1] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.
[2] Gebruikte afkortingen. GWP 100: Global Warming Potential met een tijdhorizon van 100 jaar; AP: Acidification Potential; NP: Nutrification Potential; ODP: Ozone Depletion Potential; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential; HCL/HCW/HCB: Humaan-toxicologische Classificatiefactoren voor Lucht/Water/Bodem; MAC: Maximale Aanvaarde Concentraties; OvD: Oppervlaktewater bestemd voor Drinkwaterproduktie; ECA/ECT: Ecotoxicologische Classificatiefactoren voor Aquatische/Terrestrische ecosystemen.

BIJLAGE B. MILIEU-INGREPEN

In de ingreeptabellen B.1 en B.2 zijn de milieu-ingrepen van respectievelijk de onshore dan wel de offshore windturbines per functionele eenheid opgenomen. De (engelstalige) data in deze bijlage zijn afkomstig uit het software-pakket SimaPro 2.1.

Tabel B.1 *Milieu-ingrepen van de onshore turbines per functionele eenheid [GWh]*

A = 300 kW turbine (oxystaal)
B = 500 kW turbine (oxystaal)
C = 300 kW turbine (elektrostaal)
D = 500 kW turbine (elektrostaal)

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Raw					
barrage water	7.01E+4	5.16E+4	6.65E+4	4.90E+4	kg
unspecified energy	3.04E+4	2.29E+4	1.29E+3	7.59E+2	MJ
copper ore	1.50E+4	1.20E+4	1.50E+4	1.20E+4	kg
secondary fuels	1.04E+4	7.21E+3	2.99E+3	1.60E+3	MJ
iron ore	6.76E+3	5.12E+3	9.54E-2	6.15E-2	kg
sand	4.52E+3	2.41E+3	4.52E+3	2.41E+3	kg
gravel	4.52E+3	2.41E+3	4.52E+3	2.41E+3	kg
limestone mineral	3.43E+3	2.36E+3	1.12E+3	6.05E+2	kg
coal	3.01E+3	2.23E+3	1.25E+3	8.91E+2	kg
other energies	1.65E+3	1.25E+3	0	0	MJ
water	1.61E+3	1.02E+3	1.45E+3	8.82E+2	kg
natural gas	9.10E+2	6.44E+2	2.19E+3	1.61E+3	m^3
steel scrap	8.15E+2	6.17E+2	5.11E+3	3.86E+3	kg
oil	7.52E+2	5.18E+2	4.81E+2	3.13E+2	kg
slag granulates	5.48E+2	2.92E+2	5.48E+2	2.92E+2	kg
oxygen	3.55E+2	2.69E+2	0	0	m^3
blast-furnace gas	3.27E+2	1.98E+2	3.70E+3	2.75E+3	MJ
clay	3.04E+2	1.62E+2	3.04E+2	1.62E+2	kg
coke breeze	2.95E+2	2.23E+2	0	0	kg
silica	1.75E+2	1.38E+2	1.75E+2	1.38E+2	kg
air	1.56E+2	1.06E+2	9.09E+1	5.80E+1	kg
oxylime sludge	1.05E+2	7.98E+1	0	0	kg
derived gases	6.66E+1	5.32E+1	6.66E+1	5.32E+1	MJ
sodium chloride	6.37E+1	4.27E+1	6.38E+1	4.28E+1	kg
lignite	6.24E+1	4.60E+1	6.24E+1	4.60E+1	kg
anhydrite	5.00E+1	2.67E+1	5.00E+1	2.67E+1	kg
lime	4.00E+1	3.20E+1	4.00E+1	3.20E+1	kg
methylene chloride	2.70E+1	1.50E+1	2.70E+1	1.50E+1	kg
zinc-poor residue	2.18E+1	1.65E+1	0	0	kg
gypsum	2.14E+1	1.14E+1	2.14E+1	1.14E+1	kg
steel	1.67E+1	1.33E+1	1.67E+1	1.33E+1	kg
boron oxide (B2O3)	1.33E+1	1.04E+1	1.33E+1	1.04E+1	kg
feldspar	4.44E+0	3.46E+0	4.44E+0	3.46E+0	kg
uranium ore	3.21E+0	2.19E+0	8.50E+0	6.19E+0	kg
wood	3.13E+0	1.17E+0	3.13E+0	1.17E+0	kg
nitrogen	2.70E+0	1.89E+0	6.39E+0	4.34E+0	kg
organic compounds	1.82E+0	1.08E+0	1.82E+0	1.08E+0	kg
CaF2	8.89E-1	6.93E-1	8.89E-1	6.93E-1	kg
kaolinite (chinaclay)	5.35E-1	3.66E-1	5.35E-1	3.66E-1	kg
bauxite ore	4.96E-1	3.46E-1	7.99E-1	5.74E-1	kg
flotation agent	4.33E-1	3.47E-1	4.33E-1	3.47E-1	kg
hydrochloric acid	2.29E-1	1.44E-1	2.29E-1	1.44E-1	kg
cobalt	1.11E-1	6.77E-2	1.11E-1	6.77E-2	kg
azodicarbonamide	2.70E-2	1.85E-2	2.70E-2	1.85E-2	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Air					
krypton/xenon	1.78E+4	9.50E+3	1.78E+4	9.50E+3	kBq
CO2	9.50E+3	6.48E+3	1.04E+4	7.14E+3	kg
CO	1.49E+2	1.11E+2	1.57E+1	1.06E+1	kg
NOx	3.24E+1	2.12E+1	3.44E+1	2.27E+1	kg
SO2	2.97E+1	2.12E+1	1.62E+1	1.10E+1	kg
methane	2.70E+1	2.02E+1	1.24E+1	9.22E+0	kg
dust	1.75E+1	1.06E+1	1.61E+1	9.50E+0	kg
methylene chloride	1.35E+1	7.20E+0	1.35E+1	7.20E+0	kg
acetone	9.65E+0	5.76E+0	9.65E+0	5.76E+0	kg
CxHy	9.07E+0	6.33E+0	6.43E+0	4.33E+0	kg
tritium	3.56E+0	1.90E+0	3.56E+0	1.90E+0	kBq
styrene	1.43E+0	7.79E-1	1.43E+0	7.79E-1	kg
VOC	1.31E+0	7.85E-1	1.31E+0	7.85E-1	kg
KCl	9.77E-1	7.40E-1	0	0	kg
SOx	7.20E-1	5.61E-1	7.20E-1	5.61E-1	kg
borium oxide (B2O3)	4.29E-1	3.35E-1	4.29E-1	3.35E-1	kg
H2S	4.24E-1	3.21E-1	1.21E-3	8.09E-4	kg
soot	2.91E-1	1.55E-1	2.91E-1	1.55E-1	kg
CxHy aromatic	1.36E-1	9.12E-2	1.36E-1	9.12E-2	kg
iodine	1.07E-1	5.70E-2	1.07E-1	5.70E-2	kBq
N2O	9.46E-2	6.50E-2	6.38E-1	4.76E-1	kg
HCl	4.50E-2	3.26E-2	1.68E-2	1.12E-2	kg
CxHy aliphatic	3.33E-2	2.24E-2	3.33E-2	2.24E-2	kg
F	2.66E-2	2.05E-2	1.11E-1	8.43E-2	kg
aldehydes	1.66E-2	9.87E-3	1.66E-2	9.87E-3	kg
methyl ethyl ketone	1.30E-2	8.72E-3	1.30E-2	8.72E-3	kg
NH3	1.26E-2	9.41E-3	3.43E-3	2.46E-3	kg
dioctyl phthalate (DOP)	1.07E-2	7.32E-3	1.07E-2	7.32E-3	kg
Pb	9.00E-3	6.81E-3	1.39E-2	1.05E-2	kg
H2	8.96E-3	4.16E-3	8.96E-3	4.16E-3	kg
alcohols	7.65E-3	4.54E-3	7.65E-3	4.54E-3	kg
epichlorohydrin	6.51E-3	4.36E-3	6.51E-3	4.36E-3	kg
CxHy chloro	4.41E-3	2.64E-3	4.41E-3	2.64E-3	kg
benzene	3.61E-3	2.42E-3	3.61E-3	2.42E-3	kg
Cl2	3.32E-3	1.37E-3	3.32E-3	1.37E-3	kg
crude oil	2.99E-3	1.77E-3	2.99E-3	1.77E-3	kg
HCN	2.75E-3	2.08E-3	0	0	kg
N2	2.70E-3	1.85E-3	8.12E-3	5.59E-3	kg
