

## **Evaluatie van een waterturbinepilot**

**(Tocardo T50 2800u inshore)**



# Evaluatie van een waterturbinepilot

(Tocado T50 2800u inshore)

dr.ir. A.M. Talmon

1201321-000

**Titel**  
Evaluatie van een waterturbinepilot




<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Deltares MT Kennis (V&W SO/TO)	1201321-000	1201321-000-VEB-0003	18

**Trefwoorden**  
water turbine, duurzaam, energie opwekking, pilotmeting

**Samenvatting**

Dit verslag bevat een evaluatie van pilotmetingen die zijn uitgevoerd aan de tweebladige horizontale-as waterturbine genaamd Tocardo 2800. Voor deze pilot was de Tocardo gesitueerd in een uitwateringssluis van de Afsluitdijk. Een pilot is een middel om de werking van een turbine te toetsen voordat deze ingezet wordt bij grootschalige opwekking van stromingsenergie. Er is geconstateerd dat deze turbine zeker een elektrisch vermogen van 35 kW haalt bij een watersnelheid van circa 3 m/s. Alhoewel het lastig was de stroomsnelheid nauwkeurig te meten, ziet het er naar uit dat de maximale efficiëntie ( $C_p$ ) in de range van circa 36% tot 45% ligt. Dit is tevredenstellend, temeer omdat ten faveure van robuustheid en betrouwbaarheid afgezien is van het gebruik van een instelbare bladhoek, waarmee de efficiëntie geoptimaliseerd had kunnen worden. De pilot verliep storingsvrij en, te beoordelen aan meetsignalen van toerental, stroomsnelheid en vermogen, was de turbine goed onder controle. Deze kon bijvoorbeeld moeiteloos in "stall mode" gedirigeerd worden, hetgeen nodig is bij extreem hoge stroomsnelheden om de turbine en omgeving niet te beschadigen. Daar ook de weerstandswaarden ( $C_d$ ) in lijn zijn met schaarse  $C_d$  gegevens van windturbines, kan besloten worden de pilot bij Den Oever af te ronden. Daarbij wordt afgeraden economische berekeningen te maken op basis van de gemeten efficiëntie. De meting van de ongestoorde stroomsnelheid stroomopwaarts van de turbine vormt namelijk een probleem. Turbulentiemetingen in het zog van de turbine zijn van secundair belang en kunnen in een vervolg gemeten worden.

**Referenties**  
Geen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
V0	nov.2009	dr.ir. A.M. Talmon		ir. Joh.G.S. Pennekamp		ir. T. Schilperoort	
V1	dec.2009	dr.ir. A.M. Talmon		ir. Joh.G.S. Pennekamp		ir. T. Schilperoort	
V2	mei. 2010	dr.ir. A.M. Talmon		ir. Joh.G.S. Pennekamp		ir. T. Schilperoort	

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Algemeen	1
1.2 Kenmerken van de Tocardo	4
<b>2 Meetgegevens</b>	<b>5</b>
2.1 Testprocedure	5
2.2 Meetdata	5
<b>3 Analyse</b>	<b>8</b>
3.1 Stroomsnelheid	8
3.2 Invloed sluiskanaaldoorsnede	9
3.3 Vermogenskarakteristiek	9
3.4 Weerstandskracht turbine	12
3.5 Turbinezog	13
<b>4 Factsheet</b>	<b>14</b>
<b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>15</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>17</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Vergelijkbare meetgegevens model windturbine</b>	<b>A-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Een pilot is een middel om de werking van een turbine te toetsen voordat deze ingezet wordt bij grootschalige opwekking van stromingsenergie of een commerciële pilot (Anoniem 2009a).

De uitkomsten van een pilot dienen zicht te geven op (i) de potentie van energieopwekking bij grootschalige toepassing van de turbines en (ii) relevante omgevingsinvloeden. De resultaatvorm dient tevens zodanig te zijn dat ze een eenvoudige vergelijkingsbasis biedt met andere pilots.

Het omvormen van energie uit stromingsverhang en/of getijstroming tot elektriciteit betekent het onttrekken van vermogen uit de lokale energieflex van de stroming. Hierdoor neemt bij clusteropstelling de beschikbare stromingsenergie per turbine af. Bij opstelling in een sluis kan de sluis capaciteit afnemen.

Aan de hand van de fysische gegevens van de pilot dienen:

- Energieproductie.
- De afname van stromingsenergie in clusters of sluis.
- De invloed op stroming, getij en
- de invloed op natuur en milieu berekend/beoordeeld te kunnen worden.

In de onderhavige pilot is de waterturbine gesitueerd in één van de uitwateringssluizen van het Stevinssluisencomplex in de Afsluitdijk te Den Oever, zie Figuur 1. De sluisgang heeft een breedte van 12 meter en de waterdiepte in de sluis is circa 4 meter.

Figuur 2 toont diverse facetten van de Tocardo turbine.

Figuur 3 en Figuur 4 geven de positie weer van de Tocardo turbine in de sluis.

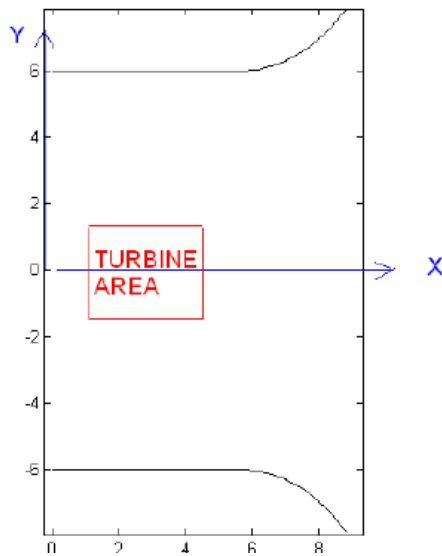
De Tocardo levert de geproduceerde energie aan het elektriciteitsnet: de Tocardo is aangesloten bij de bestaande windturbine op het Stevinssluisencomplex.



*Figuur 1 Stevinssluisen complex in de afsluitdijk te Den Oever. De pijl wijst op de locatie van de Tocardo turbine pilot, Augereau 2009*

