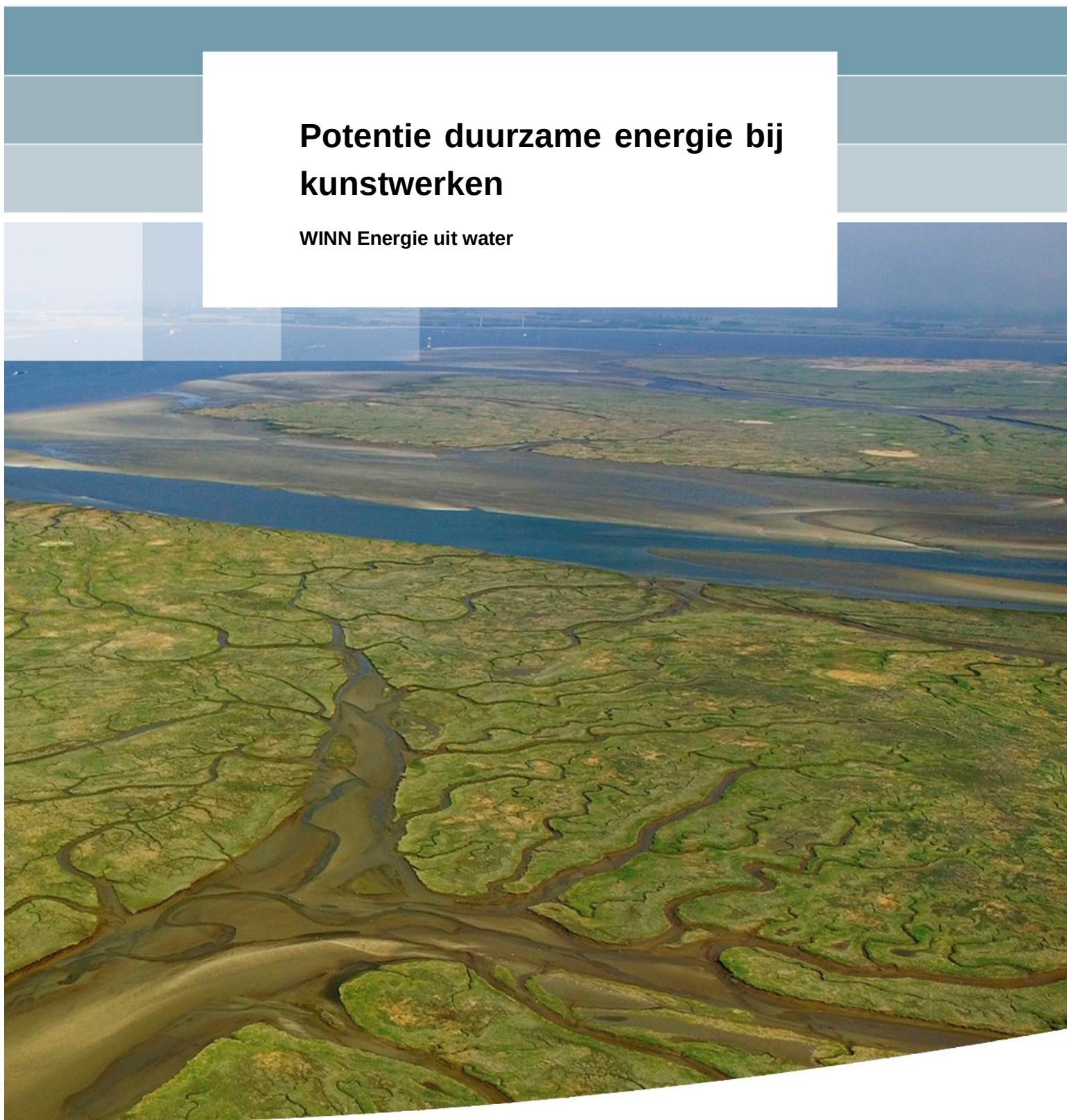


Potentie duurzame energie bij kunstwerken

WINN Energie uit water



Potentie duurzame energie bij kunstwerken

WINN Energie uit water

ir. R.J. de Jong

In samenwerking met
HKV (drs. N. Slootjes)
Royal Haskoning (ir. T. van Den Noortgaete)

Titel

Potentie duurzame energie bij kunstwerken

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WINN

Project

1201093-000

Kenmerk

1201093-000-VEB-0010

Pagina's

60

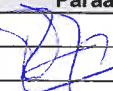
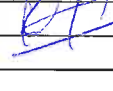
Trefwoorden

Waterkracht

Korte samenvatting

Rijkswaterstaat heeft zichzelf ambitieuze doelen gesteld met betrekking tot duurzaamheid. Een van de programma's van Rijkswaterstaat dat hieraan veel aandacht besteedt, is het WINN-programma. Dit project is uitgevoerd in het kader van het thema Energie uit Water binnen WINN Waterinnovatie Rijkswaterstaat. Het thema is erop gericht de kansen - die er in het natte beheersgebied van Rijkswaterstaat - bestaan op duurzame energie uit water, te benutten. Verschillende vormen van energie uit water zijn denkbaar, waaronder Blue Energy, golfenergie, getijde-energie en uiteraard ook de meer "traditionele" waterkracht in rivieren. Deze studie focust op de "water-energie" die bij de kunstwerken in rivieren te winnen is: vrijestromingsenergie van rivierwater en "verval-energie" van rivierwater.

Met deze via RWS-WINN aan Deltares opgedragen studie is een generieke inventarisatie gemaakt van de technische mogelijkheden die nu voorhanden zijn en naar de locaties in Nederland waar dergelijke energiewinning op vrij korte termijn mogelijk lijkt. Met deze studie worden kansrijke locaties, toe te passen installaties en te installeren vermogens aangegeven.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	10-02-2009	Ir. R.J. de Jong		Ir. T.H.G. Jongeling		drs. C.A. Bons	
	24-11-2009	Ir. R.J. de Jong		Ir. T.H.G. Jongeling		drs. C.A. Bons	

Status

definitief

Samenvatting

Kader

Rijkswaterstaat heeft zichzelf ambitieuze doelen gesteld met betrekking tot duurzaamheid. Een van de programma's van Rijkswaterstaat dat hieraan veel aandacht besteedt, is het WINN-programma.

Dit project is uitgevoerd in het kader van het thema Energie uit Water binnen WINN Waterinnovatie Rijkswaterstaat. Het thema is erop gericht de kansen - die er in het natte beheersgebied van Rijkswaterstaat - bestaan op duurzame energie uit water, te benutten. Verschillende vormen van energie uit water zijn denkbaar, waaronder Blue Energy, golfenergie, getijde energie en uiteraard ook de meer "traditionele" waterkracht in rivieren.

Met deze via RWS-WINN aan Deltares opgedragen studie is een generieke inventarisatie gemaakt van de technische mogelijkheden die nu voorhanden zijn en naar de locaties in Nederland waar dergelijke energiewinning op vrij korte termijn mogelijk lijkt. Met deze studie worden kansrijke locaties, toe te passen installaties en te installeren vermogens aangegeven.

Deze studie focust op de "water-energie" die bij kunstwerken in rivieren te winnen is: vrijestromingsenergie van rivierwater en "verval-energie" van rivierwater. Getij-energie valt buiten deze studie. Het gaat daarbij om relatief energierijke locaties (ondergrens 0,1 MW).

Als bronnen voor deze studie zijn gehanteerd rapporten en kennis van de watersystemen (op grond van landelijke modelleringen) bij Deltares en HKV Lijn in Water en informatie bij de Digitale Informatie Dienst van Rijkswaterstaat. Er is slechts zeer beperkt informatie bij de diverse locale beheerders opgehaald.

Het gaat in dit project niet om het toewerken naar experimenten of het realiseren van demonstratie-installaties, maar om daadwerkelijk en substantieel energie op te wekken. Doel is realisatie op korte termijn (paar jaar) en dus met machines die nu vanuit de industrie als zijnde voldoende ontwikkeld aangeboden worden. Vanwege diverse ontwikkelingen in de industrie is het mogelijk dat over bijvoorbeeld 5 jaar er (weer) uit meer mogelijke machines kan kiezen. Verwacht wordt echter niet dat in de loop van de tijd het aantal kansrijke locaties of de hoeveelheid te winnen energie voor deze vorm van energiewinning belangrijk zal wijzigen.

Dit project is in samenwerking uitgevoerd met Rijkswaterstaat-programma ZekerDuurzaam. In een vervolgfase worden de "high-potential" locaties geselecteerd uit de long list die deze studie oplevert. Deze short list zal in samenwerking met Rijkswaterstaat ZekerDuurzaam, een onafhankelijk ingenieursbureau en zo mogelijk ook met inbreng van een energieproductiemaatschappij en van machinefabrikanten gevormd worden. Per potentieel interessante locatie dient daarna een voorontwerp- en effectstudie te worden gemaakt. Belangrijk aspect hierbinnen zal gevormd worden door de milieu- en de visvriendelijkheid. De economische haalbaarheid van de betreffende locaties dienen dan duidelijker te worden.

Duurzame energie

Het begrip 'duurzaam' heeft diverse raakpunten: het milieu, de omgeving, de financiering, beheer en onderhoud, hernieuwbaarheid van het hele proces (*cradle to cradle*).

Het milieu dient niet in belangrijke mate belast te worden met de gevolgen ervan. Vismortaliteit is in dit verband een belangrijk aandachtspunt. Mitigerende maatregelen zijn mogelijk, maar er is ook twijfel over de effectiviteit ervan. Het zuurstofgehalte van het water wordt beïnvloed en kan van invloed zijn op het riviermilieu.

De omgeving mag geen belangrijke hinder ondervinden of er dient voor voldoende compensatie gezorgd te worden. Hinder kan ontstaan door stroming, geluidproductie, bereikbaarheid, belemmering hoogwaterafvoer, etc.

De financiering dient op orde te zijn. Dat wil zeggen dat de aanlegkosten en beheer- en onderhoudskosten in voldoende mate gedekt moeten worden door de opbrengsten. De subsidie die het Ministerie van Economische Zaken wil verstrekken voor deze vorm van energiewinning is belangrijk. In geval niet kostendekkend kan worden geproduceerd kunnen er additionele belangen zijn om een installatie toch te plaatsen. Toerekening van een deel van de kosten aan die andere belangen dient dan plaats te vinden.

Goed beheer en onderhoud van een installatie zijn van cruciaal belang voor de probleemloze werking. Juist bij de relatief kleinere installaties, waar het bij Nederlandse waterkracht altijd om gaat, is dit een belangrijk aandachtspunt.

Waterkracht en natuur

Waterkracht is de gebruikelijke term voor energiewinning uit stromend water. Er zijn diverse machines voor ontwikkeld en met de meeste - tot op heden in de wereld geïnstalleerde machines - kunnen zeer hoge rendementen (tot ca 90%) en grote vermogens worden gehaald. Deze machines vormen per locatie een geïnstalleerd vermogen van enkele tot vele honderden megawatts (MW). Over het algemeen zijn deze machines helaas visonvriendelijk en wordt er daarom veel aandacht gegeven aan de mate van vismortaliteit en worden mitigerende maatregelen toegepast.

Dergelijke grote hoogrendement installaties vergen belangrijke civieltechnische werken. Met name voor dit aspect is het relatieve aandeel in de aanlegkosten bij kleinschaliger toepassing over het algemeen zelfs belangrijk hoger. Dergelijke kleine installaties zijn dus relatief duur.

Wereldwijd is men bezig om voor kleinschalige toepassing alternatieven te ontwikkelen die minder belastend zijn voor het milieu en minder civiele kosten vergen. Enkele daarvan zijn voldoende doorontwikkeld en commercieel verkrijgbaar. Sommigen bestonden al lang (zoals de waterraderen). Het is echter niet zo dat bestaande hoogrendement machines met grote vermogens vervangen kunnen worden door nieuwe machines die minder belastend zijn voor het milieu – met name voor de vismigratie. Er gelden andere toepassingsgebieden en de nieuwe machines zijn bedoeld voor een range van enkele kW tot enkele MW. De overlap met de vermogenklasse van de grote hoogrendementmachines is betrekkelijk klein.

Waterkracht en Nederland

Energiewinning uit stromend water is in Nederland, vergeleken met wat in andere landen mogelijk is en ook in vergelijking met onze gewone energiecentrales, alleen kleinschalig mogelijk. De vervallen in Nederland zijn klein of er is nauwelijks debiet aanwezig. Bovendien zijn de snelheden in de waterlopen niet erg hoog. Het aangeboden water wordt ook voor diverse doeleinden gebruikt waardoor in veel gevallen een combinatie met waterkracht van enige omvang niet mogelijk is.

Locaties

Het zoeken naar mogelijkheden bij bestaande kunstwerken heeft een aantal voordelen: de hoofdconstructie om verval te creëren bestaat al, scheepvaart en waterkracht zitten (letterlijk) niet in elkaars vaarwater, een groot deel van het debiet kan door de centrale geleid worden of snelheden zijn veel hoger zodat de opstelling van een molen interessant wordt (dit is het geval indien een waterstroom door een vernauwing gedwongen wordt). Bovendien is er bij elk hydraulisch kunstwerk sprake van energiebehoefte, maar is er ook de mogelijkheid het elektrische net te voeden. Bij grotere vermogens moeten de kosten van de aparte aansluiting op het elektrische net echter niet onderschat worden.

Er kunnen ook negatieve consequenties zijn voor de werking van het bestaande kunstwerk. Dit is het geval als molens in de bestaande stroom worden gehangen en hierbij geen extra bouwwerk wordt gemaakt. Deze stroom zal dan een extra weerstand ondervinden en daardoor bv. de spuisluis een minder grote capaciteit geven of nivelleertijden van een schutsluis doen vergroten.

Bestaande waterkrachtcentrales

In Nederland is in het verleden al geïnvesteerd in waterkracht. Het geïnstalleerd vermogen daarvan is in totaal 38 MW en de gekozen machines zijn alle van een visonvriendelijk type en aangebracht in speciale bouwwerken (centrales). De bouw (of renovatie) ervan is toen mogelijk geweest dankzij subsidies.

Financieel kader

Ook nu is er een subsidieregeling van het Ministerie van Economisch Zaken, zij het dat deze voor waterkracht een bescheiden ondersteuning levert. De garantieprijs voor laagverval (<5m) is 0,125 €/kWh, maar voor hoogverval (>5m) is slechts 0,073 €/kWh. Deze bijpassing gebeurt enkel voor een beperkt aantal vollasturen (per locatie) op jaarbasis.

De haalbaarheid van een installatie kan worden vergroot als er meerdere belangen gediend kunnen worden. Opwekking van elektrische energie is dan niet het enige waar het om gaat en de kosten van een installatie kunnen dan verdeeld worden.

Mogelijk geschikte locaties

De verkenning werd gericht op locaties met de mogelijkheid enig vermogen op te wekken. Dat wil zeggen van een paar honderd kW tot enkele MW. Belangrijk is dat een locatie financieel-economisch een kans heeft. Indien ook andere overwegingen gelden dan zijn die voor zover bekend meegenomen in de keuzen. Het heeft concreet geleid tot de volgende, mogelijk interessante, locaties voor duurzame energie:

Stuwen

Maas: de stuwen bij Borgharen, Roermond, Belfeld, Sambeek en Grave
Nederrijn: de stuwen bij Driel en Hagestein

Spuisluizen en stormvloedkeringen:

De Afsluitdijksluizen, de Haringvlietspuisluis, de Oosterscheldekering, de Bathse spuisluis, en het sluiscomplex bij Eefde

Schutsluizen met spuifunctie (of daarmee uit te breiden)(debiet > 5 m³/s)

De sluizen bij Wijk bij Duurstede, Tiel, Bosscherveld, Born en Maasbracht en de in aanbouw zijnde Sluis III in het Prinses Wilheminakanaal

Bruggen

De bruggen over de Oude Maas, Noord, Dordtsche Kil, Noord, Waal, en over de Grensmaas

Opmerkingen:

Er zijn veel meer schutsluizen (geschat wordt ca 30, maar een deel hiervan niet in Rijkswateren) waar een klein spuidebiet (orde 1 m³/s) aanwezig is dat gebruikt zou kunnen worden voor het energieneutraal maken van het betreffende kunstwerk. Elke locatie biedt orde 30kwatt. Waarschijnlijk zijn dergelijke locaties zonder de genoemde nevendoelstelling economisch onvoldoende interessant. Ook zijn er duikers of sifons (vaak niet in Rijkswateren) met enig debiet (maar gering verval) waar een kleine hoeveelheid energie op te wekken zou zijn. Een voorbeeld is in de verbinding AA/ZuidWillemsvaar(nabij Tilburg). Dergelijke locaties vallen buiten het bestek van deze studie omdat gezocht werd naar locaties met mogelijkheden voor wat groter vermogens. Bovendien geldt vrij algemeen voor alle zeer kleine installaties dat er naast economische ook andere redenen moeten zijn om over te gaan tot realisatie. Om daar achter te komen dient met alle lokale beheerders contact gezocht te worden en dat is niet gedaan.

Overwegingen bij de keuze van de machines

De keuze van het type machine wordt door de lokale omstandigheden en mogelijkheden bepaald. Hoogrendementmachines voor grotere vermogens zijn allemaal visonvriendelijk. Mitigerende maatregelen zijn dan nodig om de vis veilig om de machines heen te leiden, maar er zal altijd sprake zijn van een zekere vismortaliteit. Visvriendelijke machines bestaan, maar hebben aanmerkelijk kleinere vermogens. Dat geldt in sterke mate bij eenzelfde ruimtebeslag. In deze studie is uitgegaan van op de markt thans te verkrijgen machines. Voor stuwen is uitgegaan van zowel visonvriendelijke en visvriendelijke opstellingen. Voor schutsluizen waar ook een spuifunctie bestaat kon in de meeste gevallen uitsluitend worden gekozen voor visvriendelijke machines. Hetzelfde geldt voor opstellingen bij bruggen.

Totaal van nieuw te installeren vermogen

Gesommeerd gaat het om ca. 20 MW nieuw te installeren vermogen in geval uitsluitend visvriendelijke installaties worden gekozen. Echter indien de mogelijkheden maximaal benut kunnen worden dan is het potentieel ca. 60 MW met gebruikmaking van visonvriendelijke installaties. Voor de SDE-subsidie komt echter maximaal 20 MW in aanmerking.

Gelet op waar de grootste potenties zitten of waar al initiatieven lopen adviseren we om met voorrang te kijken naar de volgende kansrijke locaties:

- A. In de waterstroom te hangen molens kunnen in al bestaande spuigangen relatief snel aangebracht worden. Het totale geïnstalleerde vermogen betreft dan 3,5 MW. Dit komt overeen met 70 visvriendelijke molens van het Tocardo type
- B. Installaties bij stuwen vergen meer tijd. De meest interessante lijken Borgharen, Sambeek en Grave. Het gaat hier om maximaal 27 MW geïnstalleerd vermogen (visonvriendelijk). Overwogen kan worden eerst een studie te doen naar de beschikbare methoden voor veiligstelling van de vismigratie.
- C. Initiatieven (deels particulier) lopen al bij de schutsluizen Wijk bij Duurstede (Prinses Irenesluis), Tiel (Prins Bernardsluis), Born, Maasbracht Bosscherveld en bij het aflatwerk Eefde. Het gaat hier om ca 5 MW geïnstalleerd (visvriendelijk) vermogen.

Advies voor verder onderzoek

Systemen om vismigratie beter te sturen zijn wereldwijd in ontwikkeling. Het lijkt zinvol om de ervaringen met installaties die voor Nederlandse omstandigheden (visafhankelijk) kunnen werken bijeen te brengen. Ook kijken turbinefabrikanten naar veranderingen in de vormgeving van turbinebladen die in een lagere vismortaliteit resulteren. Mogelijk kan er dan anders tegen hoogrendementmachines voor hogere vermogens worden aangekeken dan nu het geval is. Het totaal te installeren vermogen kan dan significant omhoog. Een dergelijke studie dient door en met andere instituten in Nederland en wellicht ook buitenland te worden uitgevoerd.

Per kansrijke locatie dient de positieve verwachting te worden omgezet in een degelijk voorontwerp met business case. Aanbevolen wordt om eerst de locaties voor plaatsing van molens te kiezen. Deze zijn relatief snel te plaatsen. Uitwerking voor locaties waar ook hoogrendement machines voor hogere vermogens geplaatst kunnen worden kunnen beter eerst wachten op de uitkomsten van een vismigratie- en vismortaliteitsstudie.

Het oordeel over de haalbaarheid van waterkracht is in belangrijke mate ingegeven door de financiële randvoorwaarden. Deze kunnen in de loop van de tijd wijzigen en dan kunnen locaties die nu niet haalbaar zijn wel in aanmerking komen. Ook kunnen systemen die nog in ontwikkeling zijn commercieel beschikbaar komen en van invloed zijn op beslissingen. Als deze randvoorwaarden belangrijk wijzigen is een nieuw oordeel gewenst.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1	geeft een algemene inleiding en de kadering van de studie
Hoofdstuk 2	geeft zowel technische aspecten als financieel kader.
Hoofdstuk 3	behandelt de mogelijke machines.
Hoofdstuk 4	behandelt de mogelijk locaties.
Hoofdstuk 5	somt de kansrijke locaties op en geeft het totaal aan nieuw te winnen elektrische energie uit waterkracht.
Annex 1	Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht
Annex 2	Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland

Inhoud

1 Algemeen	1
1.1 Inleiding/aanleiding	1
1.2 Opzet van de studie	2
1.3 Uitvoering van de studie	2
2 Het begrip ‘waterkracht’ in de Nederlandse setting	3
2.1 Algemeen	3
2.2 Theorie	5
2.3 Overwegingen bij de keuzen voor diverse typen machines in Nederland	6
2.3.1 Waterkrachtcentrales – overwegingen	6
2.3.2 Molens in een stroom – overwegingen	8
2.3.3 Tussenvormen	10
2.4 10	
2.4 Het financiële kader	10
2.5 Kleine waterkracht in de praktijk	12
3 Machines	13
3.1 Machines voor verval (en debiet)	13
3.1.1 De van oudsher bekende axiale Francis, Kaplan of Pelton turbines	13
3.1.2 Van het Kaplan-type afgeleide machines	14
3.1.3 De cross-flow turbine	14
3.1.4 Waterraderen en de schroefmotor (Archimedes)	14
3.1.5 De HydroRing	14
3.2 Machines voor installatie in stroming	15
3.2.1 Het stromingswiel	15
3.2.2 Molens met bladen draaiend in een vlak loodrecht op de stroom	15
3.2.3 Molens van het Darrieus-type	16
4 Locaties	17
4.1 Locaties waar hydraulisch verval en debiet geconcentreerd aanwezig zijn en waar hydraulische energie ongebruikt blijft	17
4.2 Locaties waar hydraulisch verval aanwezig is, maar een spuifunctie ontbreekt of gering is	19
4.3 Locaties waar vanwege het waterbeheer in de toekomst veranderingen verwacht worden en dan de waterkrachtoptie meegenomen kan worden	19
4.4 Locaties waar met zeer beperkte inspanning voor wat betreft de civiele constructies enige opwekking van waterkracht mogelijk is	20
4.5 Locaties waar nu geen constructies bestaan, maar wellicht een centrale gebouwd zou kunnen worden.	21
4.6 Overige locaties	21
5 Concrete voorstellen voor geschikte nieuwe locaties en de daarbij toe te passen machines	22
5.1 Mogelijk geschikte locaties	22
5.1.1 Stuwen, spuisluizen, doorvoersluizen, stormvloedkeringen	22
5.1.2 Schutsluizen met een (mogelijke) spuifunctie	33
5.1.3 Schutsluizen / nivelleersystemen	41

5.1.4	Bruggen	41
5.1.5	Elders	42
5.2	Tabellen met technisch potentiële mogelijkheden voor waterkracht in de Rijkswateren	42
5.3	Financiële implicaties	44
5.4	Welke locaties met voorrang aanpakken?	46
6	Literatuur	47

Bijlage(n)

A	Annex 1: Overzicht van techniek voor kleinschalige waterkracht - Royal Haskoning (door ir. Tom Van Den Noortgaete)	49
B	Annex 2: Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland - HKV <u>LIJN IN WATER</u> & Royal Haskoning (door drs. Nadine Sloodjes & ir. Tom Van Den Noortgaete)	50

1 Algemeen

1.1 Inleiding/aanleiding

Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat/Rijkswaterstaat wil de innovatie van technieken om duurzame energie uit water te winnen stimuleren en de implementatie van dergelijke technieken faciliteren. Hiertoe is onder meer in WINN (Innovatieprogramma voor Wateruitdagingen van Rijkswaterstaat) het thema 'Energie uit Water' opgericht.

Het onderhavige project 'Verkenningen Energie uit Water' werd in het kader van WINN uitgevoerd. De verkenningen betreffen de Nederlandse Rijkswateren. Doel is op termijn van een paar jaar een relatief belangrijke uitbreiding van energieopwekking uit water te realiseren. In deze studie gaat het er om aan te geven welke de mogelijk toepasbare technologieën zijn en waar geschikte locaties zijn om met enige omvang elektrische energie te produceren. Het huidige geïnstalleerd vermogen bedraagt ongeveer 37,5 MW. Beoogd wordt een verdrievoudiging daarvan.

Behalve bovengestelde algemene doelstelling wil Rijkswaterstaat daarnaast ook (a) de in het eigen beheersgebied benodigde energie minder uit fossiele brandstoffen betrekken en (b) de energiebehoefte terugdringen. Het Rijkswaterstaat-programma ZekerDuurzaam is daartoe actief. Een van de alternatieve mogelijkheden daartoe is het gebruik van waterkracht.

In 2008 werd door Deltares een eerste verkenning uitgevoerd naar mogelijke alternatieve energiebronnen. De resultaten van deze studie zijn vermeld in het rapport 'Water als bron van duurzame energie' (subtitel 'Inspiratieatlas van mogelijkheden'), Deltares, augustus 2008. Daarin leek in de Nederlandse Rijkswateren nog op diverse plaatsen energiewinning (waterkracht) mogelijk. Op een aantal plaatsen is een werkend waterkrachtstation aanwezig, maar waarschijnlijk kunnen veel meer mogelijkheden worden benut. Het ministerie van Verkeer en Waterstaat / Rijkswaterstaat hecht belang aan het beter in kaart brengen van deze mogelijkheden.

Deltares heeft van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat opdracht (vallend onder 'toegepast onderzoek' (TO)) gekregen in dit kader werkzaamheden voor het programma WINN uit te voeren. Voor de opdrachtbrief van Rijkswaterstaat Waterdienst wordt verwezen naar het projectplan van het programma management WINN, Deltares-projectcode 1200059; echter het onderhavige project kreeg vervolgens Deltares-projectcode 1201093.

Het project is mede op basis van het voorgaande als volgt ingekaderd:

- Het onderzoek wordt gericht op de mogelijkheden stromingsenergie om te zetten in elektrische energie. Golfenergie wordt niet bestudeerd (al worden in het rapport wel enkele opmerkingen gemaakt over golfenergiesystemen).
- Het zoekgebied betreft de Nederlandse Rijkswateren behalve de zee: rivieren, kanalen, meren, estuaria (maar afsluitdammen aan zee worden meegenomen en voor zee geschikte systemen worden wel aangeduid).

- Deze studie wordt gericht op de mogelijkheden bij bestaande kunstwerken elektrische energie uit stromend water op te wekken. Mogelijke machines voor andere locaties worden echter wel aangegeven. Opmerkingen over toepassing van waterkracht bij toekomstige werken worden ook gemaakt.
- Realisatie dient op redelijk korte termijn mogelijk te zijn; in de orde van enkele jaren. Dat betekent dat van de huidige situatie moet worden uitgegaan. Er bestaan wel plannen om in de Afsluitdijk een veel royaler spuumiddel aan te brengen. Ook wordt nagedacht over het deels terugbrengen van getij op de Grevelingen middels een veel royaler doorlaatmiddel in de Brouwersdam. Ook voor andere locaties worden vingeroefeningen gehouden. Maar deze toekomstige ontwikkelingen laten we in deze studie goeddeels buiten beschouwing.
- Locaties voor het op te wekken elektrisch vermogen dienen meer dan heel geringe vermogens te kunnen leveren (orde 0,1MW of meer bij energie uit stroming en orde 1MW of meer bij energie uit verval en debiet) gedurende een belangrijk deel van de tijd.
- Alleen de mogelijke middelen (typen stromingsmachines (turbines etc.)) die als voldoende marktrijp zijn te beschouwen worden meegenomen (al worden in dit rapport wel opmerkingen gemaakt over systemen in ontwikkeling).
- Duurzaamheid van de aan te brengen systemen is van belang; dat wil zeggen robuust, betrouwbaar, onderhoudsarm, milieuvriendelijk, compensatie van nadelige effecten mogelijk, etc.
- Koppelingsmogelijkheden van de stroomproductie aan het landelijke net of lokaal gebruik worden open gelaten.
- Eigenaarschap of beheer van de installatie is niet aan de orde in deze studie; voor realisatie is dat echter essentieel; waar mogelijk worden suggesties gegeven.
- Waar mogelijk wordt een indicatie gegeven voor kosten en kWh-prijs van de op te wekken elektrische energie.
- Besluitvorming op basis van de resultaten van deze studie vergt voorafgaand per locatie nader onderzoek; dit onderzoek wordt gericht op het verkrijgen van een overzicht en is niet een haalbaarheidsonderzoek, c.q. een business case per locatie.

1.2 Opzet van de studie

De studie is gericht op

- 1 het vinden van geschikte locaties in de Nederlandse Rijkswateren voor waterkracht uit stroming
- 2 het beoordelen van mogelijke technische oplossingen (machines)
- 3 het combineren van hiervoor genoemde ad1 en ad2 en het doen van aanbevelingen voor nadere studies voor enkele locaties zodat daar in de komende 3 à 4 jaar waterkracht met enige omvang ontwikkeld kan worden.

1.3 Uitvoering van de studie

De studie werd uitgevoerd door Deltares in samenwerking met twee ingenieursbureaus, t.w. HKV LJN IN WATER en Royal Haskoning. HKV met als specifieke taak het zoeken naar mogelijke locaties en Royal Haskoning voor een beoordeling van mogelijke machines. Het team is regelmatig bijeen geweest om een gezamenlijk product te realiseren. Teamleider was ir. R.J. de Jong; van HKV was drs. N. Slootjes betrokken en van Royal Haskoning ir. T. Van Den Noortgaete.

2 Het begrip ‘waterkracht’ in de Nederlandse setting

2.1 Algemeen

Omzetting van hydraulisch energie in elektrische energie wordt kortweg aangeduid met waterkracht (in het Engels: ‘hydro power’, ook wel ‘water power’). Men spreekt over waterkrachtcentrales indien het om bouwwerken gaat waarbinnen zich machines bevinden die in staat zijn om stromingsenergie om te zetten in elektrische energie. Er bestaan echter ook losse opstellingen (molens).

De hoeveelheid aanwezige energie in stromend water (een rivier) die kan worden omgezet in elektrische energie wordt gewoonlijk lokaal berekend en niet ten opzichte van het zeeniveau. Dat laatste zou tot veel te hoge, niet reële schattingen voor te winnen energie leiden. Rivieren gebruiken de beschikbare energie immers zelf om naar zee af te stromen¹. Daar waar tijdelijk of permanent surplus van energie bestaat kan het zonder grote problemen uit het water worden gehaald, alhoewel men ook daarbij bedacht moet zijn op mogelijke veranderingen in het natuurlijke systeem.

Zoals bekend voeren rivieren geen constante waterstroom af. De afvoeren fluctueren met de bovenstroomse regenval en dooi van ijs en sneeuw, maar worden ook sterk beïnvloed door de berging in dat gebied en de geografische spreiding van al deze verschijnselen. De Maas wordt vooral door regenwater gevoed; de Rijnafvoer wordt zowel door regen als door sneeuwdooi beïnvloed en vertoont in percentage minder sterke schommelingen dan de Maas al wordt het regenkarakter van de Rijn wel sterker.