fluoranthene	2.34E-3	1.77E-3	0	0	kg
formaldehyde (H2CO)	1.73E-3	1.31E-3	1.73E-3	1.31E-3	kg
phenol	1.50E-3	1.15E-3	1.50E-3	1.15E-3	kg
Mn	1.28E-3	9.72E-4	4.18E-2	3.16E-2	kg
Zn	1.08E-3	8.12E-4	5.11E-1	3.86E-1	kg
benzo(a)pyrene	9.72E-4	7.36E-4	0	0	kg
formic acid (HCO2H)	8.68E-4	3.57E-4	8.68E-4	3.57E-4	kg
metals	7.75E-4	4.83E-4	7.75E-4	4.83E-4	kg
Al	6.98E-4	5.28E-4	3.25E-3	2.46E-3	kg
toluene	6.29E-4	4.21E-4	6.29E-4	4.21E-4	kg
Ni	3.75E-4	2.84E-4	1.39E-4	1.05E-4	kg
Fe	2.98E-4	2.26E-4	2.79E-1	2.11E-1	kg
Cu	2.60E-4	1.97E-4	9.31E-4	7.04E-4	kg
Ca	2.49E-4	1.88E-4	9.29E-5	7.03E-5	kg
Cd	2.15E-4	1.60E-4	1.00E-5	5.35E-6	kg
ethylene oxide	2.04E-4	1.21E-4	2.04E-4	1.21E-4	kg
Hg	1.89E-4	1.42E-4	3.62E-6	1.60E-6	kg
Cr	1.87E-4	1.42E-4	1.39E-3	1.05E-3	kg
arsenic (As)	1.86E-4	1.41E-4	0	0	kg
Cl	1.48E-4	1.15E-4	1.48E-4	1.15E-4	kg
Mg	9.94E-5	7.53E-5	1.86E-2	1.41E-2	kg
ethylene glycol	8.16E-5	4.84E-5	8.16E-5	4.84E-5	kg
radioactivity	6.35E-5	3.39E-5	6.35E-5	3.39E-5	kBq
HF	6.29E-5	3.40E-5	7.35E-5	4.20E-5	kg
organics (other)	3.21E-5	1.99E-5	3.21E-5	1.99E-5	kg
phosphoric acid	3.21E-6	1.32E-6	3.21E-6	1.32E-6	kg
cobalt	2.26E-7	1.51E-7	2.26E-7	1.51E-7	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Water					
cooling water	4.61E+1	3.12E+1	4.61E+1	3.12E+1	m^3
SO4	4.07E+0	3.04E+0	2.12E-1	1.21E-1	kg
treated water	1.47E+0	1.02E+0	1.47E+0	1.02E+0	m^3
Cl	1.44E+0	7.55E-1	1.44E+0	7.53E-1	kg
Kjeldahl-N	1.00E+0	7.58E-1	4.89E-2	3.68E-2	kg
quarry water	9.60E-1	5.15E-1	9.60E-1	5.15E-1	m^3
dissolved substances	7.27E-1	5.35E-1	1.81E-1	1.21E-1	kg
Fe	6.44E-1	4.87E-1	4.41E+0	3.34E+0	kg
COD	5.87E-1	3.92E-1	5.87E-1	3.91E-1	kg
Na	4.96E-1	2.39E-1	4.97E-1	2.39E-1	kg
other	3.86E-1	2.92E-1	2.00E-4	1.37E-4	kg
E-glass polymer coating	3.55E-1	2.77E-1	3.55E-1	2.77E-1	kg
suspended substances	3.44E-1	2.43E-1	6.67E+0	5.03E+0	kg
process water	1.08E-1	7.28E-2	1.08E-1	7.28E-2	m^3
metals	1.01E-1	6.77E-2	1.05E-1	7.06E-2	kg
acid	9.66E-2	5.31E-2	1.29E-1	7.78E-2	kg
oil	5.73E-2	3.97E-2	2.70E-1	2.00E-1	kg
base	4.98E-2	2.05E-2	4.98E-2	2.05E-2	kg
CxHy	4.41E-2	2.99E-2	4.39E-2	2.97E-2	kg
dissolved organics	2.90E-2	2.02E-2	4.43E-2	3.17E-2	kg
F	1.38E-2	1.02E-2	5.97E-3	4.22E-3	kg
Ca	6.08E-3	3.24E-3	6.08E-3	3.24E-3	kg
BOD	5.90E-3	3.92E-3	5.90E-3	3.92E-3	kg
Zn	5.53E-3	4.19E-3	1.39E-2	1.05E-2	kg
di-amine (R1R2NH)	3.28E-3	1.35E-3	3.28E-3	1.35E-3	kg
ammonium ions	3.03E-3	2.00E-3	3.03E-3	2.00E-3	kg
domestic water	2.86E-3	1.52E-3	2.86E-3	1.52E-3	m^3
Mg	1.87E-3	9.98E-4	1.87E-3	9.98E-4	kg
CxHy aromatic	9.67E-4	6.75E-4	9.67E-4	6.75E-4	kg
Pb	9.59E-4	7.25E-4	9.32E-4	7.04E-4	kg
nitrate	9.13E-4	5.64E-4	1.37E-3	9.13E-4	kg
Cu	9.00E-4	6.81E-4	1.86E-2	1.41E-2	kg
Ni	5.14E-4	3.90E-4	9.32E-4	7.05E-4	kg
Cr	5.11E-4	3.87E-4	1.86E-2	1.41E-2	kg
NH3	4.89E-4	3.19E-4	1.39E-3	1.00E-3	kg
phenol	2.67E-4	1.86E-4	7.79E-4	5.72E-4	kg
PAH	1.27E-4	9.60E-5	0	0	kg
sulphur	1.04E-4	6.71E-5	1.04E-4	6.71E-5	kg
formaldehyde (H2CO)	6.43E-5	2.65E-5	6.43E-5	2.65E-5	kg
Hg	3.70E-5	2.69E-5	3.21E-6	1.32E-6	kg
crude oil	3.66E-5	2.25E-5	3.66E-5	2.25E-5	kg
Cd	3.48E-5	2.64E-5	4.44E-8	3.46E-8	kg
CxHy chloro	1.45E-5	9.77E-6	1.45E-5	9.77E-6	kg
mercaptane	1.45E-5	7.72E-6	1.45E-5	7.72E-6	kg
phosphate	9.48E-6	7.39E-6	9.48E-6	7.39E-6	kg
Ag	2.37E-7	1.85E-7	2.37E-7	1.85E-7	kg
Solid					
concrete (armoured)[1]	2.25E+4	1.20E+4	2.25E+4	1.20E+4	kg
radioactivity	7.15E+3	3.81E+3	7.15E+3	3.81E+3	kBq
turbine blade[1]	3.38E+2	2.82E+2	3.38E+2	2.82E+2	kg
unspecified waste	3.06E+2	2.32E+2	8.31E+1	6.32E+1	kg
steel[1,2]	2.15E+2	1.64E+2	2.15E+2	1.64E+2	kg
polyester GRP[1]	6.08E+1	3.60E+1	6.08E+1	3.60E+1	kg
rubber[1]	4.50E+1	3.00E+1	4.50E+1	3.00E+1	kg
zinc-rich residue	1.51E+1	1.15E+1	0	0	kg
polyester resin	9.90E+0	4.20E+0	9.90E+0	4.20E+0	kg
turbine mould[1]	7.33E+0	3.31E+0	7.33E+0	3.31E+0	kg
fly ash	5.94E+0	4.47E+0	2.21E+0	1.65E+0	kg
fiber E-glass	5.44E+0	3.62E+0	5.44E+0	3.62E+0	kg
copper[1]	4.95E+0	3.96E+0	4.95E+0	3.96E+0	kg
mineral waste	3.96E+0	2.48E+0	6.06E+0	4.06E+0	kg
glass	1.78E+0	1.39E+0	1.78E+0	1.39E+0	kg
secondary suction dust	1.34E+0	1.02E+0	0	0	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
non-toxic chemicals	1.24E+0	7.75E-1	1.25E+0	7.83E-1	kg
slag	1.02E+0	6.49E-1	1.32E+0	8.75E-1	kg
wood	5.96E-1	2.23E-1	5.96E-1	2.23E-1	kg
PVC foam	4.50E-1	2.40E-1	4.50E-1	2.40E-1	kg
epoxy resin	2.34E-1	1.01E-1	2.34E-1	1.01E-1	kg
lumps of slag	1.71E-1	9.14E-2	1.71E-1	9.14E-2	kg
PUR	9.00E-2	0	9.00E-2	0	kg
industrial waste	4.31E-2	2.85E-2	2.96E-2	1.83E-2	kg
toxic chemicals	1.91E-2	1.27E-2	1.91E-2	1.27E-2	kg
consumed oil	1.14E-2	6.10E-3	1.14E-2	6.10E-3	m^3
chemical waste	1.00E-2	5.33E-3	1.00E-2	5.33E-3	kg
CaF6	8.71E-4	6.55E-4	3.10E-3	2.34E-3	kg
Hg	7.45E-5	5.35E-5	2.56E-4	1.90E-4	kg
high act.nucl. waste	1.33E-5	9.98E-6	4.72E-5	3.56E-5	m^3
low,med.act.nucl.waste	3.27E-6	2.46E-6	1.17E-5	8.87E-6	m^3
slime	0	0	5.57E+0	4.22E+0	kg