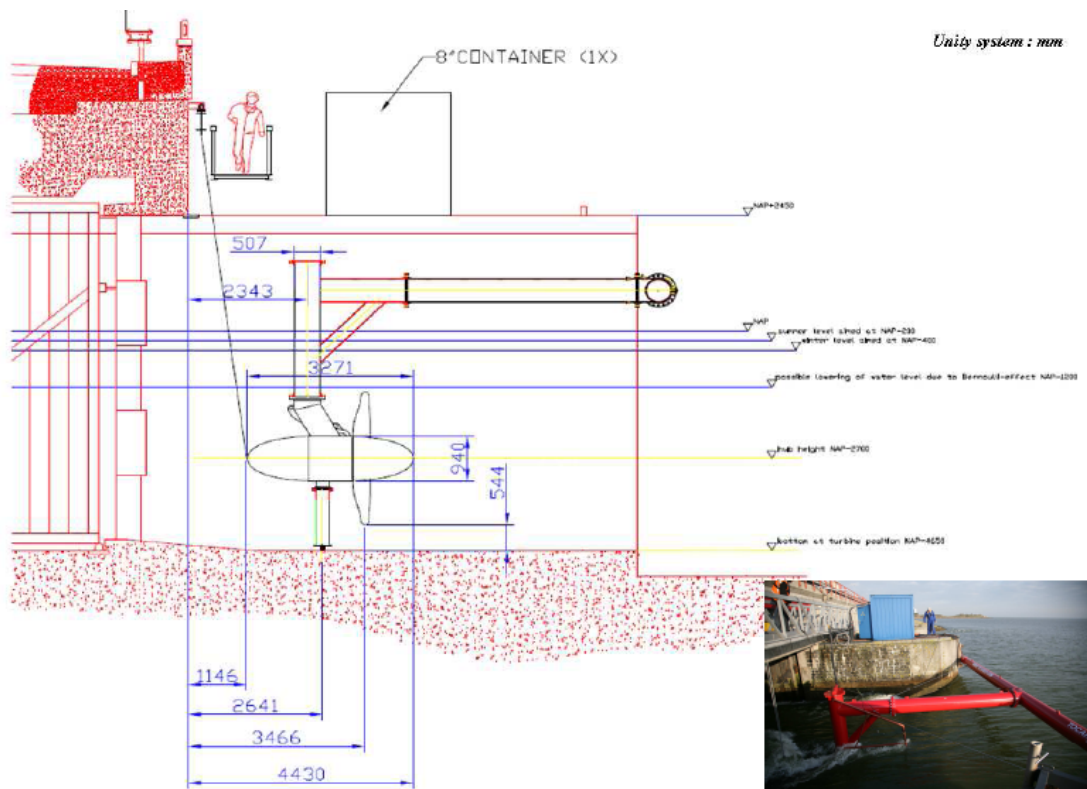


*Figuur 2 Tocardo T50-2800U inshore turbine, Augereau 2009*



Figuur 3 Bovenaanzicht instroomzijde uitwateringssluis, met locatie van de turbine. Afstanden in meters, Augerau 2009

Afstanden



Figuur 4 Verticale doorsnede van het instroomkanaal met daarin gepositioneerd de turbine, Augereau 2009

Tocardo

De huidige evaluatie is gericht op het functioneren van de waterturbine in de pilot en op de kwantificering van technische specificaties. Onderwerpen als kWh-kostprijs, visvriendelijkheid, beïnvloeding van bodemleven, eventuele ontgroningen, cavitatie, subsidiemogelijkheden, beïnvloeding van sluiscapaciteit en gevolgen van geclusterde turbines bij geïndustrialiseerde energieopwekking worden vooralsnog niet beschouwd.

## 1.2 Kenmerken van de Tocardo

De rotordiameter is 2,8 m.

Het bladprofiel bestaat uit een gestandariseerd profiel NACA4418.

De rotor is ontworpen op een Tip Speed Ratio (TSR) van 3.

De diameter van de neuscone is 0,94 m.

De turbine is ontworpen voor stroomsnelheden tot 5.9 m/s.

De energieopwekking vindt plaats via "direct-drive", welke energieverliezen en onderhoud aan tandwielkasten elimineert. Tevens vindt er waterkoeling plaats dankzij de buitengelegen positie van de stator.

Net als bij een sloopsschroef is het rotorblad getordeerd voor een zo gunstige aanstroming van het blad.

De turbinebladen zijn gepositioneerd onder een vaste hoek.

Het aantal bewegende onderdelen is tot een minimum beperkt.

De business-presentatie van Tocardo bv. vermeldt voor dit model een bandbreedte van 35 tot 50 kW. Het gespecificeerde vermogen is door Tocardo bv. berekend uit de theoretische eigenschappen van het turbineblad.

Met betrekking tot toekomstige opschaling van de turbine is het belangrijk de hydrodynamische eigenschappen van de turbine in dimensieloze grootheden als power efficiëntie ( $C_p$ ) en weerstandscoefficiënt ( $C_d$ ) uit te drukken.



## 2 Meetgegevens

### 2.1 Testprocedure

Er kan in principe 2 maal per dag gespuid worden als de wateropzet (door wind) op de Waddenzee niet te hoog is.

Tijdens spuien loopt de stroomsnelheid in het sluiskanaal redelijk snel op van 0 tot aan de maximale snelheid (meer dan 3 m/s) en vervolgens weer terug. Een uitwateringsperiode neemt circa 3 à 4 uur in beslag. Boven een zekere stroomsnelheid begint de rotor te draaien. Het toerental wordt daarbij zodanig geregeld dat er op optimale wijze stromingsenergie onttrokken wordt. Dit optimale punt ligt volgens ontwerpberekeningen van de turbinebladen bij een Tip Speed Ratio van 3. Bij een stroomsnelheid van 3 m/s beweegt de tip van de rotor met een snelheid van 9 m/s.

Ter bescherming van de turbine is men in een reeks achtereenvolgende dagen in kleine stapjes telkens tot aan een iets hogere waterstroomsnelheid gegaan. Als deze snelheid (of bijbehorend vermogen) bereikt was, werd de rotor in "stall-mode" gedirigeerd. Dat geschiedt door het drastisch verlagen van het toerental van de turbine: het bladprofiel raakt overtrokken (=stall-mode). Deze metingen waren voornamelijk gericht op het intern functioneren van de turbine.

Het beschouwde proevenprogramma werd voortijdig afgebroken omdat onderhoud aan de sluis diende plaats te vinden.

### 2.2 Meetdata

Voor overleg en overdracht van de meetgegevens, heeft d.d. 9 oktober heeft een bezoek plaatsgevonden bij Tocardo in Den Oever. Onder voorwaarde van vertrouwelijke behandeling heeft Deltares beschikking gekregen over de originele meetfiles van Tocardo. Hierin zijn de meetgegevens zoveel mogelijk in fysische eenheden uitgedrukt.

Op de meetlocatie zijn de meetsignalen met 5 Hz bemonsterd. Ze worden echter met 1 Hz opgeslagen. Per dag wordt één meetfile gemaakt. Deze bevat 85 tot 88 kanalen.

De fileomvang is circa 80 MB.

Het filetype is IVM (LabView format).

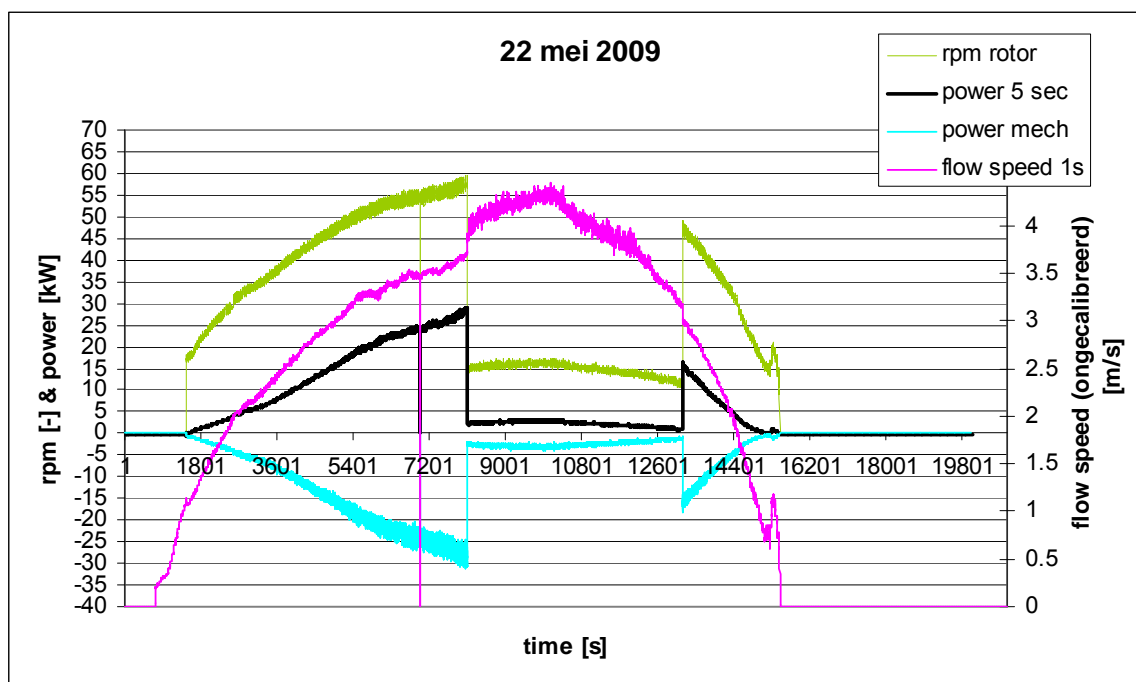
Opgeleverde files betreffen de dagen: 25 oktober 2008, 28 maart t/m 30 maart 2009, 23 april 2009 en 10 mei t/m 9 oktober 2009.