In Nederland bestaan er nauwelijks mogelijkheden om deze afvoerfluctuaties te dempen. Echter, voor de goede werking van een waterkrachtcentrale is een langdurig en constant aanbod van water essentieel. De economie van een centrale laat niet toe dat er veel weinig benutte capaciteit kan worden geïnstalleerd. Bovendien is ons rivierensysteem zo ingericht dat bij grote afvoeren allerlei energievergende obstakels (bv stuwen) uit de rivieren moeten worden gehaald. Wat dan over blijft is een traag naar zee lopende brede stroom water. Juist bij de grote afvoeren kan er geen energie uit de rivieren worden gehaald.

Duurzame energie

De focus is gericht op duurzame energie. Het begrip ‘duurzaam’ dient nader te worden verklaard. Het heeft in het kader van waterkracht diverse raakpunten: het milieu, de omgeving, de financiering, beheer en onderhoud, hernieuwbaarheid van het hele proces (*cradle to cradle*).

Het milieu dient niet in belangrijke mate belast te worden met de gevolgen van energieopwekking. Een voor Nederland vrij flinke waterkrachtcentrale van 10 MW verwerkt een groot deel van het jaar het water dat anders over een stuw zou gaan.

¹ Rivieren zijn natuurlijke afvoersystemen van water en sediment. Te veel energie uit een rivier halen heeft tot gevolg dat sediment niet meer getransporteerd kan worden. Lokaal is dat waarneembaar in diepe reservoirs waar de stroming verlamd raakt met als gevolg daarvan sedimentatie in het reservoir. In het stroomgebied benedenstrooms van de dam kunnen juist door gebrek aan sediment allerlei problemen ontstaan.

In onze Nederlandse gestuwde rivieren Maas en Neder-Rijn worden de stuwen bij een hoogwaterafvoer (met name dan vindt ook sedimentaanvoer plaats) volledig gestreken waardoor snelheden over het hele riviertraject hoog zijn bij hoge rivierafvoeren en het sediment nog voldoende naar benedenstrooms kan worden getransporteerd.

Het water wordt minder belucht en de toegepaste machines leiden tot een belangrijke vismortaliteit. De beluchting bij stuwen is weliswaar ook kunstmatig en vissen hebben ook problemen om bij de stuw in bovenstroomse richting te gaan zodat vistrappen al nodig waren. Maar de beluchting is er nu eenmaal en de benedenstroomse vismigratie – en dan vooral de vislarven - ondervindt sterk negatieve gevolgen. Mitigerende maatregelen zijn mogelijk, maar er is ook twijfel over de effectiviteit ervan.

Overigens is het verhaal dat de vismortaliteit in eerste instantie te wijten is aan vermalings in een Kaplan turbine onjuist. De ruimte tussen de turbinebladen is zeer groot (diameter van de omtrek 4 m). Een enkele vis kan wel eens geraakt worden door een turbineblad, maar de vissen gaan met het water mee en worden soepel rond de bladen geleid. Het water stroomt namelijk heel mooi door de turbine. Het probleem is de sterke negatieve druksprong (absolute druk is bijna = 0) waardoor visblazen kapot gaan. De vis kan nog een tijdje zwemmen, maar sterft verderop².

De omgeving mag geen belangrijke hinder ondervinden of er dient voor voldoende compensatie gezorgd te worden. Hinder kan ontstaan door stroming, geluidproductie, bereikbaarheid, belemmering hoogwaterafvoer, etc. Ook hiervoor zijn compenserende maatregelen mogelijk, maar dat betekent verhoging van de kosten van een centrale.

De financiering dient op orde te zijn. Dat wil zeggen dat de aanlegkosten en onderhoudskosten in voldoende mate gedekt moeten worden door de opbrengsten. De subsidie die het Ministerie van Economische Zaken wil verstrekken voor deze vorm van energiewinning is belangrijk.

Goed beheer en onderhoud van een installatie zijn van cruciaal belang voor de probleemloze werking, maar aan kleine installaties is niet makkelijk voortdurend de juiste aandacht te geven. Installaties die weinig onderhoud vergen (zoals de Archimedesschroef) zijn dan in het voordeel.

Nieuwe werken worden steeds meer ontworpen met het oog op hernieuwbaarheid van het hele proces van bouw, gebruik en afbraak. Het gaat daarbij vooral om de toepassing van veilige en volledig herbruikbare grondstoffen.

Mogelijkheden voor winning van energie uit stromend water

Grofweg bestaan er twee mogelijkheden: winning door omzetten van potentiële energie (verval met debiet) in elektrische energie en omzetting van kinetische energie (alleen stroming) in elektrische energie.

Energie uit verval (en debiet)

Om energie uit verval (met debiet) te kunnen halen is over het algemeen afdamming van een stroom nodig. Over de afsluitdam ontstaat dan verval en het debiet door de dam kan worden gebruikt om elektrische energie op te wekken.

Omzetting van potentiële energie in elektrische energie vindt plaats in een inrichting (waterkrachtcentrale) waar het water inkomt om via kanalen en machine(s) naar beneden te worden gebracht en te worden afgevoerd. Het water stroomt dan met een zeer klein surplus aan energie de centrale uit.

Inzet van de machines vereist altijd een verval, dus er zal een stuw of dam aanwezig zijn of moeten worden aangelegd. De aanleg van civiele werken is over het algemeen kostbaar.

². Overigens is de turbinefabrikant VOITH van mening dat zij de turbines belangrijk verbeterd hebben en de vismortaliteit bij nieuwe VOITH-machines minder groot is.

Daar staat tegenover dat vaak een groot deel van de beschikbare hydraulische energie kan worden omgezet in elektrische energie.

Energie uit stroming

Omzetting van kinetisch energie naar elektrisch energie vindt plaats door een molen in de stroom te hangen. Het water dat door de molen stroomt raakt stromingsenergie kwijt aan de molen (machine). De investeringen in civiele werken zijn vaak beperkt. Daar staat tegenover dat hiermee vaak maar een beperkt deel van de beschikbare hydraulische energie kan worden omgezet in elektrische energie.

2.2 Theorie

Water dat een machine passeert verliest hydraulische energie. Bovengenoemde twee mogelijkheden vergen verschillende civiele werken: bij omzetting van potentiële energie moet middels een soort van dam of stuw een niveauverschil worden gerealiseerd en stroomt het water door een opening naar de machine(s). Bij omzetting van kinetisch energie wordt direct gebruikgemaakt van de waterstroom: er wordt een molen in gehangen. In theorie is er geen verschil tussen beide mogelijkheden; het gaat vooral om het al of niet kunnen maximaliseren van mogelijkheden voor winning van elektrisch energie.

Energie uit verval (en debiet)

Voor de begripsvorming een vereenvoudigde formule voor een eerste indicatie voor de winning van elektrisch energie in geval van omzetten van potentiële energie naar elektrische energie:

$$\text{Energieproductie } P = \text{coëfficiënt}_1 * \rho * g * \Delta H * Q / 10^6 \approx 7 \text{ à } 8 * \Delta H * Q \quad \text{in } 10^3 \text{ kW}$$

Debiet door de machine Q in m^3/s , verval over de machine ΔH in m, soortelijke massa water ρ in kg/m^3 . Bij een zeer goede, optimaal werkende centrale is de coëfficiënt₁ gelijk aan ca 0,9. Een centrale voor $400 \text{ m}^3/\text{s}$ en een verval van 2,5 m kan een maximale opbrengst geven van 9000 kW (of 9 MW). De berekening is vrij transparant. Voor de keuze van ΔH dient men er echter op te letten dat alle energieverliezen van in- en uitstroming (zoals ook vuilroosters) inbegrepen zijn. Men spreekt hier oha. – en in dit rapport - over waterkrachtcentrales. In de Nederlandse Rijkswateren bestaat van dit type voor bijna 38 MW aan geïnstalleerd vermogen.

Energie uit stroming

Voor omzetten van kinetisch energie naar elektrische energie wordt de formule iets anders geschreven (door voor het verval $v^2/2g$ en voor debiet $A \cdot v$ in te vullen):

$$\text{Energieproductie } P = \text{coëfficiënt}_2 * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 / 10^3 \approx 0,25 * A * v^3 \quad \text{in kW}$$

Doorsnede van de machine A in m^2 en (oorspronkelijke) snelheid ter plaatse van de machine v in m/s , soortelijke massa water ρ in kg/m^3 . Bij een zeer goede, optimaal werkende moleninstallatie is coëfficiënt₂ gelijk aan ca 0,5. Deze lage waarde wordt veroorzaakt door het feit dat het veelal niet mogelijk is vlak achter de bladen sterke onderdruk te realiseren. In geval een molen in een tunnel (of beter een diffusor) wordt geplaatst gaat coëfficiënt₂ belangrijk omhoog. In de praktijk blijkt er echter nog een belangrijke extra inperkende factor aanwezig als gevolg van de impact op de omgeving.

Zonder dergelijke inperking kan een molen (machine) met diameter van 3 m en een aanstroomsnelheid van 2 m/s maximaal een vermogen hebben van 14 kW (of 0,014 MW). De berekening is echter niet zo transparant omdat een doorsnede A en een lokale snelheid v gekozen moeten worden. Daarover kunnen verschillende interpretaties bestaan. Bij opgaven van fabrikanten dient hierop gelet te worden.

Men spreekt hier o.h.a. – en in dit rapport - over molens of moleninstallaties en het betreft in bijna alle gevallen turbines (het stromingswiel vormt de uitzondering). In Nederland bestaan, afgezien van kortlopende pilotprojecten, dergelijke watermolenopstellingen nog niet.

2.3 Overwegingen bij de keuzen voor diverse typen machines in Nederland

Te beginnen met ‘waterkrachtcentrales’ en daarna ‘molens’ worden hier enkele algemene eigenschappen aangeduid waarmee men rekening moet houden.

2.3.1 Waterkrachtcentrales – overwegingen

Er valt vrij veel energie uit het water te halen door (gedurende een groot deel van het jaar) de hele stroom door de machines te leiden en dan bovendien het water ook ‘op te zetten’. Machines voor waterkrachtcentrales worden al vele decennia geproduceerd en ontwikkelingen zijn nog steeds gaande. Ieder type is geschikt voor een eigen range van vervallen en debieten. Voor een gedetailleerd overzicht van de mogelijke machinetypen, zie hoofdstuk 3 en Annex 1.

Voor wat betreft de machines geschikt voor waterkrachtcentrales valt onderscheid te maken in

- de machines voor de hogere vermogens (Kaplan, Francis, Pelton – ieder met een zeer hoge efficiëntie), waar grote fabrikanten zich op toelagen en
- de kleinere machines die ook door deze grote bedrijven (vaak als afgeleide van de grotere machines) worden geproduceerd, maar ook door kleine bedrijven en uitvinders worden ontwikkeld.

Bij een vast verval maar beperkt debiet worden soms ook waterraderen en omgekeerde vijzels (ook wel: ‘Archimedes spirals’) toegepast.

Voor de Nederlandse omstandigheden is vooral interessant om te weten bij welk gering verval machines die een aantal MW moeten leveren nog kunnen functioneren. Er kunnen van deze machines enige algemene kenmerken worden opgeschreven, maar de echte ontwikkeling bij fabrikanten is vanwege concurrentieoverwegingen confidencieel.

In bergachtige omgevingen wordt het water opgezet met stuwdammen (waarbij in het stuwmeer ook seizoensfluctuaties van de rivier of debietfluctuaties van de energiecentrale geborgen kunnen worden); in Nederlandse omstandigheden gebeurt dat met stuwen in rivieren. Op deze wijze wordt de bron als het ware versterkt. Bij voorkeur echter niet voor onbeperkte duur omdat de sedimenthuishouding van de rivier dan in de knoei raakt.

In Nederland is er als gevolg van de topografie en het intense landgebruik geen groot hoogteverschil beschikbaar, noch in horizontale zin veel ruimte beschikbaar (en evenmin betaalbaar) voor opzet of berging van water.

In Nederlandse omstandigheden dient in het rivierengebied daarom gezocht te worden naar zogenaamde 'run of the river' systemen: binnen nauwe grenzen van wat momentaan beschikbaar is aan water en verval kan er energie uit het water worden gehaald. Grote rivierdebieten komen maar beperkt in de tijd voor. Een relatief grote centrale zal daarom lang niet altijd volledig kunnen draaien. De 'vullast'uren zijn dan beperkt en dit leidt ertoe dat maar een deel van de energie te winnen valt. De centrale wordt dan kleiner ontworpen en een belangrijk deel van de grotere afvoeren moet dan over de stuw worden afgevoerd.

Als het verval over de stuw bij een zeer grote afvoer te gering is wordt ook dan de centrale buiten werking gesteld omdat de opbrengst dan navenant gering is terwijl er veel nadeel is de centrale dan te laten werken: veel sediment in het water met als gevolg te veel sedimentatie in het turbinehuis en in de aan- en afvoerkanalen en verhoogde slijtage aan de turbines.

Riviercentrales kunnen relatief klein zijn, maar het is (bij wet) noodzakelijk dat voor grote rivierafvoeren compensatie van het rivierdwarsprofiel nodig is en mogelijk moet zijn; dat kan veel geld kosten.

Belangrijk is het effect op vismigratie en mortaliteit. Met name hoogrendementmachines waarin onderdruk heerst of machines met hoge draaisnelheid zijn visonvriendelijk. Vissen kunnen door leid- of rotorschoepen geraakt worden en direct sterven. Maar vissen kunnen door de sterke onderdruk die in de rotor heerst een kapotte zwemblaas krijgen en zullen dan na verloop van tijd sterven. Vismortaliteit is niet alleen afhankelijk van de turbine maar ook van de vissoort. Kennis over wat bij een bepaalde waterkrachtlocatie aan vissoort kan voorkomen is daarom belangrijk. Turbinefabrikanten hebben de afgelopen decennia met enig succes onderzoek gedaan naar aanpassingen om de vismortaliteit omlaag te brengen.

Er kunnen maatregelen getroffen worden om de vis van de turbineaanstroming weg te leiden (via de uitstroming kan de vis de turbine niet passeren). Via vistrappen valt er aan de omhooggaande en omlaaggaande vismigratie iets te doen. Als vis via de machines mee naar benedenstrooms kan gaan dan is het vaak zo dat de omgekeerde weg niet mogelijk is en daarom hoe dan ook een vistrap gewenst is. Het debiet door de vistrap gaat altijd ten koste van een hoeveelheid water die anders geturbineerd zou worden (via de turbines zou gaan). Het zou goed zijn om meer te weten van recente ontwikkelingen in de vermindering van de vismortaliteit bij de diverse soorten en merken turbines.

Langzaam lopende machines zonder onderdrukdeel zijn over het algemeen veel visvriendelijker, maar halen ook minder energie uit het water. Er zijn gunstige uitzonderingen zoals de VLH-turbine die bijna 80% rendement haalt en visvriendelijk is.

Het zou goed zijn nog eens na te gaan of er nu systemen bestaan die effectief zijn voor het laten passeren van vis langs de turbine (in vistrappen o.i.d.). Deze inrichtingen zijn waarschijnlijk vissoortspecifiek. Belangrijk is ook de geleiding van de vis (met name van boven naar benedenstrooms langs de centrale).

Er valt wat voor te zeggen om niet langer toe te staan dat sportvisser (en zelfs) beroepsvisser bij ingangen van vistrappen vis vangen. Het effect van kostbare mitigerende maatregelen dienen niet tegengewerkt te mogen worden.

Visroosters hebben kleine maaswijdten. Voldoende bovenstrooms geplaatste visroosters in combinatie met maatregelen om vis te lokken cq af te schrikken zijn ontwikkeld om de vis buiten de turbines te houden. Zeer jonge vis vormt dan nog een probleem; er moet voldoende vislarve door de vistrap worden gespoeld om de vismigratie in stand te houden. Dat kan betekenen dat het debiet door een vistrap voldoende groot moet zijn of dat meerdere vistrappen nodig zijn. Dat gaat af van het debiet dat door een centrale kan stromen.

Meestal worden waterkrachtcentrales tegen grof vuil beschermd (via vuilroosters). Die roosters zijn niet bedoeld om de vis tegen te houden (afgezien van zeer grote vissen).

In het algemeen geldt dat in Nederland grote investeringen in benodigde omgevende infrastructuur de kWh-prijs teveel zal doen opjagen waardoor een dergelijke waterkrachtcentrale daardoor slechts concurrerend kan draaien bij een hoge energieprijs. Meer concreet: de bouw van een stuw op kosten van een centrale behoort in Nederland niet tot de mogelijkheden.

Altijd zal er sprake moeten zijn van een waterbouwkundig kunstwerk dat voor een of meer andere doelen is of wordt gemaakt waarbij dan overwogen kan worden een waterkrachtcentrale bij te plaatsen. Een deel van de investeringskosten kunnen dan elders in rekening gebracht worden.

Nederland heeft behalve rivierafvoer nog een andere bron voor stromingsenergie, namelijk het getij langs de kust en in de estuaria. Deze bron is in hoge mate voorspelbaar en altijd aanwezig, maar kan niet zo eenvoudig worden versterkt (opgezet) zoals dat in een rivier mogelijk is. De beschikbare vervallen voor door middel van getij opgewekte elektrische energie kunnen als gevolg daarvan slechts vrij gering zijn. Voorts geldt dat opwekking gedurende een beperkt deel van de dag mogelijk is; rond kenteringen valt de energieopwekking stil.

Opmerking: Royal Haskoning voert in opdracht van Deltares een studie uit naar de mogelijkheden getij-energie te gebruiken. Het betreft energie uit verval en debiet. Het rapport zal in 2009 beschikbaar komen. (Niet een onderdeel van deze studie).

2.3.2 Molens in een stroom – overwegingen

Als een molen in de stroming wordt geplaatst zal dat door het water als een weerstand worden gevoeld (met dezelfde effecten als bij een blokkering), maar het water zal er in dit geval ook doorheen stromen en daarmee de molen laten draaien waarbij een deel van de hydraulische energie uit het water wordt gehaald. Het water vlak benedenstrooms van de draaiende molen is daardoor minder energierijk (met lagere snelheid). Dit heeft als consequentie dat het debiet door de molen benedenstrooms ervan een groter doorsnede in beslag neemt vergeleken met datzelfde debiet in de aanstroming van de molen. Verderop stroomt dit uit de molen komende water via turbulente uitwisseling weer even hard als de omgeving. Dit heeft tot gevolg dat molens de weerstand in een stroom vergroten. De bovenstroomse rivierwaterstand gaat daardoor omhoog waardoor daar sedimentatie kan plaats vinden. Lokaal kan in de buurt van de molen bodemerrosie plaats vinden.

Als een molen in een spuisluis wordt gemonteerd zal de capaciteit van die sluis daardoor afnemen. Als een molen in een vul- en ledigsysteem van een schutsluis wordt gemonteerd zal de nivelleertijd van die schutsluis toenemen. Effecten zullen uiteraard groter zijn naarmate de installatie groter is.

De omgeving is van belang voor de energieopbrengst: een molen in een wijde situatie zal bij dezelfde aanstroomsnelheid minder energie opbrengen dan een molen in een beperkte situatie. De stroming kan in een wijde opstelling immers makkelijker rond de molen stromen in plaats van er doorheen.

Molens aan de bodem (of nabij een lange ruwe wand zoals een oever) zullen minder krachtig aangestroomd worden vanwege de daar aanwezige grenslaageffecten. Een opstelling midden in de stroom verdient de voorkeur. Een molen moet ook goed op de stroom gericht zijn; dit is van belang in estuaria waar de stroom van richting kan veranderen. Er bestaan molens die ongevoelig zijn voor de stroomrichting.

Het gaat er bij het ontwerp van molens om zoveel mogelijk water door een dergelijke molen te krijgen en daarbij zoveel mogelijk energie te winnen. In de windmolentechniek bestaan hier technieken voor die niet altijd in de watermolentechniek kunnen worden toegepast. Bijvoorbeeld de bij windmolens (en vliegtuigvleugels) steeds vaker toegepaste winglets (sterk gebogen einde van een vleugel) worden bij watermolens nog niet getraceerd. Deze winglets verhogen de efficiëntie van een vleugelprofiel.

Waarschijnlijk wordt de kans op vastrakend vuil in geval van een watermolen hoog ingeschat en houdt dit de ontwerpers af van dit idee hier ook toe te passen. Vrijstaande molens zijn nagenoeg niet tegen grofvuil te beschermen. Alleen als ze in een apart stroomkanaal staan is dat mogelijk.

De productie van kleine machines is heel divers met wereldwijd gedurende al vele jaren vele initiatieven. Ook in Nederland hebben enkele (kleine) bedrijven met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken nieuwe concepten getest of zijn daar nog mee bezig.

De ontwikkeling van molens is vooral gedurende de laatste twee decennia in een versnelling gekomen. Dit ging waarschijnlijk hand in hand met de ontwikkeling van windmolens. Slechts bij enkele typen kan van enige serieproductie worden gesproken. Veel ontwerpen zijn nog in een ontwikkelfase. Voor een gedetailleerd overzicht van de thans mogelijke molentypen, zie hoofdstuk 3 en Annex 1.

Om verschillende redenen nemen dergelijke molens altijd maar een zeer klein deel van het beschikbare dwarsprofiel in beslag en wordt er ook een navenant klein deel van de hydraulische energie uit het stromende water gehaald. Maar ook de benodigde civiele werken zijn beperkt van omvang. Daardoor is het mogelijk dat ze rendabel zijn bij wat hogere energieprijzen.

Het gaat er in deze studie om locaties te vinden waar een of meer molens kunnen worden geplaatst. In Nederland hebben veel waterlopen ook nog tal van andere functies (watervoorziening, waterafvoer, scheepvaart) waardoor het eenzijdige gebruik als bron voor waterkracht nagenoeg onmogelijk is.

Zoals hiervoor gemeld heeft Nederland behalve rivierafvoer ook getij langs de kust en in de estuaria. Hoewel dit verschijnsel altijd aanwezig en redelijk goed voorspelbaar is geldt dat energieomzetting hieruit gedurende een beperkt deel van de dag mogelijk is; de geringere snelheden rond de kenteringen bieden geen goede mogelijkheid voor energieopwekking.

Hoewel in dit rapport niet over golfenergie gerept wordt, hier alleen de opmerking dat het golfklimaat voor de Nederlandse kust te grillig is om investeringen in golfenergie te kunnen verantwoorden (of de energieprijzen moet eerst zeer drastisch omhoog). Er zijn inmiddels molens of combinaties van molens in ontwikkeling die zowel golfenergie als stromingsenergie kunnen omzetten in elektrische energie.

2.3.3 Tussenvormen

Er zijn tussenvormen tussen molens en waterkrachtstations mogelijk. Door het plaatsen van een weerstand in de stroming wordt het water opgestuwd en zal als gevolg hiervan met wat grotere snelheid langs de gedeeltelijke blokkering af stromen. Door in die contraherende stroom een molen te plaatsen kan er meer energie worden gewonnen. Het plaatsen van molens in een spuisluisgang ligt in het verlengde hiervan. Ook kan een molen in een diffusor worden geplaatst om meer water door de molen te laten stromen. Dergelijke overgangsvormen vergen meer constructies rondom de molen.

2.4 Het financiële kader

Voor een financieel oordeel is het belang om te weten hoe robuust de machines zijn, hoeveel aan civiele werken nodig is en wat de opbrengst in kWh en kWh-prijs zal zijn. Voorts uiteraard wat de averechtse gevolgen kunnen zijn (ruimtegebruik, vermindering hydraulisch energie, vismortaliteit, effecten op andere gebruiksfuncties van het water, etc). Beslissingen over al of niet overgaan tot realisatie van een dergelijk project vergt duidelijk meer studie per locatie dan voor dit rapport dat als een voorfase voor dergelijke business case studies gezien moet worden.

Voor de schatting van de energieopbrengst is het belangrijk om rekening te houden met onwerkbare uren. Die zullen ontstaan doordat hydraulische randvoorwaarden niet geschikt zijn (geen verval of geen snelheid, zware ijsvorming, vastzittend vuil, etc.), maar ook door onderhoud aan bv. een turbine of generator, stroomstoring etc.

In dat verband is het raadzaam om een installatie uit meerdere machines te laten bestaan. Eén turbine is anders te vaak géén turbine. Om deze reden een bepaalde overcapaciteit aan geïnstalleerd vermogen kiezen wordt echter nooit gedaan.

Bij plaatsing van molens in sluisgangen is de vraag hoeveel ervan te plaatsen. Meerdere in een sluisgang en/of in alle sluisgangen? Het sluisbeheer moet met diverse facetten rekening houden (onderhoud, morfologie, etc) en kan niet steeds het beschikbare debiet door zoveel mogelijk de sluisgang(en) sturen waar molens staan. Veel molens plaatsen betekent ook veel weerstand op momenten dat zoiets ongewenst is. De molens uit het water kunnen halen als het er om spant (en de afvoerfunctie grote voorrang heeft) geeft dan een voordeel.

De ervaring met installaties in een zout milieu is dat ze als gevolg van marine aangroei aanmerkelijk meer onderhoud aan bv. de turbine(bladen en het huis) vergen dan installaties in zoet water.

Voor de bepaling van de energieopbrengst wordt aangeraden om de machineleverancier een energieopbrengstgarantie te laten afgeven. Bij onvoldoende prestatie is dan verhaal mogelijk. De leverancier zal in dat geval eisen stellen aan de kwaliteit van de hydraulische omstandigheden, maar dat schept duidelijkheid en voorkomt teleurstellingen.

Voor een beoordeling is ook informatie van het ministerie van Economische Zaken van belang vanwege de financiering van de onrendabele top: het verschil tussen de normale

energieprijs en de kosten door toepassing van duurzame energie dat door EZ gesubsidieerd kan worden omdat verwacht wordt dat deze vorm van elektrische energieopwekking op termijn rendabel wordt geacht. EZ stelt als voorwaarde dat dit verschil binnen grenzen, afhankelijk van het soort energieopwekking, valt.

ECN heeft op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken onderzoek verricht naar de kosten van kleinschalige waterkracht en advies gegeven in het kader van de regeling Subsidie Duurzame Energie (SDE 2009). Uit deze regeling is de volgende tabel overgenomen³:

categorie	basisbedrag	basisprijs	subsidieperiode	vollasturen	subsidieplafond ⁴	beoogd vermogen
	€ / kWh		jaar	uren / jaar	mln. €	MW
Waterkracht						
Verval < 5 m	0,125	0,044	15	3.800	60	13
Verval > 5 m	0,073	0,044	15	3.800	12	7

Intussen is de basisprijs gestegen tot ca 0,05 € / kWh, maar het basisbedrag (het garantiebedrag voor de energieproducent) is gehandhaafd.

De tabel moet als volgt worden 'gelezen': Er is subsidie beschikbaar voor installaties onder 5m verval, gedurende 15 jaar en met een subsidieplafond van 60 mln. euro (voor de hele periode van 15 jaar) als bijpassing van de kosten van energieopwekking. Deze bijpassing is maximaal het verschil tussen basisbedrag en basisprijs per kWh en met een maximum van 3800 vollasturen⁵ per jaar. Men voorziet in deze categorie opwekking van 13 MW vermogen.

Voor vervallen kleiner dan 5m is de bijpassing 7,5 eurocent per kWh; voor groter verval installaties is die orde 3 eurocent per kWh. Ten opzichte van wat de regeling bevat voor energieopwekking uit biomassagas of zonne-energie is dit een lage vergoeding. Dat betekent dat installaties waarbij sprake is van veel bijkomende kosten slechts rendabel zullen zijn als er andere (meebetalende) doelen aanwezig zijn.

Opmerking:

SenterNovem biedt ook een energie-investeringsaftrek (EIA) aan waarbij een deel van de investeringen kan worden ingebracht in de belastingen. Er worden nu suggesties gedaan voor aanpassingen van EIA in 2010: <http://www.senternovem.nl/eia/>

De subsidiegrenzen vormen een belangrijk gegeven voor investeringsbeslissingen. Ook geldt waarschijnlijk 'wie het eerst komt die het eerst maalt' en late projecten kunnen daardoor te laat blijken voor subsidie. De bijdrage SDE wordt gegeven voor maximum 3.800 vollast draaiuren, d.w.z. een klein halfjaar, per locatie. Vermoedelijk halen niet alle waterkrachtinstallaties dit aantal vollasturen.

³ In deze tabel zijn de genoemde prijzen voor de energieproducent. De prijs die de consument voor 1 kWh moet betalen ligt om diverse redenen aanmerkelijk hoger. De prijs van het zogenaamde leveringstarief is hoger, maar moet betaald worden voor transport en er zijn belastingen. De consumentenprijs (huishouden) ligt tussen 0,20 en 0,25 €/kWh.

⁴ Deze bedragen zijn niet geïndexeerd.

⁵ Onder vollasturen wordt verstaan de som van het aantal draaiuren vermenigvuldigd met het percentage deellast/vollast. Anders zou een centrale die om een bepaalde reden geen vollast kan draaien geen subsidie kunnen verwerven.

Na behandeling van de technische mogelijkheden wordt in paragraaf 5.3 teruggekomen op deze financiële randvoorwaarden.

2.5 Kleine waterkracht in de praktijk

Waterkracht in Nederland betekent de bouw van – als dat vergeleken wordt met hier gebruikelijke (conventionele) energiecentrales – kleine installaties. Een consequentie ervan is dat het personeel voor de bediening van die installaties qua omvang slechts zeer beperkt kan zijn. Veelal draait een dergelijke installatie tijdenlang met beheer op enige afstand. Storingen moeten echter snel opgemerkt worden om tijdig ingrijpen mogelijk te maken. De ervaring elders is ook dat machines heel lang mee kunnen gaan en betrouwbaar ingezet kunnen worden mits de eigenaar/beheerder alert is op 'signalen' die op een probleem kunnen duiden. Feitelijk is er iemand nodig die zich ontfermt over een dergelijke installatie. Niet voor niets dat er bij oude installaties verenigingen blijken te bestaan die met vrijwilligerswerk weer een installatie aan de gang weten te krijgen en te houden, waar het beheer door de vroegere beheerder geminimaliseerd werd en de installatie in onbruik geraakte. Een voorbeeld is de waterkrachtcentrale in de Roer te Roermond. Het blijkt dus een niet te onderschatten economisch probleem om kleine installaties voldoende aandacht te blijven geven.

3 Machines

De studie naar mogelijke machines⁶ is uitgevoerd door Royal Haskoning. Het rapport van deze deelstudie is in dit rapport opgenomen als Annex 1: "Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht". Het is van de hand van ir. Tom Van Den Noortgaete.

In deze Annex is tevens aangegeven voor welke omstandigheden een bepaald type machine het best in te zetten is met een aanduiding van de civiele werken die benodigd zijn om deze machines effectief te laten draaien. Zie Annex 1 voor details van de diverse machines.

Voor een goed begrip is hier de classificatie die in Annex 1 ook opgenomen is weergegeven

Classificatie	Geïnstalleerd vermogen(kW)
Micro waterkracht	< 100
Mini waterkracht	100 – 2.000
Kleine waterkracht	2.000 – 10.000
Grote waterkracht	> 10.000

In Nederland is hooguit sprake van klein waterkracht. In de paar in Nederland bestaande waterkrachtcentrales van ca 10 MW zijn echter al turbines geïnstalleerd van ca 3 MW en dat zijn vrij forse machines.

Onderscheid wordt gemaakt in machines voor vervalsituaties en machines voor installatie in stroming. Voor foto's en tekeningen, zie Annex 1.

3.1 Machines voor verval (en debiet)

3.1.1 De van oudsher bekende axiale Francis, Kaplan of Pelton turbines

Voor de lage vervallen die in Nederland beschikbaar zijn is van deze drie feitelijk alleen de Kaplan turbine geschikt. Er bestaan een aantal varianten. Voor deze machines geldt dat aan- en afstroomkanalen nodig zijn en dat in de turbine een lage druk heerst. Ze worden daarom gemonteerd in een civiele constructie(waterkrachtcentrale).