[1] Stortafval.
[2] Vaste afvalstroom van staal tijdens produktiefase is verwaarloosbaar.

Tabel B.2 *Milieu-ingrepen van de offshore turbines per functionele eenheid [GWh]*

A = 300 kW turbine met betonnen fundering
B = 500 kW turbine met betonnen fundering
C = 300 kW turbine met stalen eenpaalsfundament
D = 500 kW turbine met stalen eenpaalsfundament

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Raw					
barrage water	2.39E+5	1.32E+5	2.12E+5	1.16E+5	kg
copper ore	6.26E+4	3.35E+4	6.26E+4	3.35E+4	kg
unspecified energy	3.25E+4	2.52E+4	5.32E+4	3.77E+4	MJ
sand	2.71E+4	1.64E+4	4.89E-3	3.24E-3	kg
gravel	2.71E+4	1.64E+4	0	0	kg
secondary fuels	1.57E+4	1.09E+4	1.50E+4	1.05E+4	MJ
iron ore	7.19E+3	5.62E+3	1.37E+4	9.57E+3	kg
limestone mineral	5.30E+3	3.65E+3	4.73E+3	3.31E+3	kg
coal	3.70E+3	2.73E+3	5.75E+3	3.97E+3	kg
water	2.63E+3	1.72E+3	1.39E+3	9.72E+2	kg
other energies	1.70E+3	1.34E+3	3.12E+3	2.20E+3	MJ
slag granulates	1.43E+3	8.68E+2	0	0	kg
oil	1.23E+3	8.05E+2	1.20E+3	7.84E+2	kg
natural gas	1.01E+3	7.17E+2	9.97E+2	7.08E+2	m^3
steel scrap	8.67E+2	6.78E+2	1.65E+3	1.15E+3	kg
clay	7.93E+2	4.81E+2	3.52E-2	2.30E-2	kg
blast-furnace gas	4.84E+2	3.05E+2	2.72E+2	1.76E+2	MJ
silica	4.00E+2	2.38E+2	4.00E+2	2.38E+2	kg
oxygen	3.77E+2	2.94E+2	7.16E+2	5.00E+2	m^3
coke breeze	3.14E+2	2.45E+2	5.98E+2	4.18E+2	kg
derived gases	2.78E+2	1.48E+2	2.78E+2	1.48E+2	MJ
lignite	2.38E+2	1.30E+2	2.00E+2	1.07E+2	kg
lime	1.67E+2	8.93E+1	1.67E+2	8.93E+1	kg
air	1.56E+2	1.08E+2	7.04E+1	4.78E+1	kg
anhydrite	1.31E+2	7.92E+1	0	0	kg
oxylime sludge	1.12E+2	8.76E+1	2.14E+2	1.49E+2	kg
steel	6.96E+1	3.72E+1	6.96E+1	3.72E+1	kg
gypsum	5.60E+1	3.39E+1	0	0	kg
sodium chloride	4.69E+1	3.57E+1	4.69E+1	3.57E+1	kg
zinc-poor residue	2.32E+1	1.81E+1	4.42E+1	3.08E+1	kg
methylene chloride	1.98E+1	1.25E+1	1.98E+1	1.25E+1	kg
boron oxide (B2O3)	9.77E+0	8.66E+0	9.77E+0	8.66E+0	kg
uranium ore	9.03E+0	5.06E+0	7.23E+0	3.98E+0	kg
feldspar	3.26E+0	2.89E+0	3.26E+0	2.89E+0	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
wood	2.30E+0	9.74E-1	2.30E+0	9.74E-1	kg
nitrogen	1.98E+0	1.57E+0	4.69E+0	3.62E+0	kg
flotation agent	1.81E+0	9.67E-1	1.81E+0	9.67E-1	kg
organic compounds	1.34E+0	9.00E-1	1.34E+0	9.00E-1	kg
bauxite ore	6.82E-1	4.57E-1	6.83E-1	4.58E-1	kg
CaF2	6.52E-1	5.77E-1	6.52E-1	5.77E-1	kg
kaolinite (chinaclay)	3.92E-1	3.05E-1	3.92E-1	3.05E-1	kg
hydrochloric acid	1.68E-1	1.20E-1	1.68E-1	1.20E-1	kg
cobalt	8.11E-2	5.65E-2	8.11E-2	5.65E-2	kg
azodicarbonamide	1.98E-2	1.54E-2	1.98E-2	1.54E-2	kg
Air					
krypton/xenon	4.67E+4	2.83E+4	0	0	kBq
CO2	1.62E+4	1.07E+4	1.39E+4	9.29E+3	kg
CO	1.69E+2	1.29E+2	2.92E+2	2.04E+2	kg
NOx	6.22E+1	3.94E+1	4.40E+1	2.84E+1	kg
SO2	4.82E+1	3.22E+1	5.40E+1	3.57E+1	kg
dust	3.82E+1	2.39E+1	1.21E+1	8.09E+0	kg
methane	3.10E+1	2.34E+1	5.39E+1	3.72E+1	kg
CxHy	1.19E+1	8.23E+0	1.38E+1	9.39E+0	kg
methylene chloride	9.90E+0	6.00E+0	9.90E+0	6.00E+0	kg
tritium	9.35E+0	5.66E+0	0	0	kBq
acetone	7.07E+0	4.80E+0	7.07E+0	4.80E+0	kg
styrene	1.05E+0	6.49E-1	1.05E+0	6.49E-1	kg
KCl	1.04E+0	8.12E-1	1.98E+0	1.38E+0	kg
VOC	9.91E-1	6.69E-1	9.91E-1	6.69E-1	kg
soot	7.63E-1	4.63E-1	0	0	kg
SOx	5.28E-1	4.68E-1	5.28E-1	4.68E-1	kg
H2S	4.51E-1	3.52E-1	8.58E-1	5.99E-1	kg
borium oxide (B2O3)	3.15E-1	2.79E-1	3.15E-1	2.79E-1	kg
iodine	2.80E-1	1.70E-1	0	0	kBq
N2O	2.42E-1	1.37E-1	2.07E-1	1.16E-1	kg
CxHy aromatic	9.98E-2	7.60E-2	9.98E-2	7.60E-2	kg
HCl	4.54E-2	3.46E-2	7.68E-2	5.36E-2	kg
CxHy aliphatic	2.44E-2	1.86E-2	2.44E-2	1.86E-2	kg
F	2.28E-2	1.91E-2	3.04E-2	2.37E-2	kg
aldehydes	1.53E-2	9.87E-3	1.32E-2	8.63E-3	kg
NH3	1.24E-2	9.72E-3	2.11E-2	1.50E-2	kg
Pb	9.59E-3	7.49E-3	1.82E-2	1.27E-2	kg
methyl ethyl ketone	9.55E-3	7.27E-3	9.55E-3	7.27E-3	kg