Er bestaat naar weten van de auteur van dit rapport geen rapport met eigen analyse van Tocardo bv.. Er is wel een rapport over stroomsnelheidsmetingen (met Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), o.a. uit een modelbootje (Qliner) dat gedurende enkele meetdagen stroomopwaarts van de rotor gepositioneerd was.

In de aangeleverde data is geen synchronisatie met de binnen- en buitenwater waterstanden opgenomen (data is wel opvraagbaar op RWS-site: [www.waterbase.nl](http://www.waterbase.nl)). Deze historische gegevens waren echter niet toegankelijk tijdens de huidige studie. In de toekomst wil Tocardo bv. ook de actuele waterstanden meelopen.

Een voorbeeld van meetgegevens verkregen gedurende één uitwateringsperiode is weergegeven in Figuur 5. Op het tijdstip  $t \sim 8000$  s wordt de turbine in "stall mode"

gedirigeerd: men laat de rotor langzaam draaien. Op  $t \sim 13000$ , wordt de stall-mode weer opgeheven.



Figuur 5 Voorbeeld van meetgegevens verkregen gedurende één uitwateringsslag

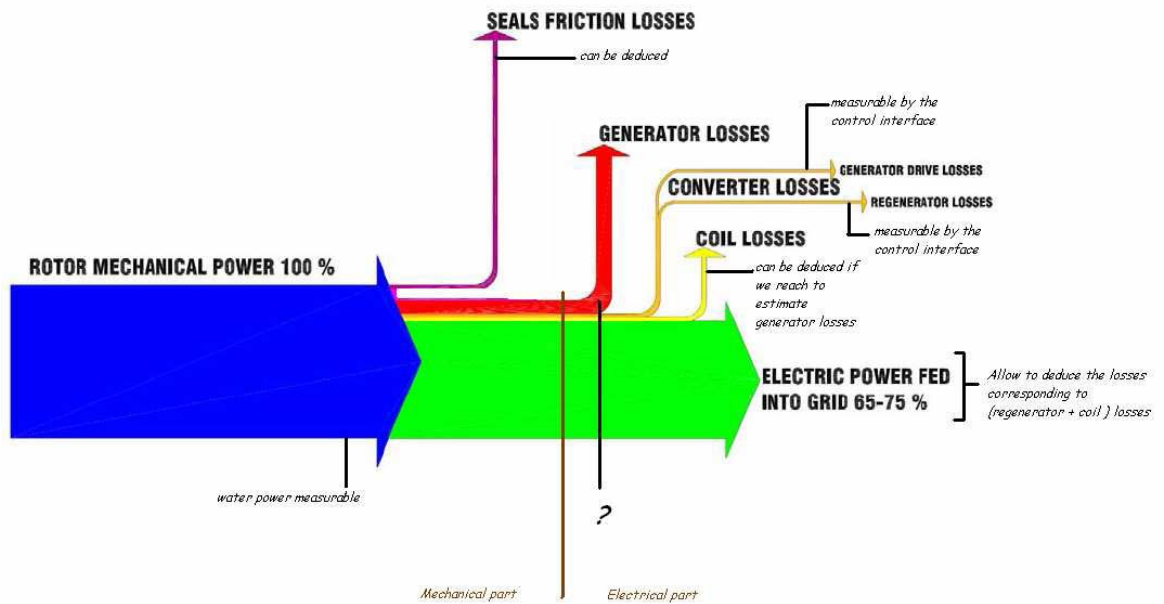
De flow speed is de niet-gekalibreerde snelheid volgens het RayMarine meetwiel (rechter verticale as). De horizontale as geeft de samplenummers (1 sample is 1 seconde). De power 5 sec is het over 5 seconde gemiddelde elektrische vermogen.

Daar er onduidelijkheden t.a.v. de berekende vermogenscoëfficiënt van de turbine naar voren kwamen bij beschouwing van versie v0 van de onderhavige evaluatie, heeft Tocardo (d.d. 10/12/2009 te Deltares) de verschillende meetposities van vermogen toegelicht. Deze zijn als volgt samengevat in het onderstaande:

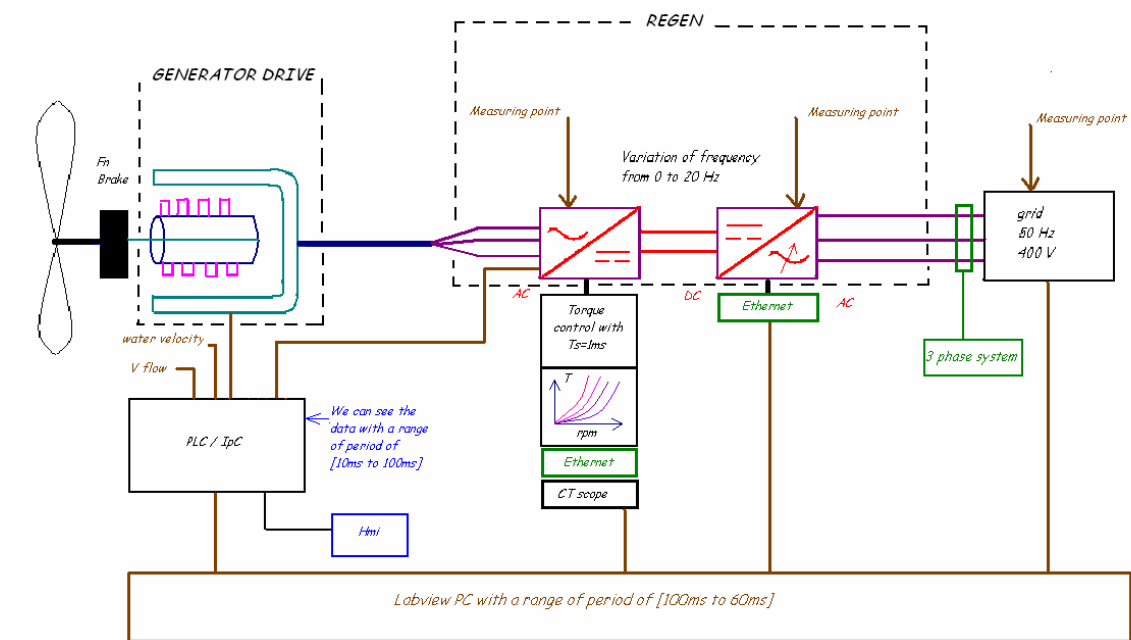
De Power mech is het vermogen gemeten aan de generator drive (het mechanisch vermogen is geregistreerd met een negatief teken). Wegens onduidelijkheden in de handleiding van de generator (B v/d Berg 2009, Tocardo), is het niet geheel duidelijk in hoeverre er in het algoritme voor berekening van het vermogen gecompenseerd wordt voor het generatorrendement. In het stroomdiagram van Figuur 6 is deze meetpositie aangeduid met een vraagteken.