⁶ Algemene opmerking:

Wat betreft de terminologie is er geen eenduidigheid gevonden. Als algemene aanduiding wordt in dit rapport de term 'machine' gebruikt. Daarmee worden alle soorten aangeduid. Vaak betreft het een turbine: een rond een as draaiend stel schoepen waarlangs het water stroomt en waarbij als gevolg van de schoepvorm snelheidsveranderingen en dus drukverschillen gegenereerd worden. Een turbine bevindt zich over het algemeen in een civiele constructie: turbinegebouw. Losse opstellingen in de stroom worden in dit rapport vaak als molen aangeduid, maar met als voorbeeld 'windturbines' komt de aanduiding turbine ook voor. Een Archimedes-schroef wijkt hiervan af. Hier vormt de geometrie afzonderlijke bakjes die met water gevuld worden. Ook voor raderen wordt de aanduiding 'turbines' niet gebezigd. Deze uitzonderingen worden in dit rapport als 'motoren' aangeduid. Machines omvatten daarom twee soorten: turbines en motoren.

De machines draaien (voor laag verval toepassingen) met beperkte snelheid (bv. 80 rpm), maar hebben vrij grote turbinebladen en de tipsnelheid is dan al gauw ca. 15m/s. De machines worden voor de hogere vermogens geproduceerd. De visvriendelijkheid van deze machines is niet goed, maar er lijken verbeteringen mogelijk. In Nederlandse riviercentrales zijn deze machines geïnstalleerd (zie hoofdstuk 4). Vaak worden vuilroosters in de stroomingang gemonteerd; deze kunnen ook dienen om vis tegen te houden (in combinatie met andere systemen om de vis weg te lokken of af te schrikken).

3.1.2 Van het Kaplan-type afgeleide machines

De VLH Turbine is een versimpelde uitvoering van een Kaplan turbine. Daarbij ontbreekt het lagedrukdeel in een gesloten systeem. Het rendement is iets lager dan bij een echte Kaplan turbine, maar de visvriendelijkheid is veel beter. De machine is al op enkele plaatsen (met name in Frankrijk) geïnstalleerd, en gemaakt voor beperkter debieten en vermogens dan de Kaplan turbines.

3.1.3 De cross-flow turbine

De cross-flow turbine is feitelijk een klein waterrad dat met gesloten aan- en afvoerkanalen op de waterpanden aangesloten wordt. De machine is niet visvriendelijk. Dit type machine is al lang in productie en bedoeld voor beperkter debieten en vermogens dan de Kaplan turbines, maar kan werken bij zeer grote vervallen. Daarentegen is de machine niet geschikt voor zeer kleine vervallen (kleiner dan 1m) en is het niet de bedoeling dat de machine onderwater raakt. Klein zwevend vuil kan de machine goed verwerken.

3.1.4 Waterraderen en de schroefmotor (Archimedes)

Waterraderen bestaan al erg lang. Er bestaan diverse typen. Ze zijn geschikt voor situaties met weinig debiet, maar met enig verval. Belangrijk is dat wateraanbod en waterstanden niet te sterk fluctueren. De visvriendelijkheid van deze machines is goed. Ze zijn ook minder gevoelig voor zwevend vuil etc.

Stromingswielen lijken op waterraderen, maar de werking is anders: ze vereisen geen verval en kunnen bij relatief groter debieten werken; zie paragraaf 3.2.

De schroef van Archimedes vormt een aparte categorie en stelt ongeveer gelijksoortige eisen. Ook hier is de visvriendelijkheid goed. Waarschijnlijk kan die vooral bij kleine installaties nog verbeterd worden door de buitenmantel mee te laten draaien (een recente ontwikkeling). De schroef kan ook in omgekeerde richting werken (dus als pomp).

Een nieuwe ontwikkeling is de SPM (Stem Pressure Machine). Het is een combinatie van een overlaat waarin een rotor (met horizontale as) is gemonteerd. Als gevolg van de eenvoudige civiele constructie is het een relatief goedkoop waterrad. Maar ook hier geldt dat waterstandvariaties ongunstig zijn voor de toepassing ervan.

3.1.5 De HydroRing

Een nieuwe ontwikkeling is de HydroRing. Feitelijk een soort turbine waarvan de centrale as ontbreekt. Het is een machine zonder aan en afvoerkanalen zodat ook geen onderdruk opgebouwd kan worden. De visvriendelijkheid wordt door de ontwikkelaar hoog ingeschat, maar moet nog bewezen worden. Het ingeschatte rendement is daarentegen vrij laag.

De lagering van de rotor is nog in ontwikkeling. De civiele kosten zijn erg laag als het kerend vlak waarin de machine gemonteerd moet worden al bestaat. De machine kan de stroom niet afsluiten zodat bij toepassing van deze machine daartoe een extra voorziening gemaakt moet worden. De capaciteit van de machine is gering.

3.2 Machines voor installatie in stroming

3.2.1 Het stromingswiel

Het stromingswiel bestaat al heel lang. Het lijkt op een waterrad, maar vereist geen verval. Het rad draait in een stroom die onderlangs het rad loopt. De waterstandvariaties mogen daarbij niet te groot zijn.

Recent zijn dergelijke wielen echter ook voor dieper water ontwikkeld.

Het stromingswiel kan voor een in stroom staande molen redelijk hoge efficiency bereiken. Belangrijk daarbij is dat water niet op andere wijze dan via het wiel kan passeren.

3.2.2 Molens met bladen draaiend in een vlak loodrecht op de stroom

Er zijn diverse fabrikanten die molens op de markt brengen en nog in ontwikkeling hebben die lijken op die van de meeste moderne windmolens. Er zijn molens die zich in de stroom richten of daarin gericht kunnen worden. Veel molens zijn in ontwikkeling voor dieper water, maar er zijn vaak ook kleine uitvoeringen. De molens zijn niet gevrijwaard van in water zwevend vuil etc.

Voorbeelden zijn:

Tocado Turbine

Een robuuste machine die aan een frame in een spuisluis gehangen kan worden. Het systeem is ongeveer gereed voor toepassing. Diverse afmetingen zijn gepland. Vrij hoge stroomsnelheden zijn toelaatbaar.

KHPS (Kinetic Hydropower System)

Een molen die opgesteld kan worden op allerlei plaatsen, los van een constructie (zoals een windmolen). Ook voor offshore, dus dieper water. Diverse afmetingen zijn beschikbaar.

UEK (Underwater Electric Kite)

Een in water zwevende molen die als dubbelstel geproduceerd wordt. Bevestigd aan een lijn (zoals een kite). Bijzonder is dat de molen(s) omgeven zijn met een mantel waardoor energie onderdruk in de molen kan worden gemaakt en het rendement relatief hoog is. Voor dieper water en vrij hoge snelheden (tot 4 m/s).

Swanturbines

Een molen soortgelijk als de KHPS. Nog in ontwikkeling.

Tidal Turbine Generator

Een molen die opgesteld kan worden op allerlei plaatsen, los van een constructie (zoals een windmolen). Ook voor offshore, dus dieper water. Om de molen zit een korte diffusor waardoor in de molen onderdruk opgebouwd kan worden en de efficiency relatief hoog is. Nog in ontwikkeling.

SmartTurbine

Een molen die lijkt op de Tidal Turbine Generator. Te monteren als set op een kolom of aan brugpijlers. Nog in ontwikkeling.

Hydrohélix Turbine

Een molen die ook lijkt op de Tidal Turbine Generator, maar met grote diameters en montage op de bodem van een waterloop. Nog in ontwikkeling.

3.2.3 Molens van het Darrieus-type

Darrieus turbines hebben een verticale as en verticale rotorbladen. Alle machines zijn in een min of meer gevorderd ontwikkelstadium. Daarmee zijn ze nog niet geschikt om ingezet te worden (zie inkadering van dit project in hoofdstuk 1). Een voordeel is dat de machine in principe ongevoelig is voor de horizontale aanstroomrichting. Een nadeel is de grote buigingsbelasting op de rotorbladen. Ook deze molens zijn niet gevrijwaard tegen in water zwevend vuil etc. Diverse fabrikanten zijn met de ontwikkeling van dergelijke machines bezig. Enkele voorbeelden:

WPI Turbine

Vormt een drijvend constructie en is een vrij grote machine die in snelheden tot 4 m/s kan worden geplaatst. Zowel voor nearshore als in waterlopen, estuaria.

EnCurrent Turbine

Draait rond een pyloon (bij voorbeeld van een windmolen in zee) en is bedoeld voor nearshore en waterlopen, estuaria.

Kobold Turbine

Hangt aan een drijvend platform en is bedoeld voor nearshore toepassingen.

Davis Turbine

Deze turbine wordt als set ontwikkeld. Het kan een zwevend systeem zijn (gelijk een kite) of in kanalen (caissons) op een bodem staan. Bijzonder is dat de machines in een (korte) tunnel zitten waardoor een grotere efficiency ontwikkeld kan worden en eventueel ook vuilroosters te monteren zijn.

Bedoeld voor allerlei soorten waterlopen, maar belangrijk is dat de stroomrichtingen bekend zijn (montage in stroom richting is nodig; omgekeerde stroomrichting mag ook)

Diffusor Augmented Water Current Turbine

Deze molen heeft achter zich een diffuser en richt zich (draaiend op een paal) in de stroom. Dat laatste is nodig om de positieve werking van de diffuser te behouden.

Geschikt voor allerlei soorten waterlopen.

Wave Rotor

Deze molen draait rond een pyloon (bij voorbeeld van een windmolen in zee) en is bedoeld voor nearshore toepassingen, waterlopen estuaria. Het bijzondere van de molen (die overigens niet verticale maar scheefstaande bladen heeft) is dat er een combinatie is gemaakt met horizontale bladen die bedoeld zijn golfenergie af te tappen.

4 Locaties

De studie naar mogelijke locaties is uitgevoerd door HKV LIJN IN WATER in samenwerking met ir. Tom Van Den Noortgaete van Royal Haskoning. Het rapport van deze deelstudie is opgenomen als Annex 2: "Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland".

Voor wat betreft de geschikte locaties werd bij aanvang van de studie een aantal categorieën onderscheiden:

- Locaties waar hydraulisch verval en debiet geconcentreerd aanwezig is en waar hydraulische energie ongebruikt blijft.
- Locaties waar hydraulisch verval aanwezig is, maar een spui functie ontbreekt of gering is.
- Locaties waar vanwege het waterbeheer in de toekomst veranderingen verwacht worden en dan de waterkrachtoptie meegenomen kan worden.
- Locaties waar met zeer beperkte inspanning voor wat betreft de civiele constructies en door middel van plaatsing van een molen waterkracht kan worden opgewekt.
- Locaties waar nu niets is, maar wellicht door aanleg een centrale gebouwd zou kunnen worden.

4.1 Locaties waar hydraulisch verval en debiet geconcentreerd aanwezig zijn en waar hydraulische energie ongebruikt blijft

Gebruik van deze overmaat aan hydraulische energie moet mogelijk zijn zonder debieten te wijzigen zodat het waterbeheer er niet door beïnvloed wordt. Belangrijkste voorbeelden hiervan zijn de bestaande stuwen in de Maas en de Neder-Rijn. Bouwkundige maatregelen en hoogwatercompenserende maatregelen zijn nodig om de centrale te realiseren.

Huidige situatie

In Nederland zijn zeven kleine tot zeer kleine waterkrachtstations min of meer continu in werking:

	waterloop	geïnstalleerd vermogen	Type machine	In bedrijf sinds	Mogelijke energieproductie op jaarbasis
Rijkswateren					
Stuw Hagestein	Benedenrijn	1,8 MW	verticale Kaplan	1958	2,5 GWh
Stuw Amerongen (Maurik)	Benedenrijn	10 MW	4 Kaplan	1988	32 GWh
Stuw Linne	Maas	11,5 MW	4 Kaplan	1989	52 GWh
Stuw Lith (Alphen)	Maas	14 MW	4 Kaplan	1990	57 GWh
Roeven - Nederweert	Limburgse en Brabantse kanalen	0,035 MW	Francis		
Regionale wateren (er zijn waarschijnlijk nog enkele kleiner installaties)					
Roermond	Roer	0,275	Francis		1,3 GWh
De Haandrik	Overijsselse Vecht	0,1 MW	verticale Kaplan		

Daarnaast zijn er diverse molens die mechanische energie produceren (maalderij bv.); enkele daarvan kunnen inmiddels zijn voorzien van een kleine turbine voor stroomopwekking. Het totaal opgesteld vermogen (incl. van particulieren) bedraagt ca 37,5 MW. De energieproductie van deze installaties tezamen op jaarbasis blijkt 90 – 120 GWh te bedragen, dus gemiddeld 105 GWh; dat komt ongeveer overeen met de behoefte aan elektrische energie van gemiddeld 30.000 huishoudens.

Onderhoud aan deze installaties brengt met zich mee dat het geïnstalleerd vermogen niet altijd inzetbaar is. Zo is de turbine in de stuw Hagestein onlangs voor wat langere tijd buiten gebruik gesteld. Voorts zullen vrijwel alle installaties jaarlijks geheel of gedeeltelijk enige tijd buiten gebruik zijn als gevolg van ongunstige hydraulische omstandigheden, zoals een te gering verval of te weinig aanbod van water. De centrales van orde 10MW werken niet meer bij vervallen kleiner dan ca 1 m. (Op zich is dat niet zo erg want dat is maar gedurende een korte periode in het jaar.)

Ook blijkt de voorspelling van de energieopbrengst niet altijd overeen te komen met de realisatie als gevolg van onnauwkeurige gegevens over het beschikbare verval over de stuw (probleem heeft zich voorgedaan bij Linne).

Mogelijkheden tot uitbreiding van het geïnstalleerde vermogen

Uitbreiding van het geïnstalleerde vermogen is het meest effectief te bereiken bij bestaande hydraulische constructies waar een zeker verval en debiet beschikbaar zijn. Energiewinning op andere plaatsen (i) leidt al gauw tot meer noodzaak van afstemming met een ander gebruik van water (bv scheepvaart), (ii) is minder efficiënt (diffuser aanbod hydraulische energie) of (iii) vergt eerst nader onderzoek en waarschijnlijk ook ontwikkeling van speciale machines (bv energieproductie bij kribben).

Alle stuwen in de Neder-Rijn en in de Maas zijn in potentie geschikt voor opwekking van waterkracht, maar niet alle zijn voldoende kansrijk. De meest kansrijke locaties hebben al een waterkrachtcentrale. Voor drie stuwen in de Maas (Sambeek (ca 6 MW), Grave(ca 6 MW) en Borgharen (ca 10 MW)) zijn door Deltares (WL | Delft Hydraulics) in het laatste decennium van de vorige eeuw verkennende studies verricht. Ontwikkelingen in het rivierengebied doet het aantal kansrijke locaties toenemen. Uitvoering van de rivierverruiming in de Grensmaas leidt tot vergroting van het verval over de stuw Borgharen en verhogingen van stuwpeilen elders in de Maas wat waterkracht iets lucratiever maakt bij de overige stuwen (stroomafwaarts van Borgharen).

Het is gewenst de mogelijkheden per stuw globaal vast te stellen. Belangrijk in dit verband zijn studies uit 1981 [SEA] en 1983 [PLEM] waarin voor de hele Neder-Rijn en/of Maas een schatting werd gemaakt voor de waterkrachtmogelijkheden. In onderstaande tabellen zijn de conclusies overgenomen, inclusief indicaties uit later studies van WL. Tevens zijn de werkelijke realisaties aan geïnstalleerd vermogen aangegeven.

Locatie	Te installeren MW (studie SEA 1981)	Te installeren MW (studie PLEM 1983)	Later studies (WL 1991, WL 1997)	Realisatie (huidige situatie)
Borgharen	13	9	Ca 10	
Born	4,5	4		
Maasbracht	4,6	4		
Linne	18,4	11		11,5
Roermond	-	6		
Belfeld	11,1	6		
Sambeek	11,2	7	Ca 6	
Grave	10,3	7	Ca 6	
Lith	12,7	10		14
Totaal Maas	85,8	64		25,5

Locatie	Te installeren MW (studie 1981)	Realisatie (huidige situatie)
Driel	10,4	
Amerongen	12,8	10
Hagestein	8	1,8
Totaal Neder-Rijn	31,2	11,8

Het is duidelijk dat de meeste stuwen in de Maas nog geen centrale hebben.

In de Neder-Rijn is de stuw Amerongen voorzien van een centrale naast de stuw. De Stuw Hagestein heeft een zeer kleine centrale (één turbine) in een stuwpijler. Stuw Driel heeft geen centrale.

4.2 Locaties waar hydraulisch verval aanwezig is, maar een spuifunctie ontbreekt of gering is

Van belang is dat het is toegestaan om de spuifunctie uit te breiden zonder het overige waterbeheer in problemen te brengen. De belangrijkste voorbeelden betreffen schutsluizen in kanalen. Bouwkundige maatregelen zijn nodig om de centrale te realiseren.

Thans (medio 2009) is een plan in studie (door Adviesbureau CSO in opdracht van RWS Limburg en het Vlaamse NV De scheepvaart) voor waterkracht met gebruikmaking van vervallen over het Julianakanaal en het Albertkanaal in België.

In het Julianakanaal: turbines bij de kanaalsluizen Born en Maasbracht vervallen van 12 m en een debiet van 25 m³/s; ieder 2,5 MW (het bedrijf Eco-energy heeft plannen). Dit gaat echter af van het Maasdebiet bij Borgharen (en het debiet door de Grensmaas).

4.3 Locaties waar vanwege het waterbeheer in de toekomst veranderingen verwacht worden en dan de waterkrachtoptie meegenomen kan worden

Het betreft met name de Afsluitdijk waar een aanmerkelijk groter spuicapaciteit gerealiseerd gaat worden en mogelijk ook de Brouwersdam waarvoor ideeën bestaan de doorlaatcapaciteit aanmerkelijk te vergroten en daarmee weer enig getij op de Grevelingen te realiseren (mogelijk maximaal 0,7m; waarschijnlijk echter slechts 0,5m).

De Afsluitdijk voert het water van de IJssel af, maar dat is niet een op een hetzelfde. De berging op het IJsselmeer en Markermeer en het waterbeheer voor dat gebied zijn ook van invloed. Vergroting van de spuicapaciteit is nodig om de in de toekomst te verwachten grotere hoogwaterafvoeren te kunnen verwerken. In de droge perioden worden echter lagere afvoeren verwacht. De investering in een centrale kan echter niet alleen worden gebaseerd op een relatief korte periode van grote afvoer. Vergroting van de spuicapaciteit leidt daarom niet automatisch tot een groter kans op een rendabel draaiende waterkrachtcentrale.

De bestaande kleine doorspoelsluis in de Brouwersdam (die samen met de hevelsluis in de Grevelingendam voor de verversing van de Grevelingen benut worden) wordt mogelijk aanmerkelijk uitgebreid om weer enig getij op de Grevelingen mogelijk te laten zijn. Overigens is het hele gebied (incl. ook het Zoommeer) in studie met het oog op de waterkwaliteit, maar welke werken daaruit gaan voortvloeien is nog onduidelijk.

De gedachte van een waterkrachtcentrale in de Brouwersdam is reeds geopperd. Het voordeel met getijcentrales is dat getij altijd aanwezig en redelijk voorspelbaar is (het aandeel stormopzet niet). Belangrijk is echter dat getij in de Grevelingen en verval over de dam zodanig gekozen kunnen worden dat elektrische energieopwekking met turbines rendabel is. Vervallen onder 1 m zijn voor Kaplan turbines te gering om in te zetten.

Een nadeel voor getijcentrales is het zoute milieu waardoor meer onderhoud nodig is dan in zoete milieus.

Omdat in deze gevallen niet sprake is van een bestaande constructie kan met de komst van een waterkrachtcentrale beter rekening gehouden worden. Indien molens in een bestaande constructie gehangen geeft dat een afname van de doorlaatcapaciteit als gevolg van de hydraulische weerstand c.q. energieproductie. Nieuwe doorlaatmiddelen kunnen met extra doorlaatcapaciteit ontworpen worden om het effect van een waterkrachtcentrale te accommoderen.

4.4 Locaties waar met zeer beperkte inspanning voor wat betreft de civiele constructies enige opwekking van waterkracht mogelijk is

Locaties waar met zeer beperkte inspanning voor wat betreft de civiele constructies en door middel van plaatsing van een molen zonder het water met andere middelen toe te leiden of verval op te bouwen waterkracht kan worden opgewekt.

Te denken valt aan het plaatsen van molens in de spuisluizen van de Afsluitdijk, molens in een paar openingen van de Oosterscheldekering, etc.

Ook plaatsing nabij / onder bruggen, bv. Aan brugpijlers valt te overwegen. Er is daar nauwelijks sprake van stoomversnelling, maar er is wel een constructie waaraan iets bevestigd kan worden.

4.5 Locaties waar nu geen constructies bestaan, maar wellicht een centrale gebouwd zou kunnen worden.

Met name waar langs een kust getij aanwezig is valt in theorie te overwegen gebruik te maken van getij-energie. Nederland heeft een paar locaties waar achter de kustlijn laagliggend gebied aanwezig is. Het doorsteken van zo'n locatie (met meer landinwaarts aanbrengen van een nieuwe kering) biedt kansen voor waterkracht. Feitelijk is het IJsselmeer zo'n gebied. Ook in de Zeeuwse wateren (Oosterschelde en Westerschelde) zouden plaatsen aan te wijzen zijn. Los van de politieke (on)haalbaarheid van een dergelijk plan is het aanbrengen van de hele wijziging van de infrastructuur voor rekening van het opwekken van waterkracht. Dat moet, gelet op wat in paragraaf 2.4 over de economie van waterkracht gesteld is, als niet realistisch worden beschouwd.

4.6 Overige locaties

Buiten de kunstwerken met verval is er sprake van enige stroming, maar ook van gebruik van de watergangen door schepen. Het lijkt niet eenvoudig beide functies te combineren. Slechts op kleine schaal is energiewinning hier mogelijk. Belangrijk is dat de beheerder van de waterweg instaat is om op goedkope wijze te verhinderen dat schepen, pleziervaart, etc schade zouden verrichten aan de molens en dat de molens vervuild raken.

In het bovenrivierengebied is de vaarbreedte tussen oevers of kribkoppen niet zo groot dat er grote installaties neergezet kunnen worden. Mogelijk dat na verandering van kribben (bv de toepassing van het Eilandkribconcept (Royal Haskoning)) meer stroming door de kribvakken plaatsvindt zodat daar molens te plaatsen zijn. De morfologie van de kribvakken is hierbij een aandachtspunt.

Indien nevengeulen permanent stromen kunnen een of meer molens geplaatst worden. In hoogwatergeulen is dat niet opportuun; die stromen slechts sporadisch.

Een heel andere gedachte is om door schepen opgewekte golven te dempen en daarmee energie te winnen. Dat moet kunnen zonder dat de schepen meer energie moeten leveren. Immers, schepen sturen die golven uit en wat er elders mee gebeurt zal niet van belang zijn voor het schip. Voor het Amsterdam-Rijnkanaal wordt nagedacht over vervanging van de harde oever (damwand) door een (goedkoop) systeem waarin verticale waterbeweging wordt omgezet in elektrische energie. Dit is nog maar een idee dat nog verder moet worden uitgewerkt.

5 Concrete voorstellen voor geschikte nieuwe locaties en de daarbij toe te passen machines

5.1 Mogelijk geschikte locaties

De verkenning werd gericht op locaties met enig vermogen. Dat wil zeggen van een paar honderd kW tot enkele MW. Het heeft concreet geleid tot de volgende locaties voor duurzame energie:

5.1.1 Stuwen, spuisluizen, doorvoersluizen, stormvloedkeringen

Maas:

Waterkrachtstations bij stuwen Borgharen, Roermond, Belfeld, Sambeek, Grave

(De stuwen Linne en Lith zijn voorzien van waterkrachtcentrales)

Borgharen

Het idee voor een centrale is in 1991 al bekeken. Het te installeren vermogen werd toen gekozen (3 Kaplan turbines) van ca 11 MW (4 m verval en 300m³/s). Jaarlijkse energieopbrengst ca 40 GWh. De civiele werken voor een dergelijke centrale zijn een belangrijke kostenpost. Naast de stuw en centrale was een waterpark gepland dat ook dienst zou doen als vistrap. Bij de centrale waren voorzieningen gepland om vis zo veel mogelijk uit de turbines te houden. Dit idee kan nog steeds worden uitgevoerd. De SDE regeling voor lage vervallen zou van kracht behoren te zijn (geldt voor alle stuwlocaties in de Maas): een gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh. Indien een debiet door het Julianakanaal gestuurd wordt gaat dat bij kleine rivierdebieten af van het debiet door deze Borgharencentrale.



Stuwcomplex Borgharen

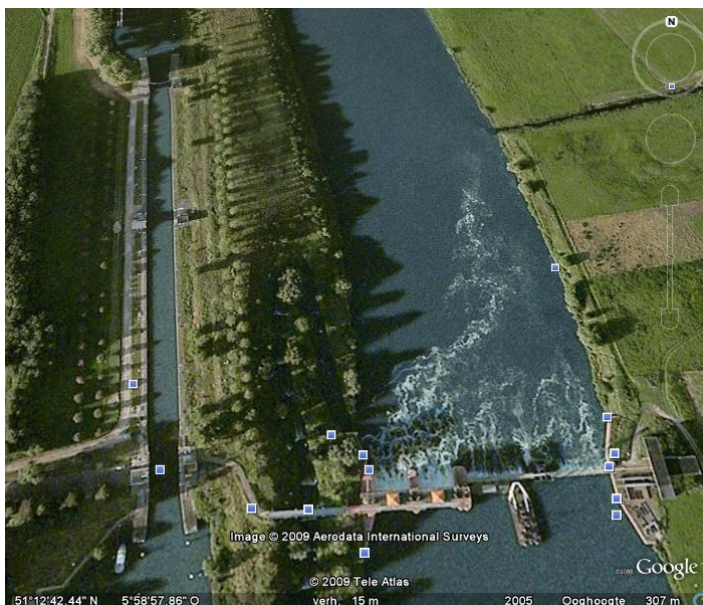
In afwachting van een eventuele vismigratiestudie kan overwogen worden nog even niets te doen. Of men kan besluiten om in plaats van Kaplan turbines visvriendelijke turbines te plaatsen in een simpele civiele constructie. Dit alternatief geeft een veel geringere energieopbrengst (bij ook geringer debiet door de centrale). In dat geval kan men bijvoorbeeld vier VLH-turbines plaatsen met ieder een vermogen van 0,5 MW; er is waarschijnlijk niet ruimte voor meer machines. Totaal vermogen is dan 2MW. Het verval is echter wat aan de hoge kant voor een dergelijke machine, maar daar is waarschijnlijk wel wat aan te doen in overleg met de fabrikant. De vraag of deze optie economisch uit kan moet worden nagegaan. Ook is het zo dat de VLH-turbine nog in (het einde van) de ontwikkelfase zit. De machine stopt er eerder mee bij geringer wordend verval dan een Kaplan turbine (1,4m, i.p.v. 0,9m), maar dat betreft in de Maas een relatief korte periode over het jaar gerekend. De machines (er kunnen meerdere worden geplaatst) moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie). Groot voordeel is ook dat de machines uit het water gekanteld kunnen worden.

Er is ook een tussenweg mogelijk waarbij wel Kaplan turbines worden geplaatst, maar parallel aan de Kaplan centrale tussen deze centrale en de stuw in een kleine visvriendelijke centrale te plaatsen. Dat kan een Archimedes-schroef, een VLH of een Stromingswiel voor diep water zijn. Vis zwemt vaak door tot aan de stuw en zoekt dan een weg en kan via een lokstroom naar de visvriendelijke machine zwemmen. Ook in dit geval moeten met speciale schermen kleine vissen worden afgehouden door de Kaplan turbines te gaan. Voor opgaande migratie van vissen blijft een normale vistrap nodig.

Er is een particulier initiatief voor de aanleg van een waterkrachtcentrale bij deze stuw.

Roermond

De potentie bij de stuw Roermond is ongeveer 60% van die bij Borgharen, dus 6,5 MW. De PLEM heeft een korte studie gedaan naar deze locatie. Uitvoering is niet gerealiseerd omdat een investering (voor een centrale met Kaplan turbines) toen niet verantwoord leek. Mogelijk ligt dat nu anders.



Stuwcomplex Roermond

Evenals voor Borgharen geldt kan men overwegen nog even te wachten of men kan besluiten na te gaan of een installatie met een aantal VLH-turbines economisch interessant is. Daarmee zou 2MW te installeren zijn. De vervallen zijn geschikt voor dergelijke machines.

De machines moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie).

Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden.

Belfeld

De potentie bij de stuw Belfeld is ongeveer 50% van die bij Borgharen, dus 5 MW. De PLEM heeft een korte studie gedaan naar deze locatie. Uitvoering is niet gerealiseerd omdat een investering (voor een centrale met Kaplan-turbines) toen niet verantwoord leek. Mogelijk ligt dat nu anders.



Stuwcomplex Belfeld

Evenals voor Borgharen geldt kan men overwegen nog even te wachten of men kan besluiten na te gaan of een installatie met een aantal VLH-turbines economisch interessant is. Daarmee zou 2MW te installeren zijn. De vervallen zijn geschikt voor dergelijke machines. De machines moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie).

Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden.

Sambeek

De situatie bij Sambeek (en Grave) zijn in 1997 bestudeerd. De maximale variant betrof 2 Kaplan-turbines met een debiet per turbine van $100\text{m}^3/\text{s}$. Totaal te installeren vermogen 8,5 MW en energieopbrengst ca 25 GWh. Het project is echter niet in uitvoering gekomen. Waarschijnlijk was het net niet voldoende economisch interessant. Mogelijk ligt dat nu anders.



Stuwcomplex Sambeek

Ook hier kan bekeken worden of een installatie met een aantal VLH-turbines economisch interessant is. Daarmee zou 2MW te installeren zijn. De vervallen zijn geschikt voor dergelijke machines. De machines moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie). Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden. Er komt een proef met een HydroRing bij deze stuw.

Grave

De situatie bij Grave is in dezelfde studie als voor Sambeek bekeken en het te installeren vermogen was 7,5 MW. De energieopbrengst is door een iets minder groot verval wat kleiner. Ook hier kan bekeken worden of een installatie met een aantal VLH-turbines economisch interessant is. Daarmee zou 2MW te installeren zijn. De vervallen zijn geschikt voor dergelijke machines.



Stuwcomplex Grave

De machines moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie).

Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden.

Opmerkingen

De schutsluis Heel heeft een groot verval (ca. 6,5 m). Deze sluis vormt het begin van het lateraal kanaal. Dit verval nu benutten zou echter debiet ontnemen aan de waterkrachtcentrale Linne. Indertijd heeft men besloten het lateraal kanaal niet te belasten met een belangrijk debiet. Men kan alsnog besluiten om enig debiet (bv. $20\text{m}^3/\text{s}$) door het lateraal kanaal te laten lopen om profijt te hebben van het hoge verval en tegelijkertijd de negatieve gevolgen voor de centrale Linne binnen de perken te houden. Zie onder schutsluizen.

Het Julianakanaal heeft twee schutsluizen met een belangrijk verval. Als er voor gekozen wordt om enig debiet door het Julianakanaal te laten gaan (bv. $20\text{m}^3/\text{s}$) dan kan er bij de sluizen Born en Maasbracht energie worden opgewekt. Dit gaat dan wel af van de mogelijke energieopwekking bij Borgharen, maar dat heeft beperkte consequenties ingeval bij Borgharen besloten wordt niet het maximaal mogelijke aan energie op te wekken. Zie onder schutsluizen.

