

NN31050.84-2

1984-02

stora

Windenergie
op
rioolwaterzuiveringsinrichtingen

1. Mechanische toepassingen

Bibliotheek STOWA

stowa

alleen ter inzage, niet voor uitlening
nagebruik RETOUR s.v.p.

serie: thema

zuiveringstechniek - energie

32/1000 (84.2)



postbus 414, 2280 AK rijswijk
sir winston churchill laan 273

070 - 980.287

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

BIBLIOTHEEK DE HAAFF
Lieveensdalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

2 DEC 2003

Windenergie

op

rioolwaterzuiveringsinrichtingen

1. Mechanische toepassingen

K 170220 / L 170220

STOWA
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 8090
3503 RB Utrecht
tel. 030-321199
fax 030-321766

Publikaties en het publikatieoverzicht
kunt u uitsluitend bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-611188
fax 079-613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.



	Inhoud	I - II
	Ten geleide	III
1	SAMENVATTING	I - 2
2	INLEIDING	3
3	INVENTARISATIE VAN WERKTUIG/WINDTURBINECOMBINATIES	4
4	RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN	5 - 16
4.1	Definities	5
4.2	Uitvoeringsvormen van rioolwaterzuiveringsinrichtingen	5
4.2.1	<i>mechanische zuiveringsinrichtingen</i>	5
4.2.2	<i>biologische zuiveringsinrichtingen</i>	5 - 11
4.2.3	<i>aantal inrichtingen</i>	12
4.2.4	<i>capaciteit van de inrichtingen</i>	12 - 13
4.2.5	<i>werktuigen op de inrichtingen</i>	13 - 16
5	WINDENERGIE	17 - 23
5.1	Een theoretische beschouwing	17 - 19
5.2	Koppeling van windturbine en werktuig	20 - 21
5.3	Elektrische of mechanische koppeling	21 - 22
5.3.1	<i>de elektrische koppeling (parallel aan het net)</i>	21 - 22
5.3.2	<i>de mechanische koppeling</i>	22
5.4	Keuze van het windturbinetype	22 - 23
6	SELECTIE VAN WERKTUIGEN	24
7	TECHNISCHE ASPECTEN VAN DE COMBINATIE WERKTUIG/WINDTURBINE	25 - 36
7.1	Algemeen	25
7.2	Separate werktuig/windturbinecombinaties naast de bestaande werktuigen	25 - 33
7.2.1	<i>pompen</i>	25 - 27
7.2.2	<i>vijzels</i>	28 - 29
7.2.3	<i>punt- en borstelbeluchters</i>	30 - 31
7.2.4	<i>luchtcompressoren (rootsblowers)</i>	32 - 33
7.3	Geïntegreerde eenheid van werktuig/elektromotor/windturbine	33 - 36
8	ECONOMISCHE HAALBAARHEID VAN EEN AANTAL WERKTUIG/WINDTURBINE-COMBINATIES	37 - 47
8.1	Algemeen	37 - 38
8.2	Rootsblower/windturbine als separate eenheid	38 - 41
8.3	Slibretourvijzel/windturbine als separate eenheid	41 - 42
8.4	Rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid	42 - 45
8.5	Borstelbeluchter/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid	45 - 47

9	ELEKTRISCHE KOPPELING VAN WERKTUIG EN WINDTURBINE	48 - 49
10	DE WARMTEMOLEN	50
11	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	51 - 52
	LITERATUUR	53

Ten geleide

De voornaamste toepassingsmogelijkheid van windturbines voor het besparen op primaire energiedragers bij de zuivering van afvalwater lijkt het opwekken van electriciteit.

Onderzoek hieraan wordt uitgevoerd door het zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden met steun van de STORA en het ministerie van Economische Zaken.

In principe kunnen windturbines werktuigen ook direkt mechanisch aandrijven. Het voorliggende rapport behandelt de technische en economische aspecten van de directe koppeling van windturbines aan werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen. Alleen de combinatie rootsblower/electromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid blijkt economisch interessant, bij windcondities zoals die langs de kust gelden.

Het onderzoek* werd uitgevoerd door het Ingenieurs- en Architectenbureau van Hasselt en de Koning B.V., mede in opdracht van het Bureau Energie Onderzoek Projecten (BEOP) van de Stichting Energieonderzoek Nederland (ECN) (in het kader van het nationaal ontwikkelingsprogramma windenergie), dat voor de helft in de kosten participeerde.

De begeleiding werd verzorgd door ir. P.C. Stamperius (voorzitter), ir. H.J. Beurskens, ir. A.A.T. Doppenberg en ir. R.J. Wittebrood.

Rijswijk, januari 1984.

de directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

* De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en
prof.dr. P.G. Fohr, ir. K. Karper, drs. S.P. Klapwijk, ir. A.A. van der Koppel, dr. E.J.M.
Kobus, ir. C.H. Kuggeleijn, ir. J.S. Kuiper, ir. Tj. Meijer, ir. H.M.J. Scheltinga,
dr.ir. D.W. Scholte Ubink, ir. J. van Selm, dra. A.A. Wismeijer (leden)

SAMENVATTING

De moderne windturbines in Nederland worden in hoofdzaak toegepast voor de opwekking van elektriciteit. Een directe mechanische koppeling van moderne windturbines aan werktuigen komt slechts incidenteel voor.

In Nederland zijn momenteel ca. 500 rioolwaterzuiveringsinrichtingen in gebruik. De totale capaciteit van deze inrichtingen bedraagt ca. 21 miljoen inwonerequivalenten. Hiervan bevindt zich 40% in de meest windrijke provincies. De rioolwaterzuiveringsinrichtingen komen in een groot aantal verschillende uitvoeringsvormen voor. Eveneens is een grote verscheidenheid aan werktuigen te constateren. De werktuigen zijn te onderscheiden in werktuigen voor het oppompen van water en/of slib-watermengsels, werktuigen voor het in stand houden van het zuiveringsproces en werktuigen voor algemene bedrijfsdoeleinden.

Het direct mechanisch aandrijven van werktuigen door windturbines is technisch mogelijk. In vergelijking met een elektrische koppeling van werktuig en windturbine heeft een directe mechanische koppeling het voordeel dat geen omzettingsverliezen optreden.

Bij het selecteren van werktuigen die in aanmerking komen voor een directe aandrijving door windturbines is een aantal aspecten van belang. Zo moet het werktuig bij voorkeur het gehele jaar continu en met een voldoende groot vermogen in bedrijf zijn. Daarnaast moet de situering van het werktuig zodanig zijn dat een onbelemmerd windaanbod mogelijk is.

Een windturbine kan als gevolg van het grillige windaanbod niet als enige energiebron de gewenste inzetbaarheid van een werktuig verzorgen. Om het zuiveringsproces ook in "windstille" perioden in stand te houden moet een elektrisch aangedreven werktuig ingeschakeld worden.

Er kan hierbij onderscheid gemaakt worden in een tweetal opstellingsmogelijkheden.

De eerste mogelijkheid is het installeren van een separate werktuig/windturbinecombinatie naast het (de) elektrisch aangedreven werktuig(en). De elektrisch aangedreven werktuigen komen in bedrijf zodra er een tekort aan windenergie optreedt. Een nadeel van deze mogelijkheid is dat geïnvesteerd moet worden in een extra werktuig.

Een andere mogelijkheid is het zodanig mechanisch koppelen van windturbine en elektromotor dat deze combinatie als één aandrijfmotor voor het werktuig kan fungeren. Bij voldoende windaanbod wordt de benodigde energie geleverd door de windturbine; is het windaanbod onvoldoende, dan wordt de benodigde energie geheel of gedeeltelijk geleverd door de elektromotor. Als het opgewekte windturbine-vermogen groter is dan het benodigde werktuigvermogen, fungeert de elektromotor als een asynchrone, parallel aan het net geschakelde generator. Een voordeel van de geïntegreerde eenheid is dat alleen de windturbine additioneel is.

Voor een aantal direct gekoppelde werktuig/windturbinecombinaties en werktuig/elektromotor/windturbinecombinaties is de kostprijs per kWh geleverde mechanische energie berekend.

Deze kWh-prijs moet worden vergeleken met het elektriciteits kWh-tarief van de desbetreffende rioolwaterzuiveringsinrichting, gedeeld door het

rendement van een elektromotor. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een lokatie met een windregime zoals dit voorkomt in Hoek van Holland. De berekende kWh-prijzen voor de aan het werktuig geleverde mechanische energie, zonder rekening te houden met subsidiemogelijkheden geven een volgende beeld:

- rootsblower/windturbine als separate eenheid; de rootsblower is geïnstalleerd in de gondel van de turbine: f 0,38/kWh;
- slibretourvijzel/windturbine als separate eenheid; de slibretourvijzel bevindt zich op de begane grond: f 0,70/kWh;
- rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid; de rootsblower en de elektromotor zijn geïnstalleerd in de gondel van de turbine: f 0,26/kWh;
- borstelbeluchter/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid; de borstelbeluchter en de elektromotor bevinden zich op de begane grond: f 0,41/kWh;
- elektrische koppeling van willekeurig werktuig en windturbine; de asynchrone generator in parallelbedrijf met het laagspanningsnet: f 0,34/kWh.

Uit de berekende kWh-prijzen blijkt de combinatie rootsblower/elektromotor/ windturbine als geïntegreerde eenheid, waarbij de rootsblower en elektromotor zich in de gondel van de turbine bevinden, de meeste perspectieven te bieden. De kWh-prijs van dit ontwerp-concept komt overeen met de uit het kleinverbruikers-elektriciteitsstarief om te rekenen mechanische kWh-prijs.

Voor werktuigen die zich op de begane grond bevinden is het in het algemeen aantrekkelijker de aandrijving te laten geschieden met door de winturbine opgewekte elektriciteit.

Op grond van de resultaten van deze studie verdient het aanbeveling:

- een nadere technische uitwerking van de rootsblower/elektromotor/ windturbine als geïntegreerde eenheid te verrichten;
- de mogelijkheid voor de realisatie van een opstelling van deze combinatie te onderzoeken.

Een gedeelte van de kosten voor de bedrijfsvoering van rioolwaterzuiveringsinrichtingen wordt besteed aan de inkoop van energie.^{9,10}

Deze energie is te onderscheiden in:

- elektrische energie voor de voeding van de aandrijfmotoren van de geïnstalleerde werktuigen;
- brandstoffen, aardgas en/of huisbrandolie, voor de verwarming van gebouwen en/of slibgistingstanks;
- brandstoffen, aardgas en/of huisbrandolie waarmede in combinatie met vrijkomend gistingsgas een warmte/krachtinstallatie in bedrijf wordt gehouden.

Uitgaande van de verwachting dat de kosten voor de inkoop van energie in de toekomst mogelijk zullen stijgen is het zinvol om te bestuderen of de energiebehoeften door toepassing van z.g. alternatieve energiebronnen geheel of gedeeltelijk kunnen worden gedekt.

Eén van deze alternatieve energiebronnen is windenergie.

In deze studie wordt ingegaan op de rechtstreekse koppeling van windturbines aan werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen.

In eerste instantie is geïnteriseerd welke werktuig/turbinecombinaties reeds zijn gerealiseerd. Nagegaan is of deze bestaande combinaties op rioolwaterzuiveringsinrichtingen kunnen worden toegepast.

Vervolgens is een selectie gemaakt van een aantal werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen welke op grond van technische mogelijkheden in aanmerking komen voor de aandrijving met behulp van windturbines.

Voor een aantal werktuig/windturbinecombinaties is tenslotte de kostprijs per geleverde energie-eenheid berekend.

Door middel van een beperkte schriftelijke enquête is informatie verzameld over werktuig/windturbinecombinaties. Hiervoor is contact opgenomen met een aantal leveranciers en producenten van windturbines alsook met bureaus, instellingen en verenigingen die zich bewegen op het gebied van windenergie en de toepassing daarvan. Op grond van de bevindingen, aangevuld met een beperkte literatuurstudie, is het volgende te concluderen:

- in Nederland zijn voor de bemaling van polders kleine windturbines geïnstalleerd, gekoppeld aan centrifugaal- en vijzelpompen alsmede aan tonmolens;⁴
- bij de Technische Hogeschool te Eindhoven, afdeling werktuigbouwkunde, vakgroep Werktuigbouwkundig Ontwerp voor de Procestechiek, is een onderzoek gaande naar de koppeling van vijzelpompen aan windturbines;⁵
- door het bureau Theyse Energieberating is in 1974 een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden tot energiebesparing door het toepassen van windenergie bij de polderbemaling van Nederland;
- door het Imag te Wageningen is als vervolg op een rapportage door het Ingenieurs Bureau Draayer te Noordwijk een onderzoek gaande naar de werking van een zogenaamde warmtemolen. Een prototype van een dergelijke molen is in ontwikkeling bij de firma Bosman te Piershil;
- in Japan zijn warmtemolens gerealiseerd waarbij de warmte met behulp van een hydraulische pomp met smoorkleppen wordt opgewekt;
- in Nederland worden windturbines in hoofdzaak ontworpen en parallel aan het net geïnstalleerd voor de opwekking van elektrische energie. Voor een overzicht van de leveranciers van deze turbines wordt verwezen naar de door het Energieonderzoek Centrum Nederland samengestelde en gepubliceerde adressenlijst.⁵

4 RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN

4.1 Definities

Onderscheiden worden:

- mechanische rioolwaterzuiveringsinrichtingen;
- biologische rioolwaterzuiveringsinrichtingen.

Deze worden door het Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater (RIZA) als volgt gedefinieerd:

- mechanische zuiveringsinrichtingen zijn inrichtingen waarin het afvalwater langs mechanische weg wordt ontdaan van bezinkbare bestanddelen;
- biologische zuiveringsinrichtingen zijn inrichtingen waarin afvalwater wordt gereinigd door middel van geforceerde afbraak van organische stoffen met behulp van bacteriën, hetzij bij aanwezigheid (aëroob), dan wel buiten aanwezigheid van zuurstof (anaëroob).

4.2 Uitvoeringsvormen van rioolwaterzuiveringsinrichtingen

4.2.1 *mechanische zuiveringsinrichtingen*

Deze inrichtingen zijn meestal samengesteld uit een afvalwateropvoergemaal, een zandvang, een bezinktank en een slibgistingstank.

Schematisch is deze inrichting weergegeven in fig. 1.

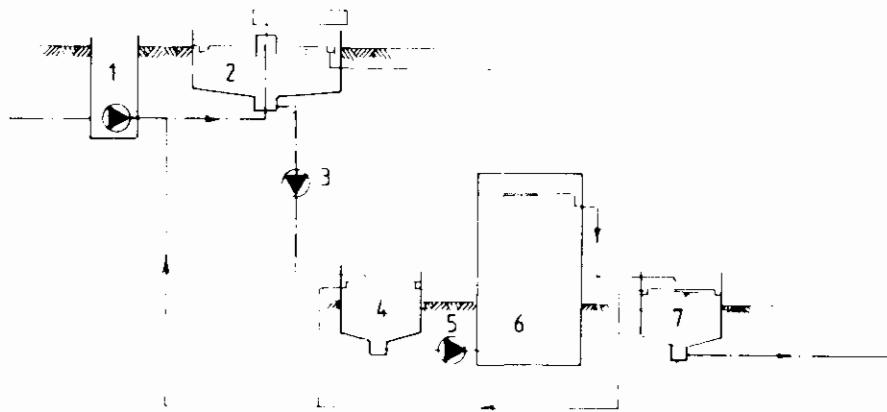
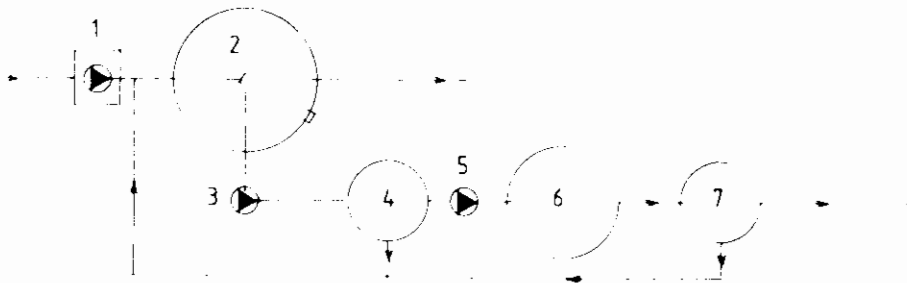
4.2.2 *biologische zuiveringsinrichtingen*

In Nederland zijn vele uitvoeringsvormen van biologische zuiveringsinrichtingen ontwikkeld en gebouwd. Het beschrijven van alle uitvoeringsvormen valt buiten de opzet van deze studie. Nochtans is getracht om onderstaand een grove indeling weer te geven. Daarnaast zijn de meest voorkomende inrichtingen in principe schema's (figuren 2 t/m 8) weergegeven.

Onderscheiden worden inrichtingen met:

- aëratietank(s) en anäerobe slibstabilisatie (gescheiden);
- continue filter(s) idem;
- oxydatiesloot(en) en aërobe slibstabilisatie;
- oxydatie tank(s) idem.

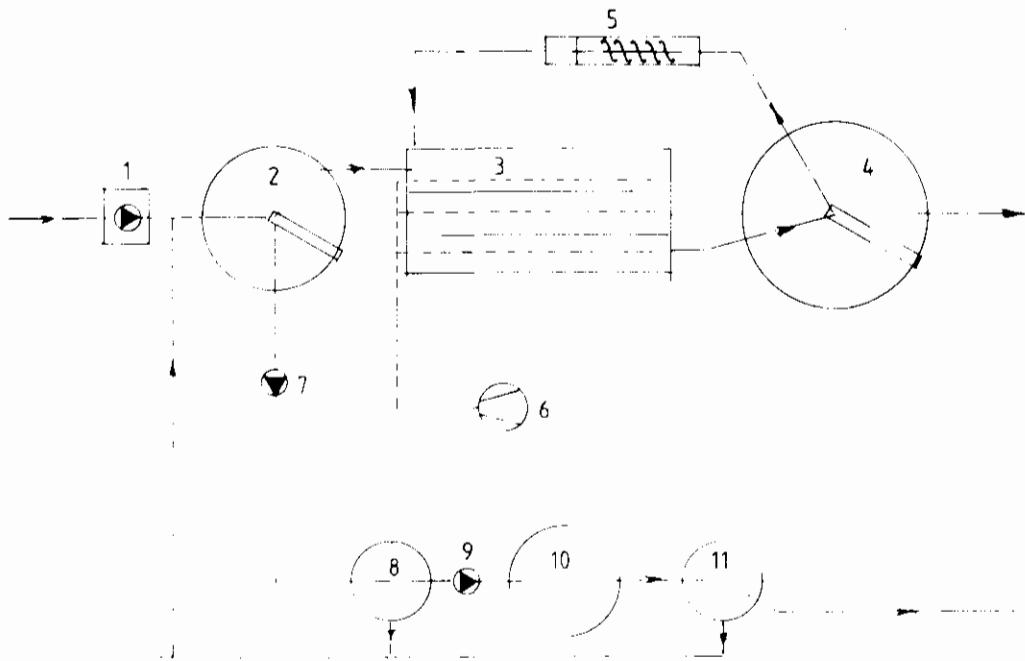
Een nieuwe ontwikkeling is de inrichting waarbij het afvalwater onder anäerobe omstandigheden wordt gereinigd. Deze methode wordt in Nederland tot nu toe alleen toegepast bij industriële zuiveringsinrichtingen.