Power 5 sec is het geleverde vermogen aan het net. Figuur 7 laat drie meetposities voor het vermogen zien: "measuring point" zie bovenhelft van de figuur. Power 5 s wordt op de meest rechts aangeduide positie gemeten.

Zoals uit Figuur 6 en 7 blijkt, is het mechanisch vermogen niet direct gemeten. Dit verklaart het kleine verschil tussen Power mech en Power 5 s in Figuur 5. "Power mech.", een aanduiding die Tocardo in de meetfiles hanteert, is aldus een incorrecte aanduiding.



Figuur 6 Sankey diagram voor de energiestroom van een turbine (uit Augereau 2009)



Figuur 7 Meetpunten vermogen Tocardo turbine (uit Augereau 2009)

## 3 Analyse

### 3.1 Stroomsnelheid

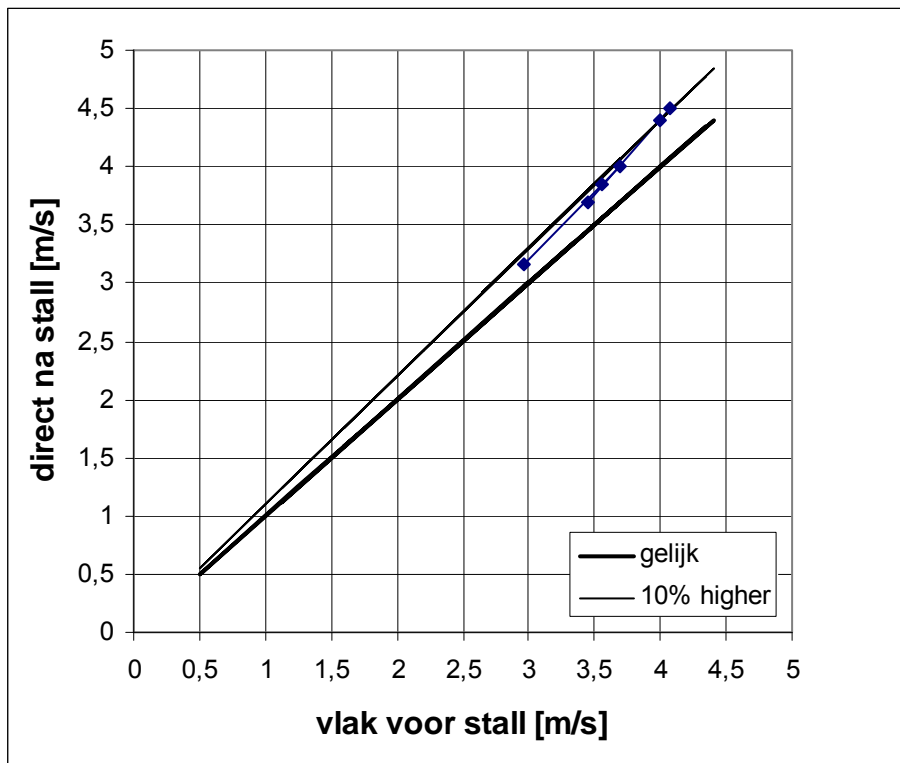
Essentieel voor een beschouwing van de turbine is de (on)gestoorde aanstroomsnelheid. De stroomsnelheid wordt gemeten met een meetwielletje van RayMarine. Dit meetwielletje bevindt zich 30 cm stroomopwaarts van de rotor en 10 cm boven de rotor tip. Dit meetwielletje is niet gekalibreerd. Tocardo heeft middels een eigen onderzoek een relatie gelegd tussen de uitkomsten van het meetwielletje en aanstroomsnelheid (referentiesnelheid), Augereau 2009. De resultaten van dit onderzoek zijn onder voorwaarde van vertrouwelijke behandeling aan Deltares ter beschikking gesteld.

Samengevat komt de methode ter bepaling van de referentiesnelheid neer op:

- De referentiesnelheid is gedefinieerd als een snelheid die simpelweg tot de derde macht genomen kan worden om het vermogen te bepalen.
- Voor twee dagen achter elkaar (1 dag met turbine en 1 dag zonder turbine) zijn verticale snelheidsprofielen stroomopwaarts van de turbine gemeten. Er is geconstateerd dat op 2,2 m voor de neuscone van de turbine de aanwezigheid van de rotor niet meer zichtbaar is in de vorm van het verticale profiel.
- Met de ADCP zijn ook metingen ter hoogte van het meetwielletje uitgevoerd (tegelijkertijd met registraties door het wielletje). Echter in het hoge snelheidsregime (> 2,5 m/s) traden er storingen op (bij wild water verliest de ADCP z'n oriëntatie). In dit gebied zijn de metingen lineair geëxtrapolleerd vanuit het lage snelheidsregime (zowel voor opgaand - als afgaand tij).

Het rapport van Augerau geeft een lineaire omrekenformule voor de stroomsnelheid. Het is echter niet goed op te maken uit het rapport, en bij Tocardo bv. weet men het ook niet met zekerheid, of deze formule betrekking heeft op een situatie met werkende turbine of zonder een werkende turbine.

De snelheid (niet gekalibreerd) gemeten met het meetwielletje is ook weergegeven in Figuur 5. Op het moment dat de turbine in "stall-mode" gedirigeerd wordt, zien we dat de gemeten snelheid met wel 10% toeneemt. In figuur 8 zijn van een aantal schakelmomenten tussen regulier bedrijf en stall-mode, de ongecalibreerde snelheden van het meetwiel weergegeven. De diagonale lijn in deze figuur is getekend ter referentie. De meetpunten zouden op deze lijn liggen indien de gemeten stroomsnelheid niet zou veranderen bij omschakeling.



Figuur 8 Ongecalibeerde snelheden van het meetwielletje voor- en na omschakeling in “stall-mode”

Bij “stall mode” draait de rotor zodanig langzaam dat zelfs de lokale stuwing t.g.v. bladpassage door het meetwielletje gemeten wordt. Tijdens “stall” vertoont de snelheidsmeting aldus meer variatie.