Nederrijn:

Waterkrachtstations bij stuwen Driel en Hagestein

(De stuw Amerongen heeft een waterkrachtcentrale)

Driel

Van de drie stuwen in de Nederrijn is Driel waarschijnlijk de minst aantrekkelijke voor het winnen van energie. Dat komt doordat de stuw als eerste in de rij als kraan functioneert en een groot deel van het jaar open staat. Toch heeft waterschap Rivierenland haar oog op Driel laten vallen en wil een haalbaarheidsstudie laten verrichten. Het te installeren vermogen met Kaplan turbines kan ca 2,3 MW bedragen (zie Annex 2).

Het alternatief van visvriendelijke VLH turbines is hier minder goed mogelijk vanwege de te geringe vervallen (de VLH draait bij vervallen $> 1,4\text{m}$). De locatie kan geschikt zijn voor een aantal SPMs. De investeringskosten van dergelijke machines lijken laag te zijn in vergelijking met de andere waterraderen. Het te installeren vermogen is nog onduidelijk; mogelijk lager dan 0,5 MW. De SPM is nog in ontwikkelfase en er is nog te weinig van bekend (maar contact met de fabrikant kan uiteraard snel helderheid verschaffen). Het minimaal benodigde verval lijkt gering te zijn. De machine moet wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie).

Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden.

De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn (dit geldt voor alle stuwlocaties in de Nederrijn): gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Hagestein

Hagestein heeft evenals Driel geen grote vervallen, maar deze zijn langduriger aanwezig zodat er meer energie gewonnen kan worden. Aan benedenstroomse kant is het getij merkbaar. De in de middenpijler aanwezige verticale Kaplan turbine heeft nogal wat storingen en is nu ook weer buiten werking. De keuze voor dit type lijkt niet gelukkig te zijn geweest en geadviseerd wordt om de middenpijlerturbine buiten gebruik te laten. In plaats daarvan kan in een eventuele Kaplan turbine centrale (en) zou aan geïnstalleerd vermogen ca 8 MW worden bereikt.



Stuwcomplex Hagestein

Als alternatief valt aan visvriendelijke VLH-turbines te denken. De omstandigheden zijn hiervoor gunstiger dan bij Driel. Waarschijnlijk geven vier VLH turbines een geïnstalleerd vermogen van 1 MW. De machines moeten wel in een kanaal geplaatst worden waarin het debiet ook afgesloten kan worden (vanwege de stuwfunctie).

Ook de bij Borgharen beschreven tussenweg kan gekozen worden.

IJsselmeer / Afsluitdijk spuisluisen:

In alle spuigangen van de sluizen in de Afsluitdijk (Lorenzsluizen bij Kornwerderzand en Stevinsluizen bij Den Oever) kan een molen geplaatst worden. Een Tocardomolen heeft het voordeel robuust te zijn en de molen kan worden opgehaald voor onderhoud of als de weerstand van de molen ongewenst is. Er is met een proefopstelling ervaring opgedaan. De ontwikkeling van de molen is zover dat er sprake is van commerciële inzetbaarheid. Het totaal te installeren vermogen per molen 50 kW. Totaal aantal spuigangen is 25, maar niet alle worden steeds gebruikt. Verondersteld is vooralsnog 18 molens en dus gaat het om ruim 0,9 MW.

Nadere analyse moet uitwijzen of er nog meer molens te plaatsen zijn en of alle spuigangen molens moeten hebben. In ieder geval mag er niet van uitgegaan worden dat het spuibeheer gericht wordt op waar de molens geplaatst zijn. Uit een zeer voorlopige analyse van de gegevens blijkt dat de spuisluisen hooguit een kwart van de tijd gebruikt worden. Het is dan de vraag of plaatsing van Tocardo molens economisch rendabel kan zijn. Mogelijk wel door er een beperkt aantal van te installeren en met het spuien rekening te houden met deze locaties.



Spuisluis Den Oever

Een zorg is de invloed die vuil (zwevende visnetten, zwevende stukken scheepstros, hout etc.) heeft op de machine. Eigenlijk zouden ze beschermd moeten worden met een vuilrooster, maar dat moet onderhouden worden en maakt het economische plaatje waarschijnlijk te ongunstig.

Plaatsing van vuilongevoeliger Waterraderen voor diep water is ook mogelijk, maar dat worden hier grote constructies die minder eenvoudig uit het water te tillen zijn. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Nieuwe Statenzijl (echter geen Rijkswater)

De spuisluis Nieuwe Statenzijl vormt een belangrijke spuinmogelijkheid voor het waterschap Reiderzijlvest. Het maximale debiet door de sluis (vier spuigangen) is ca 200 m³/s.



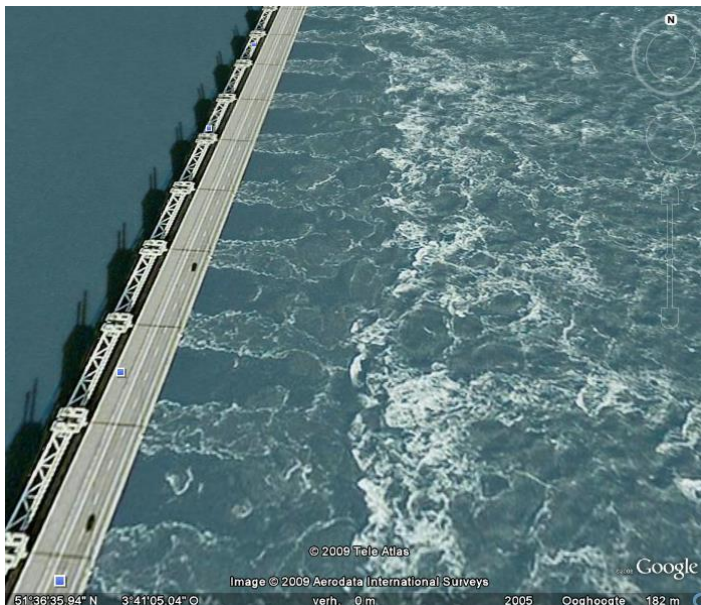
Spuisluis Nieuwe Statenzijl

Hierin kunnen Tocardo-molens gehangen worden. Totaal 0,2 MW geïnstalleerd vermogen. Hoe vaak de sluis gebruikt wordt is nog onbekend. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Oosterschelde:

Rijkswaterstaat is bereid om twee doorgangen in de Oosterscheldekering te gebruiken voor de plaatsing van molens. Ook hier kunnen Tocardo-molens geplaatst worden. Feitelijk zouden de molens gedraaid moeten worden bij omkering van het getij. Men kan bezien in hoeverre een omgekeerde aanstroming nog tot energiewinning leidt en voor de molens acceptabel is. De rotorbladen zijn immers draaibaar. In aantal kunnen er waarschijnlijk maximaal 20 molens worden geplaatst (of minder maar groter molens). Aan geïnstalleerd vermogen levert dat 1 MW. Wel zal een stevige uithouder geconstrueerd moeten worden om deze vanuit de betonnen pijlers (vanuit bovenligger is het niet toegestaan) in het water te laten. De ruimte tussen de onderkant van de bovenligger en het wateroppervlak is niet groot; waarschijnlijk moet de tilconstructie de molen aan de Oosterscheldekant achter de bovenbalk brengen.

Opm: Er is sprake van om een opening met Tocardo-molens te voorzien en de tweede opening met WaveRotors (Ecofys) (een type dat nog in ontwikkeling is). In totaal wordt gedacht aan vijf grote Tocardo-molens (ieder met 5m diameter) en drie grote WaveRotors (ieder met diameter van 7m). Totaal te installeren vermogen ca. 2 MW (Informatie van november 2009)

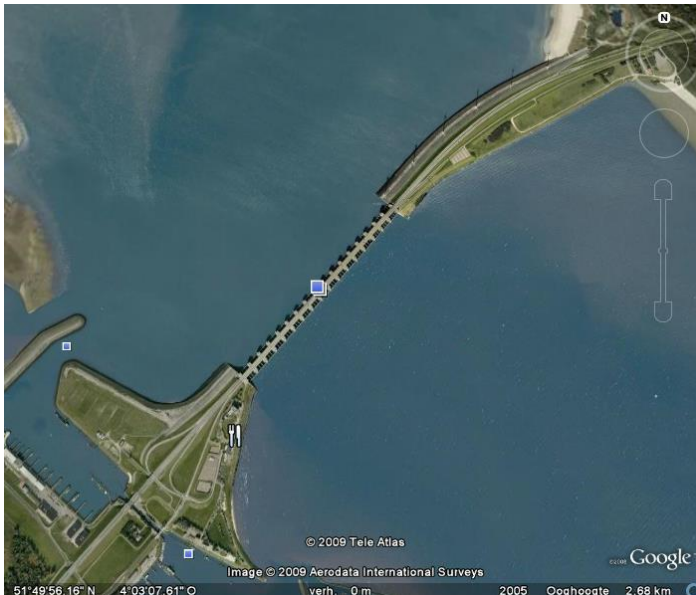


Oosterschelde stormvloedkering (deel Roompot)

Hier kan veel minder dan bij de Afsluitdijk spuisluizen voldoen worden aan de wens van vuilroosters. Er is geen mogelijkheid om Waterraderen voor diep water te plaatsen. Met name in de Oosterschelde komt een kleine zeehondenpopulatie voor en de vraag is welk gevaar molens hiervoor opleveren. De nieuwsgierigheid van deze zoogdieren (maar ook van walvisachtigen) kan extra nadelig zijn. De populatie bevindt zich aan de noordkant van de kering; reden om de opstellingen aan de zuidkant te kiezen (Roompot). De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Haringvliet

Het Haringvliet staat nu vaak dicht of er zijn slechts een paar spuigangen deels open. Na invoering van het kierbeheer zal het aantal spuigangen groter zijn. Er zijn 17 spuigangen. In elke spuigang is er plaats voor meerdere molens. Ook hier heeft de Tocardo-molen een voordeel omdat die wegneembaar is en robuust is. Wel zal een flinke uithouder per molen geconstrueerd moeten worden om deze vanuit de betonnen Nabla-ligger in het water te laten. Nadere studie moet uitwijzen of dit een financieel interessante mogelijkheid biedt. Het is denkbaar dat bv. 30 molens geplaatst worden en dan betreft dat 1,5 MW aan geïnstalleerd vermogen. Evenals bij de Oosterschelde zouden de molens draaibaar opgesteld moeten worden. Echter, het gebruik van de spuisluis is beperkt in de tijd. De uitvoering van het kierbesluit zal een frequenter gebruik geven, maar of dat voor de plaatsing van molens van belang is werd niet duidelijk. Als het kierbesluit wordt uitgevoerd door alle schuiven op een kier te zetten, dan zijn de snelheden ter plaatse van een molen waarschijnlijk niet erg groot. Wordt het debiet geconcentreerd in een aantal openingen waar de schuiven verder geheven worden en als daar dan ook molens staan dan wordt het economisch interessanter.



Spuisluis Haringvliet

Ook kan overwogen worden hier de minder vuilgevoelige Stromingswielen voor diep water te plaatsen. Deze wielen hebben echter wel forse afmetingen (maar er is wat ruimte onder de Nabla-liggers). In de studie 'Tidal Energy – Lessons learnt from the UK and opportunities for the Netherlands' is een indicatie geven voor het aantal megawatts te installeren vermogen. Maar in deze studie is niet gerekend met de bestaande spuisluissituatie. De mogelijkheden van het huidige beheer lijken zeer beperkt; bij toepassing van kierbeheer wordt dat wat beter. Vooralsnog is het aantal onzekerheden te groot om met meer rekening te houden dan 1,5 MW. In de situatie met kierbeheer kan de aanwezigheid van zeezoogdieren; zie hierboven bij de Oosterscheldedekering. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Bathse spuisluis

De Bathse spuisluis (sifon) of ook wel Lozingsmiddel Zoommeer laat water af naar de Westerschelde. Het debiet kan vrij fors zijn ($300 - 400 \text{ m}^3/\text{s}$), maar is een functie van de waterstandsverschillen en het aanbod dat voor een belangrijk deel regenwaterafvoer uit Noord-Brabant en Limburg betreft.

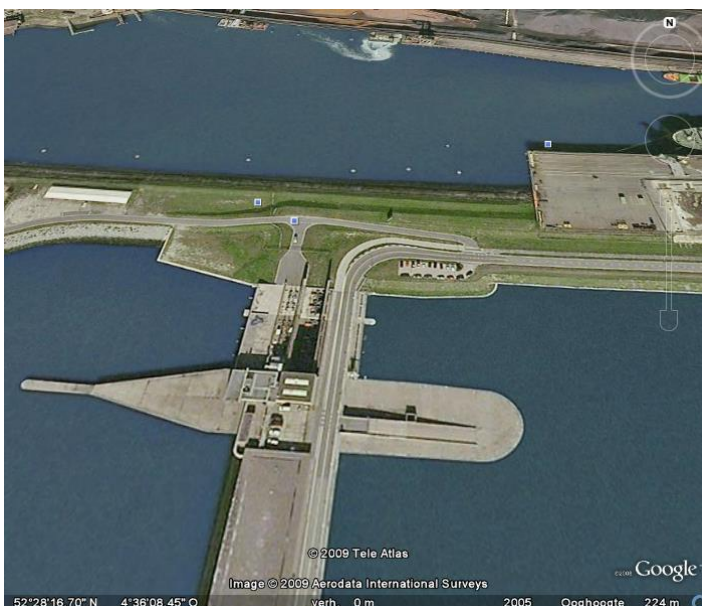


Spuisluis Bath

De spuisluis heeft diverse spuigangen van 3,35m breedte en in elke spuigang kan een Tocardo-molen gehangen worden. Het te installeren vermogen is bij 10 molens 0,5 MW, maar of het economisch haalbaar is om dat te doen is nog niet duidelijk. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

IJmuiden spuisluis

De IJmuiden spuisluis kan voorzien worden van molens. Hierbij wordt opgemerkt dat het water van het Noordzeekanaal naar zee moet en daartoe ook het gemaal regelmatig wordt ingezet. Alles wat door vertragende werking niet op normale wijze gespuid wordt en als gevolg daarvan meer gepompt moet worden is contraproductief.



Spuisluis & gemaal IJmuiden

Het plaatsen van molens is daardoor op deze plaats waarschijnlijk minder interessant. Toch zal hier preciezer naar gekeken moeten worden alvorens te besluiten hier geen molens te plaatsen. Ook de stroomsnelheden die gehaald worden in de spuigangen en hoe vaak de spuisluis gebruikt wordt zijn eveneens van belang. Voor deze locatie is geschat dat 7 Tocardo-molens geïnstalleerd kunnen worden. Totale vermogen 0,35 MW. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Limburgse en Brabantse vaarten en kanalen

Deze kanalen behoren deels tot de Rijkswateren. In deze kanalen loopt enig debiet waarmee bij Roeven – Nederweert een kleine centrale (35 kW) elektrische energie opwekt. Bij Heel komt water van de Maas naar binnen via inlaten en schutten en in het hele gebied van de provincies Limburg en Noord-Brabant vinden regenwaterlozingen (en waarschijnlijk ook wateronttrekkingen) plaats. Op diverse plaatsen komt het water via spuisluizen op de Maas of het Zoommeer (Crevecoeur (Dieze), nabij Waalwijk, Dintelmond (Dintel), Benedensas (Steenbergse Vliet), etc.). Deze locaties vallen weer onder het beheer van een waterschap. Niet is nagegaan of het op meer plaatsen mogelijk is energie te winnen. De vervallen over de spuiwerken zijn echter gering en de stromen zijn niet continu. Gelet op de mogelijke debieten in de Bathse spuisluis zouden hier en daar Tacardo-molens op te stellen moeten zijn. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Twenthekanaal

Via het sluiscomplex Eefde wordt water van het Twenthekanaal naar de IJssel afgelaten. Er zijn o.m. drie overlaten en er zijn ook pompen. Bij een tekort op het Twenthekanaal kan dan water vanuit de IJssel gepompt worden. Er bestaan plannen om in plaats hiervan pompturbines te plaatsen. Het afluutdebiet is maximaal ca 200 m³/s. Het verval kan maximaal ca 8m bedragen en is (vooral) afhankelijk van de waterstand op de IJssel. Dit zijn extremen. Meer gangbare flinke debieten zijn ongeveer een kwart en vervallen ongeveer de helft hiervan. Tot vrij hoge waterstanden op de IJssel wordt de afvoer via het sluiscomplex Eefde niet beïnvloed. Geen inzicht is verkregen over de frequentie van voorkomen van voor energieopwekking interessante situaties. Omdat hier door Rijkswaterstaat al acties worden ondernomen is deze locatie niet indringend onderzocht. De pompturbines lijken ingericht om een beperkt deel van de beschikbare hydraulische energie om te zetten. Mogelijk is rekening te houden 0,5 MW aan te installeren vermogen. De plannen lijken een soort verticale Kaplan te omhelzen. Indien een aantal Archimedes-schroeven worden geïnstalleerd dan is een visvriendelijke oplossing verkregen. Als de opstroomse vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). Het is de vraag of de SDE regeling voor lage vervallen van kracht kan zijn: gegarandeerde opbrengst in dat geval 0,125 €/kWh.

Vlak ten zuiden van het sluiscomplex mondt ook de gekanaliseerde Berkel (niet een Rijkswater) uit. Debiet uit dat kanaal is onbekend. Langs de Berkel staan twee onderslagmolens (De Stenen Tafel in Borculo en een molen in het buurtschap Mallem).

Opm. Door Rijkswaterstaat Dienst Infra wordt een studie uitgezet naar de toepassingsmogelijkheden van VLH turbines of vijzels op deze locatie (Informatie is van november 2009)



Sluizencomplex Eefde

5.1.2 Schutsluizen met een (mogelijke) spuifunctie

Bosscherveld schutsluis (tussen de Maas en de Zuid-Willemsvaart)

Over de sluis Bosscherveld staat ca 3,5m verval en er wordt maximaal 10 m³/s binnengelaten naar de (Belgische) Zuid-Willemsvaart. Er is een particulier initiatief om ter plaatse een waterkrachtcentrale te bouwen.



Schutsluis Bosscherveld

Met het inzicht van deze studie verkregen zou een middenslagrad of bovenslagrad aangeraden moeten worden. Mogelijk kan ook een aantal Archimedes-schroeven dienst doen. Als de opstroomse vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). Het te installeren vermogen bedraagt dan 0,3 MW. De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Julianakanaalsluizen Born, Maasbracht

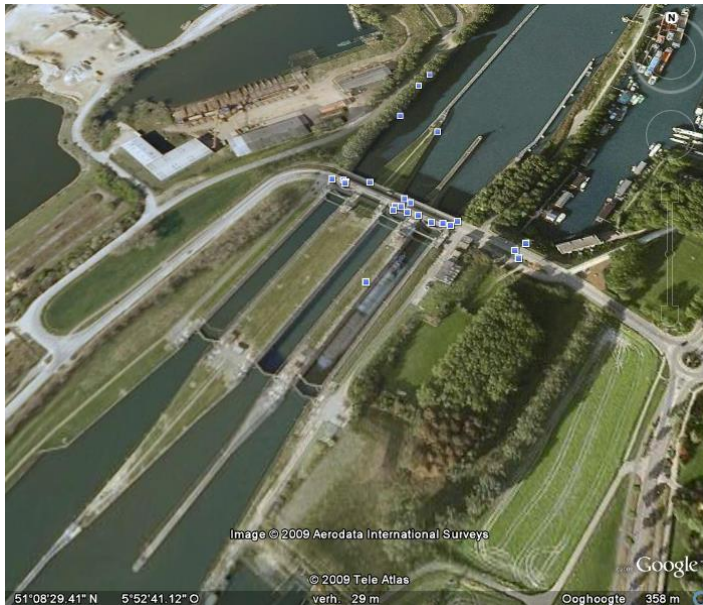
In het Julianakanaal zijn twee sluizen aanwezig; halverwege sluis Born en aan het eind sluis Maasbracht. Het verval over deze sluizen is groot (Born ca 11m; Maasbracht ca 12m). Door wat water door het kanaal te sturen zou gebruik gemaakt kunnen worden van deze grote vervallen. Weliswaar gaat dat af van de energiewinning bij Borgharen, maar als die toch niet maximaal wordt benut kan bekeken worden of het niet beter is ook Born en Maasbracht uit te nutten. Het idee daarvoor bestaat reeds en er lopen initiatieven.



Schutsluiscomplex Born

Het grote verval maakt dat de Archimedes-schroef niet meer toe te passen is. Men kan onderzoeken of een getrapt systeem mogelijk is: Archimedes-schroeven in serie. Bovenstroomse waterstanden zijn nagenoeg constant; de benedenstroomse waterstand bij Maasbracht is afhankelijk van het Maasdebiet, maar variatie is hier voor de schroeven niet kritisch. Op elke locatie kan bij 20m³/s tot 2 MW opgewekt worden. Daarvoor moeten per locatie meerdere schroeven worden geplaatst. In principe zou een of meerdere visonvriendelijke Cross-flow turbines ingezet moeten worden, met parallel daaraan een visvriendelijke machine die een lokstroom op kan wekken (voor de naar beneden migrerende vis).

Het aspect van vismigratie vereist nadere aandacht (naast een Archimedes-schroef of Cross-flow turbine is een vistrap nodig voor de migratie richting bovenstrooms).



Schutsluiscomplex Maasbracht

Voor dergelijke vervallen ($>10\text{m}$) kan ook geopteerd worden voor Francis of Pelton turbines. Dergelijke uitvoeringen zijn echter eveneens visonvriendelijk. Voor de naar boven migrerende vis moet een vistrap uitkomst bieden (of men laat die de Maasroute nemen). De vraag is hoeveel vis de kanaalroute kiest als daar een (zeer) geringe stroom in komt. Gelet op het grote verval moet hier wel rekening gehouden worden met het lage garantietarief van $0,073 \text{ €/kWh}$.

Heel (in de Maas)

De schutsluis Heel verbindt de Maas met het Lateraalkanaal en over deze sluis staat vaak een groot verval. Enig debiet langs deze sluis lijkt mogelijk en daarmee kan energie worden opgewekt. Bij een debiet van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en een verval van max. 7m (maar vaak iets minder, bv 250 dagen per jaar is $6,5\text{m}$ beschikbaar) is $1,2 \text{ MW}$ haalbaar. Daarvoor moeten meerdere (10) Archimedes-schroeven worden geplaatst. Gekozen kan worden voor kantelbare schroeven waarmee de variatie in waterstanden aan de instroomkant opgevangen kan worden; waarschijnlijk kan dat nog juist voor dit verval vanwege de meedraaiende mantel. Als de opstroomse vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). Gelet op het grote verval moet hier helaas wel rekening gehouden worden met het lage garantietarief van $0,073 \text{ €/kWh}$.



Sluis Heel (nabij stuwcomplex Linne)

Panheel (Maas – Kanaal Wessem Nederveert / Zuid-Willemsvaart (Noord-Brabant) iets bovenstrooms van Heel takt het Kanaal Wessem Nederveert af van de Maas. Over de schutsluis staat een belangrijk verval (5m). Als het mogelijk is enig debiet door het kanalen systeem te laten gaan, kan hier energie gewonnen worden.

Bij een debiet van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en een verval van 5m is 0,4 MW haalbaar. Daarvoor moeten meerdere schroeven worden geplaatst. Gekozen kan worden voor kantelbare schroeven waarmee de variatie in waterstanden aan de instroomkant opgevangen kan worden; waarschijnlijk kan dat nog juist voor dit verval vanwege de meedraaiende mantel De vismigratie vereist waarschijnlijk een vistrap (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). Mogelijk zal de SDE regeling voor lage vervallen nog juist van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Tiel

Door het Betuwepand loopt een beperkt debiet dat via de schutsluis Prins Bernardsluis (nabij Tiel) binnen wordt gelaten. De scheepvaart ondervindt daar hinder van. RWS overweegt dit debiet op andere wijze het kanaal in te laten en denkt aan energieopwekking. De Archimedes-schroef is daarbij een optie en in principe ook een goede keuze als het debiet beperkt is. Het verval bedraagt ca 3m. Bij een debiet van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en een verval van 3m is 0,5 MW haalbaar. Daarvoor moeten meerdere schroeven worden geplaatst.



Schutsluiscomplex Tiel (Prins Bernhardsluis)

Gekozen kan worden voor meedraaiende mantels en kantelbare schroeven waarmee de variatie in waterstanden aan de instroomkant opgevangen kan worden. Indien vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Wijk bij Duurstede

Over de sluis bij Wijk bij Duurstede (Prinses Irenesluis) staat vaak een flink verval. Door het Amsterdam-Rijnkanaal zou men via deze sluis (naast de schutdebieten) een beperkt debiet kunnen laten gaan. Dat extra debiet moet er bij IJmuiden (of eventueel via het Oranjesluizencomplex naar het Markermeer/IJsselmeer en via de Alsluiddijkspuisluizen naar zee) uitgelaten worden. Energieopwekking met behulp van Archimedes-schroeven is daarbij een optie en in principe ook een goede keuze als het debiet beperkt is. Bij een debiet van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en een verval van 8m is 1,5 MW haalbaar. Daarvoor moeten meerdere schroeven worden geplaatst.

Gekozen kan worden voor meedraaiende mantels en kantelbare schroeven waarmee de variatie in waterstanden aan de instroomkant opgevangen kan worden; waarschijnlijk kan dat nog juist voor dit verval vanwege de meedraaiende mantel. Indien vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). Gelet op het grote verval moet hier helaas wel rekening gehouden worden met het lage garantietarief van 0,073 €/kWh.

Weurt (Maas-Waal Kanaal)

De sluis bij Weurt (nabij de Waal in het Maas-Waal Kanaal) keert het verval tussen Waal en Maas ter plaatse. De sluis Heumen (bij de Maas aan het andere einde van het kanaal) wordt alleen gesloten (als hoogwaterbescherming van de Maas) bij hoge waterstanden op de Waal.



Schutsluiscomplex Weurt

Het verval over de sluis kan 5m bedragen, maar meestal is dat belangrijk lager, bv. 2m. Het verval kan beide kanten op staan. Door de bouw van een centrale kan hier elektriciteit opgewekt worden, maar zo'n installatie moet bi-directioneel zijn. Wel wordt gevreesd dat de scheepvaart ter plekke geen spuifunctie erbij kan hebben. Met name als het water door de geopende sluis Heumen moet worden aan- of afgevoerd. Dat betekent dat debieten klein moeten zijn of speciale voorzieningen nodig zijn. Als de vismigratie van belang is zal waarschijnlijk een vistrap nodig zijn (mogelijk gaat er voldoende vis met het schutten mee). De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

St. Andries

De sluis bij St. Andries bevindt zich in een korte verbinding tussen Maas en Waal. Het verval over de sluis kan maximaal 2m bedragen, maar is meestal orde 1m (varieert tussen enkele dm tot 2m). De Waal staat hier altijd hoger dan de Maas. Door de bouw van een centrale kan hier elektriciteit opgewekt worden. De spuifunctie lijkt hier realiseerbaar.

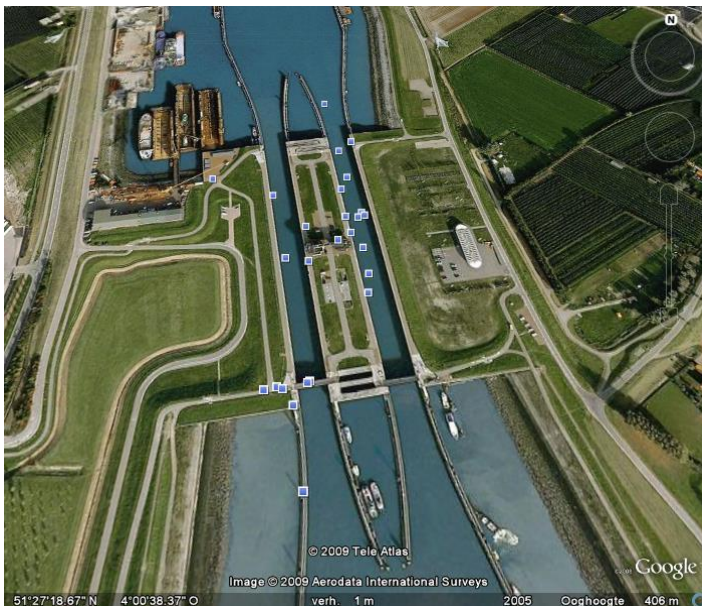
De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.



Schutsluis St. Andries

Hansweert

In het kanaal door Zuid-Beveland wordt de Oosterschelde en de Westerschelde bij Hansweert met een schutsluis gescheiden. Over de schutsluis staat een gering getijverschil tussen beide wateren. Een beperkte stroming door het kanaal lijkt het waterbeheer niet te storen en daardoor zou bij de sluis een kleine centrale te maken zijn.



Schutsluiscomplex Hansweert

Er is een getijde waterstandverschil over de sluis van ca 1 m. Met een bi-directionele installatie kan daarmee energie gewonnen worden. De grootte is te kiezen. Bij een maximum debiet van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ zou het te installeren vermogen 0,2 MW zijn. Hier lijkt vismigratie niet een probleem (beide kanten van de sluis in verbinding met dezelfde zee). De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

Volkerak

De debieten die via de Volkerakschutsluizen gaan vormen thans onderwerp van studie ivm de waterkwaliteit van het Zoommeer. Het is nog niet bekend wat daar uit zal komen voor de debieten via of langs deze schutsluizen en de Inlaatsluis Volkerak. Om die reden is de Volkerak in deze waterkrachtstudie buiten beschouwing gelaten.

Krammer

De Krammersluizen hebben een functie in het zout-zoetwaterbeheer. Het over de sluizen staande getijverval kan dan niet benut worden voor waterkracht. Dat zou immers de zout-zoetwaterscheiding frustreren. Om die reden zijn de Krammersluizen in deze waterkrachtstudie buiten beschouwing gelaten.

Terneuzen, grote zeesluis

Het Kanaal Gent -Terneuzen loost water naar de Westerschelde omdat het kanaal hoger staat dan gemiddeld waterniveau op de Westerschelde. Het schutbedrijf veroorzaakt dat spuidebiet. De grote sluis heeft bovendien de mogelijkheid om binnengedrongen zout water dat in een verlaagd deel van het aansluitende kanaalpand geborgen wordt naar zee terug te spoelen. Door in dat retourkanaal molens te plaatsen kan elektrische energie worden opgewekt. Het terugspoelen van zout water is enigszins gekoppeld met het sluisbedrijf, maar heeft geen invloed op nivelleertijden van de kolk.



Terneuzen Grote Zeesluis

Toch heeft het plaatsen van molens (dus extra weerstand) een bezwaar voor de nivelleertijden omdat dezelfde riolen gebruikt worden voor het nivelleren. Probleem is wellicht dat de riolen diep liggen en alleen via de onderhoudsschuifschachten molens kunnen worden geplaatst. De ruimte voor molens is daardoor beperkt en er kan daarom niet uit een bestaand arsenaal gekozen worden. Dan zou toch een apart kanaal gemaakt moeten worden en dat lijkt voor enkel de functie van opwekken van elektrische energie veel te duur.

5.1.3 Schutsluizen / nivelleersystemen

Het schutten van sluizen vergt kortdurend debiet via het nivelleersysteem van de sluis. Dat nivelleersysteem kan diverse vormen hebben:

- o nivelleeropeningen in de deuren van de sluis (komt veel voor bij sluizen met lager vervallen, maar ook bij vrij grote vervallen in combinatie met hefdeuren)
- o omloopriolen in de hoofden van de sluis (komt veel voor bij hoogverval sluizen in combinatie met een woelruimte in het bovenhoofd) en bij grote zeesluizen
- o langsriolen (komt voor bij oude sluizen en bij grote zeesluizen)

Installatie van een of meer molens in een nivelleersysteem zal tot gevolg hebben dat het nivelleerproces merkbaar vertraagd wordt. Het is de vraag of dat acceptabel is. Maar verder is het zo dat geen gangbare machines kunnen worden gekozen. Ze moeten worden ontwikkeld. De machines krijgen te maken met in het water aanwezige vuil: hout, plastic, scheepstrossen etc. en moeten dat kunnen doorlaten of er moeten vuilroosters voor gemonteerd worden die dan schoongehouden moeten worden. Mede gelet op het kortstondig gebruik dat van de machines kan worden gemaakt lijkt een investering in dit soort opstellingen niet rendabel. Er kunnen bijkomende redenen zijn om het toch te doen, maar de informatie daarover is niet verzameld. Deze waterkrachtstudie komt niet met een advies om molens in bestaande systemen voor nivellering van schutsluizen te plaatsen.