RENVODI

onderdeel	werktuig
1 ontvangput	pompen
2 voorbezinktank	slibruimer
3	primaarslibpomp
4 voorindiktank	roerwerk
5	ingedikt slibpomp
6 slibgistingstank	
7 naindiktank	roerwerk

Fig. 1. Mechanische zuivering met gescheiden slibstabilisatie



RENOVOOI

onderdeel	werktuig
1 ontvangput	pompen
2 voorbezinktank	slibruimer
3 beluchtingsbak	
4 nabezinktank	slibruimer
5 slibrétourvijzel	vijzel
6	luchtcompressor
7	primaïrslibpomp
8 voorindiktank	roerwerk
9	ingedikt slibpomp
10 naïndiktank	roerwerk

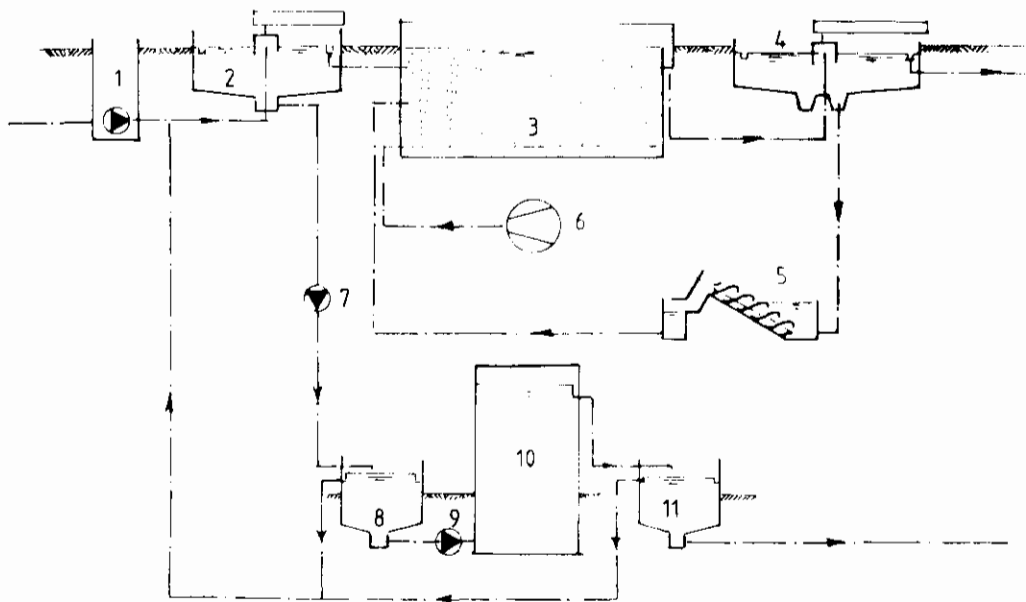
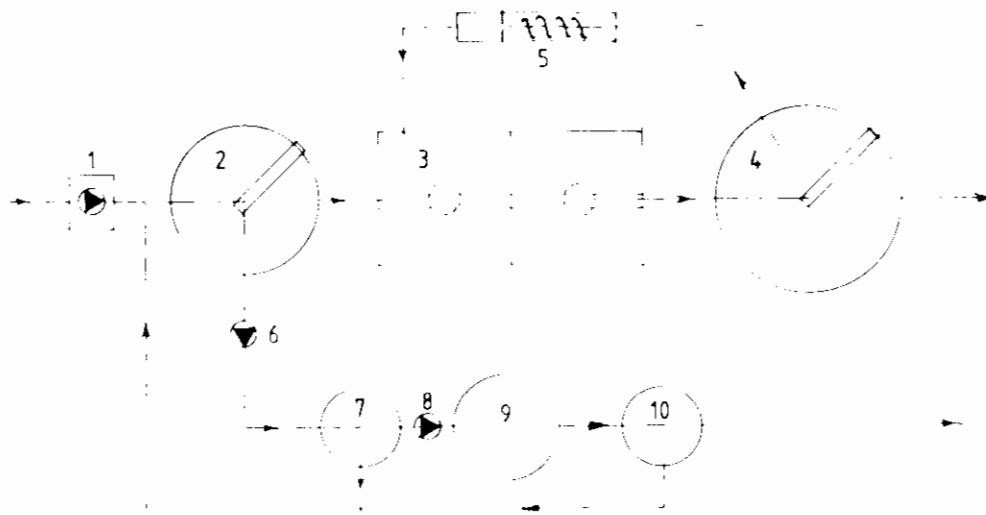


Fig. 2. Aëratietank met gescheiden slibinstallatie (bellenbeluchting)



RENVOOI

onderdeel	werktuig
1 ontvangput	pompen
2 voorbezinktank	slibruimer
3 beluchtingsbak	puntbeluchters
4 nabezinktank	slibruimer
5 slibretourvijzel	vijzel
6 primairslibpomp	primairslibpomp
7 voorindiktank	roerwerk
8	ingedikt slibpomp
9 slibgistingstank	roerwerk
10 naandiktank	roerwerk

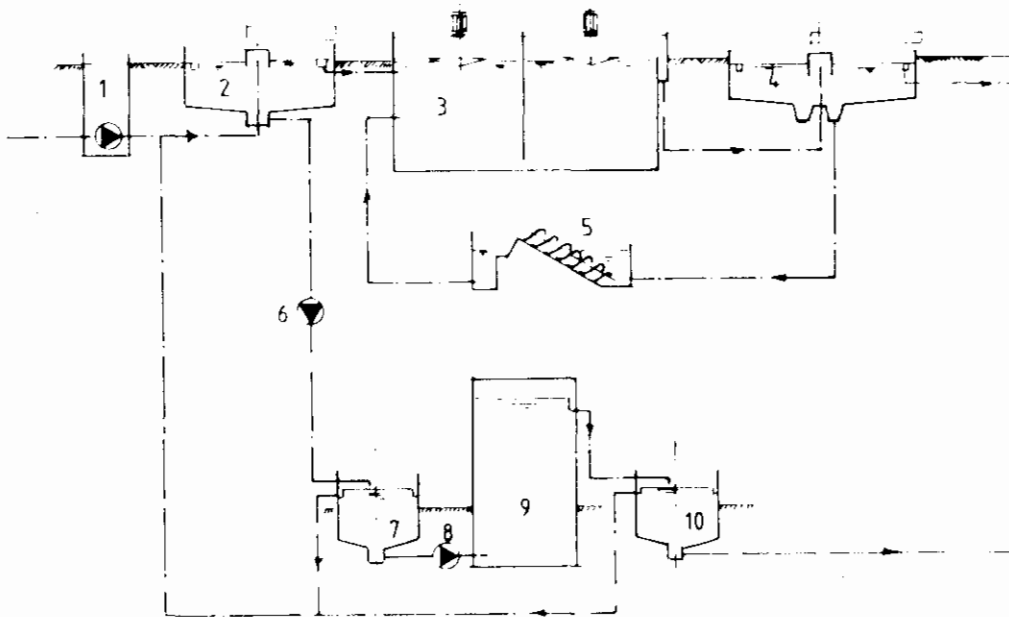
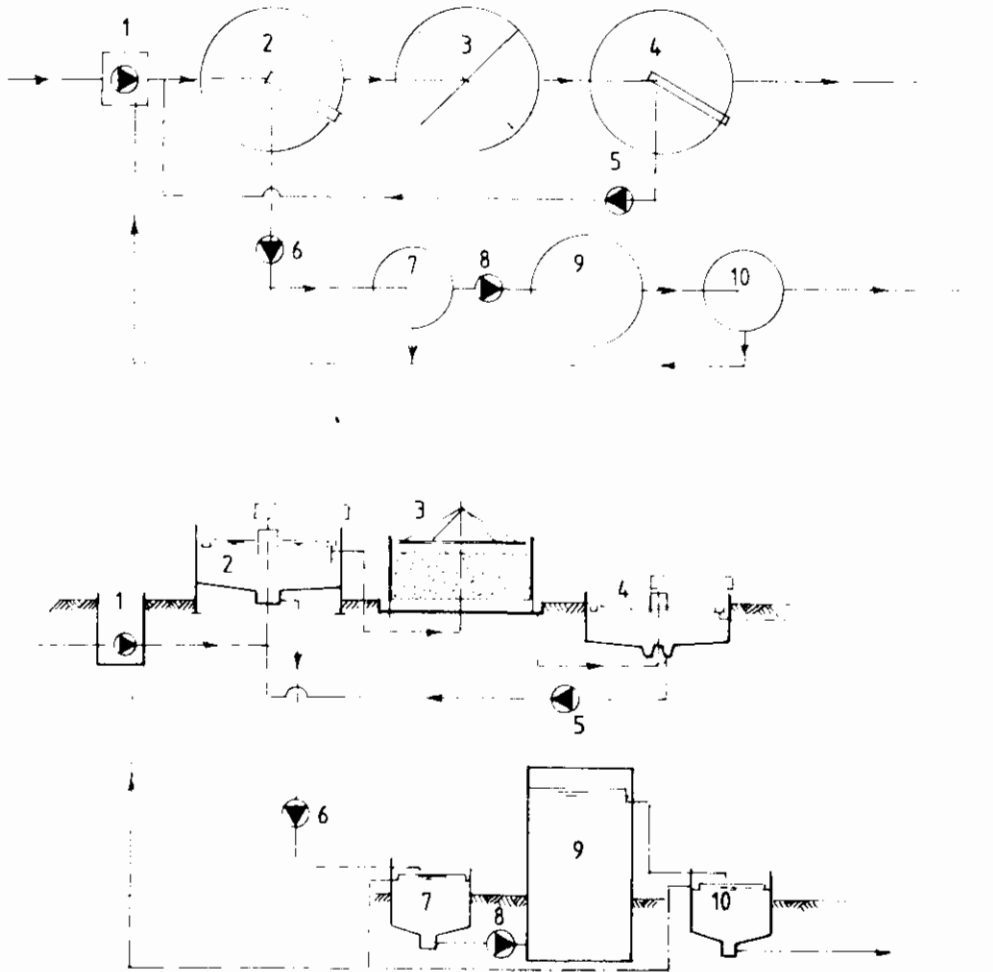


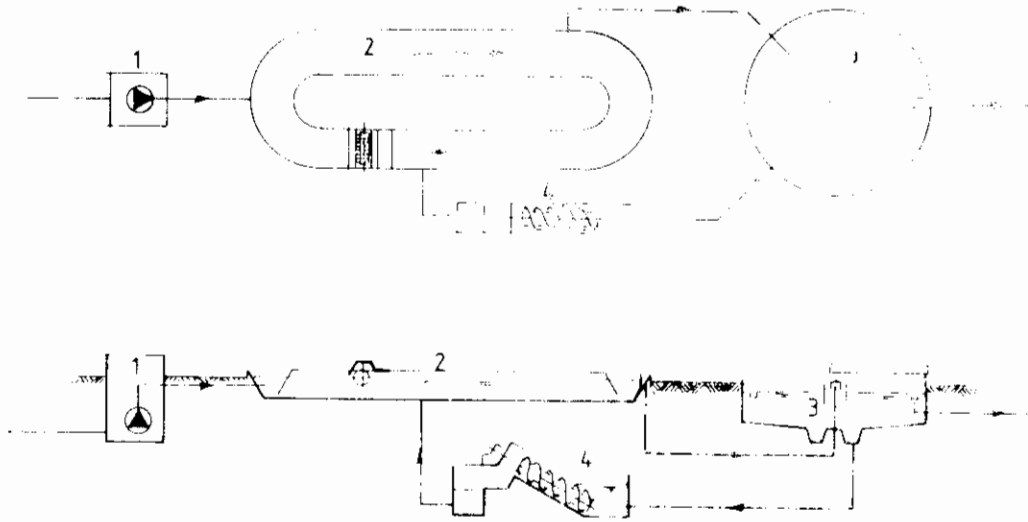
Fig. 3. Aëratietank met gescheiden slibinstallatie (puntbeluchting)



RENVOOI

- | onderdeel | werktuig |
|--------------------|-------------------|
| 1 ontvangput | pompen |
| 2 voorbezinktank | slibruimer |
| 3 oxydatiebed | sproeier |
| 4 nabezinktank | slibruimer |
| 5 | slibpomp |
| 6 | primaïrslibpomp |
| 7 voorindiktank | roerwerk |
| 8 | ingedikt slibpomp |
| 9 slibgistingstank | |
| 10 naindiktank | roerwerk |

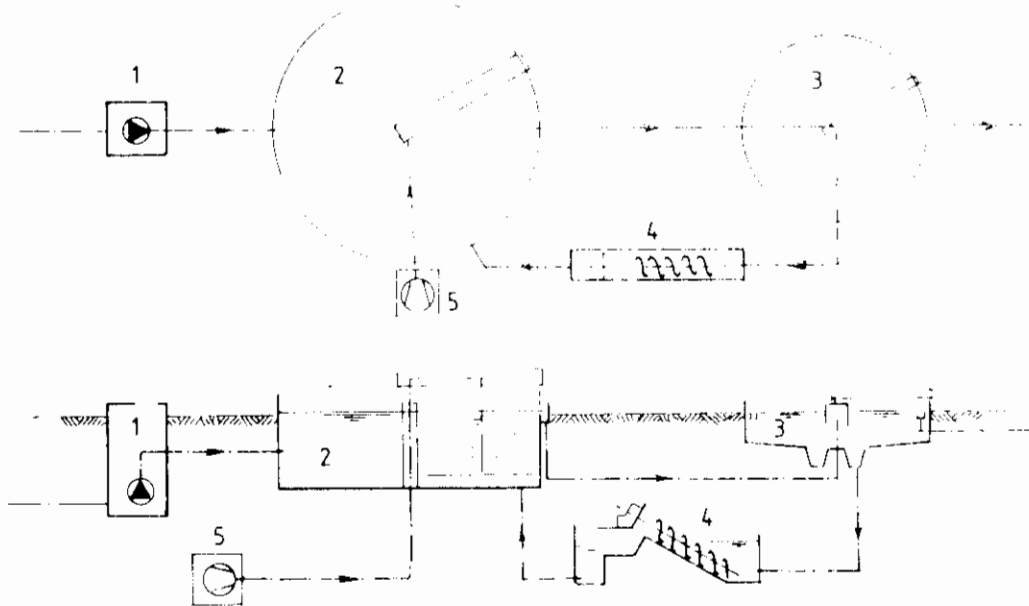
Fig. 4. Oxydatiebed met gescheiden slibinstallatie



RENVOOI

<u>onderdeel</u>	<u>werktuig</u>
1 ontvangput	pompen
2 oxydatiesloot	beluchtingsrotor
3 nabezinktank	slibruimer
4 slibretourvijzel	vijzel

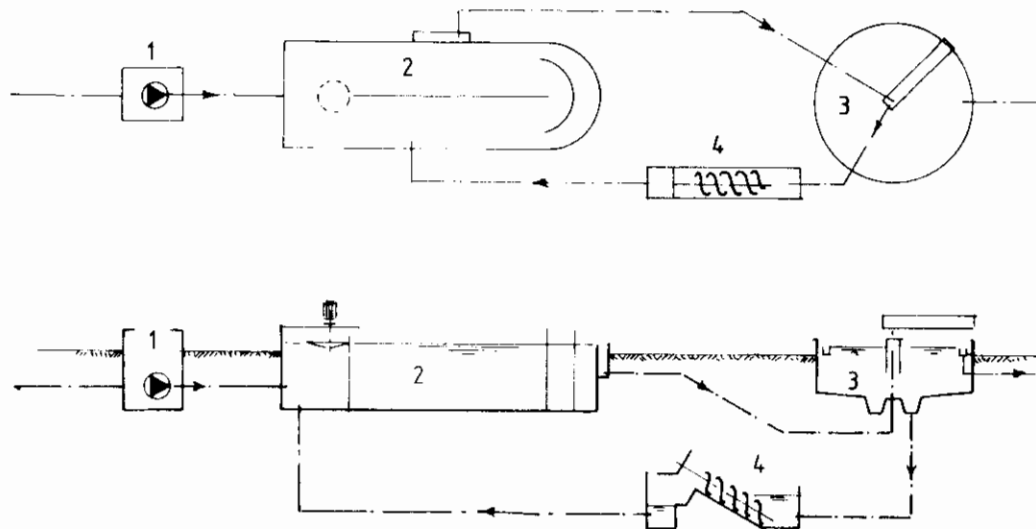
Fig. 5. Oxydatiesloot (Pasveer)



RENVOOI

<u>onderdeel</u>	<u>werktuig</u>
1 ontvangput	pompen
2 beluchtingstank	beluchtingsbrug
3 nabezinktank	slibruimer
4 slibretourvijzel	vijzel
5	luchtcompressor

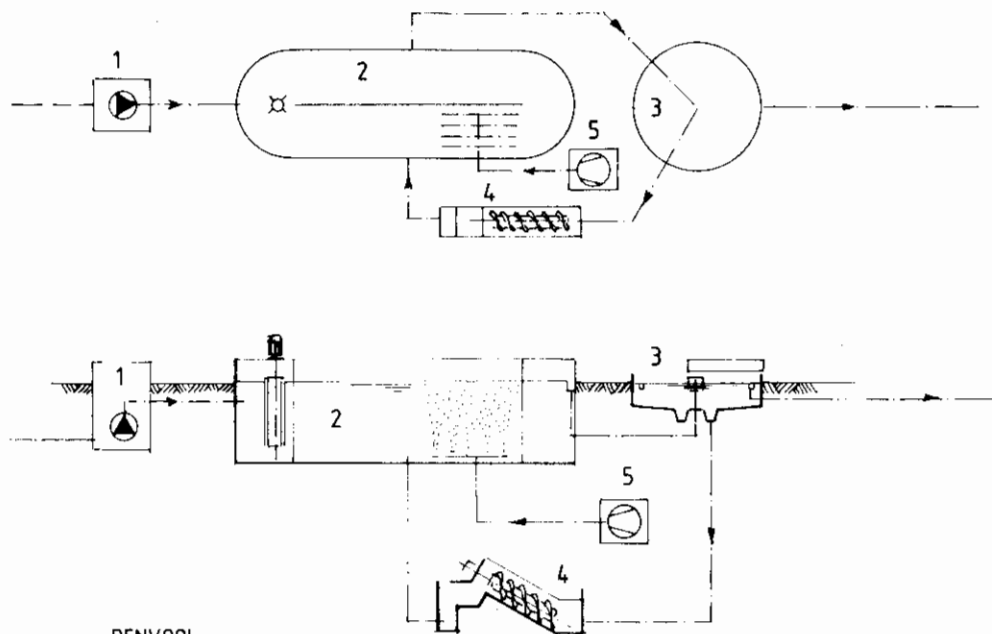
Fig. 6. Oxydatietank (Schreiber)



RENV001

onderdeel	werktuig
1 ontvangput	pompen
2 oxydatiesloot	puntbeluchter
3 nabezinktank	slibruimer
4 slibretourvijzel	vijzel

Fig. 7. Oxydatiesloot (Carrousel)



RENV001

onderdeel	werktuig
1 ontvangput	pompen
2 oxydatiesloot	roerder
3 nabezinktank	slibruimer
4 slibretourvijzel	vijzel
5	luchtcompressor

Fig. 8. Oxydatiesloot (Ladox)

4.2.3 aantal inrichtingen

Conform een opgave van het RIZA waren op 1 januari 1983 499 rioolwaterzuiveringsinrichtingen in gebruik.