dioctyl phthalate (DOP)	7.84E-3	6.10E-3	7.84E-3	6.10E-3	kg
H2	6.57E-3	3.47E-3	6.57E-3	3.47E-3	kg
alcohols	5.61E-3	3.78E-3	5.61E-3	3.78E-3	kg
epichlorohydrin	4.78E-3	3.63E-3	4.78E-3	3.63E-3	kg
CxHy chloro	3.23E-3	2.20E-3	3.23E-3	2.20E-3	kg
HCN	2.93E-3	2.29E-3	5.58E-3	3.90E-3	kg
benzene	2.65E-3	2.01E-3	2.65E-3	2.01E-3	kg
fluoranthene	2.49E-3	1.94E-3	4.74E-3	3.31E-3	kg
Cl2	2.43E-3	1.14E-3	2.43E-3	1.14E-3	kg
crude oil	2.19E-3	1.47E-3	2.19E-3	1.47E-3	kg
N2	1.98E-3	1.54E-3	5.95E-3	4.66E-3	kg
Mn	1.36E-3	1.07E-3	2.60E-3	1.82E-3	kg
formaldehyde (H2CO)	1.27E-3	1.09E-3	1.27E-3	1.09E-3	kg
Zn	1.17E-3	9.06E-4	2.15E-3	1.50E-3	kg
phenol	1.10E-3	9.58E-4	1.10E-3	9.58E-4	kg
benzo(a)pyrene	1.03E-3	8.08E-4	1.97E-3	1.38E-3	kg
metals	9.04E-4	6.06E-4	4.37E-4	3.23E-4	kg
Al	7.42E-4	5.80E-4	1.41E-3	9.87E-4	kg
formic acid (HCO2H)	6.36E-4	2.98E-4	6.36E-4	2.98E-4	kg
toluene	4.61E-4	3.51E-4	4.61E-4	3.51E-4	kg
Ni	3.99E-4	3.12E-4	7.60E-4	5.31E-4	kg
Fe	3.17E-4	2.48E-4	6.05E-4	4.22E-4	kg
Cu	2.76E-4	2.15E-4	5.24E-4	3.66E-4	kg
Ca	2.64E-4	2.07E-4	5.04E-4	3.52E-4	kg
Cd	2.44E-4	1.86E-4	4.15E-4	2.90E-4	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Hg	2.00E-4	1.55E-4	3.78E-4	2.64E-4	kg
Cr	1.99E-4	1.55E-4	3.79E-4	2.65E-4	kg
arsenic (As)	1.98E-4	1.55E-4	3.77E-4	2.63E-4	kg
radioactivity	1.66E-4	1.01E-4	0	0	kBq
HF	1.62E-4	9.71E-5	1.55E-5	8.23E-6	kg
ethylene oxide	1.50E-4	1.01E-4	1.50E-4	1.01E-4	kg
Cl	1.09E-4	9.62E-5	1.09E-4	9.62E-5	kg
Mg	1.06E-4	8.26E-5	2.02E-4	1.41E-4	kg
ethylene glycol	5.99E-5	4.03E-5	5.99E-5	4.03E-5	kg
organics (other)	2.35E-5	1.66E-5	2.35E-5	1.66E-5	kg
phosphoric acid	2.36E-6	1.10E-6	2.36E-6	1.10E-6	kg
cobalt	1.65E-7	1.26E-7	1.65E-7	1.26E-7	kg
Water					
cooling water	3.43E+1	2.63E+1	3.36E+1	2.59E+1	m^3
SO4	4.29E+0	3.32E+0	7.98E+0	5.56E+0	kg
quarry water	2.49E+0	1.51E+0	8.69E-3	7.70E-3	m^3
Cl	1.08E+0	6.42E-1	1.05E+0	6.28E-1	kg
treated water	1.08E+0	8.51E-1	1.08E+0	8.51E-1	m^3
Kjeldahl-N	1.06E+0	8.32E-1	2.03E+0	1.42E+0	kg
dissolved substances	7.57E-1	5.80E-1	1.29E+0	9.01E-1	kg
Fe	6.85E-1	5.35E-1	1.30E+0	9.11E-1	kg
COD	4.31E-1	3.27E-1	4.31E-1	3.27E-1	kg
other	4.11E-1	3.21E-1	7.83E-1	5.47E-1	kg
Na	3.83E-1	2.10E-1	3.57E-1	1.95E-1	kg
suspended substances	3.66E-1	2.68E-1	5.54E-1	3.82E-1	kg
E-glass polymer coating	2.61E-1	2.31E-1	2.61E-1	2.31E-1	kg
acid	9.64E-2	5.78E-2	9.58E-2	5.75E-2	kg
process water	7.94E-2	6.07E-2	7.94E-2	6.07E-2	m^3
metals	7.81E-2	5.85E-2	7.82E-2	5.86E-2	kg
oil	6.66E-2	4.61E-2	6.63E-2	4.60E-2	kg
CxHy	4.56E-2	3.20E-2	4.63E-2	3.24E-2	kg
dissolved organics	3.74E-2	2.54E-2	3.74E-2	2.54E-2	kg
base	3.65E-2	1.71E-2	3.65E-2	1.71E-2	kg
Ca	1.59E-2	9.67E-3	0	0	kg
F	1.54E-2	1.14E-2	2.47E-2	1.70E-2	kg
domestic water	7.47E-3	4.53E-3	0	0	m^3
Zn	5.88E-3	4.59E-3	1.12E-2	7.82E-3	kg
Mg	4.91E-3	2.97E-3	0	0	kg
BOD	4.33E-3	3.27E-3	4.33E-3	3.27E-3	kg
di-amine (R1R2NH)	2.40E-3	1.12E-3	2.40E-3	1.12E-3	kg
ammonium ions	2.22E-3	1.66E-3	2.22E-3	1.66E-3	kg
nitrate	2.04E-3	1.23E-3	7.88E-4	4.71E-4	kg
NH3	1.32E-3	7.10E-4	1.26E-3	6.76E-4	kg
Pb	1.02E-3	7.96E-4	1.94E-3	1.35E-3	kg
Cu	9.57E-4	7.48E-4	1.82E-3	1.27E-3	kg
CxHy aromatic	7.09E-4	5.62E-4	7.09E-4	5.62E-4	kg
Ni	5.46E-4	4.27E-4	1.04E-3	7.25E-4	kg
Cr	5.43E-4	4.25E-4	1.04E-3	7.23E-4	kg
phenol	2.92E-4	2.04E-4	2.59E-4	1.84E-4	kg
PAH	1.35E-4	1.05E-4	2.57E-4	1.80E-4	kg
sulphur	7.66E-5	5.59E-5	7.66E-5	5.59E-5	kg
formaldehyde (H2CO)	4.71E-5	2.21E-5	4.71E-5	2.21E-5	kg
Hg	3.82E-5	2.91E-5	7.08E-5	4.89E-5	kg
mercaptane	3.80E-5	2.30E-5	0	0	kg
Cd	3.70E-5	2.90E-5	7.06E-5	4.93E-5	kg
crude oil	2.68E-5	1.88E-5	2.68E-5	1.88E-5	kg
CxHy chloro	1.07E-5	8.14E-6	1.07E-5	8.14E-6	kg
phosphate	6.95E-6	6.16E-6	6.95E-6	6.16E-6	kg
Ag	1.74E-7	1.54E-7	1.74E-7	1.54E-7	kg