### 3.2 Invloed sluiskanaaldoorsnede

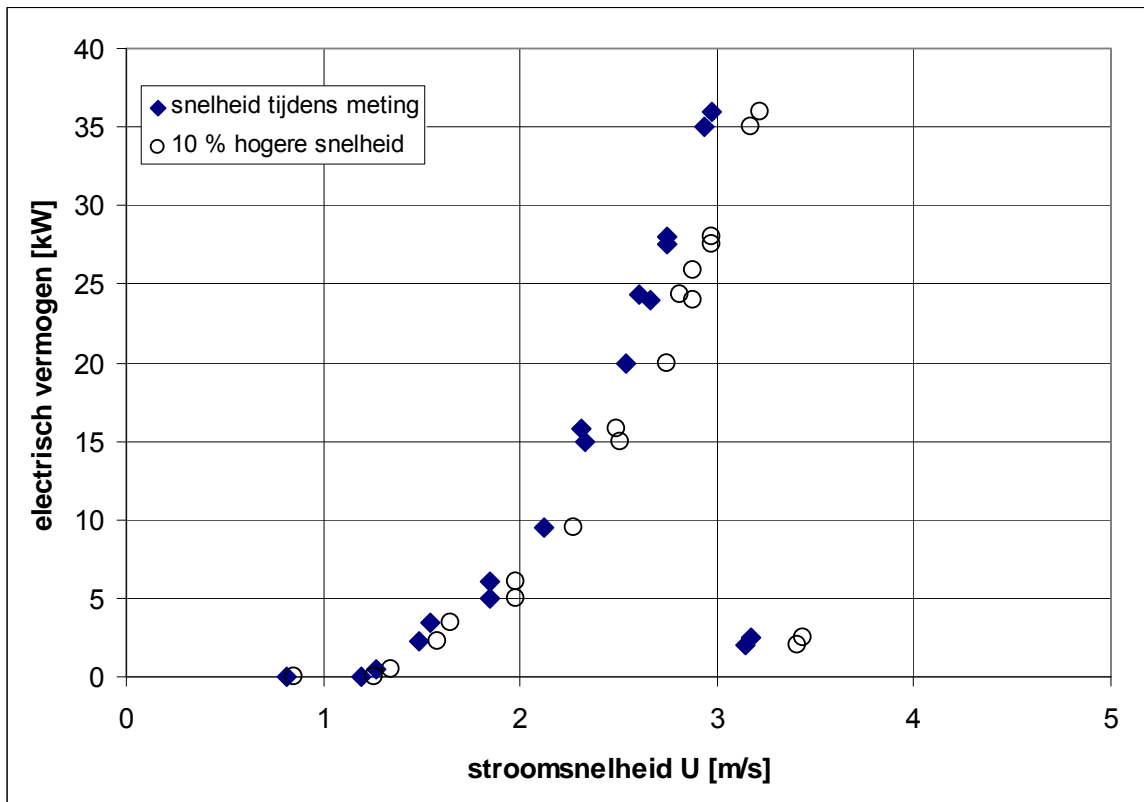
Doordat de turbine de stroming voor een gedeelte blokkeert, kan de verhouding van het frontale oppervlak van de turbine in de verhouding tot de doorsnede van het uitwateringskanaal van belang zijn bij beschouwing van de meetgegevens. Blokkering heeft twee potentiële gevolgen:

- Een geringe daling van het sluisdebiet (bij opgelegde waterstandsverschillen).
- Een lokale versnelling van de stroming langs de turbine, hetgeen de energieproductie ietwat doet toenemen.

Er bestaat een ééndimensionale theorie om deze invloeden via berekening te beoordelen, Whelan et al 2009. Daarvoor zijn echter waterstandsverschillen over de sluis en de weerstandcoëfficiënt van de turbine benodigd.

### 3.3 Vermogenskarakteristiek

Het hoogst gemeten elektrisch vermogen is 35 kW, zie figuur 9. Een vergelijkbare figuur is eerder gegeven door Tocardo bv. (Anoniem 2009b), echter met een niet-gecalibreerde snelheid bij de horizontale as en een maximaal vermogen van circa 38 kW.



Figuur 9 Enkele data van het elektrisch vermogen gegenereerd op verschillende meetdagen. De stroomsnelheid is berekend volgens de methode van Augereau 2009. De datapunten bij hoogste stroomsnelheid behoren bij "stall mode".

De efficiëntie of vermogenscoëfficiënt  $C_p$  is gedefinieerd als:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} * 100 \quad (1)$$

Hierin is  $A$  het frontaal oppervlak van het rotorvlak,  $P$  is het gegenereerde elektrisch vermogen<sup>1</sup>,  $U$  is de ongestoorde stroomsnelheid stroomopwaarts van de turbine en  $\rho$  is de dichtheid van de vloeistof.

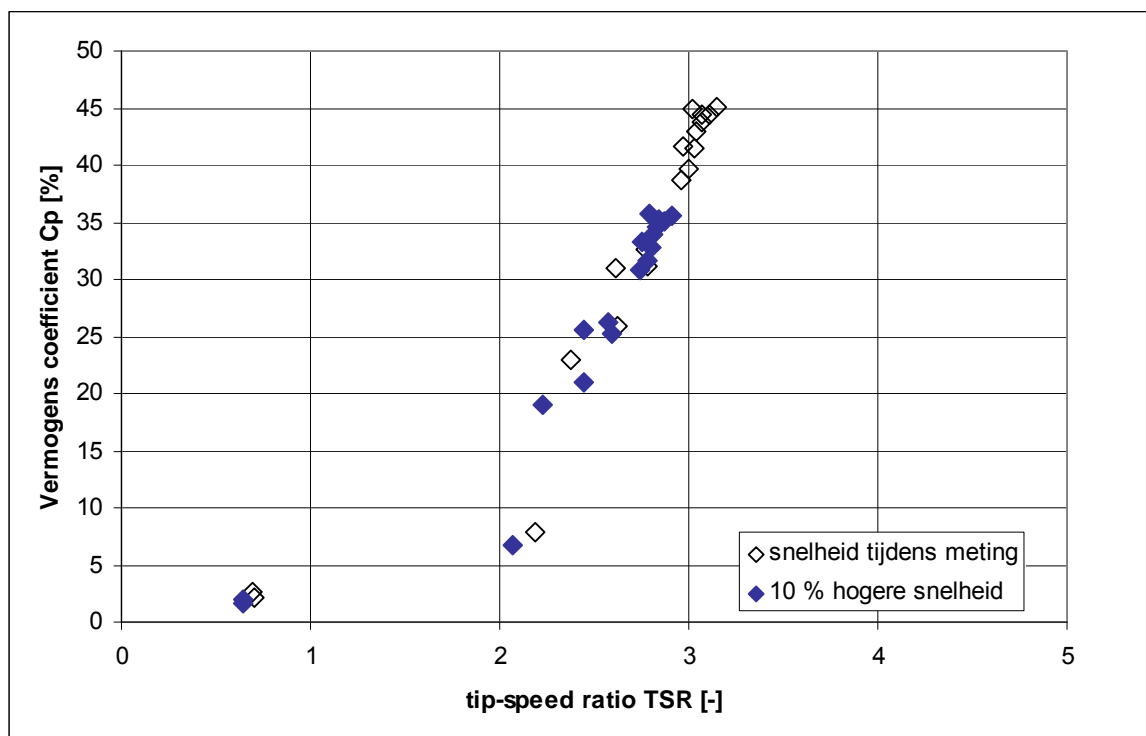
Als  $C_p = 100\%$  wordt, zou alle stromingsenergie uit het water onttrokken zijn. Dit is fysisch niet mogelijk omdat dan het water tot stilstand gebracht zou moeten zijn. Het theoretisch maximum is  $C_p=59\%$ , Betz 1920. De turbine vormt dan een zodanig obstakel dat een gedeelte van de stroming de turbine ontwijkt. Figuur 10 toont de vermogenscoëfficiënt als functie van de Tip Speed Ratio. De TSR is gedefinieerd als de verhouding van de bewegingssnelheid van de tip van de rotor en de ongestoorde aanstroomsnelheid:

$$TSR = \frac{V_{tip}}{U} \quad (2)$$

1. Bij een beoordeling van de rotor zou dit het asvermogen moeten zijn. Het asvermogen is ook door Tocardo bv. bepaald uit het elektrisch vermogen voor de converter, en correctie voor elektrische en mechanische rendementen.