Dit aantal is te verdelen in:

- 39 stuks mechanische inrichtingen
- 460 stuks biologische inrichtingen

Per provincie zijn deze als volgt verdeeld:

provincie	mechanisch	biologisch	capaciteit totaal (i.e.)
Groningen	2	32	705.620
Friesland		31	856.600
Drenthe		31	700.200
Overijssel	4	51	2.650.650
Gelderland	4	67	2.671.450
Utrecht	1	34	1.426.150
Zuid-Holland	16	112	3.702.108
Noord-Holland	1	20	3.591.100
Zeeland	7	24	211.450
Brabant	4	39	3.968.600
Limburg		19	1.146.450

Tabel 1. Capaciteit van rioolwaterzuiveringsinrichtingen uitgedrukt in inwonerequivalenten per provincie.

Uit het bovenstaande overzicht blijkt dat in de meest windrijke provincies Friesland, Noord- en Zuid-Holland en Zeeland, 24 mechanische en 187 biologische rioolwaterzuiveringsinrichtingen gesitueerd zijn. De totale capaciteit van deze inrichtingen bedraagt 8.361.258 inwonerequivalenten (i.e.), hetgeen overeenkomt met 40% van de totale landelijke capaciteit. Uit de theoretische beschouwing over windenergie (hoofdstuk 5.1) zal de grote invloed blijken van de windsnelheid op de energielevering door windturbines.

4.2.4 capaciteit van de inrichtingen

De capaciteit van een rioolwaterzuiveringsinrichting wordt bepaald met behulp van het aantal toegevoerde inwonerequivalenten.

Onder een inwonerequivalent wordt een hoeveelheid vervuiling verstaan waarvan bij biologische afbraak de zuurstofbehoefte overeenkomt met die veroorzaakt door één inwoner. Deze zuurstofbehoefte is vastgelegd op 54 gram zuurstof per etmaal.

De capaciteiten van de gerealiseerde rioolwaterzuiveringsinrichtingen zijn zeer verschillend en liggen grofweg voor de biologische inrichtingen tussen 160 i.e. en 750.000 i.e., terwijl mechanische inrichtingen zijn gerealiseerd voor capaciteiten tussen 200 i.e. en 1.400.000 i.e.

4.2.5 *werktuigen op de inrichtingen*

Voor de behandeling van het afvalwater in de zuiveringsinrichtingen is een groot scala van werktuigen geïnstalleerd.

Deze werktuigen zijn te onderscheiden in werktuigen voor het oppompen van water en of slib/watermengsel en werktuigen voor het in stand houden van de zuiveringsprocessen.

Daarnaast worden werktuigen geïnstalleerd voor algemene bedrijfsdoel-einden (o.a. schoonmaken, verwarming gebouwen e.d) en voor de ontwatering van bij de zuiveringsprocessen ontstane sliboverschotten.

Om een indruk te geven omtrent het aantal en de verscheidenheid van de werktuigen zijn in tabel 2 van een aantal gerealiseerde inrichtingen de geïnstalleerde werktuigen weergegeven.

inrichting type	aantal i.e.	opvoer werktuig	vermogen kW	bedrijfstijd	lokatie	proces werktuig	vermogen kW	bedrijfstijd	lokatie	algemeen werktuig	vermogen kW	bedrijfstijd	lokatie	opgesteld vermogen kW (totaal)
oxydatie-sloot (Pasveer)	2500	vijzel	2,2	discont.	bu	beluchtingsrotor	11	continu	bu	bufferpress	1	discont.	bi	19
		slibre-tour-vijzel slibpomp	1,80 2	continu discont.	bu bi					verwarming	1	discont.	bi	
oxydatie-sloot (Pasveer)	8520	vijzel	3,0	discont.	bu	beluchtingsretoren	2x5,5 2x4,5	continu	bu	diversen (6 motoren)	10	discont.	bi	33
oxydatie-bassin	12500	opveerpompen slibre-tour-vijzel slibpomp	3x5 1,5 3	discont. continu discont.	bi bu bi	luchtcom-presseren	3x15	2 continu 1 discont.	bi	snijroesters zandvang	1,1 2x1,1	continu continu	bu bu	80
		terrein-waterpompen hogedruk-pomp	2x3 11	discont. discont.	bi bi					reerwerk in-diktank verwarming	0,25 ca. 3	continu discont.	bu bi	
				discont.	bi					lenspomp	1,1	discont.	bi	

Tabel 2. Overzicht van geïnstalleerde werktuigen op enkele typen zuiveringsinrichtingen

bi = binnen in gebouw
bu = buiten

inrichting type	aantal i.e.	opvoer werktuig	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	proces werktuig	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	algemeen werktuigen	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	opgesteld vermogen kW (totaal)
oxydatie-bassin met slibontwatering		slibpompen	2x4	discont.	bi					versnijders	2x5,5	discont.	bi	
		slibpomp hogedruk-pomp	22 55	discont.	bi bi	21 motoren	24	discont.	bi	roerwerk transporteur luchtcompressor	1x2 1x18,5 1x5,5 15	discont. discont. discont. discont.	bi bi bi bi	161
oxydatie-sloot (Carrousel)	97000	vijsels	2x22 1x36	discont. discont.	bi bi	puntbeluchter	4x73,5	continue	bi	zandvang	1x0,7	continu	bu	
		slibre-tourvijzel hogedruk-pomp slibpomp	2x15 1x11 2x1,5	continu discont. discont.	bu bi bi					roerwerk	1x1,00	continu	bu	
		slibpomp terreinwaterpomp	7,5 2x1,5	discont. discont.	bi bi					roosterr. diversen 7 motoren	2x1,05 15	discont. discont.	bi bi	448

Tabel 2. Overzicht van geïnstalleerde werktuigen op enkele typen zuiveringsinrichtingen (vervolg)

bi = binnen in gebouw
bu = buiten

inrichting type	aantal i.e.	opvoer werktuig	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	proces werktuig	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	algemeen werktuig	vermogen kW	bedrijfs-tijd	lokatie	opgesteld vermogen kW (totaal)	
oxydatie-tank	33000	pompen	3x15	discont.	bi	puntbe-luchters	3x50	continu	bu	zandvang	2x0,5	continu	bu	258	
		slibre-tour-vijzels	2x7	continu	bu						zandwasser	2x2	continu		bu
		terrein-water-pomp	4	discont.	bi						ruimers	2x1,1	continu		bu
		recircu-latie-pomp	5,5	discont.	bi						roerwerken	2x1,1	continu		bu
aëratie tank + slibgisting waterbedrijf	120000	opvoer-pomp	3x22 2x15	discont. discont.	bi	luchtcompr.	4x75	2 continu 2 discont	bi	snijroest. zandvang	2x2,6 2x1,8	continu continu	bu bu	561	
		slibre-tour-vijzel	3x18,5	continu	bu						ruimers roerwerken diverser. (20 motoren)	6x1,5 1,5 90	continu continu		bu bu
Idem slibbedrijf		slib-pompen	2x4	discont.	bi	CV pompen	2x0,7	continu	bi		roerwerk	0,55	continu	bu	107
		slib-koeling	1,1	discont.	bi										
		slib-circu-	2x5,5	continu	bi	gascompr.	25	discont.	bi		diverser (22 motoren)	55	discont.	bi	

Tabel 2. Overzicht van geïnstalleerde werktuigen op enkele typen zuiveringsinrichtingen (vervolg)

bi = binnen in gebouw
bu = buiten

5 WINDENERGIE

5.1 Een theoretische beschouwing

Wind ontstaat door temperatuurverschillen in de atmosfeer en aan het aardoppervlak.²

Het vermogen van de wind voor een "doorstroomd" oppervlak van $A \text{ m}^2$, kan worden berekend met de formule:

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (1)$$

hierin is:

P = het vermogen (watt)

ρ = de soortelijke massa van lucht ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$)

A = het "doorstroomd" oppervlak loodrecht op de windsnelheid (m^2)
ofwel πR^2 .

V = de ongestoorde momentane windsnelheid (m/s)

Om het windenergie-aanbod voor een bepaalde plaats over een jaar vast te stellen wordt vaak gebruik gemaakt van een windsnelheidsfrequentieverdeling, kortweg windregime genoemd. Worden de in deze frequentieverdeling voorkomende windsnelheden in formule (1) ingevuld en vervolgens vermenigvuldigd met het aantal uren dat gedurende deze windsnelheden voorkomen resulteert dit in het jaarlijks energie-aanbod van de wind.

Een windturbine is echter niet in staat het energie-aanbod volledig om te zetten in mechanische energie.

Het omzettingsrendement van het windvermogen in het rotatievermogen van de windturbine-rotor, wordt de vermogenscoëfficiënt (C_p) genoemd. Het rotatievermogen van een windturbine bedraagt:

$$P_r = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (2)$$

De vermogenscoëfficiënt C_p hangt af van de snellopendheid λ . De snellopendheid λ geeft de verhouding van de tipsnelheid van de rotor en de windsnelheid weer en wordt aldus uitgedrukt:

$$\lambda = \frac{\text{tipsnelheid van de rotor}}{\text{de windsnelheid}} = \frac{V_{\text{tip}}}{V_{\text{wind}}} \quad (3)$$

Bij een molen met veel rotorbladen is de vermogenscoëfficiënt maximaal bij een $\lambda = 1$ à 2 , bij een driebladige rotor wordt een optimaal omzettingsrendement bereikt bij een $\lambda = 5$ à 6 .

De theoretische maximale waarde van C_p bedraagt $16/27$ ($0,593$). Dit maximum wordt bereikt indien de wind door de rotor tot $1/3$ van de oorspronkelijke snelheid wordt afgeremd. In de praktijk ligt de maximale C_p voor de meeste molens onder de $0,4$.

In figuur 9 is het verband tussen de snellopendheid en de vermogenscoëfficiënt van verschillende rotortypen weergegeven.

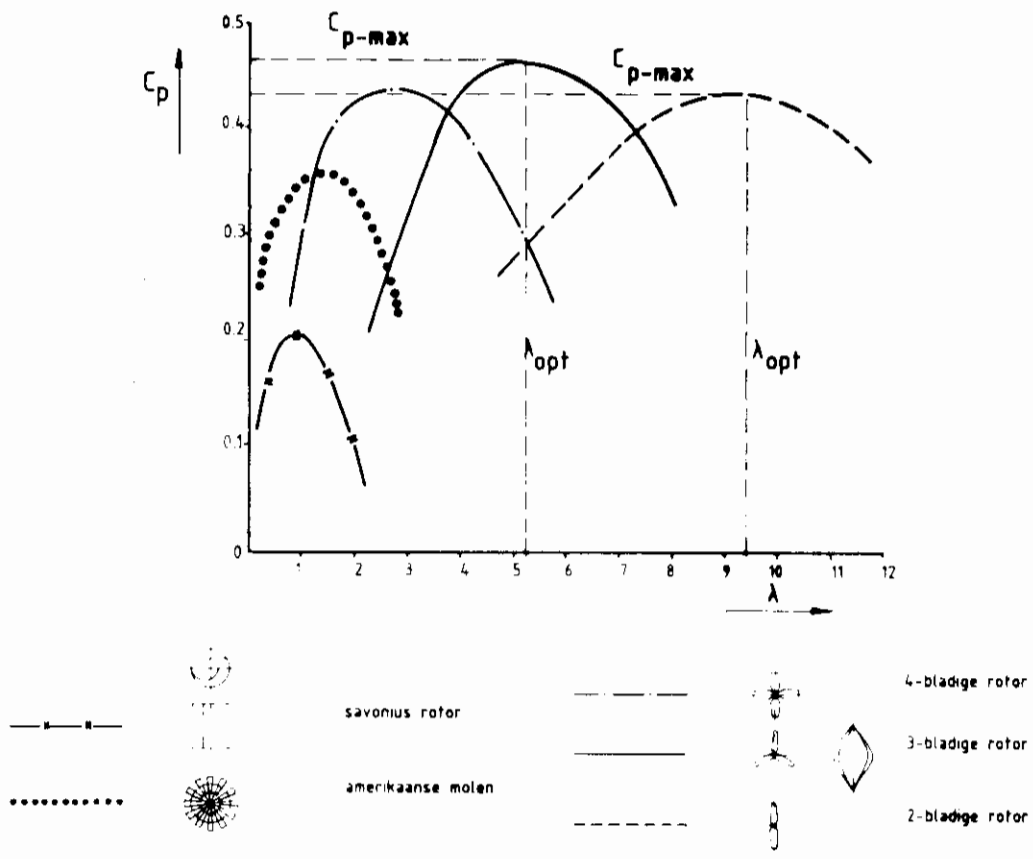


Fig. 9. Verband tussen de snellopendheid λ en de vermogenscoëfficiënt C_p van verschillende rotortypen ⁶

Het moment dat door een windturbine via de rotoras wordt geleverd bedraagt:

$$M = C_m \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \quad (4)$$

hierin is C_m de momentencoëfficiënt, waarvoor geldt:

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (5)$$

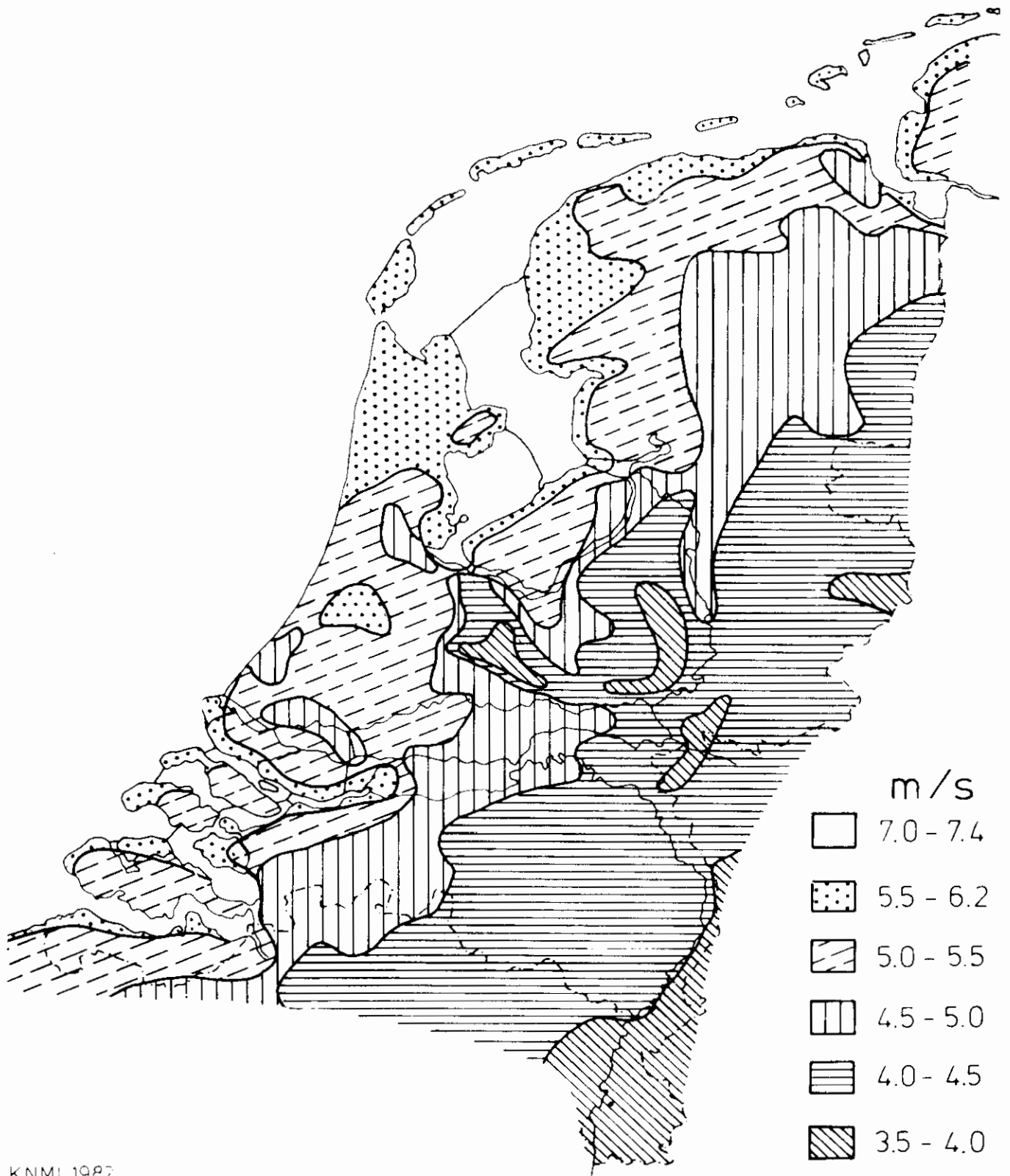
Uit het voorgaande blijkt dat het door de windturbine afgegeven vermogen voor een belangrijk deel wordt bepaald door de windsnelheid. Door het KNMI zijn voor diverse plaatsen in Nederland op een hoogte van 10 m boven het maaiveld windfrequentieverdelingen opgesteld.

In figuur 10 zijn de jaargemiddelde windsnelheden in Nederland in beeld gebracht. Uit de figuur blijkt dat de hoogste windsnelheden worden aangetroffen langs de kustlijn.

Het verband tussen de windsnelheden op verschillende hoogte kan worden weergegeven met de formule: ³

$$V_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha} \cdot V_{10} \quad (6)$$

hierin is: V_h = de windsnelheid op h meter boven maaiveld
 V_{10} = de windsnelheid op 10 meter boven maaiveld
 h = de hoogte van de turbine as
 α = exponent afhankelijk van de ruwheid van het terrein; voor vlak en open terrein bedraagt deze exponent 0,155.



KNMI 1982

Fig. 10. Windkaart van Nederland¹²

5.2 Koppeling van windturbine en werktuig

Indien het gevraagde moment van een werktuig evenredig is met het kwadraat van het toerental (4) en dus het gevraagde vermogen evenredig is met de derde macht van het toerental (2) kan dit, bij een juiste keuze van de transmissieverhouding, resulteren in een optimaal stromingspatroon van de windturbine.

Dit betekent dat voor elke windsnelheid het maximale omzettingsrendement kan worden gehaald. De windturbine, inclusief overbrenging, kan zodanig worden gekozen dat de snellopendheid λ en de vermogenscoëfficiënt C_p optimaal zijn.

Een werktuig, waarvoor dit bij benadering geldt, is een centrifugaal pomp die werkt onder bedrijfsomstandigheden waarbij de statische opvoerhoogte verwaarloosbaar klein is. De vermogenskarakteristiek van een dergelijke pomp komt nagenoeg overeen met de optimale vermogensafgifte-karakteristiek van een windturbine.