Milieu-ingreep	A	B	C	D	Eenheid
Solid					
concrete (armoured)[1]	6.02E+4	3.65E+4	0	0	kg
radioactivity	1.88E+4	1.14E+4	0	0	kBq
unspecified waste	5.15E+2	3.39E+2	7.35E+2	4.71E+2	kg
turbine blade[1]	2.48E+2	2.35E+2	2.48E+2	2.35E+2	kg
steel[1,2]	1.58E+2	1.37E+2	4.88E+2	3.37E+2	kg
polyester GRP[1]	4.46E+1	3.00E+1	4.46E+1	3.00E+1	kg
rubber[1]	3.30E+1	2.50E+1	3.30E+1	2.50E+1	kg
copper[1]	2.07E+1	1.11E+1	2.07E+1	1.11E+1	kg
zinc-rich residue	1.61E+1	1.26E+1	3.07E+1	2.14E+1	kg
polyester resin	7.26E+0	3.50E+0	7.26E+0	3.50E+0	kg
fly ash	6.77E+0	5.12E+0	1.21E+1	8.34E+0	kg
turbine mould[1]	5.38E+0	2.76E+0	5.38E+0	2.76E+0	kg
fiber E-glass	3.99E+0	3.02E+0	3.99E+0	3.02E+0	kg
mineral waste	3.30E+0	2.27E+0	3.17E+0	2.18E+0	kg
secondary suction dust	1.43E+0	1.12E+0	2.72E+0	1.90E+0	kg
glass	1.30E+0	1.15E+0	1.30E+0	1.15E+0	kg
non-toxic chemicals	9.10E-1	6.47E-1	9.10E-1	6.46E-1	kg
slag	8.12E-1	5.75E-1	7.94E-1	5.64E-1	kg
tailings	6.42E-1	4.86E-1	0	0	kg
lumps of slag	4.48E-1	2.72E-1	0	0	kg
wood	4.37E-1	1.86E-1	4.37E-1	1.86E-1	kg
PVC foam	3.30E-1	2.00E-1	3.30E-1	2.00E-1	kg
epoxy resin	1.72E-1	8.40E-2	1.72E-1	8.40E-2	kg
PUR	6.60E-2	0	6.60E-2	0	kg
industrial waste	6.16E-2	3.99E-2	6.51E-2	4.20E-2	kg
consumed oil	2.99E-2	1.81E-2	0	0	m^3
chemical waste	2.61E-2	1.58E-2	0	0	kg
toxic chemicals	1.40E-2	1.06E-2	1.40E-2	1.06E-2	kg
CaF6	3.05E-3	1.66E-3	2.91E-3	1.58E-3	kg
Hg	9.09E-5	6.31E-5	7.91E-5	5.59E-5	kg
high act.nucl. waste	4.66E-5	2.53E-5	4.44E-5	2.40E-5	m^3
low,med.act.nucl.waste	1.14E-5	6.23E-6	1.09E-5	5.91E-6	m^3

[1] Stortafval.
[2] Vaste afvalstroom van staal tijdens produktiefase is verwaarloosbaar.

BIJLAGE C. WEEGFACTOREN

In tabel C.1 worden de weegfactoren, welke worden toegepast op de milieu-ingrepen in de levenscyclusanalyses van de windturbines, per milieuthema weergegeven. De (engelstalige) data in deze bijlage zijn afkomstig uit het software-pakket SimaPro 2.1.