De relatie tussen  $C_p$  en TSR (soms wel  $C_p$ - $\lambda$  curve genoemd) geeft de eigenschappen van de rotor weer. Ondanks dat de regeling van de turbine gericht was op een  $TSR=3$ , zijn nabij het moment van start en afslaan van de turbine toch enkele lagere TSR waarden beschikbaar. In Figuur 11 is weergegeven hoe de TSR met de stroomsnelheid varieerde in deze meetserie. Tevens zijn er gegevens van het doelbewust in "stall mode" draaien, hetgeen de laagste TSR geeft.

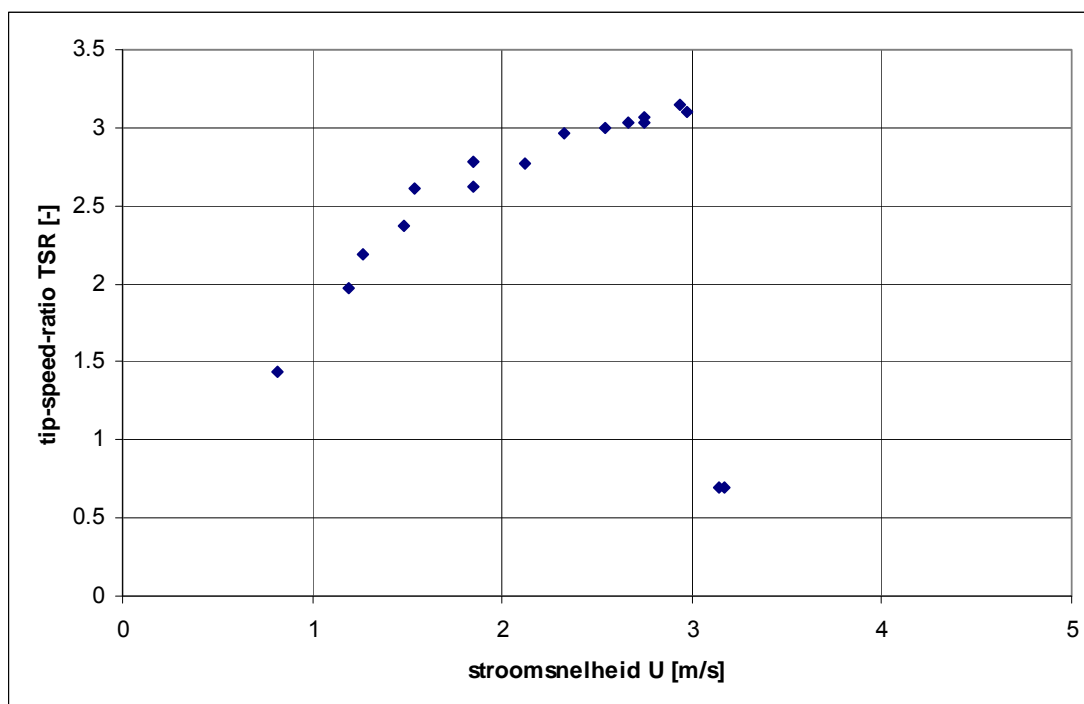
Boven  $TSR=3,1$  zijn er geen meetgegevens. Het is onbekend of de curve in figuur 10 nog iets stijgt. De hoogste efficiëntie wordt bereikt bij het maximum van de  $C_p$ -curve: het Best Efficiency Point (BEP). Bij hogere TSR buigen dit soort curven snel weer naar beneden: de rotor draait te hard en het blad wordt niet onder de juiste hoek aangestroomd om optimale lift te leveren.



Figuur 10 Variatie van de vermogenscoëfficiënt met de TSR, voor verschillende stroomsnelheden en bij "stall mode" (= overtrekken van het vleugelprofiel) bij de hoogste stroomsnelheid. De lage  $C_p$  waarden bij  $TSR=0.7$  behoren bij "stall mode"-condities

Bij eerste beschouwing van de meetresultaten is een maximale efficiëntie van circa  $C_p = 45\%$  berekend. Deze waarde is gebaseerd op de stroomsnelheid welke gemeten is wanneer de turbine in regulier bedrijf was. Indien echter de 10 % hogere stroomsnelheid, gemeten in "stall mode" beschouwd wordt (de turbine oefent dan niet veel weerstand op de stroming uit), wordt een maximale efficiëntie van 36 % berekend. Door deze waarde van de snelheid te gebruiken wordt wellicht de ongestoorde aanstroomsnelheid beter benaderd. Vanwege eerder genoemde onzekerheden m.b.t. tot de omrekenformules kan gesteld worden dat de berekende efficiëntie zich in de range 36% tot 45% bevindt. Daarbij dient echter opgemerkt te worden dat de bijbehorende snelheidsmeting niet erg nauwkeurig is, waardoor de werkelijke efficiëntie kan afwijken. De ongestoorde aanstroomsnelheid wordt namelijk niet direct gemeten. De meting vindt plaats via een meetwielletje dat zich aantoonbaar in de beïnvloedingszone van de rotor bevindt. Reproduceerbaarheid en nauwkeurigheid van het

meetwielkje zijn niet bekend. De resultaten van de meetcampagne met drijvende ADCP om het stroomveld stroomopwaarts van de turbine te meten geven niet de indruk erg nauwkeurig te zijn.



Figuur 11 Variatie van de TSR met de stroomsnelheid bij het doorlopen van de getij-ontwateringsslag (Deze figuur laat zien dat bij opstarten en stoppen de TSR lager is dan onder optimale condities)

Gezien de concessies die gedaan zijn ten voordele van robuustheid en het beperken van het aantal bewegende onderdelen is een efficiëntiecoëfficiënt van  $C_p$  in de range van 36 tot 45% zeker niet slecht.

### 3.4 Weerstandskracht turbine

De weerstandskracht bepaalt de mate waarin de stroming geblokkeerd wordt en de kracht welke de turbine op de ophangconstructie uitoefent. Het is gebruikelijk deze kracht in een dimensieloze coëfficiënt uit te drukken, de drag-coëfficiënt:

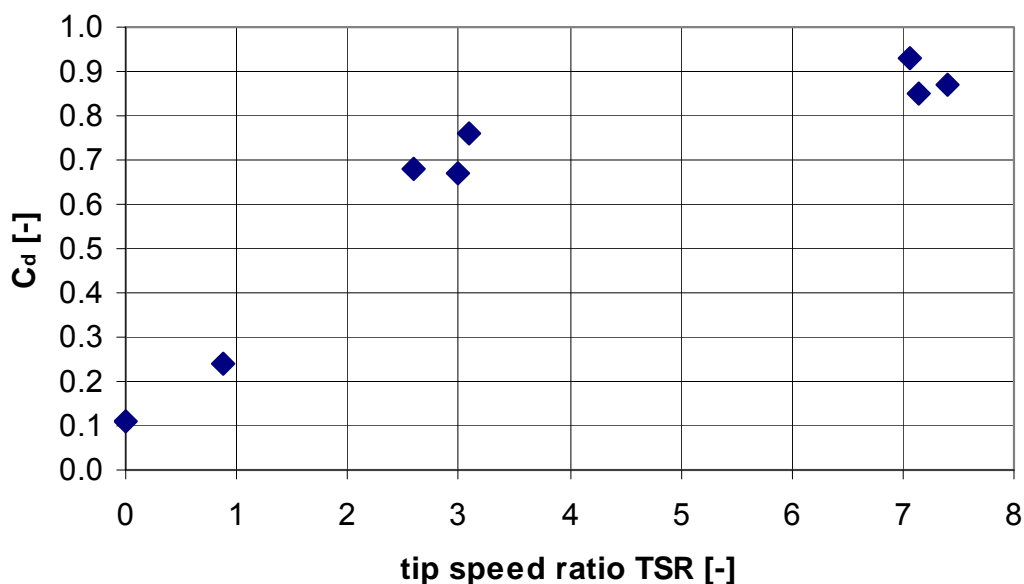
$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (3)$$

Hierin is D de weerstandskracht.