In figuur 11 zijn ter illustratie de vermogens-toerenkromme van een driebladige windturbine voor verschillende windsnelheden weergegeven. In de ideale situatie ligt de vermogens-toerenkromme van een werktuig op de streepjeslijn. Het werktuig zorgt ervoor dat de rotor voor elke windsnelheid op het optimale toerental draait en het maximale vermogen levert.

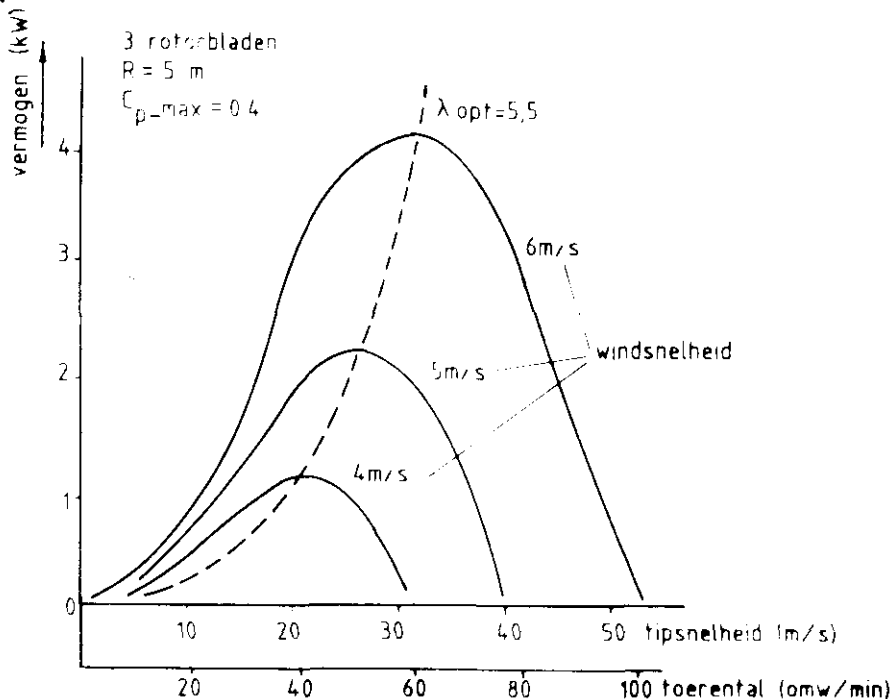


Fig. 11. Vermogen aan de rotor-as als functie van het toerental bij verschillende windsnelheden

Indien het gevraagde moment van een werktuig niet evenredig is met het kwadraat van het toerental wordt de rotor ten opzichte van zijn optimale toerentalen versneld of vertraagd, hetgeen in beide gevallen leidt tot een daling van de vermogenscoëfficiënt. De snellopendheid blijft niet constant; slechts voor één bepaalde windsnelheid zal de snellopendheid en dus de vermogenscoëfficiënt optimaal zijn. Dit geldt bijvoorbeeld bij het aandrijven van werktuigen met een constant moment zoals vijzels en plunjer- of zuigerpompen.

Bij het bepalen van de hoofdafmetingen van een windturbine spelen twee windsnelheden een belangrijke rol, namelijk:

- de windsnelheid V_c ("cut-in windspeed"), waarbij de installatie energie begint te leveren;
- de windsnelheid V_r ("rated windspeed"), waarbij de installatie het nominale vermogen levert.

De keuze van V_c en V_r wordt bepaald in relatie tot het windregime op de turbinelokatie.

Een windturbine, die in relatie tot het aan te drijven werktuig een kleine rotordiameter heeft, levert bij een relatief hoge windsnelheid het gevraagde ontwerpvermogen. De combinatie werktuig/windturbine is dan slechts gedurende een gering aantal uren in bedrijf.

Om een windturbine bij lage windsnelheden reeds het gevraagde ontwerpvermogen van een werktuig te laten leveren, dient een relatief grote diameter te worden gekozen. Het aantal bedrijfsuren, alsmede de besparing op de energiekosten, neemt daardoor toe. De kosten van een dergelijke windturbine zijn uiteraard hoger.

Voor iedere werktuig/windturbinecombinatie en voor elke turbinelokatie is een economisch optimum te bepalen.

5.3 Elektrische of mechanische koppeling

Deze studie beperkt zich in het bijzonder tot het aandrijven van werktuigen door een directe mechanische koppeling aan windturbines. Door een directe aandrijving is het gebruik van windenergie slechts voor een beperkt aantal werktuigen mogelijk.

Het gebruik van windenergie ten behoeve van de elektriciteitsopwekking voor de eigen elektriciteitsvraag kan echter evenzeer een aantrekkelijke optie zijn. In het navolgende worden enkele voor- en nadelen van de elektrische en mechanische koppeling besproken.

5.3.1 *de elektrische koppeling (parallel aan het net)*

Het roterend vermogen van de rotor-as wordt via een versnellingskast, door de generator omgezet in elektrisch vermogen en via een elektromotor aan het werktuig, geleverd.

Voordelen

- de opstellingsmogelijkheid is groot door het eenvoudige transport van elektrische energie;
- de aan te drijven werktuigen, zijn reeds van een elektrische aandrijving voorzien, zodat inpassing in het systeem zonder problemen kan geschieden;
- de eenvoudige verdeling van het geleverde vermogen over meerdere verbruikers;
- bij een te geringe windsnelheid, neemt het bestaande elektriciteitsnet de vermogenslevering automatisch over;
- het teveel aan opgewekte elektriciteit kan aan het openbare net worden teruggeleverd;
- het kruien van de windturbine en het verstellen van de rotorbladen kan elektrisch geschieden.

Nadeel

- de omzetting van mechanische energie in elektrische energie door de generator geschiedt met een rendement van ca. 85%; omzetting van elektrische energie in mechanische energie door de elektromotor geschiedt met een rendement van ca. 85%. Het omzettingsrendement van mechanische energie via elektriciteitsopwekking naar mechanische energie bedraagt daardoor ca. 72%.

5.3.2 *de mechanische koppeling*

Het roterende vermogen van de rotoras wordt direct via een tandwiel-overbrenging doorgegeven aan een (verticale) as die een werktuig aandrijft.

Voordelen

- geen omzettingsverlies van mechanische via elektrische naar mechanische energie;
- de eenvoudige uitvoering, geen generator en de hiermee gepaard gaande aanloop- en beveiligingssystemen.

Nadelen

- beperkt in opstelling, in verband met de mechanische overbrenging naar de verbruikers;
- beperkt in het koppelen van meerdere werktuigen op één windturbine;
- het uitschakelen van de koppeling windturbine/werktuig, teneinde elektriciteit te gaan gebruiken, is een extra complicatie;
- voor werktuigen met constant toerental minder geschikt;
- de opgewekte energie moet intern afgenomen worden.

5.4 Keuze van het windturbinetype

Bij de windturbines kan er onderscheid worden gemaakt tussen:

- windturbines met een horizontale as (HAT);
- windturbines met een verticale as (VAT).

In figuur 12 zijn schematisch beide typen windturbines weergegeven.

In de praktijk haalt een snellopende HAT (minder dan vier rotorbladen) zijn maximale rendement over een breder gebied van de snellopendheid dan de VAT.¹¹ Daarnaast is het een bezwaar dat een VAT in het algemeen niet zelfstartend is; het toepassen van een hulpmiddel of ingewikkeld regelmechanisme is noodzakelijk.

Een voordeel van de VAT, bij directe aandrijving is het feit dat geen haakse tandwieloverbrenging hoeft te worden toegepast om de windenergie om te zetten in roterende energie van de verticale aandrijf-as.

Op grond van de bovengenoemde overwegingen en het feit dat de VAT zich nog min of meer in de ontwikkelingsfase bevindt, wordt in deze studie uitgegaan van horizontale asturbines.

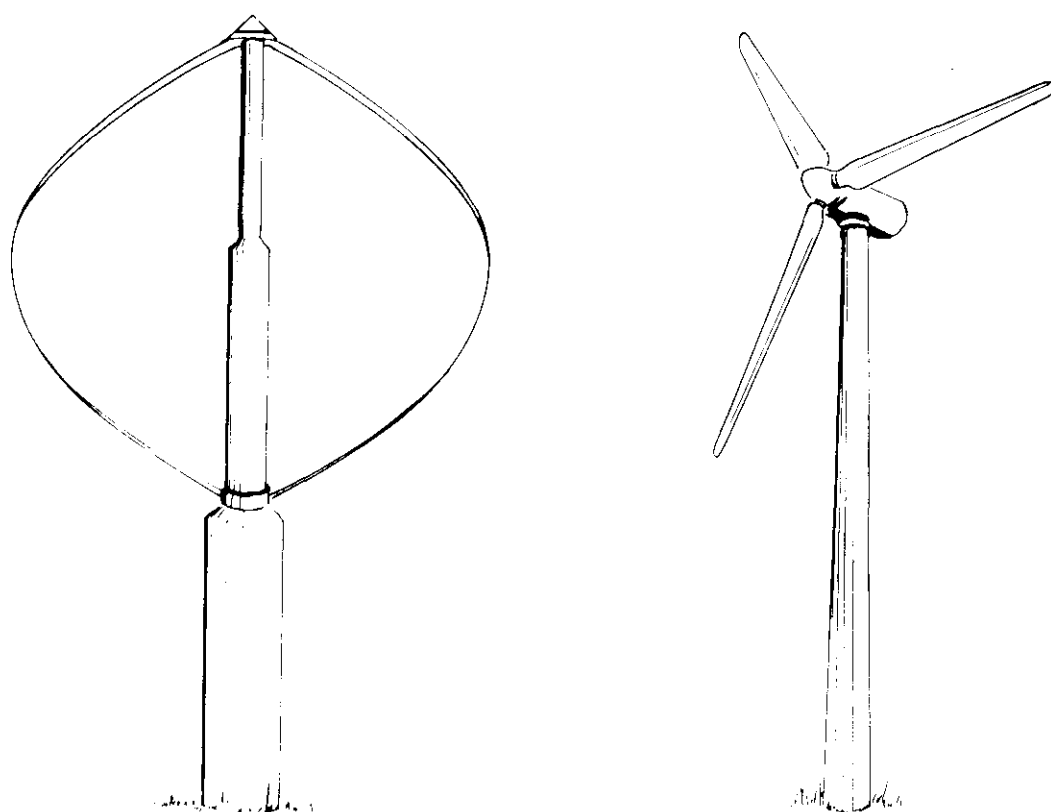


Fig. 12. Windturbine met verticale as (VAT) en horizontale as (HAT)

Bij de selectie van de werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen die in aanmerking komen voor een directe aandrijving door een windturbine is een aantal randvoorwaarden gehanteerd:

- het werktuig moet bij voorkeur het gehele jaar in bedrijf zijn. Bij het aandrijven door een windturbine moet een minimale (continue) vermogensafname door het werktuig gegarandeerd kunnen worden;
- het werktuig moet een voldoende groot ontwerpvermogen (15 kW) hebben. Dit impliceert dat windturbines met een rotordiameter van kleiner dan ruwweg 5 m buiten beschouwing zijn gelaten;
- de lokatie van het werktuig moet zodanig zijn, dat het installeren van een windturbine voor directe aandrijving zonder het maken van extreem hoge kosten mogelijk is. Het werktuig moet dus bij voorkeur vrij en in de buitenlucht zijn opgesteld.

Op grond van deze randvoorwaarden komen de volgende werktuigen voor een directe aandrijving door windturbines het meest in aanmerking:

- opvoerwerktuigen, zoals pompen en vijzels;
- beluchtingswerktuigen, zoals punt- en borstelbeluchters;
- luchtcompressoren.

De bedrijfskarakteristieken (vermogens- en koppeltoerenkrommen) van deze werktuigen moeten bij voorkeur een aandrijving door windturbines voor een gunstig windregime en rendement mogelijk maken. In het navolgende hoofdstuk zal dit aspect alsmede de specifiek technische mogelijkheden en problemen bij een directe aandrijving door windturbines worden besproken.

7 TECHNISCHE ASPECTEN VAN DE COMBINATIE WERKTUIG/WINDTURBINE

7.1 Algemeen

De beschikbaarheid en de bedrijfszekerheid van de diverse werktuigen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen is dermate kritisch dat bij aandrijving door windturbines de wisselvalligheid van het windaanbod niet of slechts in beperkte mate kan worden geaccepteerd. Dit betekent dat bij het aandrijven van een werktuig door een windturbine het bestaande elektrisch aangedreven werktuig moet blijven gehandhaafd om een continue werking van het zuiveringsproces te garanderen. Om dit te realiseren is een tweetal mogelijkheden te onderscheiden.

De eerste mogelijkheid is het installeren van een separate werktuig/windturbinecombinatie naast de elektrisch aangedreven werktuigen. De elektrisch aangedreven werktuigen komen in bedrijf zodra er een tekort aan windenergie optreedt. Een nadeel van deze oplossing is dat geïnvesteerd moet worden in een extra werktuig.

Een andere mogelijkheid is het zodanig koppelen van een windturbine aan een (bestaande) elektromotor dat deze combinatie als één aandrijfmotor voor een werktuig kan fungeren. Staat er voldoende wind, dan wordt de benodigde energie geleverd door de windturbine; is het windaanbod onvoldoende, dan wordt de benodigde energie geheel of gedeeltelijk geleverd door de elektromotor. Bij deze geïntegreerde eenheid dient alleen de windturbine als een additionele voorziening te worden beschouwd.

De technische aspecten van de separate werktuig/windturbinecombinatie en de geïntegreerde eenheid van werktuig/elektromotor/windturbine komen in respectievelijk hoofdstuk 7.2 en 7.3 aan de orde.

7.2 Separate werktuig/windturbinecombinatie naast de bestaande werktuigen

Bij het direct koppelen van windturbines aan werktuigen is het van belang de bedrijfskarakteristieken en belastingpatronen van deze werktuigen te kennen. Het werktuig (inclusief overbrenging) bepaalt immers hoe de windturbine zich bij verschillende windsnelheden zal gedragen.

Van de geselecteerde werktuigen zal worden nagegaan wat de technische mogelijkheden en te verwachten problemen bij een directe aandrijving door windturbines zijn.

7.2.1 *pompen*

Influentpompen, de pompen waarmee het afvalwater in de inrichting wordt gepompt, komen in aanmerking om door windturbines te worden aangedreven. De energie uit wind wordt dan via een haakse tandwieloverbrenging (kegeltandwielkast) doorgegeven aan een verticale as die de pomp aandrijft.

De influentpompen zijn in het algemeen centrifugaalpompen. De vermogenskarakteristiek van een centrifugaalpomp komt, voor het handhaven van een hoog omzettingsrendement redelijk overeen met de optimale vermogens-afgifte-karakteristiek van de windturbine.

Een probleem bij een door een windturbine aangedreven influentpomp vormt echter de vaste statische opvoerhoogte. Bij lage windsnelheden en het daaraan gekoppelde lage toerental van de influentpomp zal de pomp niet in staat zijn deze opvoerhoogte te overwinnen. Het door de windturbine aan de pomp geleverde vermogen wordt dan geheel in warmte omgezet.

Om te voorkomen dat de pomp in die situatie te kort wordt moeten hiervoor voorzieningen worden getroffen. Gedacht kan worden aan het toepassen van een dompelpomp.

Een andere mogelijkheid is de turbine bij voldoende vermogen met behulp van een koppelmechanisme aan de pomp te koppelen. Werktuigbouwkundig is dit mogelijk door toepassing van (gestuurde) hydraulische of elektromagnetische koppelingen.

Door de windturbine uit te voeren met een aërodynamische vermogensregeling door middel van een bladhoekverstellingsmechanisme kan bij hoge windsnelheden het toerental van de influentpomp worden begrensd. In dit geval verdient het de voorkeur de regeling te laten plaatsvinden door bijvoorbeeld centrifugaalgewichten, waardoor geen bekrachtiging en/of sturing uit een elektrisch systeem nodig is.

In figuur 13 zijn ter illustratie de bedrijfspunten bij de verschillende toerentallen van een centrifugaalpompe weergegeven. Hierin is te zien dat bij lage windsnelheden, afhankelijk van rotordiameter, transmissieverhouding e.d., het toerental van de pomp te laag kan zijn ($n < n_{\min}$) om de statische opvoerhoogte te overwinnen.

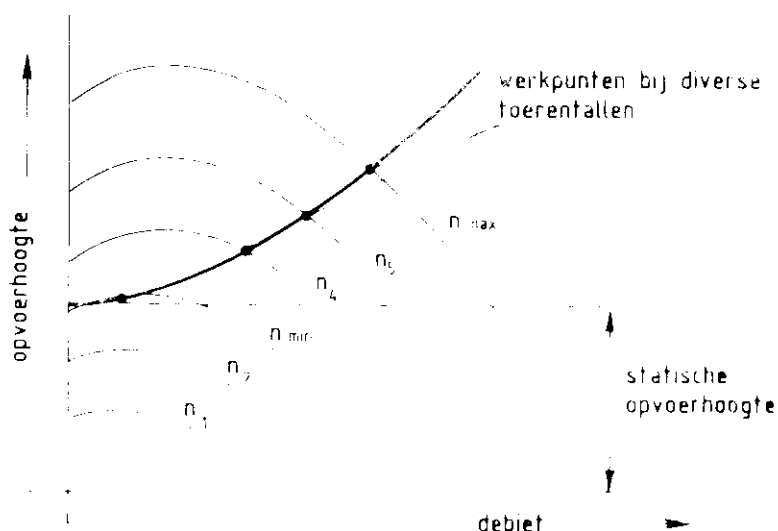


Fig. 13. Bedrijfskarakteristiek van een centrifugaalpompe

Het toepassen van de combinatie influentpomp/windturbine wordt ongunstig beïnvloed door de discontinue toevoer van het afvalwater.

Te onderscheiden hierbij zijn de droogweeraanvoer (dwa) en de regenwateraanvoer (rwa).

De dagelijkse droogweeraanvoer bedraagt ca. 100 l/i.e. gedurende 10 uren.

De aanvoer van het afvalwater gedurende de avond en de nacht (14 uur) is sterk afhankelijk van o.a. de staat van het rioolstelsel, grondwaterstanden e.d. In het algemeen is de aanvoer gedurende deze periode zeer gering.

De maximum regenwateraanvoer komt ca. 200 uren per jaar voor. De regenwateraanvoer is meestal 3 à 5x de droogweeraanvoer. De pompen zijn gedimensioneerd op het maximale debiet tijdens de regenwateraanvoer. Het inschakelen geschiedt met behulp van niveauregelapparatuur.

In figuur 14 is schetsmatig een directe koppeling van een windturbine en een influentpomp weergegeven.

De complete pomp/windturbinecombinatie is hier als een aparte eenheid beschouwd. De elektrisch aangedreven influentpompen springen bij zodra er een tekort aan windenergie optreedt. Het te bereiken voordeel van de opstelling pomp/windturbine is de besparing op de elektriciteitskosten.