5.1.4 Bruggen

Er zijn geen bruglocaties gevonden met voldoende krachtige stroming en ruimte voor plaatsing van een molen zonder de ruimte voor de scheepvaart of recreatie in te perken. Snelheden moeten minstens 1m/s zijn. Indien de beheerder in staat is scheepvaart op goedkope wijze van pijlers af te houden dan zijn kleine molens bij enkele bruggen mogelijk, maar de productie is steeds slechts enkele kW per molen.

In het bovenrivierengebied staan pijlers vaak in het winterbed (dus vaak droog) en is er ter plaatse van de overspanning over het zomerbed weinig of onduidelijke ruimte. Waar bruggen pijlers in het zomerbed hebben dan zijn die dicht bij de oever, is het onduidelijk hoe hard het water langs de oever stroomt en ook hoe diep het ter plekke is.

In de Grensmaas heeft de brug bij Elsloo (in de A76) wel met een pijler midden in de (vrij smalle) stroom, maar het is er vaak ondiep en kanoërs maken gebruik van de route. Het kan er wel met flinke snelheid stromen. Mogelijk kunnen hier molens gehangen worden die omhoog getakeld kunnen worden in geval van laag water (bv ivm gevaar voor watersporters, maar ook met het oog op mogelijk vandalisme).

In het benedenrivierengebied bestaat getijwerking, waardoor slechts gedurende 12 uur per dag een stroomsnelheid van >1 m/s beschikbaar is. In enkele gevallen kan het toch interessant zijn molens te plaatsen. Het gaat dan met name om de bruggen in de Oude Maas, de Dordtsche Kil, de Noord en het Spui. Echter wel onder de voorwaarde dat de beheerder in staat is op goedkope wijze vaartuigen uit de buurt te houden. In alle gevallen worden SmartTurbines aanbevolen.

Bij toepassing van molens in het bovenrivierengebied dient men er mee te rekenen dat dergelijke installaties bij hoogwaterafvoer een extra weerstand vormen en compensatie bij wet vereist is. In ieder geval dient nagegaan te worden wat het waterstandverhogend effect van geplaatste molens zal zijn.

De SDE regeling voor lage vervallen zal van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

5.1.5 Elders

Er zijn veel meer schutsluizen (geschat wordt ca 30, maar een deel hiervan niet in Rijkswateren) waar een klein spuidebiet (orde 1 m³/s) aanwezig is dat gebruikt zou kunnen worden voor het energieneutraal maken van het betreffende kunstwerk. Elke locatie biedt orde 30kwatt. Waarschijnlijk zijn dergelijke locaties zonder de genoemde nevendoelstelling economisch onvoldoende interessant. Ook zijn er duikers of sifons (vaak niet in Rijkswateren) met enig debiet (maar gering verval) waar een kleine hoeveelheid energie op te wekken zou zijn. Een voorbeeld is in de verbinding AA/ZuidWillemsvaar(nabij Tilburg). Ook in de Dommel nabij Eindhoven is enig debiet en verval aanwezig.

Dergelijke locaties vallen buiten het bestek van deze studie omdat gezocht werd naar locaties in de Rijkswateren met mogelijkheden voor wat groter vermogens. Bovendien geldt vrij algemeen voor alle zeer kleine installaties dat er naast economische ook andere redenen moeten zijn om over te gaan tot realisatie. Om daar achter te komen dient met alle lokale beheerders contact gezocht te worden en dat is niet gedaan.

Buiten de kunstwerken met verval is er sprake van enige stroming, maar ook van gebruik van de watergang door schepen. In het bovenrivierengebied is er vaarbreedte tussen oevers of kribkoppen opening niet zo groot dat er grote installaties neergezet kunnen worden. Mogelijk dat in de toekomst na verandering van kribben meer stroming door de kribvakken plaatsvindt zodat daar molens te plaatsen zijn. De morfologie van de kribvakken is hierbij een aandachtspunt.

Indien nevengeulen permanent stromen kunnen daar een of meer molens geplaatst worden. In hoogwatergeulen is dat niet opportuun; die stromen te sporadisch.

Plaatsing van molens ergens in een rivier of estuarium is mogelijk mits de beheerder er (op goedkope wijze) voor kan zorg dragen dat scheepvaart (beroeps, vissers, pleziervaart, surfers, kanoërs, kites, etc) buiten de installatie blijft. Overigens vallen dergelijk locaties buiten het kader van deze studie (mogelijkheden bij kunstwerken). De SDE regeling voor lage vervallen zal steeds van kracht zijn: gegarandeerde opbrengst 0,125 €/kWh.

5.2 Tabellen met technisch potentiële mogelijkheden voor waterkracht in de Rijkswateren

	Visonvriendelijke machines	Tussen-variant	Visvriendelijke machines	Type machine
Stuwen, stroomsluizen				
Borgharen	11 MW			Kaplan
of		9 MW met 0,3 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	VLH
Roermond	6,5 MW			Kaplan
of		5 MW met 0,3 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	VLH
Belfeld	5 MW			Kaplan
of		3,5 MW met 0,3 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	VLH

	Visonvriendelijke machines	Tussen-variant	Visvriendelijke machines	Type machine
Sambeek	8,5 MW			Kaplan
of		7 MW met 0,3 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	VLH
Grave	7,5 MW			Kaplan
of		6 MW met 0,3 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	VLH
Totaal Maas	38,5 MW			Kaplan
of		30,5 MW met 1,5 MW		Kaplan met Archimedes, VLH of Stromingswiel diep
of			7,5 MW	VLH
Driel	2,3 MW			Kaplan
of		2 MW met 0,2 MW		Kaplan met Archimedes, SPM of Stromingswiel diep
of			0,5 MW	SPM
Hagestein	8 MW			Kaplan
of		7 MW met 0,2 MW		Kaplan met Archimedes, VLH, SPM of Stromingswiel diep
of			1 MW	SPM of VLH
Totaal Nederrijn	10,3 MW			Kaplan
of		9 MW met 0,4 MW		Kaplan met Archimedes, VLH, SPM of Stromingswiel diep
of			1,5 MW	SPM of VLH
Afsluitdijk			0,9 MW	Tocardo
IJmuiden			0,35 MW	Tocardo
Haringvliet-spuisluis			1,5 MW	Tocardo
Oosterscheldekering			2 MW	Tocardo en evt WaveRotor
Bathse sluis			0,5 MW	Tocardo
Eefde	0,5 MW		0,5 MW	Pompturbine (verticale Kaplan)
of		0,3 MW met 0,2 MW		Pompturbine en Archimedes
of			0,5 MW	Archimedes
TOTAAL	49,3 MW			
of		39,8 MW met 2,1 MW		
of			9,5 MW	
			5,25 MW	

	Visonvriendelijke machines	Tussen-variant	Visvriendelijke machines	Type machine
Schutsluizen met spui- of afvoerfunctie				
Boscherveld			0,3 MW	Middenslagrad of Bovenslagrad
Born	2 MW			Cross flow turbine
of		1,8 MW met 0,2 MW		Cross flow turbine met Archimedes
of			2 MW	In serie staande Archimedes
Maasbracht	2 MW			Cross flow turbine
of		1,8 MW met 0,2 MW		Cross flow turbine met Archimedes
of			2 MW	In serie staande Archimedes
Heel			1,2 MW	Archimedes
Panheel			0,4 MW	Archimedes
Tiel			0,5 MW	Archimedes
Wijk bij Duurstede			1,5 MW	Archimedes
Weurt			0,1 MW	Davis Turbine, SmartTurbine of HydroRing
St. Andries			0,1 MW	Davis Turbine, SmartTurbine of HydroRing
TOTAAL	4 MW			
of		3,6 MW met 0,4 MW		
of			4 MW	
			4,1 MW	
Bruggen				
Benedenrivierengebied (enkele bruggen)			<0,1 MW (per locatie)	SmartTurbines
Waal			<0,1 MW	SmartTurbines
Grensmaas			<0,1 MW	SmartTurbines

Bijeen gaat het om ca 20 MW nieuw te installeren vermogen in geval uitsluitend visvriendelijke installaties worden gekozen. Echter indien de mogelijkheden maximaal benut kunnen worden dan is het potentieel van ca. 60 MW.

Hoeveel de zeer kleinschalige locaties die niet beschouwd zijn kunnen opbrengen is thans niet concreet na te gaan. Mogelijk gaat het bijeen om 1MW, maar het betreft dan 30 locaties.

5.3 Financiële implicaties

In bovenstaande is nagegaan waar in Nederland technische mogelijkheden liggen voor waterkracht uit stromend water zonder al te zeer rekening te houden met de financiële kader dat in paragraaf 2.4 geschetst is.

Een nadere bepaling van de financiële situatie dien per locatie te worden verricht. Dit is alleen goed mogelijk op het niveau van een business case, gebaseerd op een goed voorontwerp. Daartoe is ook een betrokkenheid van de turbineleverancier belangrijk. Een beperkt aantal locaties kan daarvoor worden uitgekozen.

Om toch enig inzicht te krijgen in de kansen inclusief de financiële aspecten is hieronder voor twee verschillende (niet nader gelokaliseerde) installaties een ruwe indruk gegeven (echter zonder rekening te houden met inflatie, rente, belastingen en EIA)

Een 10MW riviercentrale (naast een bestaande stuw)

Het betreft een Kaplan-waterkrachtcentrale (zie paragraaf 3.1 en Annex 1).

- o Kosten bouw 40 M€
- o Na 20 jaar een belangrijke revisie van 3 M€
- o Jaarlijks beheer en onderhoud, kosten voor netaansluiting etc. 0,5 M€
- o Jaarlijkse inkomsten uit energieverkoop gedurende de eerste 15 jaar en met arbitraire veronderstelling dat 3800 vollasturen haalbaar is:
 $3800 \times 10 \times 1000 \times 0,125 = 4,75 \text{ M€}$
 Van de jaarlijkse opbrengst is het subsidiedeel 3,1 M€
 Zonder SDE-subsidie is de opbrengst 1,7 M€
- o Jaarlijks benodigd voor afschrijving en beheer en onderhoud 2,25 M€

Over 15 jaar is de subsidie 77% van wat hiervoor beschikbaar is. Dat betekent dat slechts 13 MW op deze manier is te subsidiëren.

Als een afschrijfperiode van 20 jaar wordt gehanteerd levert dat (afgezien van renteverliezen, inflatie, belastingen etc, maar ook afgezien van de EIA-regeling) ongeveer een 'brake even' met een kleine winst voor de eigenaar, maar die is nodig om de jaren daarna de centrale te laten draaien. Zonder subsidie is bij een energieprijis van 0,044 €/kWh (te ontvangen door de eigenaar van de centrale) een afschrijfperiode van 40 jaar zelfs niet voldoende om financieel rond te komen.

Bovenstaande schatting geldt voor een voor Nederland relatief grote waterkrachtcentrale die behoorlijk goed draait. Bij minder goed draaiende centrales moet een langer afschrijftermijn worden gekozen. Kleinere centrales van hetzelfde type zullen goedkoper zijn, maar zullen ook geringer marges tonen.

Een 0,1 MW installatie

Het betreft als voorbeeld een installatie van 2 Tocardo-molens (zie paragraaf 3.2 en Annex 1)

- o Kosten installatie 350 k€ (inclusief montageframes)
- o Na maximaal 8 jaar zijn de machines afgeschreven
- o Jaarlijks beheer en onderhoud, kosten voor netaansluiting 20 k€
- o Jaarlijkse inkomsten uit energieverkoop gedurende 8 jaar en met arbitraire veronderstelling dat 3800 vollasturen haalbaar is:
 $3800 \times 0,1 \times 1000 \times 0,125 = 47,5 \text{ k€}$
 Hiervan is de jaarlijkse SDE-subsidie 31 k€.
- o Jaarlijks benodigd voor afschrijving (8 jaar) en beheer en onderhoud 64 k€

Als een afschrijfperiode van 8 jaar wordt gehanteerd levert dat in deze berekening (afgezien van renteverliezen, inflatie, belastingen etc, maar ook afgezien van de EIA-regeling) een verlies voor de eigenaar. De machines moeten veel meer uren draaien waarvoor geen subsidie beschikbaar is (of een duidelijk langer afschrijftermijn hebben) wil een 'brake even' worden gehaald. Zonder betere subsidieregeling lijkt een dergelijke installatie niet zomaar haalbaar.

Conclusies:

1 De financiële randvoorwaarden lijken erg beperkend voor de waterkracht-mogelijkheden in Nederland. De zeer kleine installaties (molens) zijn daar gevoeliger voor door met name de erg korte afschrijftermijnen die daarvoor door fabrikanten aangegeven worden.

2 In het algemeen zal voorwaarde voor investering in kleine waterkracht in Nederland blijken te zijn dat er in de komende decennia zicht is op een belangrijke verhoging van de kWh-prijs. Dat is ook de achtergrond van de subsidie: een overbrugging bedoeld voor in de toekomst economisch interessante vormen van elektrische energiewinning.

3 De tariefstructuur voor een kWh blijkt complex. Producenten en ontwikkelaars van machines komen met nogal uiteenlopende energieprijzen waarbij de machines rendabel inzetbaar zouden zijn. Het is vaak niet duidelijk van welke referentie daarbij uitgegaan wordt. In geval men overgaat tot het maken van business cases zal dat daarin transparant moeten worden gemaakt.

4 Indien er op een bepaalde locatie meer belangen gediend worden met de winning van elektriciteit uit stromend water dan kan dat een belangrijke positieve invloed hebben op de besluitvorming.

5.4 Welke locaties met voorrang aanpakken?

In de waterstroom te hangen molens kunnen in al bestaande spuigangen relatief snel aangebracht worden. Dat betreft 3,5 MW, alle van het type Tocardo en het betreft circa 70 molens die visvriendelijk lijken. Het is de vraag of dit ook geldt richting zeezoogdieren. De Tocardo lijkt een robuuste machine te zijn. Maar de kosten van de installatie en de afschrijftermijn zijn bij de subsidieregeling zoals genoemd in paragraaf 2.4 bepalend voor de mogelijkheden. Machines van het Darrieus-type (zoals de Davis (van Blue Energy Corporation Inc) en WCT (van Tidal Energy LTD) WPI-Turbine) lijken goedkoper, maar zijn groter, niet zo makkelijk uit het water te halen en nog in ontwikkeling.

De kans dat er voldoende energie met aan brugpijlers gemonteerde molens kan worden opgewekt lijkt bijzonder gering. Over het algemeen is de stroming daar niet voldoende groot of niet vaak genoeg aanwezig. Bovendien zijn molens op dergelijke locaties kwetsbaar vanwege de scheepvaart.

Installaties bij stuwen vergen meer bouwtijd. De meest interessante lijken Borgharen, Sambeek en Grave. Het gaat hier om maximaal 27 MW (visonvriendelijk). Overwogen kan worden eerst een studie te doen naar de beschikbare methoden voor veiligstelling van de vismigratie.

Initiatieven (deels particulier) lopen al bij de schutsluizen Eefde, Wijk bij Duurstede, Tiel, Born, Maasbracht, Bosscherveld en Sluis III in het Prinses Wilheminakanaal. Het gaat hier om circa 5 MW (visvriendelijk).

Voor elk van deze locaties dient een globaal voorontwerp gemaakt te worden en met een turbine-adviseur of met een turbineleverancier besproken te worden. Het doel is onder meer de bepaling van de financiële uitkomst. De subsidiemogelijkheden (SDE 2009 en EIA) zijn daarin zeer belangrijk. De SDE-regeling geeft ook een begrenzing voor het totaal te installeren vermogen: 13 MW voor vervallen < 5m en 7 MW voor vervallen > 5m; totaal 20 MW. Waarschijnlijk is ook daardoor niet meer dan 20 MW aan geïnstalleerd vermogen haalbaar.

6 Literatuur

Tidal Energy – Lessons learnt from the United Kingdom and opportunities in the Netherlands.
Studie uitgevoerd door Royal Haskoning in opdracht van Deltares, 2009.

Kosten van kleinschalige waterkracht en getijdenenergie in Nederland.
Advies van ECN aan Ministerie van Economische Zaken
ECN-BS-09-001, 26 januari 2009

Water als bron van duurzame energie; Inspiratieatlas van mogelijkheden
Opdracht van Rijkswaterstaat
Deltares, augustus 2008

Objectbeheerregiem Kunstwerken 2006 (Versie 1 juni 2006)
BON Waterbeheer en Vaarwegen, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Van regen tot Maas; Grensoverschrijdend waterbeheer in droger en natte tijden
Marcel de Wit, Veen Magazines, Diemen 2008, ISBN-9789085712305

Een kwestie van lange adem; De geschiedenis van duurzame energie in Nederland
G. Verbong e.a., Boxtel, Aeneas, cop. 2001

Haalbaarheidsstudie waterkrachtcentrales Grave en Sambeek
Opdracht van N.V. Elektriciteits-Productiemaatschappij Zuid-Nederland EPZ
Waterloopkundig Laboratorium, januari 1997, Q2248

Oude Aflaatwerk in het Twenthekanaal te Eefde
Opdracht van Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland
Waterloopkundig Laboratorium, februari 1996, Q2149

Design of fish ways and other fish facilities, C.H. Clay, 1995, ISBN 1-56670-111-2

Waterhuishoudkundige mogelijkheden voor een waterkrachtcentrale bij het sluiscomplex Eefde
RIZA, augustus 1993, nota 93.032

Waterkrachtcentrale Borgharen; Verlag bureaustudie
Opdracht van N.V. Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij,
Waterloopkundig Laboratorium, oktober 1991, Q0486

Définition et contrôle de l'efficacité des passes a poissons, La Houille Blanche 1/2/1987

Waterkrachtcentrale Alphen
Opdracht van N.V. Provinciale Gelderse Energie-Maatschappij,
Waterloopkundig Laboratorium, mei 1987, Q77

Waterkrachtcentrale Linne
Opdracht van N.V. Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij,
Waterloopkundig Laboratorium, november 1986, Q243

Waterkrachtcentrale Maurik

Opdracht van N.V. Provinciale Gelderse Energie-Maatschappij,
Waterloopkundig Laboratorium, januari 1986, M2110

Kleinschalige waterkracht en milieu; Eindrapport van een onderzoek uitgevoerd door het
Onderzoeksbureau Energie Anders in opdracht van het ministerie van VROM, juli
1984, Rapport 84.015.03.19.V , Staatsdrukkerij, ISBN 90 346 0342 3

Rijnkracht kan; Haalbaarheidsstudie voor een waterkrachtcentrale nabij Maurik (Gld.)
N.V. Provinciale Gelderse Energie-Maatschappij, maart 1984

Waterkrachtcentrale in de Maas bij Heel

Opdracht van N.V. Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij
Waterloopkundig Laboratorium, januari 1984, R1885

Waterkracht Maas; Verkennende studie van een waterkrachtcentrale bij Heel en op andere
plaatsen langs de Maas

N.V. Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij, Rijkswaterstaat Limburg,
Nederlandse Energie Ontwikkeling Maatschappij B.V., uitgave NV PLEM, januari
1983

Waterkracht in de Maas en Nederrijn; Onderzoek naar de mogelijkheden en economische
haalbaarheid van energiewinning uit waterkracht in de Maas en Nederrijn

R.H. van Terwisga, afstudeerverslag begeleid door prof. J.F. Agema en ir. J. Stuij, oktober 1982

Windenergie en waterkracht

Commissie Appendix Plan Lieveense (samenvatting en appendix), Staatsuitgeverij,
oktober 1982

Waterkracht, mogelijkheden voor ons land

Stichting Energie Anders, mei 1981

A Annex 1: Overzicht van techniek voor kleinschalige waterkracht - Royal Haskoning (door ir. Tom Van Den Noortgaete)



Eindrapport



HASKONING BELGIUM BVBA

Hanswijkdries 80

B-2800 Mechelen

+32 (0)15 405656 Telefoon

Fax

info@haskoning.be E-mail

www.royalhaskoning.com Internet

Documenttitel Overzicht stand van techniek voor
kleinschalige waterkracht

Verkorte documenttitel Machines toepasbaar voor kleinschalige
waterkracht

Status Eindrapport

Datum 8 september 2009

Projectnaam Waterkracht Deltares

Projectnummer 9V3951A0 (NL); 81904001 (BE)

Opdrachtgever Deltares

Referentie 9V3951A0/R0001/BJON/SSOM/Rott

Auteur(s) Tom Van Den Noortgaete

Collegiale toets Bas Jonkman

Datum/paraaf 14 september 2009

Vrijgegeven door Bas Jonkman

Datum/paraaf 14 september 2009

INHOUDSOPGAVE

	Blz.
1 INLEIDING	1
2 OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE TECHNIEKEN	2
3 SYSTEMEN OP BASIS VAN POTENTIËLE ENERGIE	5
3.1 Inleiding	5
3.2 Axiale turbines	7
3.2.1 Inleiding	7
3.2.2 Definitie van axiale turbines	10
3.2.3 Axiale turbinetypes	11
3.2.4 Opmerkingen m.b.t. axiale turbines	14
3.2.5 Referenties	15
3.3 Doorstroomturbine of cross-flow turbine	16
3.3.1 Werkingsprincipe	16
3.3.2 Toepassingen	17
3.3.3 Leveranciers	17
3.3.4 Referenties	18
3.4 Waterraderen	19
3.4.1 Inleiding	19
3.4.2 Bovenslaande waterraderen	20
3.4.3 Middenslaande waterraderen	22
3.4.4 Onderslaande waterraderen	22
3.4.5 Referenties	23
3.5 Schroefmotor van Archimedes	24
3.5.1 Inleiding	24
3.5.2 Werkingsprincipe	24
3.5.3 Toepassingen	25
3.5.4 Leveranciers	25
3.5.5 Referenties	26
4 SYSTEMEN OP BASIS VAN KINETISCHE ENERGIE	27
4.1 Inleiding	27
4.2 Tocardo Turbine	29
4.2.1 Werkingsprincipe	29
4.2.2 Toepassingen	29
4.2.3 Leverancier	30
4.2.4 Referenties	30
4.3 KHPS - Kinetic Hydropower System	31
4.3.1 Werkingsprincipe	31
4.3.2 Toepassingen	31
4.3.3 Leverancier	32
4.3.4 Referenties	32
4.4 Stromingswielen	33
4.4.1 Stromingswielen voor ondiep water bij subkritische stroming	33
4.4.2 Stromingswielen voor diep water	34
4.4.3 Referenties	35

4.5	UEK - Underwater Electric Kite	36
4.5.1	Werkingsprincipe	36
4.5.2	Toepassingen	36
4.5.3	Leverancier	37
4.5.4	Referenties	37
5	NIEUWE TECHNOLOGIEËN	38
5.1	Inleiding	38
5.2	HydroRing	39
5.2.1	Werkingsprincipe	39
5.2.2	Toepassingen	40
5.2.3	Referenties	40
5.3	VLH Turbine - Very Low Head Turbine	41
5.3.1	Werkingsprincipe	41
5.3.2	Toepassingen	41
5.3.3	Referenties	42
5.4	SPM - Stem Pressure Machine	43
5.5	Verticale as turbines van het Darrieus type	44
5.5.1	WPI Turbine - Water Power Industries Turbine	45
5.5.2	EnCurrent Turbine	46
5.5.3	Kobold turbine	46
5.5.4	Davis Turbine	47
5.5.5	Diffuser Augmented Water Current Turbine	47
5.5.6	Referenties	48
5.6	Wave Rotor	49
5.7	Swanturbines	50
5.8	Tidal Turbine Generator	51
5.9	SmartTurbine	52
5.10	Hydrohélix Turbine	53

LIJST MET GEBRUIKTE AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

Afkortingen

BEC	Blue Energy Company
FFP	Free Flow Power
KHPS	Kinetic Hydropower System
kW	kilowatt (= 10^3 W)
kWh	kilowattuur
MCT	Marine Current Turbine
MW	megawatt (= 10^6 W)
RHPM	Rotary Hydraulic Pressure Machine
rpm	rotaties per minuut
SIF	Significant Impact Factor
SPM	Stem Pressure Machine
UEK	Underwater Electric Kite
UNIDO	United Nations Industrial Development Organisation
VAWT	verticale as windturbine
VLH	Very Low Head
WCT	Water Current Turbine
WPI	Water Power Industries

Symbolen

A	m^2	oppervlakte
Cp	-	vermogenscoëfficiënt
D	m	diameter
g	m/s^2	gravitatieconstante
h	J/kg	enthalpie
h	m	waterstand of waterdiepte
H _n	m	netto verval
J	$kg.m^2/s^2$	Joule (energie-eenheid)
P	W	vermogen
Q	m^3/s	debiet
R	-	reactiegraad
U	m/s	loopsnelheid
v	m/s	absolute snelheid
w	m/s	relatieve snelheid
W	$kg.m^2/s^3$	Watt (vermogeneenheid)

Griekse symbolen

η_m	-	motorrendement (turbinerendement)
η_t	-	totaalrendement
ρ	kg/m^3	dichtheid

1 INLEIDING

In deze Annex 1 wordt een overzicht gegeven van bestaande machines die ingezet worden als turbines of motoren in kleinschalige waterkrachtcentrales. Er wordt eveneens een blik geworpen op pre-commerciële systemen die nu in ontwikkeling zijn en waarvan de eerste prototypes gebouwd zijn.

Kleinschalige waterkracht wordt gedefinieerd volgens de definities van UNIDO¹. Een overzicht van deze indeling volgens geïnstalleerd vermogen in kW (lees kilowatt = 1000 Watt) wordt gegeven in onderstaande tabel.

Klassificatie	Geïnstalleerd Vermogen (kW)
micro	< 100
mini	100 - 2000
klein	2000 - 10000
groot	>10000

Tabel 1.1: Classificatie volgens UNIDO voor waterkracht.

In het kader van het project werd ook een voorstudie uitgevoerd door het studiebureau HKV² waarbij potentiële locaties aangeduid werden voor de uitbouw van waterkrachtcentrales. Gezien de omvang en grootte van vermogens die in Nederland nog exploiteerbaar zijn op deze locaties, richt deze studie zich enkel op kleinschalige waterkracht (met de aanduiding 'kleinschalig' worden in deze Annex vermogens < 10 MW bedoeld).

De machines die in deze Annex besproken worden, zijn ingedeeld in drie groepen. Deze indeling gebeurt in de eerste plaats volgens de energievorm (potentiële of kinetische energie) die de systemen uit de aangeboden waterstroom winnen voor omzetting in elektrische of andere vormen van energie.

In **hoofdstuk 3** worden de machines beschreven die inzetbaar zijn indien een bepaald verval beschikbaar is. Dat is bijvoorbeeld het geval ter hoogte van een kunstwerk. Dergelijke systemen benutten in de eerste instantie de potentiële energie van de waterstroom. Bemerk hierbij dat ter hoogte van turbines deze potentiële energie vaak omgezet wordt naar kinetische energie.

Er bestaan echter ook systemen die geen verval vereisen voor de productie van elektrische of andere vorm van energie. Bij deze machinetypes is de grootte van de stromingssnelheid (kinetische energie van de waterstroom) ter hoogte van de turbine doorslaggevend. Dergelijke kinetische systemen worden besproken in **hoofdstuk 4**.

Ten slotte worden in **hoofdstuk 5** enkele nieuwe technologieën besproken. Deze machines bevinden zich nog in een pre-commerciële fase.

Een tabel met een overzicht van de verschillende technieken die in deze Annex besproken worden en hun belangrijkste kenmerken wordt gegeven in **hoofdstuk 2**.

¹ United Nations Industrial Development Organisation (www.unido.org).

² Bijlage 2 'Inventarisatie kansrijke locaties' opgesteld door Nadine Slootjes, HKV, & Tom Van Den Noortgaete, Royal Haskoning, 2009.

2 OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE TECHNIEKEN

In de volgende twee tabellen wordt een overzicht gegeven van de verschillende machines die in deze Annex besproken worden. De belangrijkste eigenschappen worden hierin opgesomd. In tabel 2.1 worden de machines opgesomd die in de eerste plaats de potentiële energie van het water benutten. Tabel 2.2 beschrijft de kinetische systemen.

Het rendement dat in tabel 2.1 wordt aangegeven is het motorrendement of turbinerendement. De strikte definitie van het rendement wordt besproken in hoofdstuk 3. Tabel 2.2 toont de vermogenscoëfficiënt C_p (C_p -waarde) i.p.v. het motorrendement wat gebruikelijker is voor kinetische systemen (zie hoofdstuk 4).

In de tabellen wordt een waarde voor de investeringskosten aangegeven. Dit zijn voor kosten per kW geïnstalleerd vermogen waarbij nog belangrijke civiele kosten kunnen komen. In de omschrijving van de machines wordt daarover meer gezegd.

De bijkomende kosten aan civiele werken kunnen bij kleine installaties beperkt zijn in totale omvang, maar relatief tot de machinekosten kunnen ze wel hoog zijn. Dat geldt vooral voor systemen op basis van potentiële energie. De bijkomende kosten van systemen op basis van kinetische energie (hoofdstuk 4) zullen vaak wel beperkt zijn.

Fabrikanten geven over het algemeen geen opgaven van de kosten voor aansluiting op het elektrische net. Die kosten kunnen vooral voor installaties ver van de bewoonde wereld zeer groot zijn. Ook zijn die kosten relatief hoog voor kleine installaties.

Het visvriendelijke karakter van de machines is eveneens opgenomen in de tabellen. Er wordt geopteerd voor een relatieve +/- vergelijking tussen de machines onderling.

Algemene gegevens			Technische Gegevens			Werkinggebied			Overige			
Naam	Bedrijf	Type	Ortsw. Stadium	Vermogen	Rendement	Diameter (m)	Verval (m)	Debiet (m3/s)	Toepassing	Fish-Friendly	Economisch	Contact
Rim Generator	Andritz Hydro GmbH	Axiale turbine	Commercieel	1 - 2 MW	92%	≤ 4	≤ 10	1 - 100	Stuwen, spuikanalen	--	1000 - 2000 €kW	www.andritz.com
Tube Turbine	Andritz Hydro GmbH	Axiale turbine	Commercieel	100 - 7000 kW	92%	2 - 5	≤ 18	1 - 100	Stuwen, spuikanalen	--	1000 - 2000 €kW	www.andritz.com
Bulb Turbine	Andritz Hydro GmbH	Axiale turbine	Commercieel	2 - 50 MW	93%	2 - 6	2 - 15	1 - 100	Stuwen, spuikanalen	--	1000 - 2000 €kW	www.andritz.com
Cross-flow	Ossberger	Radiale Impulsturbine	Commercieel	10-2000 kW	80%	/	1 - 200	0,04 - 10	Stuwen	--	2500 - 3000 €kW	www.ossberger.de
Bovenslaand wateraad	Hydrowatt	Gravitair wateraad	Commercieel	1 - 100 kW	85%	2,5 - 10	2,5 - 10	0,1 - 2,5	Sluizen, stuwen, spuikanalen	++	4000 - 4500 €kW	Mevr. Weber +49 721 831 860
Middenslaand wateraad	Hydrowatt	Gravitair wateraad	Commercieel	1 - 100 kW	80%	2,5 - 10	1,5 - 4	0,5 - 7	Sluizen, stuwen, spuikanalen	++	4000 - 4500 €kW	Mevr. Weber +49 721 831 860
Onderslaand wateraad	Water Wheel Factory	Gravitair wateraad	Commercieel	1 - 100 kW	65 - 75 %	1 - 10	0,5 - 2	/	Sluizen, stuwen, spuikanalen	++	5000 - 5500 €kW *	www.waterwheelfactory.com
Schroef van Archimedes	Ritz-Atro	Axiale schroefmotor	Commercieel	1 - 300 kW	90%	≤ 3	1 - 10	≤ 5,5	Sluizen, stuwen, spuikanalen	+	1700 - 2000 €kW	Dhr. Matthias Ertl +49 172 147 60 84
HydroRing	HydroRing bv	Axiale asloze turbine	Pre -commercieel	35 kW	/	1,3	2 - 3,5	10 - 30	Sluizen, stuwen, spuikanalen, sluisdeuren	+	/	www.hydroring.nl
VLT turbine	Stellba Hydro	Axiale/Hellende turbine	Pre-Commercieel	100 - 500 kW	72 - 80%	3,5 - 5,6	1,4 - 3	10 - 30	Stuwen, spuikanalen	+	1500 - 2000 €kW	www.vlt-turbine.com
SPM	Öwatec	Stromings-wateraad	Pre-Commercieel	150 kW	70 - 80 %	1,5 - 7,5	≤ 5	/	Rivieren, getijdenstromingen	+	3000 €kW	www.oewatec.de

Opmerking: * = inclusief civiele kosten
/ = onbekend

Tabel 2.1: overzicht van de machines op basis van potentiële energie.