Tabel C.1 *Weegfactoren toegepast op de milieu-ingrepen in de levenscyclusanalyses van de windturbines per milieuthema*

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Energiegebruik			**MJ**
Raw material	barrage water	kg	9.000E-3
Raw material	coal	kg	2.930E+1
Raw material	lignite	kg	1.000E+1
Raw material	natural gas	m^3	3.165E+1
Raw material	oil	kg	4.186E+1
Raw material	unspecified energy	MJ	1.000E+0
Raw material	uranium ore	kg	1.080E+3
Uitputting			**1.10^{12}/voorraad**
Raw material	bauxite ore	kg	3.600E-2
Raw material	boron oxide (B2O3)	kg	1.600E+0
Raw material	cobalt	kg	1.140E+2
Raw material	copper ore	kg	1.700E+0
Raw material	iron ore	kg	4.300E-3
Raw material	steel	kg	6.000E-3
Broeikaseffect			**GWP[1] 100**
Airborne emission	CO2	kg	1.000E+0
Airborne emission	methane	kg	1.100E+1
Airborne emission	methylene chloride	kg	1.500E+1
Airborne emission	N2O	kg	2.700E+2
Verzuring			**AP[1]**
Airborne emission	formic acid (HCO2H)	kg	1.000E+0
Airborne emission	HCl	kg	8.800E-1
Airborne emission	HCN	kg	1.190E+0
Airborne emission	HF	kg	1.600E+0
Airborne emission	NH3	kg	1.880E+0
Airborne emission	NOx	kg	7.000E-1
Airborne emission	phenol	kg	3.400E-1
Airborne emission	phosphoric acid (H3PO4)	kg	9.800E-1
Airborne emission	SO2	kg	1.000E+0
Airborne emission	SOx	kg	1.000E+0

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Vast afval			**kg**
Solid emission	CaF6	kg	1.000E+0
Solid emission	chemical waste	kg	1.000E+0
Solid emission	concrete (armoured)	kg	1.000E+0
Solid emission	copper	kg	1.000E+0
Solid emission	epoxy resin	kg	1.000E+0
Solid emission	fiber E-glass	kg	1.000E+0
Solid emission	fly ash	kg	1.000E+0
Solid emission	glass	kg	1.000E+0
Solid emission	Hg	kg	1.000E+0
Solid emission	industrial waste	kg	1.000E+0
Solid emission	lumps of slag	kg	1.000E+0
Solid emission	mineral waste	kg	1.000E+0
Solid emission	non-toxic chemicals	kg	1.000E+0
Solid emission	polyester GRP	kg	1.000E+0
Solid emission	polyester resin	kg	1.000E+0
Solid emission	PUR	kg	1.000E+0
Solid emission	PVC foam	kg	1.000E+0
Solid emission	rubber	kg	1.000E+0
Solid emission	secondary suction dust	kg	1.000E+0
Solid emission	slag	kg	1.000E+0
Solid emission	slime	kg	1.000E+0
Solid emission	steel	kg	1.000E+0
Solid emission	toxic chemicals	kg	1.000E+0
Solid emission	turbine blade	kg	1.000E+0
Solid emission	turbine mould	kg	1.000E+0
Solid emission	unspecified waste	kg	1.000E+0
Solid emission	wood	kg	1.000E+0
Solid emission	zinc-rich residue	kg	1.000E+0
Vermesting			**NP[1]**
Airborne emission	HCN	kg	2.300E-1
Airborne emission	NOx	kg	1.300E-1
Airborne emission	phosphoric acid (H3PO4)	kg	1.000E+0
Waterborne emission	ammonium ions	kg	3.300E-1
Waterborne emission	COD	kg	2.200E-2
Waterborne emission	di-amine (R1R2NH)	kg	6.000E-2
Waterborne emission	Kjeldahl-N	kg	4.200E-1
Waterborne emission	NH3	kg	3.300E-1
Waterborne emission	nitrate	kg	4.200E-1
Waterborne emission	phosphate	kg	1.000E+0
Oxidantia			**POCP[1]**
Airborne emission	acetone	kg	1.780E-1
Airborne emission	alcohols	kg	1.960E-1
Airborne emission	aldehydes	kg	4.430E-1
Airborne emission	benzene	kg	1.890E-1
Airborne emission	benzo(a)pyrene	kg	7.610E-1
Airborne emission	crude oil	kg	3.770E-1
Airborne emission	CxHy	kg	3.770E-1
Airborne emission	CxHy aliphatic	kg	3.980E-1
Airborne emission	CxHy aromatic	kg	7.610E-1
Airborne emission	CxHy chloro	kg	2.100E-2
Airborne emission	dioctyl phthalate (DOP)	kg	7.610E-1
Airborne emission	epichlorohydrin	kg	2.100E-2
Airborne emission	ethylene glycol	kg	1.960E-1
Airborne emission	ethylene oxide	kg	3.770E-1
Airborne emission	fluoranthene	kg	7.610E-1
Airborne emission	formaldehyde (H2CO)	kg	4.210E-1
Airborne emission	formic acid (HCO2H)	kg	3.770E-1
Airborne emission	methane	kg	7.000E-3

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Airborne emission	methyl ethyl ketone	kg	4.730E-1
Airborne emission	methylene chloride	kg	1.000E-2
Airborne emission	phenol	kg	7.610E-1
Airborne emission	styrene	kg	7.610E-1
Airborne emission	toluene	kg	5.630E-1
Airborne emission	VOC	kg	3.770E-1
Humane toxiciteit			**HCL/HCW/HCB[1]**
Airborne emission	acetone	kg	2.200E-2
Airborne emission	Al	kg	3.300E+0
Airborne emission	alcohols	kg	1.100E-2
Airborne emission	aldehydes	kg	3.400E-1
Airborne emission	arsenic (As)	kg	4.700E+3
Airborne emission	benzene	kg	3.900E+0
Airborne emission	benzo(a)pyrene	kg	1.700E+1
Airborne emission	borium oxide (B2O3)	kg	3.300E+0
Airborne emission	Ca	kg	3.300E-2
Airborne emission	Cd	kg	5.800E+2
Airborne emission	Cl	kg	3.300E-2
Airborne emission	Cl2	kg	3.300E-2
Airborne emission	CO	kg	1.200E-2
Airborne emission	CO2	kg	4.000E-5
Airborne emission	cobalt	kg	2.400E+1
Airborne emission	Cr	kg	6.700E+0
Airborne emission	crude oil	kg	7.000E-1
Airborne emission	Cu	kg	2.400E-1
Airborne emission	CxHy	kg	2.200E-2
Airborne emission	CxHy aliphatic	kg	2.200E-2
Airborne emission	CxHy aromatic	kg	3.900E+0
Airborne emission	CxHy chloro	kg	2.400E+0
Airborne emission	dioctyl phthalate (DOP)	kg	1.300E+0
Airborne emission	dust	kg	7.700E-3
Airborne emission	epichlorohydrin	kg	2.500E-2
Airborne emission	ethylene glycol	kg	8.300E-1
Airborne emission	ethylene oxide	kg	2.400E-1
Airborne emission	F	kg	4.800E-1
Airborne emission	Fe	kg	4.200E-2
Airborne emission	fluoranthene	kg	1.700E+0
Airborne emission	formaldehyde (H2CO)	kg	4.000E+1
Airborne emission	formic acid (HCO2H)	kg	6.700E+0
Airborne emission	H2S	kg	7.800E-1
Airborne emission	HCl	kg	3.300E-2
Airborne emission	HCN	kg	6.700E-1
Airborne emission	HF	kg	4.800E-1
Airborne emission	Hg	kg	1.200E+2
Airborne emission	KCl	kg	3.300E-2
Airborne emission	metals	kg	1.200E+2
Airborne emission	methane	kg	2.200E-2
Airborne emission	methyl ethyl ketone	kg	3.700E-2
Airborne emission	methylene chloride	kg	6.900E-2
Airborne emission	Mg	kg	3.300E+0
Airborne emission	Mn	kg	1.200E+2
Airborne emission	N2O	kg	2.000E-2
Airborne emission	NH3	kg	2.000E-2
Airborne emission	Ni	kg	4.700E+2