Tot slot moet nog rekening worden gehouden met de volgende technische problemen:

- de situering van het influentpompgemaal moet zodanig zijn dat de windturbine voldoende wind vangt. Normaal wordt een dergelijk gemaal gecombineerd met andere onderdelen van de inrichting. Dat wil zeggen, dat voor toepassing van windenergie waarschijnlijk een volledig separaat gemaal moet worden gebouwd;
- afvalwater bevat grove delen, met andere woorden de influentpompen kunnen gemakkelijk "vastslaan" (delen tussen waaier en slijtring). Een mechanische beveiliging, zoals het toepassen van breekpennen of een vloeistofkoppeling met thermische beveiliging is noodzakelijk.

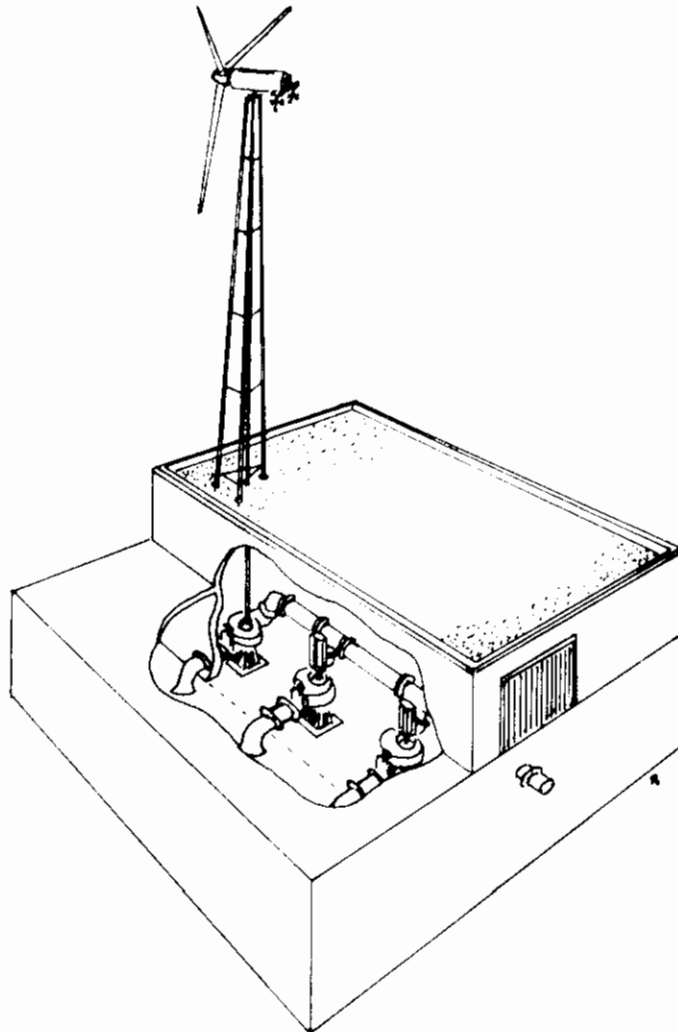


Fig. 14. Directe koppeling van een influentpomp aan een windturbine, geïnstalleerd in parallelbedrijf met elektrisch aangedreven influentpompen

7.2.2 vijzels

Vijzels worden in rioolwaterzuiveringsinrichtingen op diverse plaatsen toegepast als opvoerwerktuig voor influent en retourslib.

Slibretourvijzels zijn het gehele jaar in bedrijf en komen afhankelijk van het type en de grootte van de zuiveringsinrichtingen voor in diverse vermogens, variërend van 3 tot 70 kW. Het gewenste vermogen gedurende de periode van droogweeraanvoer bedraagt voor een gemiddelde installatie 30 à 50% van het nominale vermogen.

De windturbine moet zodanig gedimensioneerd zijn dat het verkregen vermogen bij windsnelheden die vaak voorkomen te allen tijde afgegeven kan worden.

Het toerental van een slibretourvijzel bij levering van de ontwerpcapaciteit bedraagt in het algemeen slechts ca. 40 omw/min. Indien een dergelijke vijzel wordt aangedreven door een moderne windturbine kan met een eenvoudige overbrenging worden volstaan. Een nadeel is echter dat de haakse tandwieloverbrenging in de gondel van de turbine bij dit lage toerental een slecht rendement heeft.

De hoeveelheid opgepompt retourslib wordt bepaald door de windsnelheid. Bij lage windsnelheden zal overeenkomstig het daarbij behorende lage toerental van de vijzel de opbrengst minder zijn. Een tijdelijke meer- of minderlevering van retourslib is binnen zekere grenzen acceptabel.

De bedrijfskarakteristiek van een vijzelpomp is in figuur 15 weergegeven. De hoeveelheid verplaatst influent of retourslib wordt bepaald door het toerental en dus indirect door de windsnelheid.

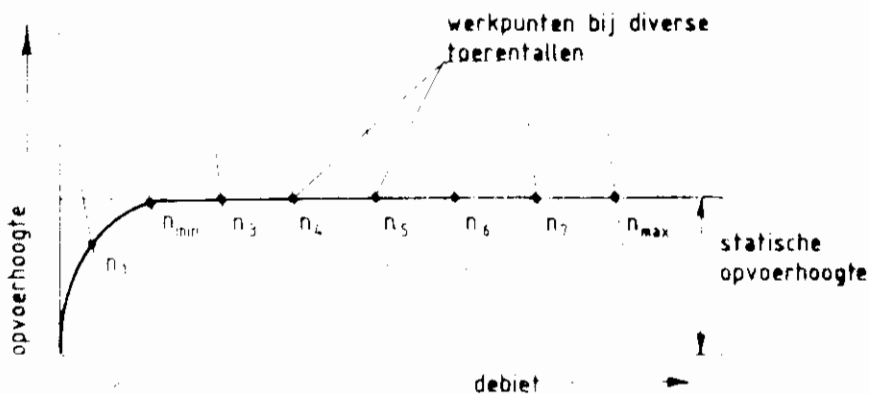


Fig. 15. Bedrijfskarakteristiek van een vijzel

In de figuren 16 en 17 is de koppeling van vijzel en windturbine zichtbaar gemaakt.

Het wisselende windaanbod maakt het ook bij dit concept noodzakelijk een complete windturbine/vijzel combinatie als additionele eenheid te installeren.

Om ook hier bij hoge windsnelheden het vermogen in de hand te houden kan een bladhoekverstelling van de rotorbladen noodzakelijk zijn.

Een voordeel van vijzels in het algemeen is dat deze mogen "droogdraaien".

Bij het koppelen van een windturbine aan een vijzel moet rekening worden gehouden met het feit dat de hoek waaronder de vijzel is gemonteerd nogal verschillend kan zijn, n.l. 28° , 30° of 35° met de horizontaal.

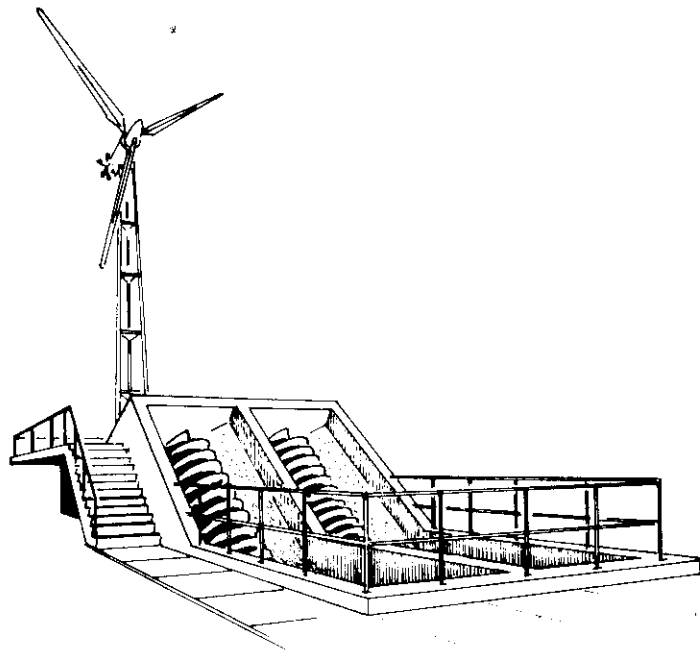


Fig. 16. Situatieschets van een vijzel/windturbinecombinatie geïnstalleerd in parallelbedrijf met een elektrisch aangedreven vijzel

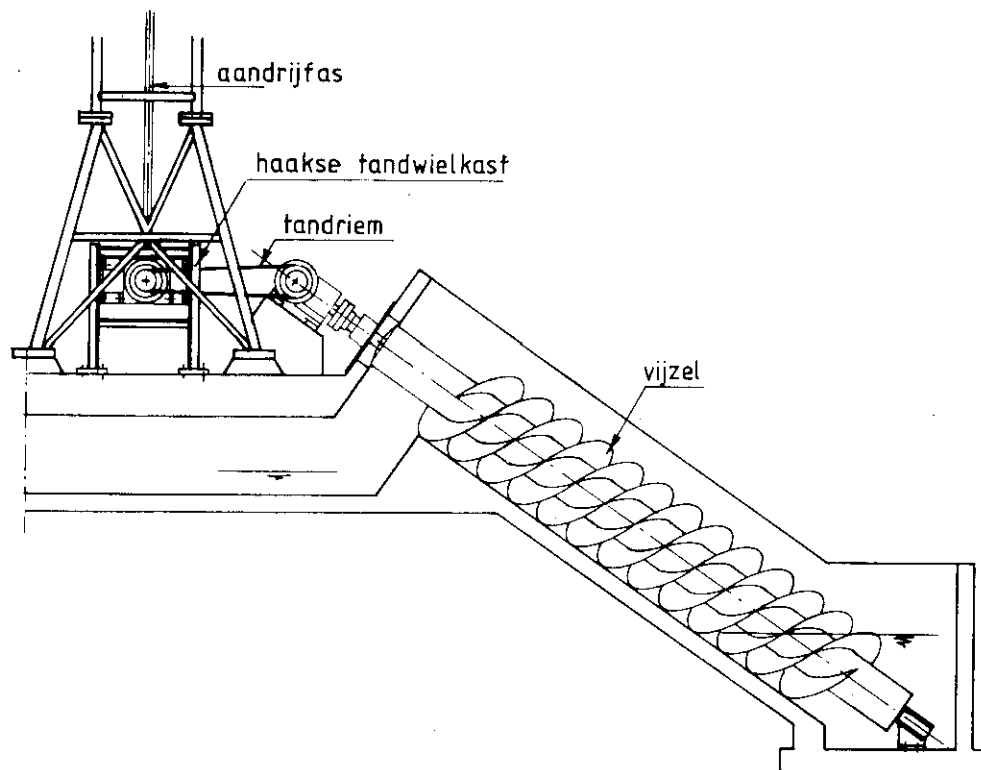


Fig. 17. Detail van de aandrijving

7.2.3 punt- en borstelbeluchters

Deze werktuigen zorgen voor de zuurstofinbreng in en de beweging van het afvalwater. De beluchters zijn het gehele jaar in bedrijf.

De functie van zowel een punt- als borstelbeluchter is tweeledig n.l.:

- het in stand houden van de stroming in het bassin; stroomsnelheid 30 cm/s.;
- het inbrengen van zuurstof in het afvalwater.

Technisch is het mogelijk om de beluchters aan te drijven met een windturbine of een elektromotor.

De zuurstofinbreng wordt geregeld door een verstelling van de indompeldiepte. Dit geschiedt, naar keuze, door verstelling van de overstortrand van het bassin of door het op en neer halen van de beluchter door middel van een verstelmechanisme. Het verbruikte vermogen bij het ontwerp-toerental in hoogste en laagste stand varieert dan tussen de 70 en 100% van het maximale vermogen. De regeling van de indompeldiepte geschiedt op basis van de zuurstofbehoefte van het afvalwater.

Het inbrengen van te veel zuurstof is in het algemeen voor het zuiveringsproces niet bezwaarlijk.

Gezien het wisselende windaanbod zal ook hier het additioneel aandrijven van een beluchter door een elektromotor onvermijdelijk blijven.

De koppel-toerenkrommen van een punt- en borstelbeluchter zijn identiek. In figuur 18 is deze bedrijfskarakteristiek weergegeven. De bedrijfskarakteristiek van de beluchters is, afgezien van het startmoment bij stilstaand rioolwater, voor aandrijving door een windturbine gunstig te noemen.

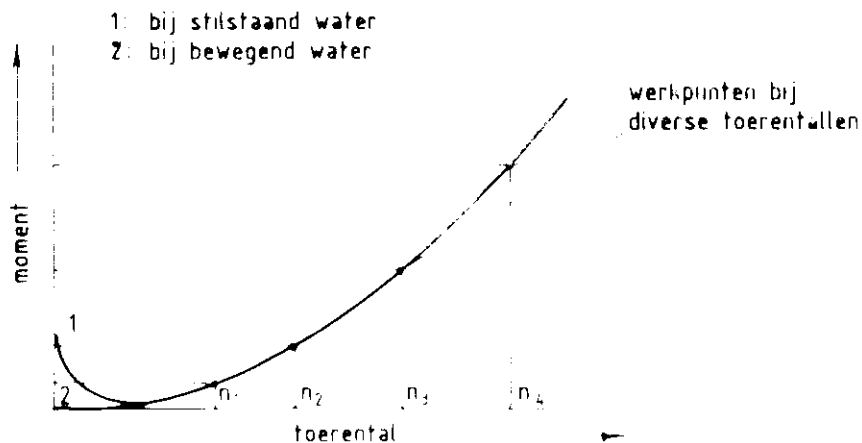


Fig. 18. Bedrijfskarakteristiek van een puntbeluchter

Een puntbeluchter bevindt zich op een brug in het midden van het oxydatie-bassin. Door deze ongunstige lokatie ligt de koppeling windturbine/puntbeluchter in bestaande rioolwaterzuiveringsinrichtingen niet voor de hand. Bestaande bruggen moeten worden verzwakt om als fundatie voor een windmolen te fungeren. Een tweede bezwaar is het feit dat de puntbeluchter/windturbine als separate eenheid en de elektrisch aangedreven puntbeluchter voor het goed functioneren van het zuiveringsproces op dezelfde plaats gesitueerd zouden moeten zijn. Immers dan is het mogelijk het vermogenstekort van de puntbeluchter/windturbine door de elektrisch aangedreven puntbeluchter aan te vullen.

Voor de borstelbeluchter in bestaande rioolwaterzuiveringsinrichtingen is een directe koppeling met een windturbine qua constructie eenvoudiger. De koppeling zou kunnen geschieden zoals in de figuren 19 en 20 is weergegeven.

Het toerental van een borstelbeluchter bedraagt 60 omw/min. De regeling van de gewenste hoeveelheid in te brengen lucht geschiedt meestal door het verstellen van de hoogte van de overstortrand.

Het nadeel van punt- en borstelbeluchters is dat deze continu op een vast toerental in bedrijf moeten zijn. Bij een toerental van 85% van het nominale toerental voldoen deze werktuigen, volgens opgave van de fabrikant, niet meer aan de gestelde eisen met betrekking tot het in stand houden van de stroming en het inbrengen van zuurstof in het afvalwater. De geleverde energie van de windturbine tijdens de aanlooptoestand, ofwel gedurende de periode tussen V_c en V_r draagt dus niet bij tot een besparing in de elektriciteitskosten. De elektrisch aangedreven borstelbeluchter verzorgt in die periode nagenoeg alleen de stroming van het rioolwater en de inbreng van zuurstof.

Uit het voorgaande blijkt dat het aandrijven van punt- en borstelbeluchters door windturbines als separate eenheden uit procestechnisch oogpunt geen aanbeveling verdient.

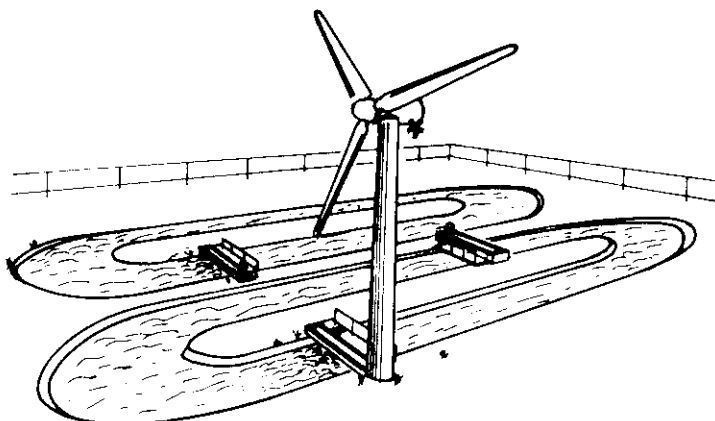


Fig. 19. Situatieschets van een borstelbeluchter/windturbinecombinatie, geïnstalleerd in parallelbedrijf met een elektrisch aangedreven borstelbeluchter

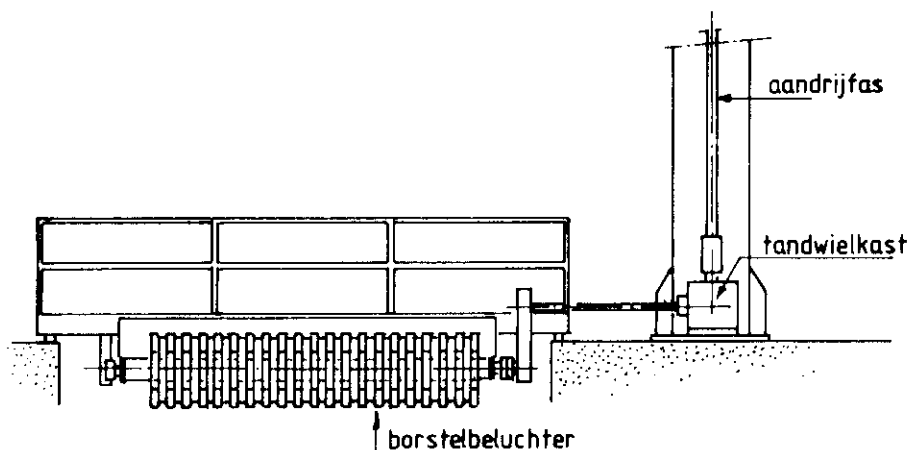


Fig. 20. Detail van de aandrijving

7.2.4 Luchtcompressoren (rootsblowers)

Luchtcompressoren worden toegepast voor het inblazen van gecomprimeerde lucht in actief slibinstallaties en oxydatiebassins. De zuurstof wordt ingebracht met behulp van bellenbeluchting. Het comprimeren van de lucht geschiedt door middel van rootsblowers. De compressorinstallatie is continue in bedrijf. Om aan deze voorwaarde te voldoen zal naast een separate compressor/windturbinecombinatie een compressor/elektromotorinstallatie geïnstalleerd moeten worden.

De te comprimeren lucht moet worden ingeblazen tegen een statische waterdruk van ongeveer 4 m waterkolom. Bij de maximale hoeveelheid gecomprimeerde lucht zal bij een lange persleiding de hydraulische druk nog enigszins toenemen zoals ook in de bedrijfskarakteristiek van de luchtcompressor (figuur 21) is te zien.