Algemene gegevens			Technische Gegevens				Werkgingsgebied		Overige			
Naam	Bedrijf	Type	Ontw. Stadium	Vermogen	Cp - waarde	Diameter (m)	Hoogte	Snelheid (m/s)	Toepassing	Fish-Friendly	Economisch	Contact
Tocardo T50 Turbine	Tocardo bv	Axiale stromingsturbine	Commercieel	35 - 50 kW	40%	2,5 - 4	n.v.t.	3 - 3,5	Rivieren, spuikanalen, getijdenstromingen	+	3500 €kW	Dhr. de Haas +31 226 42 34 11
	KHPS	Axiale stromingsturbine		Commercieel	35 kW	43%	5	n.v.t.	> 2	Rivieren, getijdenstromingen	+	/
Stromingswiel (ondiep water)	Water Wheel Factory	Kinetisch waterrad	Commercieel	< 2 kW	29%	3,5 - 5	n.v.t.	> 1	Rivieren, getijdenstromingen	++	/	www.waterwheelfactory.com
Stromingswiel (diep water)	Water Wheel Factory	Kinetisch waterrad	Commercieel	100 - 1000 kW	56 - 68%	< 10	n.v.t.	> 1	Rivieren, getijdenstromingen	++	/	www.waterwheelfactory.com
UEK	UEK Systems	Omhuide axiale stromingsturbine	Commercieel	90 kW	57%	3	n.v.t.	> 0,2	Rivieren	+	/	www.uekus.com
WPI Turbine	Water Power Ind. Enterprises bv	Verticale as turbine (Darrieus)	Pre-Commercieel	100 - 200 kW	49%	/	/	1 - 4	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	++	3400 €kW	www.wpi.no
EnCurrent Turbine	New Energy Corporation Inc	Verticale as turbine (Darrieus)	Pre-Commercieel	25 kW	35 - 40%	/	/	> 1	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	/	www.newenergycorp.com
Kobold Turbine	Ponte di Archimede Int SpA	Verticale as turbine (Darrieus)	Pre-Commercieel	25 kW	23%	6	5	> 3	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	/	www.pontediarchimede.com
	Davis Turbine	Blue Energy Company Inc.	Pre-Commercieel	250 kW	/	6	/	> 1	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	2000 - 2500 €kW	www.blueenergy.co.in
Diffuser Augmented WCT	Tidal Energy PTY LTD	Verticale as turbine (Darrieus)	Pre-Commercieel	350 kW	45%	1,2	/	> 1	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	1500 - 2000 €kW	Dhr. B. Meywes +61 401 052 522
Wave Rotor	EcoFys	Verticale as turbine (Darrieus)	Pre-Commercieel	30 - 60 kW	30 - 40%	10	3,5	> 2	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	/	www.ecofys.nl
Swanturbine	Swanturbines Tidal Energy	Axiale stromingsturbine	Pre-Commercieel	350 kW	45%	/	/	/	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	/	www.swanturbines.co.uk
Tidal Turbine Generator	Clean Current	Omhuide axiale stromingsturbine	Pre-Commercieel	250 kW	50%	14	n.v.t.	> 1	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	2000 - 2500 €kW	www.cleancurrent.co.uk
SmartTurbine	Free Flow Power Corporation	Omhuide axiale stromingsturbine	Pre-Commercieel	10 kW	/	3	n.v.t.	> 1	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	/	www.free-flow-power.com
Hydrohélix Turbine	Hydrohélix Energies	Omhuide axiale stromingsturbine	Pre-Commercieel	250 kW	/	8	n.v.t.	1 - 4	Rivieren, nearshore, getijdenstromingen	+	3400 €kW	www.hydrohelix.fr

Opmerking: / = onbekend

Tabel 2.2: overzicht van de machines op basis van kinetische energie.

3 SYSTEMEN OP BASIS VAN POTENTIËLE ENERGIE

3.1 Inleiding

Het doel van dit hoofdstuk is om de meest geschikte technieken te beschrijven die inzetbaar zijn bij situaties waar een (laag) verval beschikbaar is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij sluiscentrales en/of stuwcentrales.

De valhoogtes die in de Nederlandse rivieren voorkomen zijn laag. Op vrijwel alle interessante locaties³ worden vervallen gemeten die lager zijn 10 m. Bovendien zijn de te installeren vermogens eerder beperkt (tot maximaal 10-15 MW).

Het te installeren vermogen van een waterkrachtcentrale is evenredig met het product van het doorgevoerde debiet Q door en het (netto)verval H_n over de centrale:

$$P = \eta_t \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \text{ (in W)} \quad (1)$$

In deze formule staat g voor de gravitatie, ρ voor de dichtheid en η_t voor het totale rendement. Het totale rendement η_t geeft de verhouding weer van het aangeboden vermogen van de waterstroom tot het opgewekt elektrisch vermogen. η_t is het product van een aantal deelrendementen waaronder het turbinerendement (juister is de benaming motorrendement η_m aangezien strikt niet alle besproken machines turbines zijn), generatorrendement, overbrengingsrendement (niet alle machines vereisen overbrengingssystemen), enz. Het motorrendement is eigen aan de specifieke machine en geeft de verhouding weer van het aangeboden vermogen van de waterstroom tot het door de motor opgewekte asvermogen. Rendementsverliezen t.g.v. bijhorende systemen zoals een generator komen hier niet tussen. Het motorrendement η_m is dus een maatstaf die een objectieve vergelijking van de machines mogelijk maakt. In deze Annex wordt steeds motorrendement (turbinerendement in geval van turbine) gehanteerd, tenzij anders vermeld.

Bemerk dat het totale rendement η_t nog niet alle verliezen in een waterkrachtcentrale in rekening brengt. Het rendement omvat enkel de 'volledige machine'. Het is een water (net 'voor' de machine) to wire (net 'na' de machine) rendement.

Andere verliezen kunnen optreden. Deze kunnen te wijten zijn aan bijvoorbeeld een voorgeplaatst vuilrooster (zie verder). Een dergelijk rooster zorgt immers voor een extra weerstand in de watertoevoer.

Een machine wordt ook voor onderhoudsredenen of door slijtage of beschadiging een aantal uren/dagen uit werking genomen. Hierdoor daalt de opbrengst of draairendement op jaarbasis.

Nog andere verliezen kunnen netverliezen zijn, verliezen t.g.v. slecht eigengebruik van de machine, enz.

Volgens formule 1 is het dus mogelijk om met een klein verval en een groot debiet toch een vrij aanzienlijke hoeveelheid energie op te wekken. Dit is in Nederland een veelvoorkomende situatie. Toch beperken de randvoorwaarden m.b.t. locatie al enigszins de keuze van techniek. Het selecteren van een turbinetype is immers afhankelijk van een aantal variabelen waaronder debiet en verval in eerste instantie

³ Zie wederom bijlage 2 'Inventarisatie kansrijke locaties' opgesteld door Nadine Slootjes, HKV, & Tom Van Den Noortgaete, Royal Haskoning, 2009.

bepalend zijn. De eerder genoemde lagere vervalhoogtes vernauwen de keuze aangezien dergelijke systemen tot voor kort niet als economisch rendabel beschouwd werden.

Uiteraard is ook het motorrendement van belang. Dit rendement moet voldoende hoog blijven buiten het ontwerppunt van de machine. Een turbine, rad of motor wordt immers op een nominaal verval en debiet gedimensioneerd waar het rendement maximaal is. Bij belangrijke variaties van het doorstroomdebiet neemt het rendement soms drastisch af. Een dergelijke eigenschap is afhankelijk van de machine en wordt in deze Annex per systeem besproken.

De visvriendelijkheid is nogal verschillend van de diverse type machines. Daarom wordt hier aandacht aan besteed. Bovendien zijn mitigerende maatregelen nodig bij visonvriendelijke machines die een deel van het beschikbare debiet nodig hebben (dat dan niet voor energiewinning in aanmerking komt).

Ten slotte is uiteraard ook de kostprijs een belangrijk criterium. Deze parameter bepaalt immers de haalbaarheid van een waterkrachtcentrale.

In dit hoofdstuk bespreken we verschillende machines systemen met uiteenlopende vermogenranges gaande van micro systemen (< 100 kW) tot kleine systemen (<10 MW). De hier aangehaalde machines zijn:

- Axiale turbines (Kaplan turbines)
- Doorstroomturbine (cross-flow turbine)
- Waterraderen
- Schroefmotor van Archimedes

Bemerk dat axiale turbines ook ingezet worden in grote waterkrachtcentrales (vermogens > 10 MW).

3.2 Axiale turbines

3.2.1 Inleiding

Voor hogere vermogenstoepassingen (1000 kW en meer) zijn hedendaags drie types turbines in gebruik. Deze turbintypes zijn de Peltonturbine (gelijkdrukturbine), de Francisturbine (radiale turbine) en de Kaplan turbine (axiale turbine). Deze turbines worden ingedeeld op basis van hun reactiegraad [4]. De reactiegraad R geeft immers de verhouding weer van de kinetische energie die in het relatieve stelsel verbruikt wordt (reactiedeel) tot de totale kinetische energie die zowel in het absolute (actiedeel) als relatieve stelsel verbruikt wordt. De reactiegraad wordt gedefinieerd als [4]:

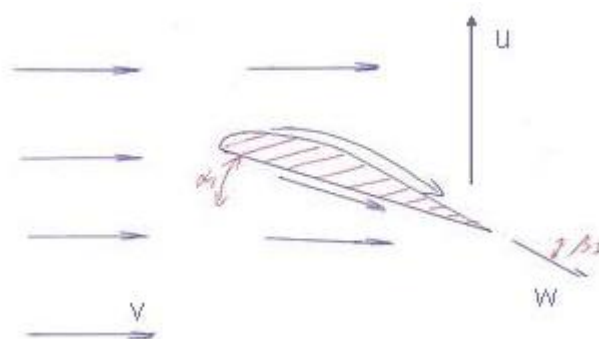
$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{01} - h_{02}} \quad (2)$$

In deze vergelijking stellen h_1 en h_2 de statische enthalpie in de stroming voor, h_{01} en h_{02} de totale enthalpie in de stroming. De indicatie 1 is steeds de situatie 'voor' het machinedeel, de indicatie 2 steeds de situatie 'na' het machinedeel.

Enthalpie (eenheid J/kg) is per definitie de energie-inhoud per massa hoeveelheid. Zonder dieper in te gaan op het begrip enthalpie kunnen we de reactiegraad R herschrijven (goede benadering):

$$R \approx \frac{w_1^2 - w_2^2}{(w_1^2 - w_2^2) + (v_1^2 - v_2^2)} \quad (3)$$

In formule 3 is v de absolute snelheid van de stroming en w de relatieve snelheid. De relatieve snelheid w kan gezien worden als de snelheidscomponent van de stroming die raakt aan het rotorblad van een turbine. De doorsnede van een rotorblad kan voorgesteld worden als vliegtuigvleugel. Op de figuur 3.1 is dan duidelijk te zien dat een deel van aankomende stroming met snelheid v (absolute stroming) omgebogen wordt door het profiel (relatieve stroming). De relatieve snelheid neemt hierbij af $w_2 < w_1$ waardoor een liftkracht ontstaat in de rotatiezin. Het blad draait hierdoor rond met een loopsnelheid u .



Figuur 3.1: vleugelprofiel met bijhorende snelheidsvectoren.

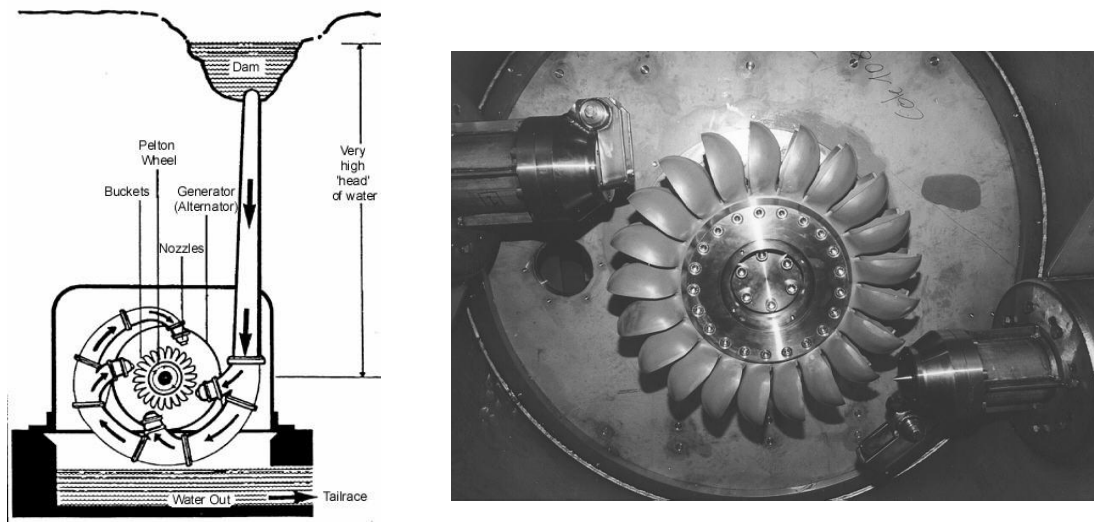
De definitie van reactiegraad kan nu eenvoudig verklaard worden. Indien de relatieve snelheid niet verandert in grootte ($w_1 = w_2$), ontstaat er geen liftkracht. Het verschil in de teller van formule 3 is nul, m.a.w. de reactiegraad is nul. Een rotorblad wordt dan

letterlijk bestraalt door een waterstroom met absolute snelheid v waarbij t.g.v. impulsoverdracht deze absolute snelheid v afneemt. De relatieve snelheid verandert in dit geval enkel van richting, niet in grootte.

In het omgekeerde geval, waarbij de absolute snelheid v niet afneemt in grootte ($v_1 = v_2$), is de reactiegraad $R = 1$. De rotor draait dan puur door drukverschil over de rotor (liftkracht).

De reactiegraad R is dus een maat voor het drukverschil over de rotor van een turbine. De reactiegraad varieert, zoals gezien, van 0 (geen drukverschil, actieturbine) tot 1 (reactieturbine). Turbines worden daarom ingedeeld op basis van deze parameter.

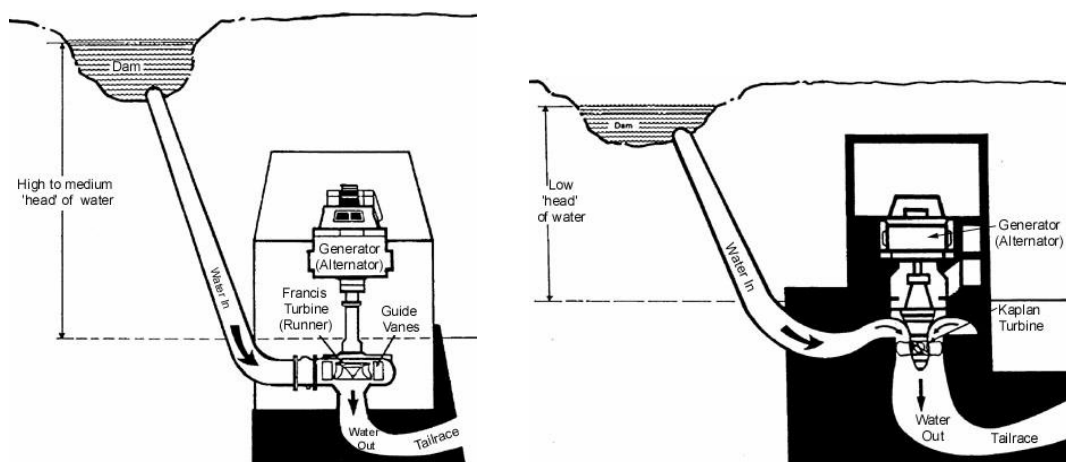
De Peltonmachines worden actieturbines of impulsturbines genoemd. Dergelijke systemen maken dus gebruik van de impuls van een waterstraal gericht op de schoepen van een rotor (zie figuur 3.2). De rotor is niet volledig ondergedompeld in water en draait dus deels in lucht onder atmosferische druk. Over de rotor staat er geen drukverschil en de reactiegraad is nul.



Figuur 3.2: voorstelling van een Pelton turbine. Links: schematische voorstelling; rechts: close-up van de rotor en straalpijpen [1].

Francis- en Kaplan turbines zijn reactieturbines: de rotor is volledig ondergedompeld in water en er staat een drukverschil over de rotor. Het water dat door de turbine is geleid dient dan achterna door een zuigbuis afgevoerd te worden voor drukrecuperatie (kinetische energie die in drukenergie omgezet wordt). Bij Francis turbines bedraagt de reactiegraad 0,55 tot 0,75. Bij axiale turbines (Kaplan- of propellertype) is de reactiegraad groter dan 0,75. Beide turbines worden schematisch voorgesteld in figuur 3.3.

Een axiale turbine kan worden voorgesteld als een omgekeerd werkende schroef. Ze zijn echter moeilijk te maken door de grote, complexe schoepen en nauwkeurig vormgegeven behuizing om de hydraulische verliezen te minimaliseren (zie verder). Hier tegenover staat dat dergelijke turbines met een hoog rendement kunnen draaien bij lagere vervallen.



Figuur 3.3: schematische weergave van een Francis turbine (links) en van een verticale as Kaplan turbine [1].

Hoewel voor het ontwerp van elke turbine rekening gehouden wordt met zowel het verval als debiet – nominale gegevens van de machine – kan een eerste indeling van deze drie types gebeuren op basis van het benodigde verval [5].

Turbinetype	Beschikbaar verval		
	Hoog (> 50m)	Medium (10-50 m)	Laag (< 10m)
Impulsturbine	Pelton Multi-jet Pelton	Multi-jet Pelton	
Reactieturbine		Francis	Kaplan Propellor

Tabel 3.1: indeling van de turbinetypes volgens verval [5].

Opmerking: Een meer wetenschappelijke aanpak gebeurt door indeling op basis van specifieke snelheid in de turbine waarbij deze snelheid functie is van het verval en debiet.

In deze paragraaf worden, gezien de lage beschikbare hoogteverschillen in de Nederlandse rivieren, enkel axiale turbines behandeld. De machines van het Pelton- en Francistype worden bewust achterwege gelaten om deze Annex niet te overladen.

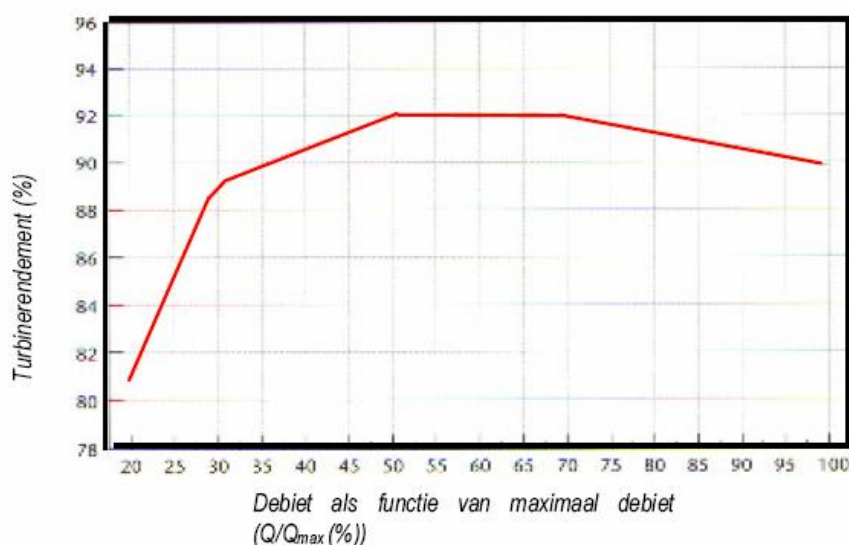
3.2.2 Definitie van axiale turbines

Axiale stromingsturbines zijn turbines waarbij de rotor axiaal doorstroomd wordt. Het zijn turbines met een hoge reactiegraad (0,75 en meer) die met een horizontale of verticale as uitgevoerd zijn. De uitvoering met horizontale as leent zich bij uitstek voor lage-drukcentrales vanwege de gunstige hydraulische eigenschappen [10]. Ten gevolge van de rechte stroomlijnen is er immers een lagere turbulentiegraad dan bij uitvoeringen met verticale as (stroming verdraait over 90 graden). Hierdoor blijven de verliezen minimaal, wat vooral bij lage valhoogten van relatief grotere betekenis is. Verticale as turbines worden overwogen indien het verval toeneemt.

Axiale turbines kunnen geclassificeerd worden als propeller- of Kaplan turbines. De rotor van een propellerturbine is uitgevoerd met vaste schoepen (loopschoepen). De turbine is hierdoor ontworpen in een specifiek werkingsspunt. Bij een variatie van het debiet kan de rotor zich niet herinstellen wat ten koste gaat van het rendement. Letterlijk kan dit voorgesteld worden dat de stroming zich dan niet meer optimaal aansluit aan de vorm van een rotorblad. Hierdoor wordt een deel van de energie in de stroming niet benut. Dergelijke turbines worden daarom ingezet op locaties waar het debiet en verval nagenoeg constant blijven. Dergelijke situaties komen in de Nederlandse rivieren bijna niet voor.

Om aan dit euvel te verhelpen worden rotoren van axiale turbines uitgevoerd met regelbare loopschoepen. Deze turbines worden Kaplan turbines genoemd. Bij lagere debieten kan een dergelijke turbine toch met een hoog rendement draaien. Soms kunnen bij deze uitvoeringen ook de statorschoepen (leidschoepen) variabel ingesteld worden.

Het turbinerendement van een Kaplan turbine bedraagt over een breed debietinterval meer dan 90% (zie figuur 3.4). Het turbinerendement van de turbine is maximaal 92% bij een doorvoerdebiet van 50 tot 70% van het ontwerpdebiet. Beneden de 30% van het doorvoerdebiet neemt het rendement snel af.



Figuur 3.4: rendementscurve in functie van het debiet voor een algemene Kaplan turbine [7].

Onder de horizontale of iets hellende axiale turbines bestaan er heel wat varianten. Toch kunnen over het algemeen drie types onderscheiden worden naargelang de plaatsing van de generator t.o.v. de turbine:

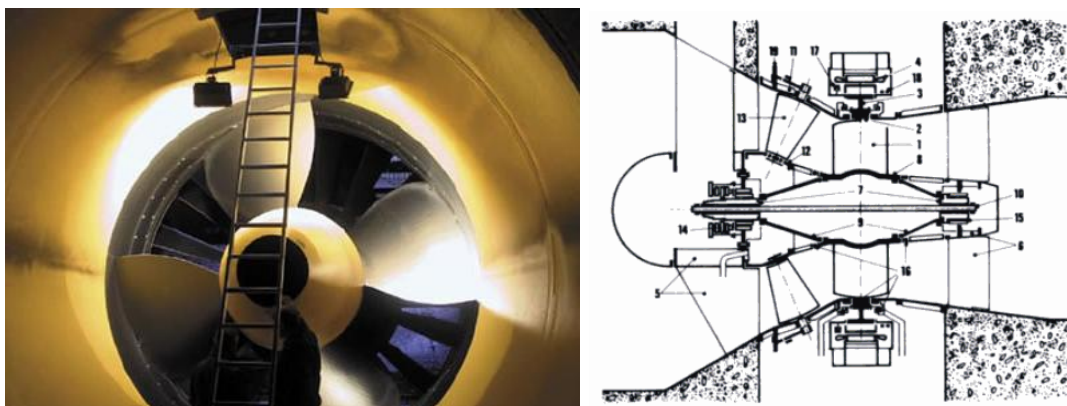
- Rim generator turbine (poolradturbine of Strafloturbine)
- Tube turbine (buisturbine)
- Bulb Turbine (bolturbine)

In principe kan elk type zowel met vaste als met verstelbare rotorschoppen uitgevoerd worden. Toch heeft het rendement van een machine een directe invloed op de economische haalbaarheid van een waterkrachtcentrale waardoor meestal Kaplanuitvoeringen geïnstalleerd worden. Bovendien worden axiale turbines ingezet waar een bepaald verval aanwezig is, gecreëerd door een kunstwerk (stuw- of sluiscentrale). Op dergelijke locaties varieert het doorstromingsdebiet belangrijk waardoor propellerturbines niet zonder meer optimaal zijn. Hieraan kan enigszins worden tegemoet gekomen door meerdere machines te plaatsen en machines af te schakelen zodat de overblijvende machines voldoende debiet krijgen. De draaiuren van de afgeschakelde machines worden minder en de investering wordt daardoor hoger, dus minder interessant. .

3.2.3 Axiale turbinetypes

Rim generator turbine

Bij dit type turbine zit de generator als een ring rondom de turbine (poolradturbine). Een dergelijke opstelling dateert al van 1919. De voordelen van deze opbouw zijn de compactheid van het geheel (ruimtebesparing) en het ontbreken van een aandrijfslag tussen turbine en generator (geen overbrengingsverlies). Hieruit volgt wel dat de ondersteuning van generator op bezwaren kan stuiten waardoor soms lekkage optreedt. Dit probleem werd verholpen door de generator op aparte kogellagers te laten draaien die zich buiten de waterstroom bevinden (ontwerp van Escher-Wyss of de Strafloturbine).



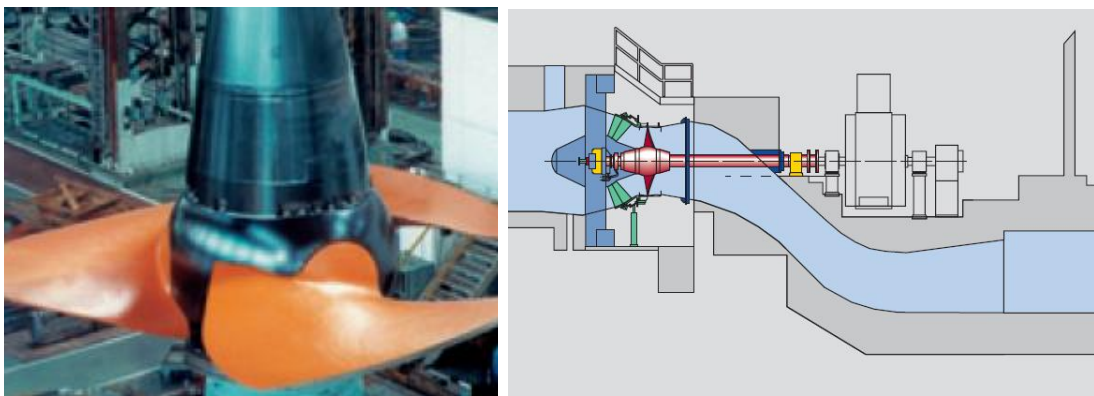
Figuur 3.5: voorstelling van de poolradturbine. Links: foto van de Straflorotor; rechts: schematische voorstelling van poolradturbine [1].

Door de grote rotatietraagheid als gevolg van de 'omhullende' generator is de poolradturbine bij uitstek geschikt voor kleinere vermogens (1 en 2 MW). Gebruikelijke valhoogtes kunnen sterk variëren. Zowel uitvoering, normale types, voor lage vervallen (< 10 m) als uitvoering, Strafloturbine, voor hogere hoogteverschillen (9 tot 40 m) zijn beschikbaar. De rotordiameter is maximaal 4 m voor de normale poolradturbine. Voor Straflotubines bedraagt deze maximaal 10m.

Tube Turbine

Bij dit type turbine bevindt de generator zich buiten de waterstroom. De turbine en generator zijn onderling verbonden d.m.v. een aandrijfstang. Een voordeel van deze opstelling is de gemakkelijke bereikbaarheid van de generator en de simpele waterdichte afsluiting.

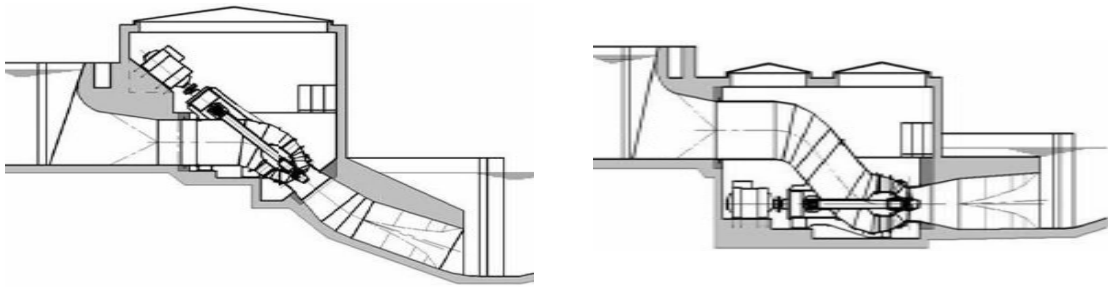
Uiteraard vereist deze schikking de aanleg van een lang gebouw. Bovendien is een onderlinge afstelling van de generator en turbine nodig gezien beide niet langer direct gekoppeld zijn zoals bij een Strafloturbine.



Figuur 3.6: voorstelling van een buisturbine. Links: voorstelling van de Kaplanrotor, rechts: opstelling [11].

De buisturbine kent veel variaties [2]. De generator kan zowel boven- als benedenstrooms geplaatst worden en de aandrijfstang kan zowel horizontaal als hellend worden aangebracht (zie figuur 3.7). Naargelang de opstelling worden specifieke benamingen gegeven aan deze machines (bijvoorbeeld: de S-type turbine t.g.v. een S-vormige buis).

Tegenwoordig zijn verschillende gestandaardiseerde buisturbines te verkrijgen met capaciteiten tot 7 MW en valhoogtes tot 18 m. De rotordiameter is beperkt tot 4 m.



Figuur 3.7: verschillende opstellingsmogelijkheden voor een buisturbine [2].

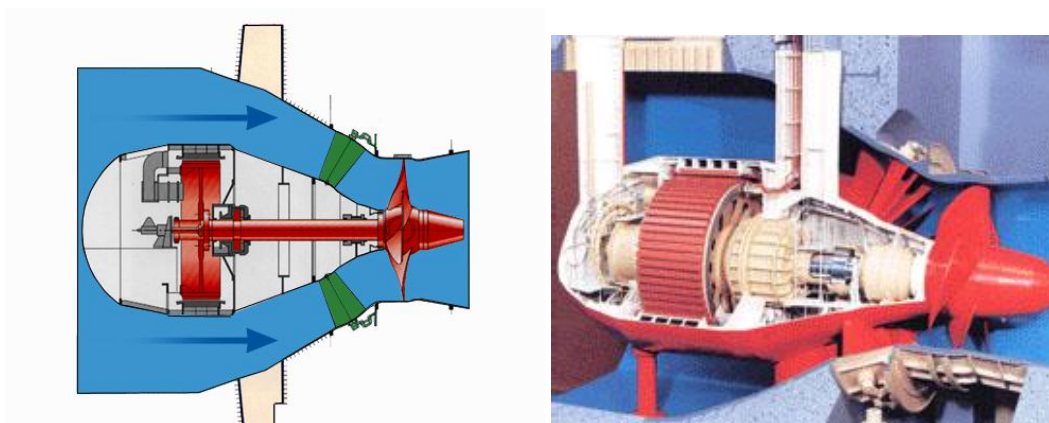
Bulb Turbine

Bij dit type machine hangt de generator op dezelfde horizontale as als van de turbine. De rotor is direct gekoppeld aan de generator die zich in een bolvormige omhulling voor de rotor bevindt. De generator hangt dus eveneens in de waterstroom.