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Airborne emission	NOx	kg	7.800E-1
Airborne emission	organics (other)	kg	2.200E-2
Airborne emission	Pb	kg	1.600E+2
Airborne emission	phenol	kg	5.600E-1
Airborne emission	phosphoric acid (H3PO4)	kg	2.400E-3
Airborne emission	SO2	kg	1.200E+0
Airborne emission	soot	kg	2.200E-2
Airborne emission	SOx	kg	1.200E+0
Airborne emission	styrene	kg	1.500E-1
Airborne emission	toluene	kg	3.900E-2
Airborne emission	VOC	kg	2.200E-2
Airborne emission	Zn	kg	3.300E-2
Waterborne emission	acid	kg	2.000E-4
Waterborne emission	Ag	kg	5.700E-2
Waterborne emission	ammonium ions	kg	1.700E-3
Waterborne emission	base	kg	2.000E-4
Waterborne emission	BOD	kg	1.600E-3
Waterborne emission	Ca	kg	7.000E-4
Waterborne emission	Cd	kg	2.900E+0
Waterborne emission	Cl	kg	2.900E-3
Waterborne emission	COD	kg	4.000E-4
Waterborne emission	Cr	kg	5.700E-1
Waterborne emission	crude oil	kg	5.700E-2
Waterborne emission	Cu	kg	2.000E-2
Waterborne emission	CxHy	kg	1.900E-3
Waterborne emission	CxHy aromatic	kg	6.600E-1
Waterborne emission	CxHy chloro	kg	2.000E-1
Waterborne emission	di-amine (R1R2NH)	kg	8.000E-4
Waterborne emission	dissolved organics	kg	1.900E-3
Waterborne emission	E-glass polymer coating	kg	1.700E-3
Waterborne emission	F	kg	4.100E-2
Waterborne emission	Fe	kg	3.600E-3
Waterborne emission	formaldehyde (H2CO)	kg	3.100E+0
Waterborne emission	Hg	kg	4.700E+0
Waterborne emission	Kjeldahl-N	kg	8.000E-4
Waterborne emission	mercaptane	kg	1.900E+0
Waterborne emission	metals	kg	3.600E-3
Waterborne emission	Mg	kg	4.100E-3
Waterborne emission	Na	kg	2.100E-3
Waterborne emission	NH3	kg	1.700E-3
Waterborne emission	Ni	kg	5.700E-2
Waterborne emission	nitrate	kg	7.800E-4
Waterborne emission	oil	kg	5.700E-2
Waterborne emission	PAH	kg	1.400E-1
Waterborne emission	Pb	kg	7.900E-1
Waterborne emission	phenol	kg	4.800E-2
Waterborne emission	phosphate	kg	4.100E-5
Waterborne emission	SO4	kg	3.300E-3
Waterborne emission	sulphur	kg	3.300E-3
Waterborne emission	suspended substances	kg	1.700E-3
Waterborne emission	Zn	kg	2.900E-3
Solid emission	consumed oil	m^3	3.850E+1
Solid emission	Hg	kg	1.500E-1
Solid emission	toxic chemicals	kg	1.500E+1
Solid emission	zinc-rich residue	kg	3.500E-3

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Humane toxiciteit (lucht)			1/MAC[1]
Airborne emission	acetone	kg	5.620E+2
Airborne emission	Al	kg	1.000E+5
Airborne emission	alcohols	kg	5.260E+2
Airborne emission	aldehydes	kg	5.560E+3
Airborne emission	arsenic (As)	kg	2.000E+7
Airborne emission	benzene	kg	3.330E+4
Airborne emission	benzo(a)pyrene	kg	5.000E+6
Airborne emission	borium oxide (B2O3)	kg	1.000E+5
Airborne emission	Ca	kg	2.000E+5
Airborne emission	Cd	kg	5.000E+7
Airborne emission	Cl	kg	3.330E+5
Airborne emission	Cl2	kg	3.330E+5
Airborne emission	CO	kg	3.450E+4
Airborne emission	CO2	kg	1.110E+2
Airborne emission	cobalt	kg	2.000E+7
Airborne emission	Cr	kg	2.000E+6
Airborne emission	crude oil	kg	2.000E+5
Airborne emission	Cu	kg	5.000E+6
Airborne emission	CxHy	kg	2.000E+3
Airborne emission	CxHy aliphatic	kg	1.020E+3
Airborne emission	CxHy aromatic	kg	3.330E+4
Airborne emission	CxHy chloro	kg	5.000E+3
Airborne emission	dioctyl phthalate (DOP)	kg	2.000E+5
Airborne emission	dust	kg	1.000E+5
Airborne emission	epichlorohydrin	kg	2.500E+5
Airborne emission	ethylene glycol	kg	3.800E+4
Airborne emission	ethylene oxide	kg	1.110E+4
Airborne emission	F	kg	5.000E+5
Airborne emission	Fe	kg	2.000E+5
Airborne emission	fluoranthene	kg	5.000E+6
Airborne emission	formaldehyde (H2CO)	kg	6.670E+5
Airborne emission	formic acid (HCO2H)	kg	1.110E+5
Airborne emission	H2S	kg	6.670E+4
Airborne emission	HCl	kg	1.430E+5
Airborne emission	HCN	kg	9.090E+4
Airborne emission	HF	kg	5.000E+5
Airborne emission	Hg	kg	2.000E+7
Airborne emission	KCl	kg	5.000E+5
Airborne emission	metals	kg	1.000E+6
Airborne emission	methane	kg	1.020E+3
Airborne emission	methyl ethyl ketone	kg	1.690E+3
Airborne emission	methylene chloride	kg	2.860E+3
Airborne emission	Mg	kg	1.000E+5
Airborne emission	Mn	kg	1.000E+6
Airborne emission	N2O	kg	6.580E+3
Airborne emission	NH3	kg	5.560E+4
Airborne emission	Ni	kg	1.000E+7
Airborne emission	NOx	kg	2.500E+5
Airborne emission	organics (other)	kg	1.000E+3
Airborne emission	Pb	kg	6.670E+6
Airborne emission	phenol	kg	5.260E+4
Airborne emission	phosphoric acid (H3PO4)	kg	1.000E+6
Airborne emission	SO2	kg	2.000E+5
Airborne emission	soot	kg	2.860E+5
Airborne emission	SOx	kg	2.000E+5
Airborne emission	styrene	kg	4.760E+3
Airborne emission	toluene	kg	2.670E+3
Airborne emission	VOC	kg	1.000E+3
Airborne emission	Zn	kg	2.000E+5