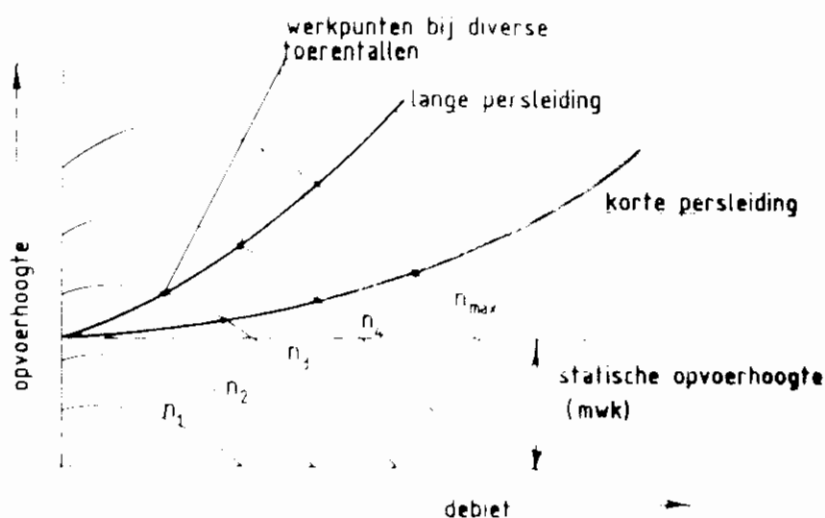


Fig. 21. Bedrijfskarakteristiek van een rootsblower

Het is in principe mogelijk een rootsblower te koppelen aan een windturbine. Gedacht kan worden aan een blower welke gemonteerd wordt in de gondel van de turbine op de plaats waar normaal een generator is gesitueerd, zoals in figuur 22 is weergegeven.

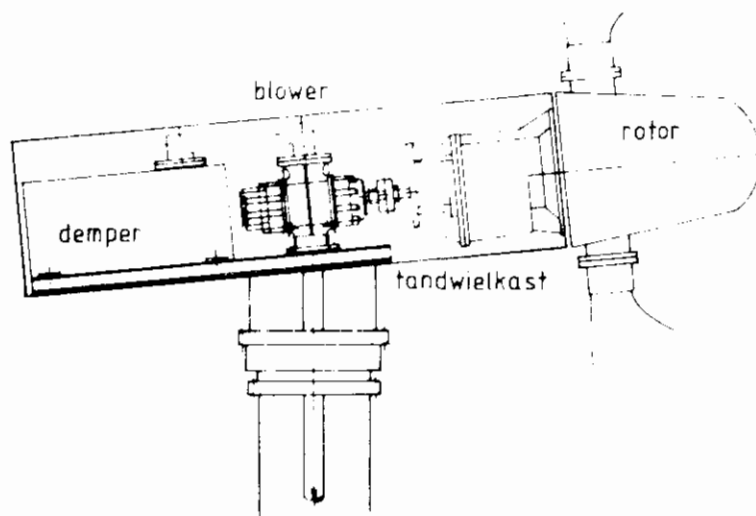


Fig. 22. Rootsblower in de gondel van de windturbine

Een standaardmolen dient voor deze specifieke toepassing te worden aangepast.

Hierbij moet men ondermeer denken aan:

- aanpassing van de molenkarakteristiek door een andere instelling van het bladverstelsysteem;
- een andere overbrengverhouding van de tandwielkast;
- een aanpassing van de (elektrische) krui-inrichting.

Voorts moet bij het kruien van de molenkop rekening gehouden worden met de consequenties hiervan voor het persluchtkanaal. Eveneens dient extra aandacht te worden geschonken aan de geluidsproductie van de rootsblower. Het aanbrengen van een geluidsdempende bekleding van de gondel is een mogelijkheid.

De energie-opbrengst van de windturbine/compressorcombinatie kan worden verhoogd door opslag van gecomprimeerde lucht in een drukvat. Hierbij moet echter wel rekening gehouden worden met een toenemende drukverhoging van de lucht tijdens het vullen.

Door de continue drukverhoging neemt de opbrengst van de windturbine/compressorcombinatie geleidelijk af.

7.3 Geïntegreerde eenheid van werktuig/elektromotor/windturbine

In het voorgaande is steeds uitgegaan van het installeren van zelfstandige werktuig/windturbinecombinaties in parallelbedrijf met de bestaande werktuigen.

Het is echter eveneens mogelijk een windturbine en elektromotor zodanig te koppelen dat deze als één aandrijfmotor voor een werktuig kan fungeren, waarbij het uitgangspunt van een directe mechanische aandrijving van het werktuig door de windturbine blijft gehandhaafd.

In figuur 23 is schematisch een dergelijke werktuig/elektromotor/windturbinecombinatie in beeld gebracht.

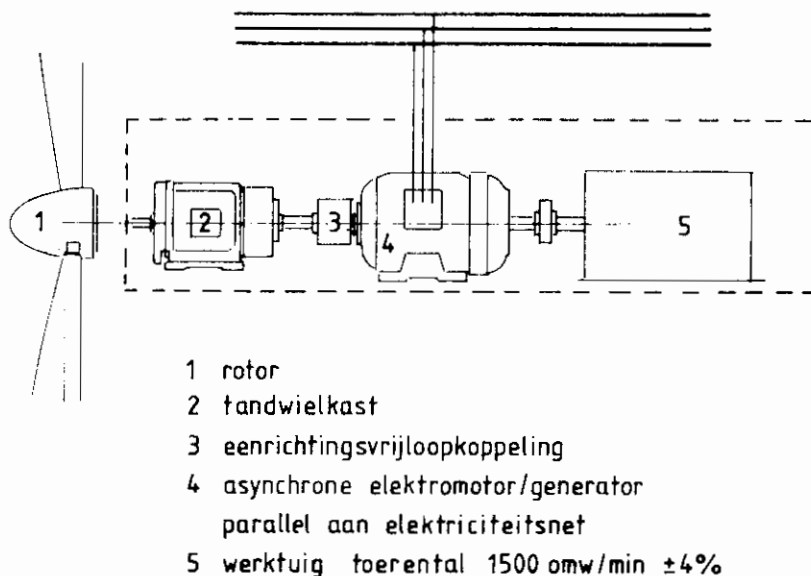


Fig. 23. Geïntegreerde eenheid van werktuig/elektromotor/windturbine

Een aan het elektriciteitsnet geschakelde asynchrone elektromotor is direct gekoppeld aan een werktuig. De uitgaande as van de andere zijde van de asynchrone elektromotor is door middel van een (éénrichtings) vrijloopkoppeling verbonden met de as van de windturbine.

De elektromotor kan de rotor niet aandrijven; omgekeerd echter wel. In figuur 24 zijn de bedrijfssituaties, die bij de verschillende windsnelheden kunnen voorkomen, weergegeven. Er wordt hierbij verondersteld dat het werktuig continu het nominale vermogen vraagt.

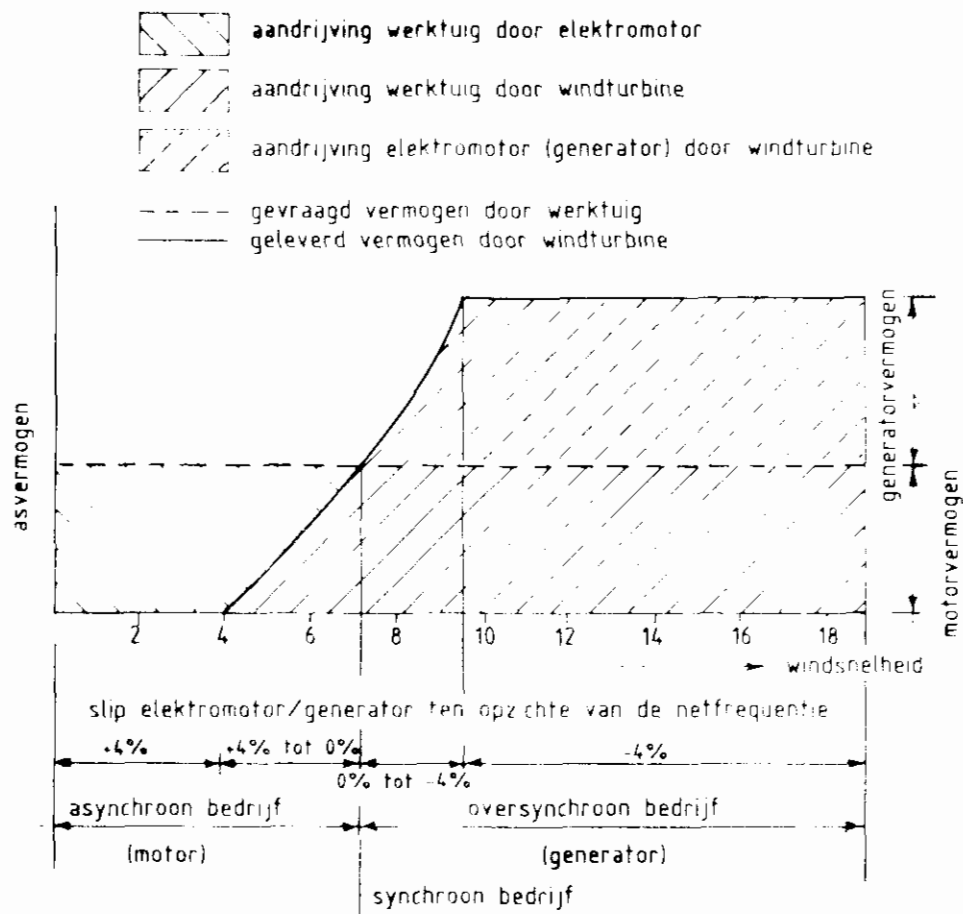


Fig. 24. Situaties bij de verschillende windsnelheden

De volgende situaties kunnen zich voordoen:

- Bij lage windsnelheden wordt het werktuig alleen door de asynchrone elektromotor aangedreven. De elektromotor draait asynchroon met een maximale (positieve) slip ten opzichte van de netfrequentie (ca. 4%). Uit het elektriciteitsnet wordt het nominale elektrisch vermogen gevraagd. Het toerental van de windturbine-as na de versnellingskast ligt beneden het toerental van de elektromotor; de windturbine levert dus geen energie aan het werktuig;
- Bij toenemende windsnelheden zal de turbine versnellen tot het nominale toerental (werktuigtoerental). De (positieve) slip van de elektromotor ten opzichte van de netfrequentie zal geleidelijk afnemen ofwel de asynchrone elektromotor zal minder asynchroon gaan draaien. Als gevolg daarvan neemt het gevraagde elektrisch vermogen af. Windturbine en elektromotor leveren nu gezamenlijk het gevraagde vermogen;
- Bij één bepaalde windsnelheid wordt het werktuig alleen door de windturbine aangedreven. De elektromotor draait synchroon met de netfrequentie (0% slip) waardoor geen of nauwelijks elektrische energie uit het net wordt onttrokken;

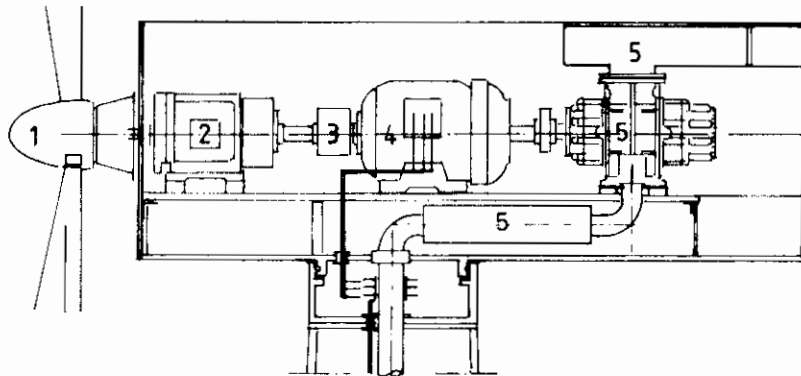
- Bij hogere windsnelheden fungeert de asynchrone elektromotor als een asynchrone, parallel aan het net geschakelde, generator. Het afgegeven elektrische vermogen is afhankelijk van de grootte van de negatieve slip (max. 4%). De generator zorgt er tevens voor dat het toerental nagenoeg constant blijft. Bij te hoge windsnelheden zal het aan de generator afgegeven vermogen de maximaal toelaatbare waarde van de generator overschrijden. Om beschadigingen aan de generator te voorkomen zal een bladhoekversnellingsmechanisme in werking moeten komen.

Een voordeel van deze opstelling is dat slechts alleen de windturbine, bestaande uit rotor, tandwielkast en mast als meerinvestering opgevoerd hoeft te worden. De elektromotor (generator) en het werktuig behoren reeds tot de standaard-uitrusting van een rioolwaterzuiveringsinrichting.

In vergelijking met een windturbine, waarbij de koppeling door middel van een "elektrische as" zou geschieden, heeft deze geïntegreerde eenheid nog de volgende voordelen:

- de elektromotor c.q. generator wordt altijd bekrachtigd waardoor de aanloopprocedure eenvoudig is en inschakelstroomstoten worden vermeden;
- de aandrijving van het werktuig geschiedt met een hoger rendement ($\eta_{\text{mech}} = 0,95$) dan met de tussenstap elektriciteit ($\eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{generator}} \times \eta_{\text{elektromotor}} = 0,95 \times 0,85 \times 0,85 = 0,69$);
- een grotere variatie in het rotortoerental wordt verkregen in vergelijking met een windturbine met een asynchrone generator.

In figuur 25 is de combinatie rootsblower/elektromotor/windturbine in beeld gebracht. De blower is gemonteerd gedacht in de gondel van de windturbine. Een standaard op de markt verkrijgbare windturbine wordt aldus uitgebreid met een rootsblower. Het enigszins vergroten van de gondel van de windturbine kan in een aantal gevallen noodzakelijk zijn. De windturbine wordt na de aanlooptoestand door de elektromotor/generator op een nagenoeg constant toerental gehouden.



- 1 rotor
- 2 tandwielkast
- 3 eenrichtingsvrijlooppkoppeling
- 4 asynchrone elektromotor/generator
parallel aan elektriciteitsnet
- 5 rootsblower met dempers

Fig. 25. Geïntegreerde eenheid van rootsblower/elektromotor/windturbine

De geringe toerentalvariatie van plus of min 4% ten opzicht van het nominale toerental is voor de blower acceptabel.

De windturbine moet worden gedimensioneerd op het gezamenlijk nominale as-vermogen van werktuig en generator. Het bladhoekverstellingsmechanisme, de krui-inrichting en de diverse beveiligingssystemen kunnen, door de aanwezigheid van een elektrische voeding, elektrisch geschieden.

In figuur 26 is de combinatie borstelbeluchter/elektromotor/windturbine weergegeven. De beluchter (ca. 80 omw/min) wordt tweezijdig aangedreven. Een tandwielkast bevindt zich tussen de beluchter en elektromotor en werkt in de richting van motor naar beluchter vertragend.

Het rotortoerental komt, afhankelijk van het aantal rotorbladen en de grootte van de windturbine, redelijk overeen met het beluchtertoerental waardoor geen versnellingskast hoeft te worden toegepast. Door het lage toerental is echter het mechanische rendement van de haakse tandwieloverbrengen in de gondel van de windturbine en op de begane grond ongunstig.

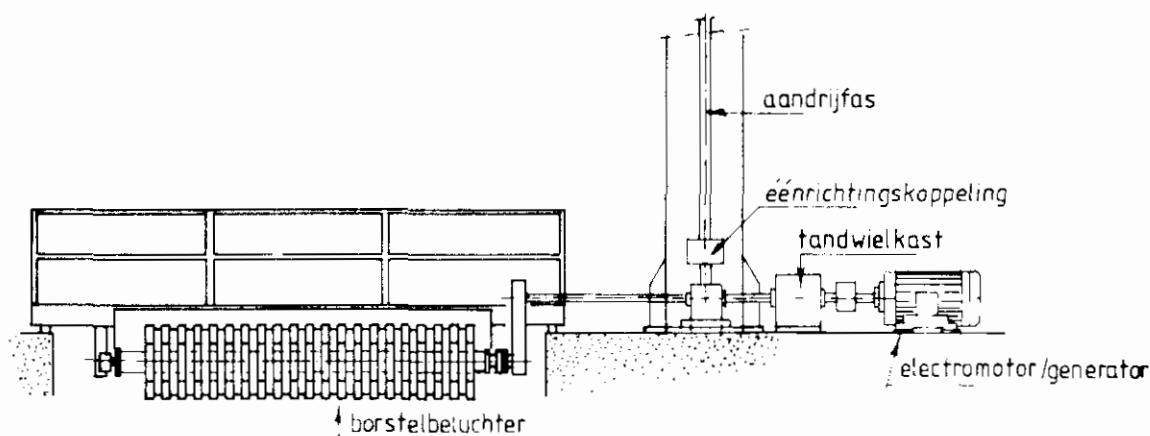


Fig. 26. Geïntegreerde eenheid van borstelbeluchter/elektromotor/windturbine

8.1 Algemeen

De werktuigen, die in rioolwaterzuiveringsinrichtingen zijn geïnstalleerd, komen in een breed capaciteitsgebied voor.

Veel werktuig/windturbinecombinaties kunnen in overweging worden genomen. Daarnaast worden in de verschillende rioolwaterzuiveringsinrichtingen in Nederland uiteenlopende zuiveringsprocedures en type installaties toegepast.

Een echte referentie zuiveringsinrichting is moeilijk te kiezen. De in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten met betrekking tot de haalbaarheid van het direct koppelen van windturbines aan werktuigen in rioolwaterzuiveringsinrichtingen hebben dan ook een indicatief karakter. Voor elke concrete situatie, en in het bijzonder de lokatie, dient de haalbaarheid nader te worden onderzocht.

In dit hoofdstuk wordt de kostprijs per eenheid geleverde arbeid, ofwel de kWh-prijs, voor een aantal combinaties bepaald, namelijk:

- rootsblower/windturbine als separate eenheid;
- slibretourvijzel/windturbine als separate eenheid;
- rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid;
- borstelbeluchter/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid.

De belangrijkste bedrijfsspecificaties van de gekozen werktuigen zijn in tabel 3 weergegeven.

De vermogens van de werktuig/windturbinecombinaties zijn weergegeven in de laatste kolom en zijn zodanig gekozen dat de opgewekte energie in principe te allen tijde aan het zuiveringsproces kan worden afgegeven.

type installatie	grootte i.e.	werktuig	geïnstalleerd vermogen	bedrijfsvoering	verbruik per jaar	gekozen vermogen als referentie
oxydatiebassin (Schreiber)	12.500	lucht-compressoren	3 x 15 kW	eenheden bij- of afschakelen	245.280 kWh	1 x 15 kW
oxydatiesloot (Carrousel)	97.000	slibretourvijzel	2 x 15 kW	toerenregeling	175.200 kWh	1 x 15 kW
oxydatiesloot (Pasveer)	5.000	beluchtingsrotor	2 x 11 kW	continu vast toerental	131.400 kWh	1 x 11 kW

Tabel 3. Belangrijkste specificaties van de werktuigen

Per combinatie wordt globaal het ontwerpconcept met hoofdafmetingen van de windturbine vastgesteld.

Voor de verschillende combinaties zijn vervolgens investeringsramingen opgesteld. Aan de hand van de geschatte opbrengst van de combinaties, is tenslotte de kWh-prijs bepaald.