Het grote voordeel van deze opstelling is de compacte opbouw. Bovendien zijn de hydraulische eigenschappen optimaal: bij de stroming rondom de bol blijven de stromingslijnen nagenoeg recht. Het rendement van de bolturbine is daarom ook 1% hoger dan de overige types (turbinerendementen tot 94%). Ook komen afdichting- en afstellingmoeilijkheden niet voor.

Een belangrijk nadeel is de moeilijke toegankelijkheid van de generator voor onderhoud. Door de geringe diameter beschikt het systeem over een lage rotatietraagheid. Hierdoor is de bolturbine best inzetbaar voor iets hogere vermogens (2 – 50 MW) en valhoogten van 1 tot 15 m [2].

De rotordiameter is meestal maximaal 6 m. Voor de bolgenerator wordt dan een diameter van 3 m aangehouden.



Figuur 3.8: voorstelling van de bolturbine. Links: schematische voorstelling. Rechts: schaalmodel van de bolturbine [11].

3.2.4 Opmerkingen m.b.t. axiale turbines

Om het theoretische potentieel van de Kaplan turbines technisch te realiseren, moet rekening gehouden worden met de verliezen. De belangrijkste verliezen zijn de hydraulische verliezen, de turbineverliezen, de verliezen t.g.v. eigengebruik van de centrale, de verliezen in de generator en de transformatorverliezen. De laatste twee verliezen zijn eigen aan het type machine en kunnen zich weerspiegelen in de kostprijs.

De hydraulische verliezen omvatten hoofdzakelijk de instroom- en uitstroomverliezen. Het is dus van belang om zo optimaal mogelijke instroom- en uitstroomcondities te garanderen wat de civiele kosten aanzienlijk kunnen verhogen.

Turbineverliezen kunnen optreden bij afwijkingen van het nominale verval en debiet (ontwerppunt). Een verandering van valhoogte heeft slechts een geringe invloed op het turbinerendement omdat de rotorsnelheid dan zodanig aangepast wordt dat ook onder de nieuwe valhoogte hoge rendementen behouden blijven. De verandering van debiet heeft een belangrijke daling van het rendement tot gevolg omdat de snelheidsrichting van het water niet langer aansluit bij de situatie waarop de rotor werd ontworpen. Een gedeelte van de waterstroom draagt dan geen energie over aan de bladen. Zoals reeds vermeld wordt dit probleem deels opgevangen door de richting van het water te veranderen m.b.v. variabele rotorbladen of door variabele leidschoepen. Om aan deze voorwaarden te voldoen zijn elektronische en mechanische controlesystemen vereist.

Het inplanten van een turbine zorgt voor een extra knelpunt in de waterloop voor vismigratie. Stroomopwaartse en –afwaartse migratie dient gegarandeerd te worden mits een lage vismortaliteit. Dit vereist de bouw van een bypass voor vispassage. Een dergelijke ingreep heeft een verhoging van de kostprijs tot gevolg. Bovendien mag gerekend worden dat, naargelang de riviergrootte, 1% tot 6% van het debiet gereserveerd dient te worden voor een operationeel bypass-systeem [5].

Een vuilrooster dient geïnstalleerd te worden om de turbine te beschermen tegen afval (zwevende of drijvende objecten van natuurlijke of industriële aard) uit de rivier. Vaak wordt de celgrootte van het rooster vrij klein genomen, ongeveer 2 cm op 2cm, om zo ook visintrede grotendeels te vermijden. Mechanische reinigingssystemen worden soms voorzien om het rooster te reinigen. Een ophoping van afval voor het rooster is nadelig voor het rendement.

Toch zorgt een dergelijk rooster sowieso voor een extra weerstand in de water en dient als hydraulisch verlies gerekend te worden.

Ten slotte is het belangrijk om op te merken dat de kostprijs per vermogeneenheid (€/kW) voor axiale turbines sterk toeneemt bij afnemend geïnstalleerd vermogen. Controlesystemen, generatoren, enz zijn apparatuur die niet noodzakelijk afnemen in kostprijs bij downscaling. Aansluitingskosten en civiele werken nemen eveneens relatief minder snel af bij afnemend vermogen.

Dit heeft als gevolg dat dergelijke turbines voor micro waterkracht niet economisch rendabel kunnen zijn. Om in dergelijke situaties nog aan energiewinning te kunnen doen zijn andere machines commercieel beschikbaar. Ook voor mini waterkracht komen hierdoor andere technologieën in concurrentie met de axiale turbines.

3.2.5 Referenties

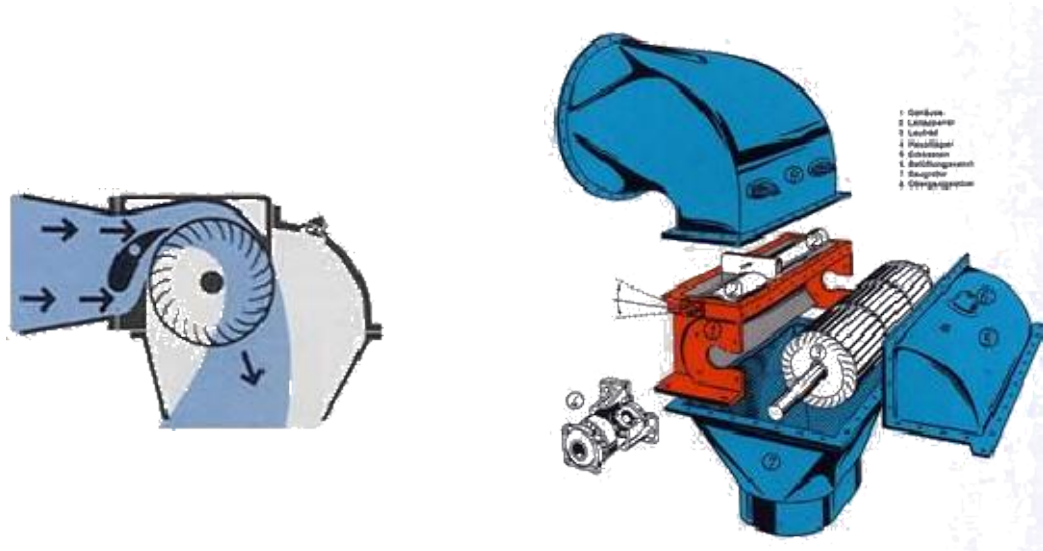
1. Alstom Power: Internet: <http://www.power.alstom.com/>.
2. Andritz Hydro GmbH: <http://www.andritz.com/>.
3. Apad, Small Energy Sources: Internet: <http://www.apad.ir>
4. Dick E., *Turbomachines 2006-2007*. Cursusnota's Universiteit Gent, Laboratorium voor Stromingstechniek.
5. ESHA: European Small Hydropower Association: Internet: <http://www.esha.be/>.
6. Gugler Water Turbines GmbH: Internet: <http://www.gugler.com/>.
7. Lammeren, van, S.A., *Sluiscentrales in Nederland: Een studie naar de haalbaarheid van waterkracht uit schutsluizen en spuisluizen*. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen, Afdeling Waterbouwkunde, 2003.
8. Mavel a.s.: Internet: <http://www.mavel.cz/>.
9. Ossberger GmbH + Co: Internet: <http://www.ossberger.de/>.
10. Terwisga, van, R.H., *Waterkracht in de Maas en Nederrijn*, Vakgroep Waterbouwkunde, Afdeling der Civiele Techniek, Technische Hoogeschool Delft, 1982.
11. Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG: Internet: <http://www.voithhydro.com/>.

3.3 Doorstroomturbine of cross-flow turbine

3.3.1 Werkingsprincipe

Naast de hiervoor besproken axiaalturbines bestaat er ook nog een turbine van het doorstroomtype (cross-flow turbine). Doorstroomturbines – soms aangeduid als Banki-turbines (naam van de uitvinder) of ook Ossberger turbines – kunnen ingezet worden voor zowel middelgrote als lage valhoogtes.

Onderstaande figuur schetst een doorsnede en een visualisatie van de turbine.



Figuur 3.9: principe van een doorstroomturbine. Links: doorsnede van de doorstroomturbine; rechts een visualisatie van de turbine [4].

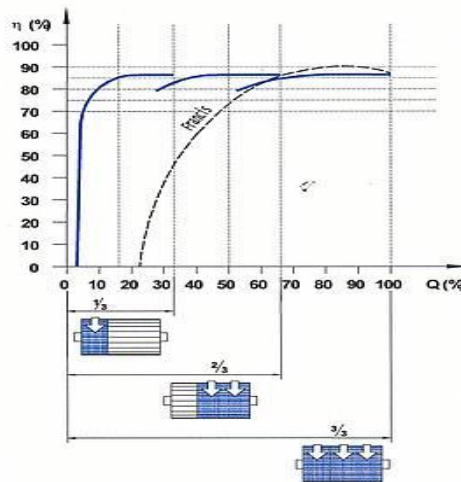
Het betreft een radiale impulsturbine die geclassificeerd wordt als een eerder traag lopende machine [2]. Het water wordt vooreerst doorheen een verstelbaar statorapparaat geleid. Door straalpijpwerking worden de schoepen van de cilindrische rotor bestraald (zie figuur 3.9). De rotorschoepen worden tweemaal geraakt, eerst van de buiten- naar de binnenzijde en vervolgens van de binnenzijde naar de buitenzijde.

De relatieve snelheid bij in- en uitlaat van de rotor is dezelfde, er staat geen drukverschil over de rotor. De reactiegraad is dus nul. De rotor draait gedeeltelijk in lucht bij atmosferische druk.

De lengte van de rotor kan in principe zo lang gemaakt worden als nodig is. De rotor wordt dan meestal in cellen verdeeld (multi-cel uitvoering). Bij dergelijke uitvoering blijven hoge rendementen behouden in een breed debietinterval door systematisch cellen in of uit te schakelen (zie figuur 3.10 voor principe).

De machine wordt net zoals de axiale turbines uitgevoerd met een zuigbuis waardoor de afwaartse valhoogte gerecupereerd wordt. Een snuifklep is meestal voorzien om extra lucht toe te voeren naarmate lucht meegesleurd wordt in de zuigbuis [2].

De doorstroomturbine is relatief eenvoudig van ontwerp en zeer robuust. Weinig onderhoud is vereist. Bovendien heeft het stromingspatroon het voordeel dat minder omvangrijk afval zoals bladeren, gras en kleine takken zonder al te veel complicaties de rotor terug uitgespoeld worden – mede door de middelpuntvliedende kracht [4].



Figuur 3.10: Rendementscurve in functie van debiet, principe van multi-cel werking [4].

3.3.2 Toepassingen

Een sterk argument is dat de doorstroomturbine een breed toepassingsgebied heeft. De machine kan gebruikt worden voor vervallen tussen 1 en 200 m en debieten van 0,04 tot 10 m³/s [4]. Het vermogensbereik gaat van 1 kW tot 2 MW. Doorstroomturbines zijn bovendien eenvoudig te construeren.

Een nadeel is dat dergelijke turbines een turbinerendement hebben dat belangrijk lager is dan de axiaalturbines: 80% t.o.v. 90%. Dit komt neer op een totaal rendement van 60%. Bovendien moet de rotor – gezien deze bij atmosferische druk draait – altijd boven de benedenwaterstand geplaatst worden. Dit kan bij een sluiscentrale tot complicaties leiden. De turbine is eveneens niet erg visvriendelijk.

3.3.3 Leveranciers

Het Duitse bedrijf Ossberger GmbH + Co biedt de Ossberger turbine aan [4]. De turbines zijn custom-made. Het bedrijf heeft de meeste referenties in de vermogensklasse van 200 kW tot 800 kW. Betrouwbare economische gegevens zijn hierdoor beschikbaar. Totale investeringskosten tussen 2500 en 3000 €/kW mogen verwacht worden voor kleinschalige toepassingen. Een terugverdientijd tussen de 5 – 7 jaar wordt gegarandeerd. Bij lagere vervallen hebben de civiele kosten het grootste aandeel in de totale kosten (ongeveer 50%). De machinekosten bedragen dan ongeveer 25% van de totale kosten. De machine heeft een levensduur van 35 jaar.

De site van Ossberger GmbH is zeer gebruiksvriendelijk. In geval van een specifieke case kan een gebruiker de randvoorwaarden invoeren op de site om zo een idee te krijgen van de kosten.

3.3.4 Referenties

1. Apad, Small Energy Sources: Internet: <http://www.apad.ir/>.
2. Dick E., *Turbomachines 2006-2007*. Cursusnota's Universiteit Gent, Laboratorium voor Stromingstechniek.
3. Hydrowatt Ltd: Internet: <http://www.hydrowatt.de/>.
4. Ossberger GmbH + Co: Internet: <http://www.ossberger.de/>.

3.4 Waterraderen

3.4.1 Inleiding

Waterraderen behoren samen met de schroef van Archimedes (zie volgende paragraaf) tot de oudste hydraulische machines en werden al toegepast sinds de oudheid. De uitvinder van het waterrad was de Romeinse Architect Vitruvius in 27 v.Chr. [2,9]. Het systeem werd in de eerste plaats ontwikkeld voor irrigatiedoeleinden maar werd nadien hoofdzakelijk toegepast als mechanische motor (maalmolens).

Tegenwoordig kunnen waterraderen naargelang de watertoeloop geclassificeerd worden in drie basistypes [6]. De meeste raderen benutten de potentiële energie van het water:

- Bovenslaand waterrad (Eng. Overshot water wheel): Het water bestraalt het rad langs de bovenzijde. Deze types worden ingezet bij vervallen tussen 2,5 en 10 m en debieten variërend van 0,1 tot 0,2 m³/s per breedte-eenheid (m).
- Middenslaand waterrad (Eng. Breast water wheel): Het stroomopwaartse peil ligt bij dit type ongeveer op de ashoogte van het rad. Dergelijke machines kunnen ingezet worden bij hoogteverschillen tussen 1,5 en 4 m en debieten tussen 0,35 en 0,65 m³/s per breedte-eenheid (m).
- Onderslaand waterrad (Eng. Undershot water wheel): Het water bestraalt de raderbladen beneden de ashoogte van het rad. Deze waterraderen worden ingezet bij zeer lage hoogteverschillen gaande van 0,5 tot 2,5 m en relatief hoge debieten: 0,5 tot 0,95 m³/s per meter breedte.
Binnen deze klasse kunnen ook de diepslaande of stromingswaterraderen ingedeeld worden. Deze types zijn impulsraden en gebruiken dus enkel de kinetische energie van de stroming. Dergelijke types worden in hoofdstuk 4 besproken.

In de vorige paragrafen werd duidelijk dat de investeringskosten voor turbines (axiaalturbines en crossflow turbine) snel toenemen bij afnemende capaciteit. Voor micro en mini waterkrachtcentrales zijn dergelijke systemen daarom niet altijd even kosten-effectief. Waterraderen hebben in deze vermogenrange t.o.v. van turbines een aantal voordelen:

- Waterraderen vereisen geen complexe en dure in- en uitstroomstructuren om hydraulische verliezen tegen te gaan.
- Waterraderen behouden een redelijk hoog rendement over een breed debietgebied. Turbines vereisen actieve controlesystemen om hieraan te kunnen voldoen (verstelbare loopschoepen en/of leidschoepen).
- Turbines opereren bij relatief hoge omloopsnelheden. Hierdoor is een hoge accuraatatie vereist gedurende productie en constructie.
- Waterraderen zijn geen turbines maar opereren t.g.v de potentiële energie van water. Hierdoor zijn deze systemen visvriendelijk.
- Roosters zijn bij turbines nodig om drijvend of zwevend afval tegen te houden. Soms zijn automatische verwijderingsystemen vereist. Ook om vismortaliteit tegen te gaan zijn fijne maar dure roosters nodig. Dit laatste is niet het geval bij waterraderen.

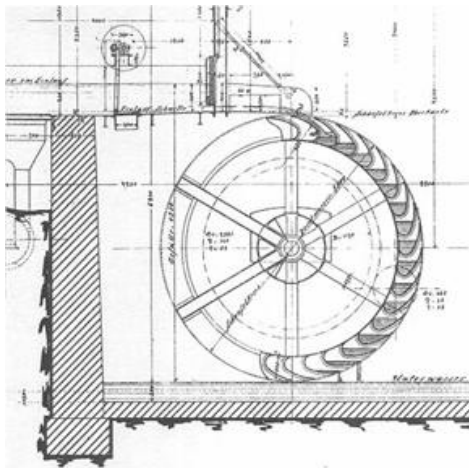
Watrerraden hebben uiteraard ook een aantal nadelen t.o.v. turbines.

- Waterraderen hebben een veel lagere capaciteit met uitzondering van de SPM (Stem Pressure Machine, zie hoofdstuk 5).
- De investeringskosten (€/kW) van de machine zelf komen hierdoor hoger uit dan voor een turbine.
- Hoogtevariaties – zowel stroomop- als stroomafwaarts – kunnen de vermogenoutput gevoelig doen dalen indien waterraderen verbonden zijn aan vaste constructies.
- Waterraderen hebben een lager motorrendement dan axiaalturbines (75 – 85% naargelang type waterrad).
- De lage omloopsnelheden van de waterraden vereisen hoge versnellingsverhoudingen voor het aandrijven van de generator (600 – 1500 rpm). Dit gaat gepaard met verliezen.
- Waterraden produceren door hun grote omvang en lage omloopsnelheid een laag-frequent geluid. Dit kan tot complicaties leiden.

In de volgende subparagrafen wordt kort ingegaan op de verschillende types van waterraderen. Hierbij wordt het economisch aspect eveneens besproken.

3.4.2 Bovenslaande waterraderen

Het basisontwerp van deze klasse raderen wordt toegeschreven aan de Britse ingenieur Fairbairn in 1840. Een bovenslaand waterrad ontvangt het water aan de bovenzijde van het rad (zie figuur 3.11). Een klepsysteem (sluis) regelt de toevoer. Het water wordt vervolgens opgevangen in nauwkeurig ontworpen 'cellen' waarna het rad verdraait ten gevolge van de zwaartekracht van het water. Het water verlaat de cellen op de laagst mogelijke positie.



Figuur 3.11: principe van een bovenslaand waterrad. Links: doorsnede van een bovenslaand waterrad, rechts: foto van een bovenslaand waterrad in werking [3,6].

Met het oog op een maximale benutting van de potentiële energie van het water dient het wiel bovenaan zo nauw mogelijk aan te sluiten met het watertoevoerstuk en dient het hoogteverschil tussen het uitstromingspunt en het afwaartse waterpeil zo laag

mogelijk te zijn. De cellen moeten uiteraard volledig leeg te zijn als deze terug beginnen stijgen.

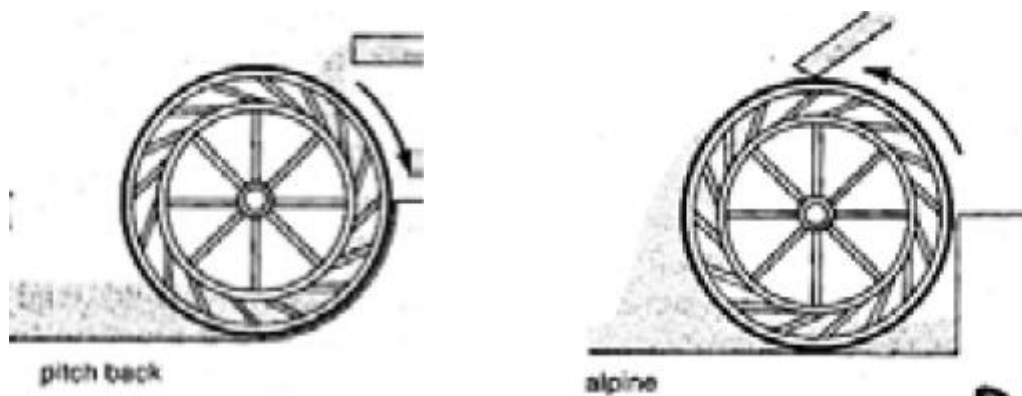
De celleninhoud bedraagt best maximaal 60 % omdat het vroegtijdige leeglopen van de cellen het rendement gevoelig beïnvloedt. Hierdoor boet het rad in aan capaciteit (0,1 tot 0,2 m³/s per breedte-eenheid).

De diameter van het waterrad en daarmee de grootte van de installatie wordt bepaald door het te overwinnen hoogteverschil. Ze worden ingezet voor hoogteverschillen tussen 2,5 – 10 m.

Bovenslaande waterraden hebben de hoogste rendementen onder de waterraderen. Deze bedragen 85% en hoger [6]. Bovendien worden deze hoge rendementen aangehouden tot 30% van het maximum debiet zonder actieve controlesystemen.

De optimale rotatiesnelheid van het rad bedraagt ongeveer 7 – 10 rpm [5]. Dit toerental komt overeen met een omtrekssnelheid die ongeveer de helft bedraagt van de instromingsnelheid van het water. De snelheid/rendementscurve is vrij vlak.

Varianten van bovenslaande waterraderen zijn het 'pitch back' en 'alpine' waterrad [2]. De doorsneden van deze raderen worden getoond in onderstaande figuur.



Figuur 3.12: doorsneden van de varianten van bovenslaande waterraderen. Links: doorsnede van een pitch back waterrad; Rechts: doorsnede van een alpine waterrad [2].

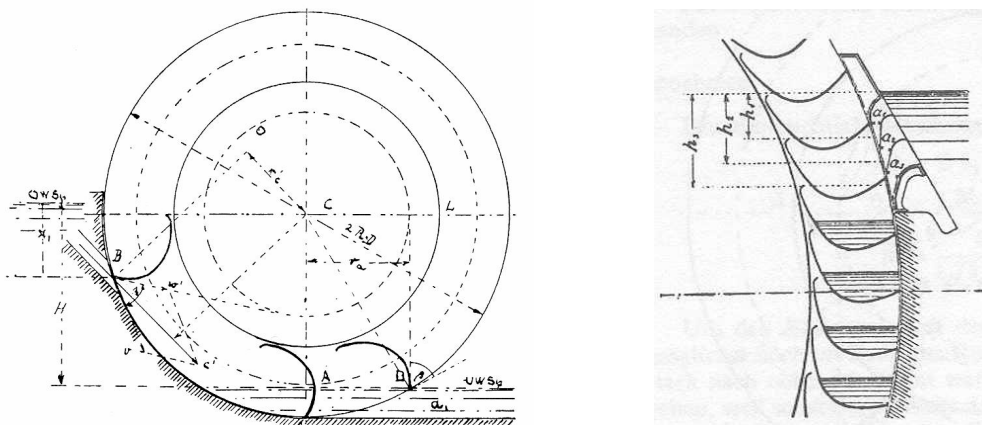
Het Duitse bedrijf Hydrowatt Ltd heeft sinds de jaren 90 tientallen waterraderen gebouwd [3]. Hieruit bleek dat de vooropgestelde rendementen inderdaad werden gehaald (totale rendementen lagen bij alle installaties hoger dan 60%). De raderen hebben een debietbereik van 100 tot 2500 l/s. Ze zijn inzetbaar voor vermogens tussen 1 en 100 kW (micro toepassingen). Economische details worden door Hydrowatt vrijgegeven indien een specifieke locatie als case opgegeven wordt. De aanschafkosten van een bovenslaand waterrad komen dan neer op 3500 – 4000 €/kW. Deze kosten zijn exclusief civiele en aansluitingskosten. De civiele kosten kunnen ongeveer 30 – 40% bedragen van de mechanische en elektrische componenten (uiteraard op locaties waar reeds een stuw of sluis bestaat).

Het Duitse bedrijf BEGA Wasserkraftanlagen ontwerpt de Turas waterraderen [1]. Dergelijk wielen zijn slechts eenzijdig gelagerd wat nauwkeurige constructie met zich meebrengt voor het evenwicht.

3.4.3 Middenslaande waterraderen

De basis voor deze wielen werd gelegd door de ingenieur Bach in 1886 [9]. Figuur 3.13 toont links een doorsnede van een middenslaand waterrad. Het water bestraalt de cellen met een vrij grote helling waardoor een snelle vulling wordt gegarandeerd. De cellen zijn bovendien zo ontworpen dat de resulterende kracht, t.g.v. het eigengewicht van het rad en het gewicht van het water, in de richting van de beweging van het rad werkt. De verliezen worden minimaal gehouden doordat het water de celwanden benedenstrooms verlaat onder de juiste hoek.

Rechts in de figuur wordt een detail getoond van het instromingsstelsel volgens Bach [6]. Naargelang het debiet worden meerdere schotten geopend zodat het waterpeil stroomopwaarts behouden blijft.



Figuur 3.13: voorstelling van middelslaande waterraderen. Links: doorsnede van een middelslaand waterrad; rechts: close-up van het inlaatstuk [6].

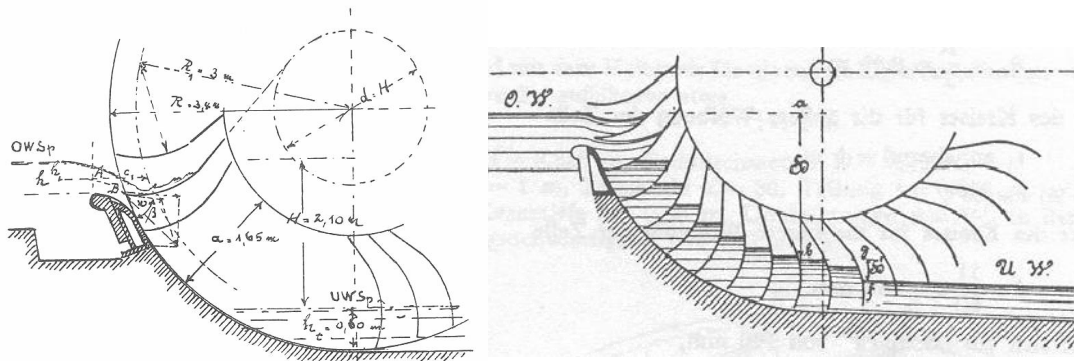
Dergelijke waterraderen behalen motorrendementen tussen 80 en 85%. Bovendien worden rendementen boven 80% behouden over brede variaties van het debiet. Dergelijke wielen worden ingezet bij hoogteverschillen tussen 1,5 – 4 m en debieten van 500 tot 7000 l/s [3]. Houd hierbij rekening dat de diameter van het waterrad minimaal het dubbele bedraagt van het verval.

De investeringskosten bedragen volgens Hydrowatt ongeveer 3500 – 4000 €/kW voor een middenslaand waterrad. Opnieuw zijn deze kosten exclusief civiele en aansluitingskosten.

3.4.4 Onderslaande waterraderen

Onderslaande waterraderen werden ontwikkeld voor zeer lage hoogteverschillen. Dergelijke wielen werd eerst ingezet als impulsraderen (stromingsraderen) waarbij de kinetische energie van de stroming benut werd. De Franse ingenieur Poncelet merkte echter op dat het extraheren van de potentiële energie van het water tot veel betere rendementen leidde (Poncelet raderen). De Zwitserse ingenieur Zuppinger optimaliseerde ten slotte het model van onderslaande waterraden door de bladen licht achteruit te hellen (zie figuur 3.14). Dergelijke waterraderen worden daarom ook Zuppinger raderen genoemd [5].

Zoals te zien op deze figuur zijn de cellen zo ontworpen dat de verliezen bij intrede minimaal gehouden worden. Bovendien neemt de hoogte van het water gradueel af naarmate het rad verdraait waardoor potentiële energie in mechanische energie omgezet wordt. Ten slotte verlaat het water het rad met een minimum aan verlies.



Figuur 3.14: Voorstelling onderslaande waterraderen. Links: doorsnede onderslaand waterrad; rechts: schematische voorstelling waterverloop [6].

Deze raderen opereren optimaal bij hoogteverschillen tussen 1 – 2 m en omloopsnelheden van 1,4 – 1,8 m/s [5]. In deze range haalt het wiel rendementen tot 76%. Bij lagere hoogteverschillen 0,3 – 1 m zakt het rendement tot 65 - 60%. Diameters van degelijke wielen variëren van 4 tot 7 m.

Dergelijke systemen vragen totale investeringskosten van 5000 – 5500 €/kW (echter inclusief civiele en aansluitingskosten). Deze hoge investeringskosten zijn hoofdzakelijk te wijten aan de relatief lage capaciteit van het rad. In hoofdstuk 5 wordt een nieuwe machine, de SPM, beschreven die behoort bij deze klasse waterraderen. Gezien het hoge debiet dat bij deze machine verwerkbaar is per breedte-eenheid komt deze technologie op totale investeringskosten van 3000 €/kW.

3.4.5 Referenties

1. Bega Wasserkraftanlagen GmbH: Internet: <http://www.bega-wasserkraft.de/>.
2. Editors of Extractive Industry Ireland, *Waterwheels: The earliest form of water power*. Extractive Industry Ireland 2008.
3. Hydrowatt Ltd: Internet: <http://www.hydrowatt.de/>.
4. Jones Z., *Domestic electricity generation using waterwheels on moored barge*. Dissertation, Heriot-Watt University, School of the Built Environment, 2005.
5. Müller G., Klemens K., *Old watermills – Britain's new source of energy?* Civil Engineering 150, November 2002, 178-186. Paper 12738.
6. Müller G, *Water wheels as a power source*. Renewable Energy.
7. Senior J., Wiemann P., Müller G., *The Rotary Hydraulic Pressure Machine for very low head hydropower sites*. University of Southampton, Civil Engineering Department, UK.
8. Water Wheel Factory: Internet: <http://www.waterwheelfactory.com/>.
9. Wikipedia, De Vrije Encyclopedie: Internet: <http://nl.wikipedia.org/>.

3.5 Schroefmotor van Archimedes

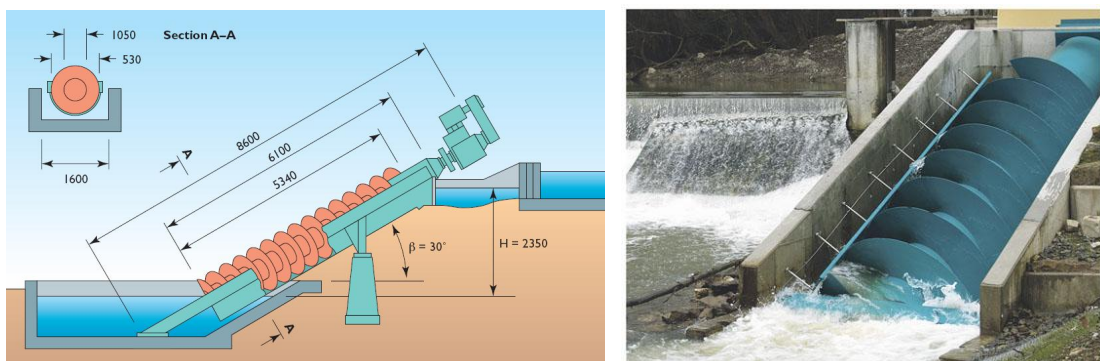
3.5.1 Inleiding

De schroef van Archimedes is een van de oudste mechanische systemen. De schroef is uitgevonden door de Griekse wiskundige Archimedes (ca 287-212 VC) om water (of andere media) omhoog te pompen voor irrigatie- en drainagedoeleinden [2]. Sinds kort worden deze Archimedesschroeven overwogen als 'turbine' waarbij het potentiële energieverschil tussen twee waterniveaus benut wordt voor het genereren van elektriciteit.