De Tocardo-turbine pilot heeft plaatsgevonden in een uitwateringssluis. Voor een vertaling van de pilotlocatie naar beoogde industriële productielocaties, al dan niet in clusteropstelling, dienen de gegevens transformeerbaar te zijn. De daartoe benodigde referentie bestaat uit een vrije opstelling van de turbine in oneindig breed en oneindig diep water. Omrekening van de  $C_d$ - en  $C_p$ -coëfficiënten gemeten op de pilotlocatie kan geschieden aan de hand van relaties in gespecialiseerde literatuur, met specifieke uitbreidingen in verband met locatiespecifieke omstandigheden. Berekeningen voor inzet op andere meer gecompliceerde locaties en/of in clusters kunnen in de toekomst geschieden aan de hand van numerieke stromingsberekeningen, waarin  $C_d$  als invoer dient.



Van de Berg en Vriesema (2010) beschrijven de meting van de weerstandscoëfficiënt van de Tocardo turbine gesitueerd in de uitwateringssluis te den Oever. De gemeten weerstandscoëfficiënt van de turbine is in Figuur 12 weergegeven als functie van tip speed ratio.



Figuur 12. Weerstandscoëfficiënt Tocardo turbine als een functie van de tip speed ratio.

Zoals bekend ligt het best-efficiëntie-punt van de turbine bij  $TSR=3$ . Bij vrijloop van de turbine (er wordt dan geen energie opgewekt),  $TSR=7,2$ , is de weerstand van de turbine maximaal. In aanvulling op de getalsmatige gegevens van  $C_d$  gegeven door Tocardo heeft Deltares uit de door hen gegeven meetreeks ook de weerstandcoëfficiënten bij stilstand en laag toerental afgeleid: d.i. bij  $TSR=0$  en  $0,9$ . Getalsmatig komt de  $C_d$ -waarde bij het best- efficiëntie-punt goed overeen met metingen welke aan een windturbine model in een windtunnel zijn uitgevoerd door Talmon 1985, vergelijk Figuur 12 met  $C_d$ -curve in Bijlage A. Ook het feit dat de  $C_d$ -waarde toeneemt rechts van het best-efficiëntie-punt (d.i. in vrijloop) komt overeen. Deze weerstandswaarden zijn overigens inclusief de aangestroomde ophangconstructie.

### 3.5 Turbinezog

Er zijn geen zogmetingen uitgevoerd. Zogmetingen kunnen uitsluitsel geven over turbulentie gegeneerd door de turbine. Deze turbulentie kan eventueel bodemleven beïnvloeden of erosie veroorzaken. Op de huidige pilotlocatie zal het niet eenvoudig zijn zogmetingen uit te voeren, zeker dicht bij de sluisbodem. Hiertoe is een geavanceerde ADCP nodig, maar voor een nauwkeurige meting is het beter puntmetingen uit te voeren met een EMS of Vector. Een alternatief hiervoor is wellicht om met numerieke stromingsberekening de zogturbulentie te bepalen (ook hiervoor dient de weerstandskracht van de turbine bekend te zijn), en kan deze vergeleken worden met turbulentie welke op de beoogde grootschalige productielocatie van nature al aanwezig is.

## 4 Factsheet

onderwerpen in dit factsheet zijn voorafgaand aan de analyse vastgesteld. Daarom kan er soms sprake van doublure zijn of onderwerpen welke niet in het voorgaande besproken / uitgewerkt zijn.

Geometrie pilotlocatie	figuur 3 en figuur 4
Geometrie turbine	figuur 4
Uni- of bi-directional turbine	Uni-directional
Meetmethode om turbine op best efficiency punt (BEP) te houden	via meting rotor koppel in combinatie met toerental
Meetmethode om turbine op de stroming gericht te houden	niet van toepassing
Positie van turbine in pilot locatie	figuur 3 en figuur 4
Positie van meetinstrumenten in pilot	zie paragraaf 3.1
Specificatie van meetinstrumenten in pilot	-snelheidswieltje RayMarine -drijvende ADCP
Flow hold-up in pilot	blokkeringsoppervlak circa 13%
Weerstandscurve in pilot	figuur 12
Efficiencycurve in pilot	figuur 10
Snelheidsherstel in zog	niet gemeten (slecht toegankelijk)
Turbulentie-intensiteit onderzijde zog	niet gemeten (slecht toegankelijk)
minimaal benodigde stroomsnelheid	circa 1 m/s is.
maximaal toelaatbare stroomsnelheid.	in ontwerp 5,9 m/s
% up-time	Er is bijna 2 maanden <sup>2</sup> achtereen tijdens elke uitwatering gedraaid <sup>3</sup>
ervaringen met meetmethode om turbine op BEP (en op de stroming gericht te houden: niet van toepassing)	Volgens Tocardo bv. geschiedt de TSR regeling (en daarmee BEP) aan de hand van gemeten koppel.
verwondingen/sterfte vissen of zoogdieren.	visnet direct achter turbine. Deltares heeft hier geen onafh. onderzoek naar gedaan.
berekende reference drag curve	nog niet te bepalen
berekende reference efficiency curve	nog niet te bepalen
aanbevelingen vervolgpilot	- variatie van TSR - berekening referentiesnelheid uit waterniveaus - meting referentiesnelheid - verdere stroomafwaartse plaatsing turbine, - zogmetingen met drijvende ADCP of anderszins

Tabel 1 FACTSHEET TOCARDO 2800 Pilot

<sup>2</sup> 1,5 week in mei en een vrijwel ononderbroken periode van 4 juli t/m 20 augustus.

<sup>3</sup>Voor het draaien is Tocardo afhankelijk van de sluis. Deze blijft in de zomer geregeld dicht vanwege de geringe regenval. De wind heeft verder ook veel invloed op de stand van het water.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

Op grond van voorliggende analyse en data kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- In de meetreeksen zijn geen haperingen van de turbine waargenomen. De turbine blijkt goed in “stall mode” te dirigeren te zijn, het geen bedoeld is om beschadigingen bij extreme omstandigheden te voorkomen.
- Er is geconstateerd dat deze turbine zeker een elektrisch vermogen van 35 kW haalt bij een watersnelheid van circa 3 m/s.
- De startsnelheid van de turbine ligt net iets beneden de 1 m/s. Voor stroomsnelheden van 2 m/s en hoger wordt er significant energie geproduceerd (van circa 20% tot maximaal waargenomen vermogen bij circa 3 m/s). De hoogst toelaatbare stroomsnelheid (5,9 m/s in ontwerp) is niet behaald in deze meetcampagne.
- Er heeft maar weinig variatie van de TSR (Tip Speed Ratio) plaats gevonden. Er zijn enkele fragmenten van de efficiëntie curve (=  $C_p$  curve) te zien, hetgeen desalniettemin voldoende is om een indruk te verkrijgen van de linkerzijde van de  $C_p$ -curve.
- De  $C_p$ -waarde neemt toe met stroomsnelheid (des te hoger de stroomsnelheid, des te efficiënter de turbine) De maximale  $C_p$  waarde is wellicht nog niet bereikt (het meetprogramma werd afgebroken vanwege sluisonderhoud).
- Alhoewel de stroomsnelheid niet nauwkeurig gemeten is volgt er uit de beschikbare gegevens een maximale efficiëntie ( $C_p$ ) in de range van 36% tot 45% is. Deze getalswaarden zijn tevredenstellend, temeer omdat ten faveure van robuustheid en betrouwbaarheid afgezien is van het gebruik van een instelbare bladhoek, waarmee de efficiëntie geoptimaliseerd had kunnen worden.
- Daar ook de weerstandswaarden ( $C_d$ ) in lijn zijn met de schaarse  $C_d$  gegevens van windturbines, kan besloten worden de pilot bij Den Oever af te ronden. Daarbij wordt afgeraden economische berekeningen te maken op basis van de gemeten efficiëntie. De meting van de ongestoorde stroomsnelheid stroomopwaarts van de turbine vormt namelijk een probleem. Turbulentiemetingen in het zog van de turbine zijn van secundair belang en kunnen in een vervolg gemeten worden.