De koppeling van een opvoerpomp of opvoervijzel aan een windturbine lijkt, gezien het geringe aantal bedrijfsuren van deze werktuigen, minder perspectieven te bieden. Beide werktuigen, die het influent in de zuiveringsinrichting pompen (opvoeren), zijn gedurende de avond en de nacht nauwelijks in bedrijf. Zelfs door het kiezen van een aanzienlijk lager vermogen als basislast zal geen continue bedrijfssituatie gecreëerd kunnen worden. Om deze reden is voor deze opvoerwerktuig/windturbinecombinatie de haalbaarheid niet onderzocht.

Ook voor een direct mechanisch gekoppelde puntbeluchter is de economische haalbaarheid niet onderzocht. Zoals reeds is vermeld, is een puntbeluchter gemonteerd op een brug in het oxydatiebassin. Het installeren van een windturbine op die plaats vergt in verband met het verzwaren van de brug een aanzienlijke extra investering.

Alle genoemde investeringen zijn op prijsbasis 1983 en excl. B.T.W. Eventuele subsidies zijn niet in de kostprijsberekening opgenomen.

8.2 Rootsblower/windturbine als separate eenheid

Een directe mechanische koppeling van een windturbine en rootsblower is technisch te realiseren.

Het installeren van de luchtcompressor in de gondel van de windturbine lijkt een goede keuze. Hierdoor kan de verticale aandrijfas achterwege blijven. De te comprimeren lucht moet worden ingeblazen tegen een statische waterdruk van ongeveer 4 m waterkolom.

Door het langere persluchtkanaal zullen echter de wrijvingsverliezen (dynamische drukverliezen) iets toenemen.

Er is uitgegaan van een rootsblower met de volgende specificaties:

- Het benodigde asvermogen bij een maximale luchthoeveelheid van 13,5 m³/min en een druk van 5 m waterkolom (statisch en dynamisch) bedraagt 14 kW. Het toerental bedraagt dan 1500 omw/min.;
- Het benodigde asvermogen bij een minimale luchthoeveelheid van 2 m³/min en een druk van 4 m waterkolom bedraagt 3 kW. Het toerental bedraagt dan 500 omw/min. Bij lagere toerentallen nemen de teruglekverliezen zeer sterk toe en kan de statische opvoerhoogte niet worden geleverd. Voor deze situaties dienen voorzieningen getroffen te worden om te sterke verhitting van de compressor te voorkomen.

De combinatie luchtcompressor/windturbine wordt in zijn geheel als additioneel beschouwd.

Doordat geen verticale aandrijfas nodig is kan worden gekozen voor een windturbine met een grotere masthoogte.

Een windturbine voor directe aandrijving van bovengenoemde luchtcompressor zou voor een lokatie zoals in Hoek van Holland globaal de volgende afmetingen moeten hebben:

- diameter van de rotor : 10 m.
- aantal rotorbladen : 3
- max. vermogenscoëfficiënt : 0,35
- overbrengverhouding : 1:16
- stopsnelheid Vs : 20 m/s.
- masthoogte : 20 m.

De kosten van deze molen bedragen:

- windturbinekop excl. generator	: f	43.000,--
- buismast 20 m.	: f	14.000,--
- fundatie en ankers (incl. vracht, heien en montage)	: f	20.000,--
- aanpassing van bestaand concept	: f	5.000,--
- luchtcompressor, persluchtleiding, dempers, filters e.d.	: f	17.500,--

Totaal excl. B.T.W. f 99.500,--

=====

Onder de aanpassing van een bestaande windturbine kan worden verstaan:

- een andere instelling van het bladverstelsysteem;
- een andere overbrengverhouding van de tandwielkast;
- aanpassing van het krui-systeem.

Bij een annuïteit van 14% (levensduur combinatie 10 jaar, marktrente 8%) bedragen de jaarlijkse kapitaalslasten f 13.930,--. De kosten voor onderhoud en verzekering zijn geraamd op 3% van de totale investering en bedragen f 2.985,-- per jaar.

Verondersteld wordt dat door middel van een bladhoekverstellingsmechanisme de bladhoek optimaal gevarieerd wordt, waarmee tevens wordt voorkomen dat het maximale toerental wordt overschreden.

De compressor/windturbinecombinatie zal te allen tijde de opgewekte energie aan het zuiveringsproces kunnen leveren. De overige compressoren worden op basis van de benodigde luchthoeveelheid en de hoeveelheid gecomprimeerde lucht door de compressor/windturbinecombinatie geregeld.

De hoeveelheid geleverde energie voor een lokatie met een windregime zoals in Hoek van Holland, is in tabel 4 berekend.

De windsnelheidsfrequentieverdeling, ofwel het aantal uren per jaar dat een bepaalde windsnelheid voorkomt, op een hoogte van 10 m boven maaiveld voor de lokatie Hoek van Holland is door het KNMI gemeten. Voor het verkrijgen van de windsnelheidsfrequentieverdeling op een hoogte van 20 m (masthoogte van de windturbine) is gebruik gemaakt van formule (6) van hoofdstuk 5.1.

De opbrengst van de windturbine die door middel van het bladhoekverstelmechanisme wordt geregeld op een constant toerental is berekend met een veronderstelde gemiddelde vermogensfactor C_p van 0,3. Voor omstandigheden in de open lucht is dit een optimistische aanname.

windsnelheid op hoogte:		vermogen aan as werktuig	Hoek van Holland	
10 m m/s	20 m m/s		uren	opbrengst kWh/jaar
4 - 4,9	4,45 - 5,46	1,18 - 2,19	1049	0
5 - 5,9	5,57 - 6,57	2,32 - 3,81	949	2908
6 - 6,9	6,68 - 7,68	4,00 - 6,08	868	4375
7 - 7,9	7,79 - 8,80	6,35 - 9,15	745	5774
8 - 8,9	8,91 - 9,91	9,50 - 13,07	527	5947
9 - 9,9	10,02 - 11,02	13,51 - 14,00	493	6781
> 10	11,13	14	1343	18802
totaal per jaar ca.				4775 kWh.

Tabel 4. Jaarlijkse energieopbrengst van de luchtcompressor/windturbinecombinatie

De kosten per eenheid arbeidsproductie voor een lokatie zoals in Hoek van Holland bedragen dan minimaal:

$$(f 13.900,-- + f 2.985,--) / 45000 = f 0,38 / kWh \text{ (excl. subsidies)}$$

Het aantal draaiuren met nuttige energielevering door de compressor/windturbinecombinatie bedraagt ca. 4900 uren, de belastinggraad is 0,367.

De kWh-prijs van de rootsblower/windturbinecombinatie moet worden vergeleken met het vigerende elektriciteitsstarief van de desbetreffende rioolwaterzuiveringsinrichting.

Voor de zeer kleine inrichtingen kan de kleinverbruikers-elektriciteitsprijs als referentie gelden. De gemiddelde kleinverbruikersprijs in Nederland bedraagt op dit moment ca. f 0,22/kWh (prijspeil 1983). Bij een rendement van 85% van een elektromotor is de vergelijkbare prijs aan de as van de rootsblower dan f 0,26/kWh.

Geldt voor een rioolwaterzuiveringsinrichting het grootverbruikerstarief, dan is de referentieprijs lager. In die situaties hangt het er ondermeer vanaf in hoeverre het installeren van een werktuig/windturbinecombinatie een wijziging in het piekverbruik en de bedrijfstijd van de inrichting tot gevolg heeft. Bij een bedrijfstijd van 5250 uur is de referentie-elektriciteitsprijs ca f 0,17/kWh. De vergelijkbare prijs aan de as van de rootsblower bedraagt dan: f 0,20/kWh.

$$* \text{ Belastinggraad} = \frac{\text{Jaaropbrengst}}{8760 \times \text{nominaal vermogen}}$$

De kWh-prijs van een separate rootsblower/windturbine, ligt dus aanmerkelijk hoger dan de referentieprijs.

Het toepassen van een separate luchtcompressor/windturbinecombinatie is, zonder rekening te houden met subsidies, niet rendabel.

De rentabiliteit van een geïntegreerde eenheid van compressor/elektromotor/windturbine zal in hoofdstuk 8.4 aan de orde komen.

8.3 Slibretourvijzel/windturbine als separate eenheid

In een gangbaar type oxydatiesloot (type Carrousel, 97000 i.e.) bevinden zich slibretourvijzels met een vermogen van circa 2 x 15 kW. De slibretourvijzels transporteren het slib naar het beluchtingsbassin. De beide slibretourvijzels werken onafhankelijk, beide zijn gekoppeld aan een aparte nabezinktank.

De karakteristieke eigenschappen van een vijzel zijn:

- het toerental heeft geen uitwerking op de opvoerhoogte;
- bij hogere toerentallen is de teruglek relatief lager en dus het volumetrisch rendement van de vijzel iets beter;
- zowel het vermogen als het debiet is nagenoeg evenredig met het toerental;
- bij een toerental van 20% van het ontwerptoerental neemt het rendement zeer sterk af. Het werkgebied van de vijzel ligt derhalve tussen 20% en 100% overeenkomend met 3 kW resp. 15 kW.

De vijzels zijn continu in bedrijf en de hoeveelheid retourslib wordt geregeld door toerenregeling van de elektromotor. Aan deze voorwaarde kan een door windenergie aangedreven vijzel, in verband met de wisselvalligheid van het windaanbod, niet voldoen.

Een parallelle vijzel/elektromotorcombinatie moet het tekort aan vermogen aanvullen. Dit betekent dat de kostenraming moet worden gebaseerd op een complete vijzel/windturbinecombinatie, hetgeen de kWh-prijs nadelig zal beïnvloeden (figuur 16).

Een geschikte windturbine voor een vermogen van 15 kW zou de volgende hoofdafmetingen moeten hebben (lokatie Hoek van Holland):

- diameter van de rotor : 10 m.
- aantal rotorbladen : 3
- max. vermogenscoëfficiënt C_p : 0,35
- rendement mechanische overbrenging : 0,85
- stopsnelheid V_s : 20 m/s.
- masthoogte : 11,5 m.

De investeringen van de windturbine, de aandrijving, de vijzel, de benodigde meet- en regelapparatuur en de toerenregeling van de tweede elektromotor moeten als additioneel worden beschouwd.

De investeringen bedragen:

- windturbinekop, exclusief generator, exclusief tandwielkast : f 40.000,--
- mast 11,5 m. : f 10.000,--
- fundatie en ankers (incl. vracht, heien en montage) : f 15.000,--
- aanpassing van bestaande concept : f 5.000,--
- haakse overbrengingen, verticale aandrijf-as : f 14.000,--
- vijzel + bouwkundige voorzieningen + extra meet- en regelapparatuur : f 50.000,--

Totaal (excl. B.T.W.) : f 134.000,--
=====

De jaarlijkse onderhouds- en verzekeringskosten voor bovengenoemde componenten worden geraamd op ca. f 4.020,-- per jaar. Bij een afschrijvingsperiode van 10 jaar en een rentepercentage van 8% zijn de jaarlijkse kapitaalslasten f 18.760,-- (annuïteit van 14%).

In tabel 5 zijn globaal de jaarlijks te verwachten besparingen op het elektriciteitsverbruik berekend, indien het energie-aanbod van de werktuig/turbinecombinatie volledig kan worden gebruikt. Vanwege het constante koppel dat de slibretourvijzel de turbinerotor oplegt is in de berekening een gemiddelde vermogensfactor C_p aangehouden van 0,25.

Bij een masthoogte van 11,5 m. is de jaarlijks te verwachten besparing voor een lokatie in Hoek van Holland ca. 32.700 kWh.

windsnelheid op hoogte:		vermogen aan as werktuig kW	Hoek van Holland	
10 m m/s	11,5 m m/s		uren	opbrengst kWh/jaar
5 - 5,9	5,11 - 6,03	1,34 - 2,19	949	0
6 - 6,9	6,13 - 7,05	2,31 - 3,51	868	2526
7 - 7,9	7,15 - 8,07	3,66 - 5,26	745	3323
8 - 8,9	8,18 - 9,09	5,48 - 7,52	527	3426
9 - 9,9	9,20 - 10,12	7,8 - 10,38	493	4481
10 - 10,9	10,2 - 11,14	10,63 - 13,84	390	4772
11 - 11,9	11,24 - 12,16	14,2 - 15	287	4190
> 12	> 12,26	15	666	9990
totaal per jaar ca.			32710 kWh	

Tabel 5. Jaarlijkse energieopbrengst van de slibretourvijzel/windturbinecombinatie

De kosten per eenheid arbeidsproductie voor een lokatie zoals in Hoek van Holland bedragen dan:

$$(f 18.760,-- + f 4.020,--) / 32710 = f 0,70 / kWh.$$

Het aantal draaiuren met nuttige energielevering door de vijzel/windturbinecombinatie bedraagt ca. 4000 uren, de belastinggraad is 0,249.

8.4 Rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid

Voor een geïntegreerde combinatie van rootsblower/elektromotor/windturbine, zoals dit in figuur 25 is weergegeven, is de kWh-prijs berekend.

Er is hierbij uitgegaan van dezelfde rootsblower als bij de separate rootsblower/windturbinecombinatie (8.2).

De asynchrone elektromotor en de rootsblower worden niet in de kostenraming opgenomen, aangezien deze zich reeds op de rioolwaterzuiveringsinrichting bevinden.

De door de elektromotor/windturbine aangedreven rootsblower fungeert als basislasteenheid en is, zo wordt aangenomen, het gehele jaar op het nominale vermogen (14 kW) en toerental (ca. 1500 omw/min) in bedrijf. Het nominale asvermogen van de elektromotor bedraagt 14 kW. Het rendement van de elektromotor, zowel in motor- als in generatorbedrijf, bedraagt 85%. Het maximale mechanische vermogen, wat door de generator (elektromotor) in elektrisch vermogen omgezet kan worden, bedraagt 16,5 kW. Het afgegeven elektrisch vermogen bedraagt dan 14 kWe.

De windturbine moet worden gedimensioneerd op het vermogen van werktuig en generator tezamen.

Een windturbine met de volgende hoofdafmetingen zou voor een lokatie Hoek van Holland in aanmerking komen:

- rotordiameter : 12 meter;
- aantal rotorbladen : 3;
- rendement mechanische overbrenging : 95%;
- overbrengingsverhouding : 1:20;
- Vstop : 20 m/s;
- masthoogte : 20 meter.

De vermogenskarakteristiek van deze windturbine waarbij is uitgegaan van een constant toerental, een variabele bladhoek en een gezamenlijk geïnstalleerd asvermogen van werktuig en generator van 30,5 kW is weergegeven in figuur 27.

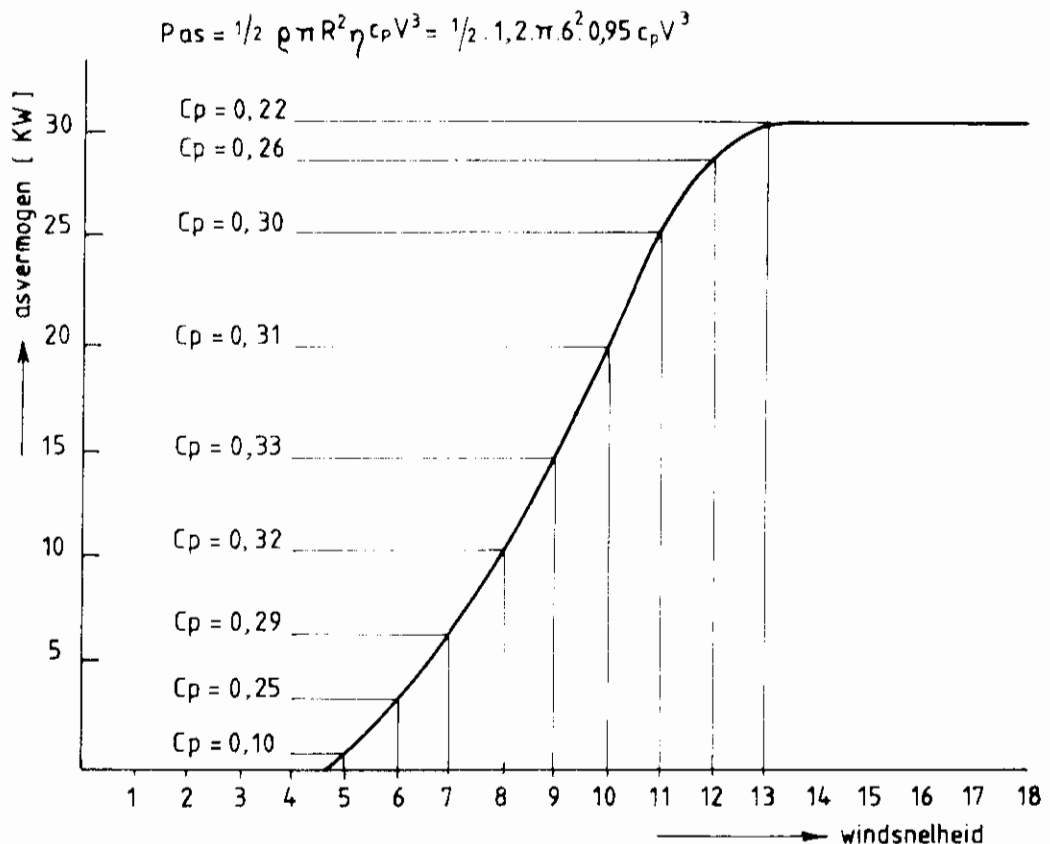


Fig. 27. Vermogen- windsnelheidskromme voor windturbine met variabele bladhoek en een rotordiameter van 12 meter

De investering van een dergelijke windturbine, exclusief generator maar inclusief de benodigde aanpassingen, is geraamd op:

- windturbinekop, excl. generator	:	f	62.000,--
- mast 20 m.	:	f	16.000,--
- fundatie en ankers (incl. vracht, heien en montage)	:	f	25.000,--
- aanpassen van bestaand concept	:	f	3.000,--
- koppeling en persleiding	:	f	4.000,--

Totaal (excl. B.T.W.)	:	f	110.000,--
			=====

Voor de jaarlijkse onderhouds- en verzekeringskosten wordt 3% aangehouden, hetgeen overeenkomt met f 3.300,--.

De jaarlijkse kapitaalslasten bij een annuïteit van 14% bedragen f 15.400,--.

Aan de hand van de vermogenskarakteristiek, zoals is weergegeven in figuur 27, en de windfrequentieverdeling van Boek van Holland is de jaarlijkse energielevering van de windturbine bekend. In tabel 6 is het aandeel weergegeven van de geleverde mechanische energie welke rechtstreeks wordt benut voor de aandrijving van de rootsblower en het aandeel dat aan de generator wordt geleverd. De omzetting van mechanische in elektrische energie door de generator geschiedt met een rendement van 85%. De laatste kolom van de tabel geeft de jaarlijkse elektriciteitsproductie weer.