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Humane toxiciteit (water)			**1/OvD[1]**
Waterborne emission	acid	kg	1.000E+3
Waterborne emission	Ag	kg	1.000E+5
Waterborne emission	ammonium ions	kg	8.300E+2
Waterborne emission	base	kg	1.000E+3
Waterborne emission	BOD	kg	1.400E+2
Waterborne emission	Ca	kg	1.700E+1
Waterborne emission	Cd	kg	6.700E+5
Waterborne emission	Cl	kg	5.000E+0
Waterborne emission	COD	kg	3.300E+1
Waterborne emission	Cr	kg	2.000E+4
Waterborne emission	crude oil	kg	5.000E+3
Waterborne emission	Cu	kg	2.000E+4
Waterborne emission	CxHy	kg	5.000E+3
Waterborne emission	CxHy aromatic	kg	5.000E+3
Waterborne emission	CxHy chloro	kg	5.000E+3
Waterborne emission	di-amine (R1R2NH)	kg	5.000E+3
Waterborne emission	dissolved organics	kg	5.000E+3
Waterborne emission	dissolved substances	kg	2.000E+1
Waterborne emission	E-glass polymer coating	kg	1.000E+3
Waterborne emission	F	kg	1.000E+3
Waterborne emission	Fe	kg	2.000E+3
Waterborne emission	formaldehyde (H2CO)	kg	5.000E+3
Waterborne emission	Hg	kg	3.300E+6
Waterborne emission	Kjeldahl-N	kg	4.000E+2
Waterborne emission	mercaptane	kg	5.000E+3
Waterborne emission	metals	kg	2.000E+3
Waterborne emission	Mg	kg	5.000E+1
Waterborne emission	Na	kg	8.300E+0
Waterborne emission	NH3	kg	8.300E+2
Waterborne emission	Ni	kg	1.000E+5
Waterborne emission	nitrate	kg	2.000E+1
Waterborne emission	oil	kg	5.000E+3
Waterborne emission	PAH	kg	5.000E+6
Waterborne emission	Pb	kg	3.300E+4
Waterborne emission	phenol	kg	2.000E+5
Waterborne emission	phosphate	kg	5.000E+3
Waterborne emission	SO4	kg	1.000E+1
Waterborne emission	sulphur	kg	1.000E+1
Waterborne emission	suspended substances	kg	2.000E+1
Waterborne emission	Zn	kg	5.000E+3
Humane toxiciteit (bodem)			**HCB[1]**
Solid emission	chemical waste	kg	1.000E+0
Solid emission	consumed oil	m^3	3.850E+1
Solid emission	Hg	kg	1.500E-1
Solid emission	toxic chemicals	kg	1.500E+1
Solid emission	zinc-rich residue	kg	3.500E-3
Ecotoxiciteit (water)			**ECA[1]**
Waterborne emission	Cd	kg	2.000E+2
Waterborne emission	Cr	kg	1.000E+0
Waterborne emission	crude oil	kg	5.000E-2
Waterborne emission	Cu	kg	2.000E+0
Waterborne emission	CxHy	kg	5.000E-2
Waterborne emission	CxHy aromatic	kg	2.900E-2
Waterborne emission	CxHy chloro	kg	9.400E-4
Waterborne emission	Hg	kg	5.000E+2
Waterborne emission	Ni	kg	3.300E-1
Waterborne emission	oil	kg	5.000E-2
Waterborne emission	PAH	kg	6.200E+0
Waterborne emission	Pb	kg	2.000E+0
Waterborne emission	phenol	kg	5.900E+0
Waterborne emission	Zn	kg	3.800E-1

	Milieu-ingreep	Eenheid	Weegfactor
Ecotoxiciteit (bodem)			ECT[1]
Solid emission	chemical waste	kg	5.000E-1
Solid emission	Hg	kg	2.900E+1
Solid emission	toxic chemicals	kg	1.000E+0
Solid emission	zinc-rich residue	kg	1.300E+0

[1] Afkortingen van genoemde weegfactoren. GWP 100: Global Warming Potential met een tijdhorizon van 100 jaar; AP: Acidification Potential; NP: Nutrification Potential; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential; HCL/HCW/HCB: Humaan-toxicologische Classificatiefactoren voor Lucht/Water/Bodem; MAC: Maximale Aanvaarde Concentraties; OvD: Oppervlaktewater bestemd voor Drinkwaterproduktie; ECA/ECT: Ecotoxicologische Classificatiefactoren voor Aquatische/Terrestrische ecosystemen.

BIJLAGE D. NORMALISATIE

In tabel D.1 worden de effectscores van de milieuthema's energiegebruik, uitputting, broeikaseffect, verzuring en vast afval voor de verschillende 300 kW turbines per functionele eenheid en de Nederlandse situatie per jaar [32-34] weergegeven. Tabel D.2 presenteert de effectscores van bovengenoemde milieuthema's voor zowel een 300 kW als een 500 kW turbine waarin elektrostaal wordt toegepast. Met behulp van vergelijking I kunnen genormaliseerde effectscores berekend worden (zie paragraaf 4.3). Deze genormaliseerde waarden van de 300 kW windturbines zijn opgenomen in tabel D.3.

Tabel D.1 *Effectscores van zowel onshore als offshore 300 kW windturbines per functionele eenheid [GWh] en de Nederlandse situatie*

Milieuthema	Eenheid	Onshore	Offshore met betonnen fundering	Offshore met stalen fundering	Nederland
Energiegebruik	GJ	180	240	320	$2.750 \cdot 10^6$
Uitputting[1]	10^3	26	110	110	$110 \cdot 10^6$
Broeikaseffect[2]	ton	10	17	15	$206 \cdot 10^6$
Verzuring[3]	kg	53	92	85	$988 \cdot 10^6$
Vast afval	kg				$1.090 \cdot 10^6$
- produktie	kg	350	560	800	
- inclusief stort[4]	kg	24.000	61.000	1.600	

[1] Dimensieloos als gevolg van de weegfactor (1/voorraad (kg)).
[2] In CO_2-equivalenten (Global Warming Potential 100) [8].
[3] In SO_2-equivalenten (Acidification Potential) [8].
[4] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.

Tabel D.2 *Effectscores van een 300 kW en een 500 kW windturbine waarin elektrostaal wordt toegepast per functionele eenheid [GWh]*

Milieuthema	Eenheid	300 kW onshore turbine	500 kW onshore turbine
Energiegebruik	GJ	140	99
Uitputting[1]	10^3	26	20
Broeikaseffect[2]	kg	11.000	7.500
Verzuring[3]	kg	41	28
Vast afval			
- produktie	kg	120	85
- inclusief stort[4]	kg	23.000	13.000

[1] Dimensieloos als gevolg van de weegfactor (1/voorraad (kg)).
[2] In CO_2-equivalenten (Global Warming Potential 100) [8].
[3] In SO_2-equivalenten (Acidification Potential) [8].
[4] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.

$$\text{Effectscore}_{(\text{genormaliseerd})} = \text{effectscore}_{(\text{turbine})}/\text{effectscore}_{(\text{Nederland})} \times \text{Nederlands elektriciteitsverbruik}/\text{elektriciteitsproduktie}_{(\text{turbine})} \times 100 \quad \text{(I)}$$

waarbij het Nederlandse elektriciteitsverbruik in 1992 en de elektriciteitsproduktie van de turbine per functionele eenheid respectievelijk 79.930 GWh [35] en 1 GWh bedraagt.

Tabel D.3 *Genormaliseerde waarden van zowel onshore als offshore 300 kW windturbines*

Milieuthema	Onshore turbine		Offshore turbine met	
			betonnen fundering	stalen fundering
	(oxystaal)	(elektrostaal)	(oxystaal)	(oxystaal)
Energiegebruik	0,53	0,40	0,69	0,92
Uitputting	1,9	1,9	7,7	7,7
Broeikaseffect	0,39	0,42	0,65	0,57
Verzuring	0,43	0,33	0,75	0,69
Vast afval				
- produktie	0,26	0,087	0,41	0,59
- inclusief stort[1]	17	17	45	1,2

[1] Stort van afgedankte materialen/onderdelen.