De aanbevelingen voor een eventuele vervolgpilot zijn:

- Variatie van TSR voor een beter beeld van de vermogenscurve, inclusief het vaststellen van het best efficiëntie punt). De nog niet beschikbare metingen van de axiale kracht zouden eveneens geëvalueerd moeten. Wellicht bevat deze data set ook condities waarin de energieproductie van de Tocardo niet beperkt is door opgelegde “stall mode” en is de TSR wellicht meer gevarieerd.

- Aanvullend op de weinig nauwkeurige snelheidsmeting, wordt er aanbevolen hydrodynamische berekeningen uit te voeren naar stroomsnelheden in de sluisgang als functie van de waterstandsverschillen.
- Er wordt aanbevolen de referentiesnelheid direct te meten met gecertificeerde meetapparatuur gesitueerd op een vaste positie stroomopwaarts van de turbine. Daarbij is een verder stroomafwaartse plaatsing van de turbine eigenlijk beter. Dit kan echter moeilijk bij Den Oever omdat de turbine dan onder het wegdek gesitueerd moet worden.
- Zogmetingen met drijvende ADCP ter verkrijging van hydrodynamische gegevens met betrekking tot eventuele beïnvloeding van bodemleven of ontgroning stroomafwaarts van de turbine. Deze ADCP meting dient een ruimtelijk beeld te leveren van de gemiddelde snelheid en turbulentie in het zog. Dit kan wellicht nog in de Den Oever met een geavanceerde drijvende ADCP. Onder het wegdek zal draadloze communicatie- en positiebepalingsapparatuur geïnstalleerd moeten worden, of via puntmetingen met EMS of Vector). Wellicht kan dit beter op een andere beter toegankelijke locatie.

## 6 Referenties

Anoniem, 2009a, Projectplan commerciële pilot – Oosterschelde (15-06-2009), Tocardo Tidal Energy.

Anoniem, 2009b, Meetprogramma Tocardo Aqua Inshore, status per 14 juni 2009, Tocardo Tidal Energy.

Augereau H., 2009, Study about the real reference velocity to consider for the Tocardo aqua inshore turbine 2800, Tocardo & ISITV. report on 3<sup>rd</sup> year internship Marine Engineering School (confidential).

Berg B. van de & B. Vriesema, 2010, Behaviour of turbine thrust of a turbine in overspeed, Tocardo, report 2010R0030-p0001, v1.0a.

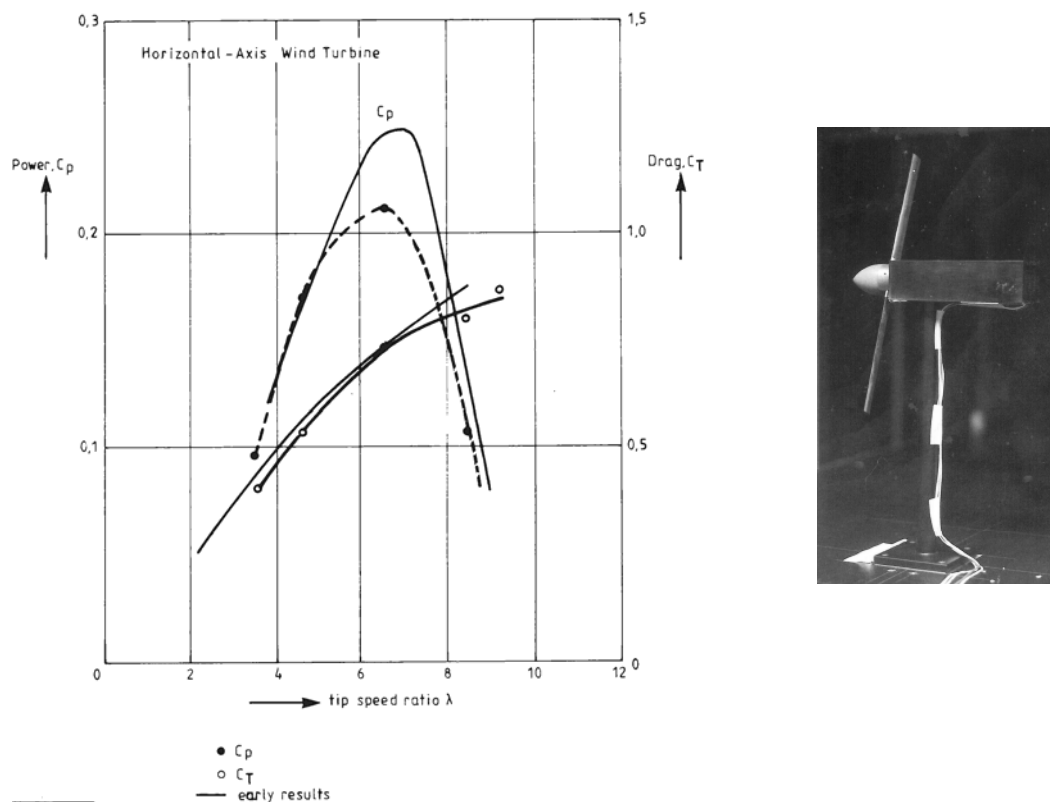
Betz A., 1920, Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen 1920; 26: 307–309.

Talmon A.M., 1985, The wake of a horizontal-axis wind turbine model; measurements in approach flow and in a simulated atmospheric boundary layer, report. 85-010121, TNO.

Whelan J.I., Graham J.M.R. and J. Peiro, 2009, A free-surface and blockage correction for tidal turbines, J. Fluid mechanics, vol.264, pp.281-291.

## A Vergelijkbare meetgegevens model windturbine

In 1985 zijn in een windtunnel bij TNO-Apeldoorn metingen uitgevoerd aan een model windturbine gesitueerd in een windtunnel (Talmon 1985). In deze windtunnel kon een atmosferisch turbulente grenslaag nagebootst worden. Van dit windturbine model zijn o.m. het geleverde elektrische vermogen en de weerstandskracht gemeten ( $C_p$ -en  $C_d$ -coëfficiënt). De turbinebladen zijn uitgevoerd met een vlak bladprofiel Gö 804. De weerstandskracht werd gemeten via een load-cell gesitueerd onder de voetplaat van het model. Tevens is zogontwikkeling gemeten. Windsnelheden zijn met hot-wire techniek gemeten.



Figuur A1. Resultaten van een 30 cm diameter windturbine model gesitueerd in een windtunnel met nagebootste atmosferische grenslaag. De weerstandscoefficiënt is hier aangeduid met  $C_T$  (rechter verticale as).