Uit de tabel blijkt dat 51890 kWh mechanische energie aan het werktuig wordt afgegeven en 22460 kWh elektrische energie wordt opgewekt.

windsnelheid op hoogte:		gemiddeld asvermogen	uren Hoek van Holl.	mechanische energie			elektrische energie = 0,85 kWh
10 m	20 m			totaal	aan werktuig	aan generator	
m/s	m/s	kW	uren	kWh	kWh	kWh	kWh
4 - 4,49	4,45 - 5,46	0,8	1049	840	840	0	0
5 - 5,9	5,57 - 6,57	3,5	950	3325	3325	0	0
6 - 6,9	6,68 - 7,68	7	868	6076	6076	0	0
7 - 7,9	7,79 - 8,80	11,5	745	8568	8568	0	0
8 - 8,9	8,91 - 9,91	17	527	8959	7378	1581	1344
9 - 9,9	10,0 - 11,0	22,5	493	11092	6902	4190	3561
10 - 10,9	11,13 - 12,14	27	390	10530	5460	5070	4309
11 - 11,9	12,24 - 13,25	30	287	8610	4018	4592	3903
12 - 12,9	13,36 - 14,36	30,5	227	6923	3178	3745	3183
> 13	14,48	30,5	439	13390	6146	7244	6157
totaal per jaar ca.				78313	51890		22460

Tabel 6. Jaarlijkse energie-opbrengst van de luchtcompressor/elektromotor/windturbine

Door de relatief grote behoefte aan elektriciteit van zuiveringsinrichtingen zal de opgewekte elektrische energie in praktisch alle gevallen intern kunnen worden afgezet. Het terugleveren aan het openbare net moet zoveel mogelijk worden beperkt. De vergoeding voor aan het net geleverde elektriciteit is immers gebaseerd op een brandstofvergoeding en bedraagt slechts ca. f 0,11/kWh.

In het voorgaande is steeds de kostprijs per eenheid geleverde mechanische energie van de windturbine bepaald.

Om de opbrengst van mechanische en elektrische energie van de geïntegreerde eenheid tot vergelijkbare grootheden terug te brengen, wordt verondersteld dat de elektrische energie door een elektromotor met een rendement van 85% in mechanische energie wordt omgezet. De opbrengst van mechanische energie bedraagt dan:

$$51890 \text{ kWh} + (22460 \text{ kWh} \times 0,85) = 70980 \text{ kWh.}$$

De kosten per eenheid arbeidsproduktie van de geïntegreerde eenheid voor de lokatie Hoek van Holland bedragen dan:

$$(f 15.400,-- + f 3.300,--) / 70980 = f 0,26 / \text{kWh (excl. subsidies).}$$

Voor de rioolwaterzuiveringsinrichtingen met een elektriciteitsprijs volgens het kleinverbruikerstarief moet de prijs van een kWh mechanische energie vergeleken worden, zo bleek uit hoofdstuk 8.2, met f 0,26/kWh.

Indien het grootverbruikerstarief van toepassing is kan minder eenduidig een referentieprijs worden vastgesteld. Bij een bedrijfstijd van de rioolwaterzuiveringsinrichting van 5250 uur bedraagt de vergelijkbare kWh-prijs mechanische energie f 0,20/kWh.

Uit de berekeningen blijkt dat het installeren van een geïntegreerde eenheid van rootsblower/elektromotor/windturbine in gebieden met een gunstig windregime zonder rekening te houden met subsidies, economisch gezien kan concurreren met een elektrisch aangedreven werktuig.

8.5 Borstelbeluchter/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid

Het aandrijven van een borstelbeluchter door een geïntegreerde eenheid van elektromotor en windturbine is technisch mogelijk. In tegenstelling tot de rootsblower kan dit werktuig uiteraard niet in de gondel van de turbine geplaatst worden. De roterende energie van de turbine-rotor wordt via de haakse tandwieloverbrenging in de gondel van de turbine, een verticale aandrijf-as en een haakse tandwieloverbrenging op de begane grond naar de borstelbeluchter overgebracht (figuur 26). Door deze roterende overbrengingen naar de begane grond zijn de mechanische verliezen groter dan bij rootsblower als geïntegreerde eenheid. Daarnaast zal de masthoogte door de verticale aandrijving beperkt moeten zijn.

De borstelbeluchters zijn continu in bedrijf en draaien op een constant toerental (60 omw/min). Een elektromotor (1500 omw/min) met verdragingskast is gesitueerd op de begane grond. De tandwielkast heeft een rendement zowel in de vertragende als in de versnellende richting (aandrijving door windturbine) van 95%.

Voor een beluchtingsrotor met een ontwerp-asvermogen van 11 kW zou het nominale asvermogen van de elektromotor 11,6 kW bedragen. Het maximale mechanische vermogen dat door de elektromotor in generatorbedrijf in elektrisch vermogen omgezet kan worden bedraagt 13,6 kW.

Voor de lokatie Hoek van Holland zou een windturbine voor deze toepassing globaal de volgende afmetingen moeten hebben:

- diameter van de rotor : 11,5 meter;
- aantal rotorbladen : 3;
- totaal rendement haakse tandwielkasten en verticale as : 80%;
- Vstop : 20 meter;
- masthoogte : 15 meter.

De investering van deze turbine is begroot op:

- windturbinekop, excl. generator, excl. tandwielkast : f 57.000,--
- mast 15 m. : f 14.000,--
- fundatie en ankers (incl. vrachtheien en montage) : f 20.000,--
- aanpassing van bestaand concept : f 5.000,--
- haakse tandwieloverbrengingen, verticale aandrijfas, koppeling : f 26.000,--

Totaal (excl. B.T.W.) : f 122.000,--
=====

Uit de kostenraming blijkt de relatief hoge investering voor de haakse tandwieloverbrengingen, de verticale aandrijfas en de vrijloopkoppeling. Dit is een gevolg van het grote koppel (laag toerental) van de rotor naar het werktuig. De haakse kegelkasten met een overbrengverhouding van 1:1 kosten ca. f 10.000,-- per stuk; de vrijloopkoppeling voor dit vermogen kost ca. f 4.000,--.

windsnelheid op hoogte:		gemiddeld Hoek asvermogen van Holl.		mechanische energie			elektrische energie n=0,85
10 m	15 m	kW	uren	totaal kWh	aan werktuig kWh	aan generator kWh	
m/s	m/s						kWh
4 - 4,9	4,26 - 5,22	0,2	1049	210	2100	0	
5 - 5,9	5,32 - 6,28	1,8	950	1710	17100	0	
6 - 6,9	6,39 - 7,35	4,2	868	3646	36460	0	
7 - 7,9	7,45 - 8,41	7,8	745	5811	58110	0	
8 - 8,9	8,51 - 9,48	11,8	527	6219	5797	401	341
9 - 9,9	9,58 - 10,54	15,5	493	7642	5423	2108	1792
10 - 10,9	10,65 - 11,61	20,0	390	7800	4290	3335	2835
11 - 11,9	11,71 - 12,67	23,2	287	6658	3157	3326	2827
12 - 12,9	12,78 - 13,74	25,5	227	5788	2497	3126	2657
≥ 13	≥ 13,84	25,5	439	11195	4829	6048	5140
totaal per jaar ca.				56679	37370		15592

Tabel 7. Jaarlijkse energie-opbrengst van borstelbeluchter/elektromotor/windturbine

In tabel 7 is de jaarlijkse energielevering van de windturbine, aan het werktuig en aan de generator weergegeven.
Voor het bepalen van de jaarlijkse energie-opbrengst van de windturbine is uitgegaan van de Cp-waarden van figuur 27.

Jaarlijks wordt 37.400 kWh mechanische energie aan het werktuig geleverd en 15600 kWh elektriciteit opgewekt. Verondersteld mag worden dat de opgewekte elektriciteit aan andere elektromotoren op de rioolwaterzuiveringsinrichting wordt geleverd.

Uitgaande van een rendement van 85% bedraagt de totale mechanische energielevering van de windturbine:

$$37400 + (15600 \times 0,85) = 50660 \text{ kWh.}$$

De jaarlijkse kapitaal- en exploitatielasten, inclusief verzekering, bedragen respectievelijk f 17.080,-- en f 3.660,--.

De kWh-prijs mechanische energie komt daarmee op:

$$(17080 + 3660) / 50660 = f 0,41/\text{kWh.}$$

In het voorgaande is steeds de kWh-prijs bepaald voor mechanisch gekoppelde werktuig/windturbinecombinaties.

Ter vergelijking wordt in dit hoofdstuk globaal de kWh-prijs bepaald indien de aandrijving van de werktuigen geschiedt met de tussenstap elektriciteit.

De berekende kostprijs geldt niet voor een specifiek werktuig; de opgewekte elektriciteit kan aan ieder willekeurig elektrisch aangedreven werktuig worden geleverd.

Er is uitgegaan van een windturbine met een asynchrone generator in parallelbedrijf met het laagspanningsnet.

De jaarlijkse energie-opbrengst van windturbines voor elektriciteits-opwekking, die zijn uitgerust met asynchrone generatoren, kan als benadering worden berekend met de formule:¹

$$E = 0,2 \times A \times \bar{V}^3 \times 8,760$$

Hierin is: E = de energielevering in kWh elektrische energie van de windturbine

A = het bestreken rotoroppervlak

\bar{V} = de gemiddelde windsnelheid op ashoogte

Om de invloed van de lokatie van de windturbine op de jaarlijkse energie-opbrengst en de hieruit afgeleide kWh-prijs aan te geven is een viertal verschillende lokaties gekozen.

Er is uitgegaan van een middelgrote windturbine met een rotordiameter van 12 m en een masthoogte van 20 m. Het elektrisch vermogen van de asynchrone generator is bepaald in relatie tot de gemiddelde windsnelheid. Bij het ramen van de kosten voor fundatie is, met uitzondering voor de turbinelokatie Breda, verondersteld dat heien noodzakelijk is.

In tabel 8 zijn de investeringen en de te verwachten jaarlijkse elektriciteitsleveringen berekend.

Om een vergelijking te maken met de in het vorige hoofdstuk berekende kWh-prijzen wordt verondersteld dat de elektrische energie door een elektromotor met een rendement van 85% wordt omgezet in mechanische energie.

De mechanische kWh-prijs is weergegeven in de onderste regel van de tabel en bedraagt voor een lokatie met windregime zoals in Hoek van Holland f 0,34/kWh.

	turbine lokatie			
	H. v. Holland	Alkmaar	Gouda	Breda
windsnelheid op 10 m hoogte	6,2 m/s	5,9 m/s	5,3 m/s	4,8 m/s
wiekdiameter	12 m	12 m	12 m	12 m
ashoogte	20 m	20 m	20 m	20 m
windsnelheid op 20 m hoogte	6,9 m/s	6,6 m/s	5,9 m/s	5,3 m/s
generator- vermogen	35 kW	30 kW	20 kW	15 kW
investering excl. fundatie	f 84.500,--	f 84.000,--	f 82.500,--	f 81.000,--
investering incl. fundatie	f 109.500,--	f 109.000,--	f 107.500,--	f 90.000,--
kapitaals- lasten/jaar	f 15.300,--	f 15.250,--	f 15.000,--	f 12.600,--
exploitatie- lasten/jaar	f 3.285,--	f 3.270,--	f 3.200,--	f 2.700,--
geschatte opbrengst/jaar	65.100 kWh	55.000 kWh	40.000 kWh	30.000 kWh
kostprijs per kWh elektrisch (excl. subsidies)	f 0,29	f 0,34	f 0,45	f 0,51
kostprijs per kWh mechanisch (excl. subsidies)	f 0,34	f 0,40	f 0,53	f 0,60

Tabel 8. Kostprijs per kWh elektriciteit en mechanische energie voor
verschillende lokaties

Voor verwarmingsdoeleinden kan warmte worden opgewekt door een windturbine. Dit zou kunnen geschieden door koppeling van een windturbine aan een speciaal geconstrueerde waterrem.

In de waterrem wordt door de roterende beweging van de schoepen het aanwezige water in temperatuur verhoogd. Het warme water dat zo wordt verkregen kan vervolgens worden gebruikt voor verwarmingsdoeleinden. De combinatie van windturbine en warmteopwekker wordt ook wel warmtemolen genoemd.⁷

De warmteopwekker heeft dezelfde karakteristiek als de windturbine; het aandrijfkoppel is evenredig met het kwadraat van het toerental. Dit betekent dat, indien de warmteopwekker en windturbine goed op elkaar zijn afgestemd, het rendement van de installatie over een groot windsnelheidsgebied optimaal is.

Als gevolg van het onregelmatige windaanbod houdt het installeren van een warmtemolen niet in dat de benodigde ketelcapaciteit geheel of gedeeltelijk kan vervallen.

De investering van een warmtemolen komt ruwweg overeen met de investering van een windturbine voor elektriciteitsopwekking. Voor een warmtemolen met een rotordiameter van 12 m en een masthoogte van 20 m kan als richtprijs, exclusief fundatie, B.T.W. en subsidies een bedrag van f 80.000,-- worden aangehouden. De investering inclusief fundatie en heien is geraamd op f 105.000,--. De opbrengst wordt berekend met behulp van de onderstaande benaderingsformule.¹

$$E = 0,29 \times A \times \bar{V}^3 \times 8,760$$

Hierin is: E = de warmtelevering in kWh van de warmtemolen
 A = het bestreken rotoroppervlak
 \bar{V} = de gemiddelde windsnelheid op ashoogte

Voor een lokatie als in Hoek van Holland is de jaarlijkse opbrengst aan warmte: 94000 kWh ofwel 338 GJ. Bij een aardgasprijs van 50 ct/m³ exclusief B.T.W. en een ketel rendement van 80% op bovenwaarde is de referentiekostprijs per GJ warmte f 17,80. De hoeveelheid geleverde warmte vertegenwoordigt een economische waarde van 338 x 17,80 = f 6.000,--. De jaarlijkse kapitaal-, exploitatie- en verzekeringskosten van de warmtemolen bedragen f 17.850,--. Het installeren van een warmtemolen is bij de huidige aardgasprijzen financieel economisch niet verantwoord.

11 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het direct mechanisch aandrijven van bepaalde werktuigen op rioolwater-zuiveringsinrichtingen door windturbines is technisch te realiseren. Voor de meeste toepassingen zal een standaard op de markt verkrijgbare windturbine aan de specifieke eisen van het werktuig moeten worden aangepast.

Bij de directe koppeling van werktuig en windturbine geschiedt de aandrijving, in tegenstelling tot een elektrische koppeling, zonder omzettingsverliezen.

Om een continue werking van het zuiveringsproces te garanderen, kan worden gekozen voor een separate combinatie van werktuig en windturbine naast de bestaande elektrisch aangedreven werktuigen of voor een geïntegreerde eenheid van werktuig/elektromotor/windturbine. Ten opzichte van de separate koppeling heeft de geïntegreerde eenheid het voordeel dat slechts de windturbine een additionele investering is.

De investeringen, energie-opbrengsten en de daaruit afgeleide kWh-prijzen voor mechanische energie aan de as van de betreffende werktuigen zijn voor de verschillende beschouwde combinaties in tabel 9 samengevat.

kostenpost	werktuig/windturbinecombinatie				
	A	B	C	D	E
rotordiameter	10 m	10 m	12 m	11,5 m	12 m
masthoogte	20 m	11,5 m	20 m	15 m	20 m
investering windturbine incl. fundatie	77.000,-	65.000,-	103.000,-	91.000,-	109.500,-
kosten voor aanpassing + realiseren van koppeling	5.000,-	19.000,-	7.000,-	21.000,-	
investering van werktuig	17.500,-	50.000,-			
totale investering (excl. subsidies)	99.500,-	134.000,-	110.000,-	122.000,-	109.500,-
jaarlijkse energie-opbrengst					
- mechanisch rechtstreeks aan werktuig (kWh)	45.000	32.710	51.890	37.370	
- elektrisch (kWh)			22.460	15.592	65.100
- totaal mechanisch aan werktuig(en) (kWh)	45.000	32.710	70.980	50.660	55.335
kostprijs per kWh-mechanisch (excl. subsidies)	f 0,38	f 0,70	f 0,26	f 0,41	f 0,34
A : rootsblower/windturbine als separate eenheid; rootsblower in de gondel van de turbine (8.2)					
B : slijbretourvijzel/windturbine als separate eenheid; slijbretourvijzel op de begane grond (8.3)					
C : rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid; rootsblower en elektromotor in de gondel van de turbine (8.4)					
D : borstelbeluchter/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid; rootsblower en elektromotor in de gondel van de turbine (8.5)					
E : elektrische koppeling van werktuig en windturbine; asynchrone generator parallel aan het laagspanningsnet (9)					

Tabel 9. Totaal overzicht van investeringen, opbrengsten en kWh-prijzen van de diverse combinaties voor de lokatie Hoek van Holland

Uit de berekende kWh-prijzen blijkt de rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid, waarbij de rootsblower en elektromotor zich in de gondel van de turbine bevinden, de meeste perspectieven te bieden. De kWh-prijs (excl. subsidies) komt overeen met de uit het kleinverbruikers-elektriciteitstarief omgerekende mechanische kWh-prijs.

Voor werktuigen die zich op de begane grond bevinden verdient het in het algemeen aanbeveling de aandrijving te laten geschieden met door de windturbine opgewekte electriciteit.

Het installeren van een werktuig/windturbinecombinatie als separate (zelfstandige) eenheid is het minst aantrekkelijk.

Op grond van de resultaten van deze studie verdient het aanbeveling:

- een nadere technische uitwerking van de rootsblower/elektromotor/windturbine als geïntegreerde eenheid te verrichten;
- de mogelijkheid voor de realisatie van een proefopstelling van deze combinatie te onderzoeken.

LITERATUUR

- 1 Beurskens, J. - Opbrengst windmolens, kwartaaltijdschrift Duurzame Energie, no. 5, juli 1982
- 2 Beurskens, J. - M. Houët, P. van der Varst - Windenergie, Afdeling der Technische Natuurkunde van de Technische Hogeschool Eindhoven, 6e druk, september 1980
- 3 Bureau Energie Onderzoek Projecten - Perspectieven voor windenergie in Nederland, april 1981
- 4 Bureau Energie Onderzoek Projecten - Polderbemaling met windenergie, Petten
- 5 Energieonderzoek Centrum Nederland, Bureau Voorlichting - Producenten en leveranciers van windturbines en -onderdelen
- 6 H.J. Hengeveld, E.H. Lysen, L.M.M. Paulissen, Matching of windrotors to low electrical generators, S.W.D., Amersfoort, december 1978
- 7 Ingenieursbureau Draijer - Windenergie voor de glastuinbouw, Noordwijk, 1 november 1979
- 8 Louis Linssen - Verslag van een literatuuronderzoek naar vijzelpompen en tonmolens, T.H. Eindhoven, rapportnr. WPS 3-83.05.R355
- 9 Stichting Toegepast Onderzoek Reiniging Afvalwater, STORA - Energie uit gistingsgas, Rijswijk, januari 1983
- 10 Stichting Toegepast Onderzoek Reiniging Afvalwater, STORA - Gistingsgas als energiebron op rioolwaterzuiveringsinrichtingen, Rijswijk, augustus 1981
- 11 Theyse energieberatung - De mogelijkheden tot energiebesparing door het toepassen van windenergie bij de polderbemaling van Nederland; een analyse en een aanbeveling voor constructieve uitvoering, Moitzfeld, november 1979
- 12 Wieringa, J. - KNMI, Nieuwe windkaart van Nederland, Technisch weekblad no. 16, 17 juli 1983