3.5.2 Werkingsprincipe

Strikt genomen gaat het hier om een volumetrische machine i.p.v. een turbine (turbomachine). De machine is immers gravitair: de schroef roteert door de kracht van het water op de materiële delen ten gevolge van de zwaartekracht (net zoals de hiervoor besproken waterraderen). De schroef is immers hellend opgesteld. Het water zit dus als het ware gevangen in bakjes gevormd tussen twee schroefbladen en mantel. Het gewicht in elk bakje zorgt voor de aandrijving van de schroef (zie figuur 3.15).

De snelheid komt niet tussen bij de energieoverdracht. Dit in tegenstelling tot een turbomachine waarbij de kracht opgewekt wordt door richtingsverandering in een stroming.



Figuur 3.15: voorstelling van de schroef van Archimedes. Links: doorsnede van de schroefmotor; Rechts: schroefmotor in werking [3].

De schroefmotor bestaat meestal uit een vaste, halfopen buitencilinder waarin een binnencilinder met schroefbladen verdraait (zie figuur 3.15). Deze opstelling heeft als voordeel dat de schroef gemakkelijk toegankelijk is voor onderhoud. Een tweede voordeel is dat een deel van het gewicht van het water – de normale component, deze component draagt niet bij tot de rotatie van de schroef – opgevangen wordt door de mantel.

Een nadeel is dat water kan lekken tussen de schroef en mantel wat het rendement doet dalen. Bovendien is er een marginale toename van de viscositeit als gevolg van de relatieve beweging tussen mantel en schroef. Ook afval kan verstrikt geraken in de spleten wat een goede werking kan verhinderen. Vandaar dat uitvoeringen op de markt zijn waarbij mantel en schroef als een geheel verdraaien [1].

De schroef van Archimedes heeft over het algemeen t.o.v. turbines een aantal voordelen:

- Visvriendelijk door lage omloopsnelheden. De rotatiesnelheid van de schroef is vrij laag. Nagel observeerde dat het toerental vanuit rendementsoogpunt best niet hoger is dan $50/D^{2/3}$ rotaties per minuut, waarbij D de diameter is van de buitencilinder [2]. Bij hogere rotatiesnelheden zou het water immers kunnen overslaan.
- Robuust systeem: eenvoudige opstelling en lage onderhoudskosten.
- Minder gevoelig voor afval. Mede door het visvriendelijke karakter zijn hierdoor geen fijne roosters vereist. Hierdoor worden de energieverliezen aan de inlaat geminimaliseerd en worden de civiele kosten gereduceerd.
- Het rendement bij motorwerking is allicht hetzelfde als het rendement bij pompwerking. Dubbelwerking is mogelijk zonder dure rotoraanpassingen.
- Geen complexe controlesystemen vereist.
- Door de hoge turbulentiegraad bij het uitreden wordt het water met zuurstof verrijkt wat de waterkwaliteit stroomafwaarts bevordert.

De belangrijkste nadelen van de schroefmotor zijn:

- Lage vullingsgraad waardoor relatief grote diameter vereist is en de volumeeinnahme toeneemt.
- Relatief kleine debieten verwerkbaar.
- De motor is iets duurder dan de conventionele turbines. Dat wordt goedgemaakt door de lagere constructieve eisen.

3.5.3 Toepassingen

De schroefmotor is een oplossing voor locaties met lage hoogteverschillen (< 10m) gecombineerd met lage volumestromen (< 5500 l/s). Rendementen tot 90% zijn haalbaar [3]. Voor deellastcondities worden rendementen gegarandeerd boven 80% [3].

De vermogenrange wordt geschat tussen 1 kW – 300 kW. Volgens de leverancier Ritz-Atro zijn vermogens vanaf 1 kW economisch rendabel [3]. Hogere vermogens zijn mogelijk maar dit gaat uiteraard gepaard met grotere diameters of een parallelschakeling van meerdere schroefmotoren.

De schroef wordt site-specifiek ontworpen [3]. De motor kan ingezet worden in kanalen of rivieren bij een stuw of sluis. Zeker op locaties waar vismigratie een knelpunt vormt. Bovendien kan de schroefmotor ingezet worden op plaatsen waar defecte waterwielen of kleine turbine-eenheden vervangen moeten worden.

3.5.4 Leveranciers

De Duitse producent Ritz-Atro en Nederlands bedrijf Spaans Babcock hebben reeds diverse schroefmotoren gebouwd en kunnen referenties aanleveren [3,5].

Enkel economische gegevens zijn beschikbaar via Ritz-Atro. De totale investeringskosten voor de technologie worden vastgepijnd op 2000 - 2500 €/kW. De levensduur van dergelijke systemen worden geschat op 25 tot 40 jaar.

Het Nederlandse Fishflow Innovations richt zich op het ontwerp van visvriendelijke schroefmotoren. Typisch hierbij is de meedraaiende composieten cilindermantel.

3.5.5 Referenties

1. Fishflow Innovations: Internet: <http://www.fishflowinnovations.nl/>.
2. Nagel G., *Archimediainscrew pump handbook*. Prepared for Ritz-Atro Pumpwerksbau GMBH Roding, Nürnberg, Germany, 1968.
3. Ritz-Atro Pumpwerksbau GmbH: Internet: <http://www.ritz-atro.de/>.
4. Rorres C., *The turn of the screw: optimal design of an Archimedian Screw*. Journal of Hydraulic Engineering, January 2000, 72-80.
5. Spaans Babcock: Internet: <http://www.spaansbabcock.com/>.

4 SYSTEMEN OP BASIS VAN KINETISCHE ENERGIE

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op systemen die de kinetische energie van een waterstroom benutten voor het produceren van elektrische energie (of andere vormen van energie). Dergelijke systemen worden Water Current Turbines (WCT's) genoemd. In de Nederlandse taal wordt vaak de term stromingsturbine gebruikt.

Het energiedebiet aangeboden aan een oppervlakte A loodrecht op de stromingsrichting bedraagt (massadebiet vermenigvuldigd met kinetische energie):

$$P = (\rho \cdot A \cdot v) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot v^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W}) \quad (4)$$

In deze formule is ρ de dichtheid van water (kg/m^3) en v de stromingssnelheid (m/s). Het is duidelijk dat voor dergelijke systemen de watersnelheid een doorslaggevende factor is: een verdubbeling van de snelheid betekent een achttvoud van het aangeboden vermogen. Voor een optimale inzet van WCT's dient de oppervlakte A , beschreven door de rotorbladen, bij een gegeven snelheid en randvoorwaarden (bijvoorbeeld diepte rivier) zo groot mogelijk te zijn.

Uiteraard kan niet het volledig aangeboden vermogen worden omgezet in elektrische of andere vormen van energie. De hoeveelheid vermogen dat effectief op de as van de turbine wordt overgedragen wordt uitgedrukt door de vermogenscoëfficiënt C_p . De theoretische, absolute bovengrens van C_p bedraagt 59,3% en wordt de Betz-limiet genoemd. In praktijk dienen echter de bijkomende verliezen nog in rekening gebracht worden (o.a. generatorrendement, eventueel overbrengingsrendement...). Deze verliezen worden in rekening gebracht door de factor η .

Onderzoekers hebben ook geconstateerd dat – naast de Betz-limiet – slechts een eindig deel van de totale energie kan gewonnen worden zonder een significante verstoring van de algemene stroming van de site. Een te grote verstoring zou gevolgen voor de omgeving (fauna, flora, topografie) en dus economische gevolgen met zich meedragen. Dit percentage wordt uitgedrukt door de Significant Impact Factor⁴ (SIF). De SIF is uniek voor elke locatie en definieert welke fractie van de totale aangeboden energie naar asvermogen kan omgezet worden. Deze SIF varieert tussen 10% en 50% en legt hiermee meteen, naast de theoretische Betz-limiet, een tweede, praktische limiet op aan de vermogenscoëfficiënt C_p . C_p kan dus maximaal 50% bedragen.

Formule 4 wordt dus geschreven als volgt:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W}) \quad (5)$$

Merk op dat een dergelijke formule uiteraard ook opgaat voor windturbines. In vergelijking met windturbines zijn de vrije stromingssnelheid in rivieren of bij getijdenstromingen weliswaar relatief laag. Water heeft echter ± 850 keer de densiteit van lucht. Zodoende kunnen stromingsturbines economisch rendabel zijn vanaf snelheden van ongeveer 1,5 m/s. Dergelijke situaties komen in de Nederlandse rivieren vaak voor. Op sommige locaties kunnen snelheden optreden tot 3 m/s, waardoor de energiewinning zeer interessant wordt. Dat is meestal het geval bij bochten of

⁴ Carbon Trust 2005 (<http://www.carbontrust.com>)

vernauwingen waar het water door gedwongen wordt (zoals openingen in estuaria, nauwe doorgangen, sluizen). Systemen voor deze toepassingen werden tot voor kort weinig ingezet. Enkele commerciële modellen zijn nu op de markt:

- Tocardo turbine
- Kinetic Hydropower System (KHPS turbine)
- Stromingswielen
- Underwater Electric Kite (UEK turbine)

Recent is er echter een flinke opmars van nieuwe systemen (hoofdstuk 5).

4.2 Tocardo Turbine

Het Nederlandse bedrijf Tocardo bv ontwikkelde een nieuwe veelbelovende stromingsturbine. Deze turbine werd kortstondig getest in de Afsluitdijk en is nu commercieel beschikbaar.

4.2.1 Werkingsprincipe

De Tocardo turbine kan gezien worden als een kleinere uitvoering van de Marine Current Turbines (MCT's) [1]. Het is een horizontale as turbine bestaande uit een rotor met twee verstelbare rotorbladen. De rotorbladen zijn speciaal ontworpen voor bi-directionele werking. Een hoge rendementsgenerator – een permanente magneet Direct Drive generator [2] – ingewerkt in de hydrodynamisch afgewerkte bol zorgt voor de generatie van elektrische energie.

Het systeem wordt via een 'eenvoudige' constructie verbonden aan een kunstwerk. De turbine kan dan via een hefboomsysteem in of uit de stroming getild worden.



Foto 4.1: voorstelling van de Tocardo T50 turbine [2].

Voorlopig heeft het bedrijf een eerste model, de T50, ontwikkeld en getest. De diameter van de rotor varieert tussen de 2,5 en 4,5 m waardoor debieten tot 11 m³/s verwerkbaar zijn. Dit resulteert volgens Tocardo in een nominaal vermogen van 35 tot 50 kW [2]. Volgens formule 5 komt dit overeen met een stromingssnelheid, v , van 2,5 – 3,5 m/s wat haalbaar is in rivieren in Nederland. Voor de berekening werd de vermogenscoëfficiënt, C_p , gelijkgesteld aan de opgegeven waarde van Tocardo: 42%. Ondertussen zijn meerdere projecten in ontwikkeling, waaronder drie in de UK en enkele Nederland [2].

4.2.2 Toepassingen

De Tocardo turbine kan toegepast worden waar vrij hoge stromingssnelheden beschikbaar zijn in combinatie met een redelijke diepte voor het plaatsen van de turbine. Optimale stromingssnelheden variëren tussen 3 – 3,5 m/s [2].

De turbine kan dus geïntegreerd worden in (getijden)rivieren in de vrije stroming of verbonden worden aan kunstwerken zoals bijvoorbeeld sluizen, nauwe kanalen en bruggen. De diepte en de scheepvaart kunnen hier echter beperkende factoren zijn.

Offshore en nearshore toepassingen zijn uiteraard ook mogelijk. De turbine kan immers bi-directioneel opereren en kan bijvoorbeeld geplaatst worden op drijvende platformen of verankerd worden via pijlers aan de bodem.

Vooral voor deze toepassingen zijn nieuwe en grotere modellen in ontwikkeling. Een eerste nieuw model is de T150 met een rotordiameter van 4 – 10 m. Deze omvang is goed voor een nominaal vermogen van 80 – 150 kW. Het model zou in exploitatie komen in de zomer 2010 maar is nu al beschikbaar [2]. Verder is ook de T500 in ontwikkeling met rotordiameter 7 – 20 m wat een nominaal vermogen van 350 – 500 kW oplevert.

De turbines hebben als voordeel dat de energie-ouput zeer voorspelbaar is en dat ze slechts een minimale visuele impact hebben. Hun technologie is in zekere zin bewezen bij de grotere modellen, MCT's (MCT's worden vanwege hun omvang in deze Annex niet besproken), en is uiteraard ook qua techniek ver ontwikkeld in de windturbine sector. Bovendien is de turbine zeer toegankelijk voor onderhoud.

Een nadeel is echter dat de civiele kostprijs sterk afhankelijk is van de specifieke site. Bovendien zijn extra maatregelen vereist om de turbine te beschermen tegen zwevend of drijvend afval in de waterloop.

4.2.3 Leverancier

Tocado bv is de leverancier van dergelijke turbines. Ondanks de prille ontwikkeling maakt het bedrijf zich sterk dat de technologie reeds competitief is met zonne-energie, i.e. 0,5 €/kWh. De investeringskosten bedragen ongeveer 3500 €/kW en hebben een afschrijftermijn van 5 tot 8 jaar. Op termijn wil het bedrijf competitief zijn met windenergie.

De economische rendabiliteit is uiteraard sterk afhankelijk van de stromingssnelheid en het aantal draaiuren

4.2.4 Referenties

1. Marine Current Turbines Ltd: Internet: <http://www.marineturbines.com/>.
2. Tocardo bv, Tidal Energy: Internet: <http://www.tocado.com/>.
3. Senternovem: Internet: <http://www.senternovem.nl/>.

4.3 KHPS - Kinetic Hydropower System

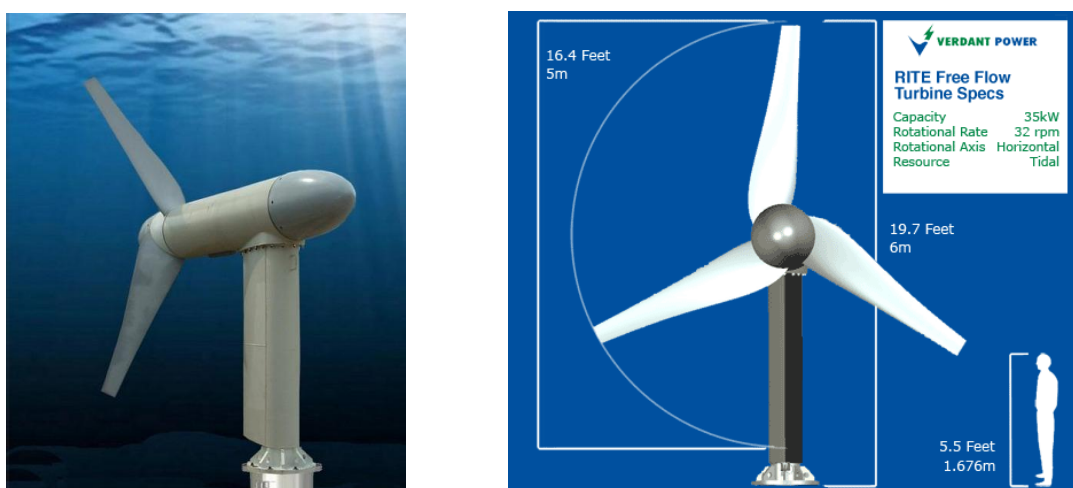
Het bedrijf Canadese Verdant Power ontwikkelde in 2002 een axiale stromingsturbine die kinetische energie van het water omzet in elektrische energie. Het systeem wordt ondergedompeld in de stroming van (getijden)rivieren of nearshore gebieden. De machine is ondertussen klaar voor commerciële toepassingen.

4.3.1 Werkingsprincipe

De KHPS is een axiale stromingsturbine met een diameter van 5 m. De rotor bestaat uit 3 bladen en genereert een vermogen van 35 kW. De rotorbladen zijn ontworpen door New York University en beschikken over een hoog hydrodynamisch rendement over een breed snelheidsbereik.

De rotor van de turbine drijft via een versnellingskast een drie-fasige inductiegenerator aan die op zijn beurt met het net is aangesloten. De versnellingsbak en generator bevinden zich in een waterdichte, gestroomlijnde gondel voor de rotor (zie figuur 4.2). De gondel is gemonteerd op een pyloon. Deze pyloon heeft de vorm van een laminair vleugelprofiel om de stromingslijnen voor de rotor zo min mogelijk te verstoren.

De pyloon is via lagering verbonden met een paal die op zijn beurt verbonden is met de bodem. De turbine richt zich zo volgens de stromingsrichting (eb of vloed).



Figuur 4.2: voorstelling van de KHPS-turbine. Links: KHPS-turbine in werking; rechts: Specificaties van de turbine [1].

4.3.2 Toepassingen

Volgens Verdant Power is de turbine economisch rendabel bij gemiddelde stroomsnelheden vanaf 2 m/s. De vereiste waterdiepte is uiteraard minimaal 9 m gezien de grootte van de rotor (zonder rekening te houden met externe factoren zoals scheepvaart). De turbine kan dus net zoals de Tocardo turbine geplaatst worden in (getijden)rivieren, getijdenestuaria of nearshore toepassingen. Verdant Power ontwikkelt nu ook modellen met grotere en kleinere diameters.

Het systeem heeft het belangrijke voordeel dat geen kunstwerken of grote civiele werken vereist zijn om operationeel te zijn. Bovendien heeft het ondergedompelde systeem geen visuele impact.

Het systeem is echter wel gevoelig aan drijvend of zwevend afval. Scheepvaart en de grote diameter van de turbinerotor kunnen toepassingen in rivieren beperken.

4.3.3 Leverancier

Een prototype werd in 2003 getest in de East River te New York. Het systeem genereerde 15,5 kW bij een gemiddelde stromingssnelheid van 2,13 m/s. Het systeem heeft dus een hoge vermogencoëfficiënt (C_p is 43 %).

Ondertussen installeerde Verdant Power in de zomer van 2006 zes pre-commerciële modellen met een diameter van 5 m in de New Yorkse rivier [1, 2]. Elk model produceerde een piekvermogen van 35,9 kW. Dit was goed voor een totale nominale capaciteit van 150 – 200 kW. Parallel aan deze testfase werd ook een onderzoek uitgevoerd naar het effect op de vismigratie.

Economische cijfers en extra informatie m.b.t. de studies zijn nog niet verkregen hoewel er contact gezocht is met het bedrijf.

4.3.4 Referenties

1. Verdant Power: Internet: <http://www.verdantpower.com/>.
2. Navy Pudget Sound – KHPS: Internet: <http://www.nps-khps.net/>.

4.4 Stromingswielen

Stromingswielen zijn, zoals vermeld in hoofdstuk 2, impulswielen die geclassificeerd kunnen worden als onderslaande waterraderen. De systemen worden beschouwd als economisch inefficiënt hoewel nauwelijks civiele constructies vereist zijn om de werking te garanderen. Het probleem schuilt vaak in de lage rendementen in combinatie met de relatief lage capaciteit waar dergelijke raderen mee te maken hebben [1].

Toch zijn dergelijke wielen de enige machine die kinetische energie uit een ondiepe waterstroom kunnen benutten. Bovendien verstoort de inzet van een dergelijke machine nauwelijks de stroming van de rivier.

In theorie kunnen drie types stromingswielen onderscheiden worden afhankelijk van de snelheid van de waterstroom v , de werkelijke diepte van de waterloop h en de ondergedompelde diepte van het blad d [2]:

- Ondiep water in subkritische stroming ($d \approx h$, $v < v_{kr}$)
- Ondiep water in superkritische stroming ($d \approx h$, $v > v_{kr}$)
- Diep water ($d \ll h$, $v < v_{kr}$)

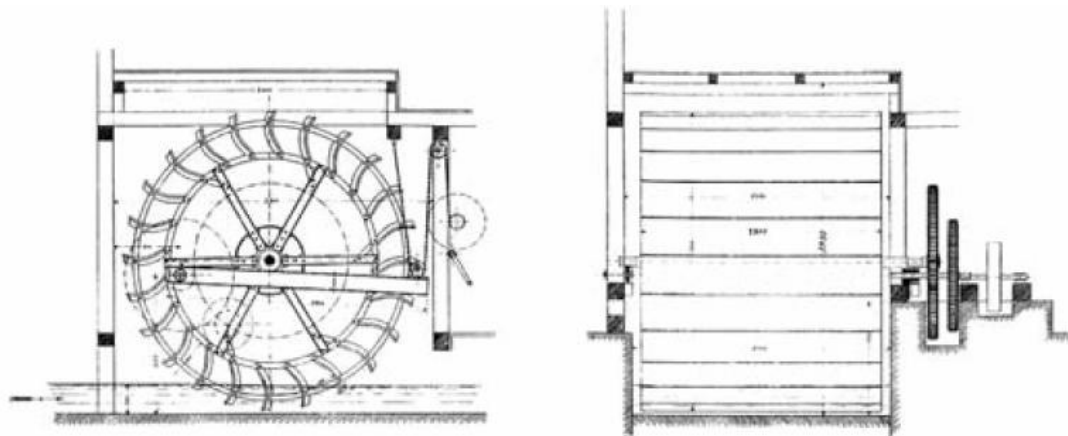
Superkritische stroming is een stroming waarbij de stromingssnelheid v groter is dan de golfvoortplantingssnelheid in ondiep water met een diepte h . Dergelijke stroming komt bijna nooit voor in natuurlijke rivieren. Alleen in stuwen treedt dit op. Een dergelijke machine in zo'n stroom plaatsen geeft grote bewaren (de machine moet wijken bij het strijken van de stuw).

In dit hoofdstuk wordt daarom enkel ingegaan op machines voor ondiep water met subkritische stroming en machines voor diep water.

4.4.1 Stromingswielen voor ondiep water bij subkritische stroming

Het wiel draait om een horizontale as. De rotorbladen zijn eenvoudig van vorm en meestal recht. Deze worden onderaan het wiel ondergedompeld en benutten de kinetische energie van het water (zie figuur 4.3). Civiele werken zijn nauwelijks nodig om het wiel operationeel te maken. Strikt genomen dient enkel de as langs beide zijden gelagerd te worden om optimale werking te garanderen. Een liftsysteem kan gebruikt worden om de hoogte te regelen naargelang het peil van het water.

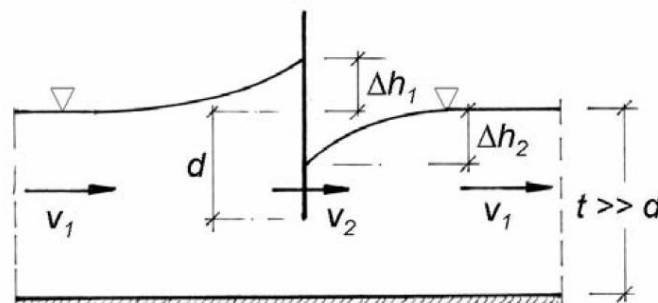
Het systeem haalt een maximale vermogenscoëfficiënt van $C_p = 29,6\%$. De diameter van dergelijke wielen varieert tussen de 3,5 en 5 m. Het blad heeft een hoogte die varieert van 15 tot 20% van de diameter van het rad. Het aantal bladen op een rad is zo ontworpen dat steeds minstens een blad volledig ondergedompeld is. Het blad is licht gekromd om zo de verliezen bij intrede en uittrede te minimaliseren. De vermogensoutput is meestal lager dan 2 kW. Een 1 m diepe rivier die stroomt met een snelheid van 1,5 m/s produceert slechts 0,5 kW per meter breedte.



Figuur 4.3: Schematische voorstelling van een stromingsrad voor ondiep water bij subkritische stroming [2].

4.4.2 Stromingswielen voor diep water

Recent werd er aan de universiteit van Southampton onderzoek gedaan naar stromingsraderen die inzetbaar zijn in rivieren met sterke stroming of getijdenstromingen [2]. In deze gevallen is de diepte h van het water veel groter is dan de ondergedompelde diepte van het blad d .



Figuur 4.4: schematische voorstelling van blad.

Aan de tip van het blad ontstaat - t.g.v. snelheidsdaling van het water door energie-uitwisseling - een wervel. Deze wervel zorgt voor een daling van het waterpeil net na het blad (zie figuur 4.4). Het drukverschil over het blad zorgt voor een extra hydrostatische kracht in de rotatiezin. Hierdoor wordt de Betz-limiet deels ontweken en neemt het rendement van dergelijke wielen toe t.o.v. van stromingswielen in ondiep water. Indien continu 2,5 tot 3 bladen ondergedompeld zijn, kan de vermogenscoëfficiënt C_p geschat worden op 56 – 68% [2].

De vermogenopbrengst van dergelijke wielen kan 100 tot 1000 kW bedragen. Een wiel met een diameter van 10 m genereert bij een snelheid van 2,5 m/s 96 kW per meter breedte. Hierbij zijn de bladen 1 m diep ondergedompeld.

4.4.3 Referenties

1. Jones Z., *Domestic electricity generation using waterwheels on moored barge*. Dissertation, Heriot-Watt University, School of the Built Environment, 2005.
2. Senior J., Wiemann P., Müller G., *The Rotary Hydraulic Pressure Machine for very low head hydropower sites*. University of Southampton, Civil Engineering Department, UK.
3. Water Wheel Factory: Internet: <http://www.waterwheelfactory.com/>.

4.5 UEK - Underwater Electric Kite

4.5.1 Werkingsprincipe

Het UEK-systeem bestaat uit twee axiale turbines die zij aan zij geplaatst zijn. Elke turbine bestaat uit vijf rotorbladen die een interne generator, gehuisvest in de gondel, aandrijven. De turbines zijn omhuld door een convergerende ring die vervaardigd is uit composiet om de drijvende eigenschappen te bevorderen (zie verder).



Figuur 4.5: voorstelling van de UEK turbine.

De convergerende ring is gepositioneerd voor de turbine en zorgt voor een lage druk zone net voor de rotor. Hierdoor neemt de snelheid toe t.o.v. de vrije stromingssnelheid en wordt het water als het ware door de turbine getrokken.

De turbine wordt verankerd aan een rivierbedding of zeebodem via een kabel. Het systeem kan dan gezien worden als een 'kite' in een krachtige wind. De convergerende kap regelt door de krachtwerking t.g.v. stromingsnelheid dat de turbine steeds in de stroming richt. Bovendien kan de aanvalshoek van de kap gevarieerd worden door een ballastsysteem bestaande uit een axiaal bewegend gewicht. Het systeem beschikt over zijdelingse controlemechanismen om zo zich te kunnen positioneren in kern van de stroming.

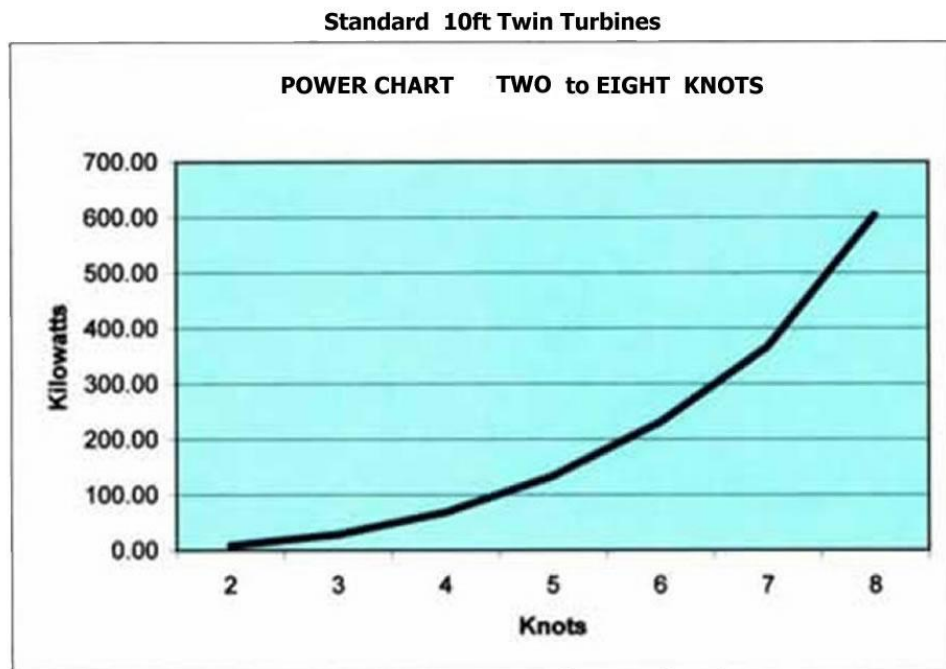
4.5.2 Toepassingen

Het systeem kan door het Amerikaanse bedrijf UEK systems geleverd worden in verschillende maten. Het kleinste model heeft een diameter van ongeveer 2 m. De turbine is ontworpen om te opereren in rivier-, getijden- of zeestromingen vanaf zeer lage stromingssnelheden, i.e. vanaf 0,2 m/s.

Het voordeel is dat, gezien de vermoedelijk lage rotatiesnelheid en de mogelijkheid voor eenvoudige afschermingmogelijkheden bevestigd aan de kap, het systeem visvriendelijk is. Het verankeringsmechanisme vermijdt ook ophoping van sediment.

De basiseenheid met een diameter van 3 m heeft een totaal vermogen van 90 kW (twee zij-aan-zij eenheden van 45 kW) bij een stromingssnelheid van 2,5 m/s. Het systeem haalt rendementen tot 57%.

Een grafiek met het vermogen in functie van de stromingssnelheid wordt getoond in onderstaande figuur. De curve toont deze relatie voor de standaardeenheid van 90 kW.



Realistic cost effective velocities are between four and eight knots

**Data disclosed above are based on perfect site conditions.
Non linear flow, bottom conditions,
seasonal availability of water flow, and other factors may reduce the overall
expectation of the site. Please adjust accordingly.**

Figuur 4.6: vermogen in functie van de stromingssnelheid voor de 90 kW eenheid [1].

4.5.3 Leverancier

UEK US installeert dit jaar de eerste commerciële eenheden geïnstalleerd in de Yukon River. 20 turbines worden zij aan zij geplaatst over een totale breedte van 180 m. Elke turbine voorziet 40 gezinnen van elektriciteit.

Economische gegevens en extra informatie i.v.m. de commerciële eenheden zijn niet beschikbaar hoewel contact gezocht werd met het bedrijf.

4.5.4 Referenties

1. UEK Systems US: Internet: <http://uekus.com/>.

5 NIEUWE TECHNOLOGIEËN

5.1 Inleiding

In deze paragraaf worden enkele nieuwe systemen aangehaald en besproken. Het zijn technologieën die op korte termijn commercieel beschikbaar kunnen zijn.

Systemen die zowel op basis van potentiële energie als op basis van kinetische energie opereren, worden aangehaald. Deze machines werden al kort samengevat in respectievelijk tabel 2.1 en tabel 2.2. De machines worden voor de volledigheid nogmaals opgesomd.

Machines die een verval vereisen:

- HydroRing
- VLH-turbine
- SPM – Stem Pressure Machine

Machines die werken op basis van kinetische energie:

- Water Power Industries turbine (WPI turbine)
- EnCurrent turbine
- Kobold turbine
- Davis turbine
- Diffuser Augmented Water Current Turbine
- Wave Rotor
- Tidal Turbine Generator
- SmartTurbine
- Hydrohélix

5.2 HydroRing

Het Nederlandse bedrijf HydroRing ontwikkelde een innovatief idee door de rotor zowel als turbine en als generator te laten fungeren [2].

5.2.1 Werkingsprincipe

De HydroRing bestaat uit een stator met daarin een ingebouwde, asloze rotor. De rotor is een ring die aan de buitenzijde gelagerd is met permanente magneten. Tussen rotor en stator is een spleet van 5 mm aanwezig die zich door werking vult met water.

De rotorbladen bevinden zich aan de binnenzijde van deze ring. De bladen hebben een beperkte hoogte zodat een interne opening behouden blijft in de turbine voor bijvoorbeeld vispassage.

De ring wordt in een kunstwerk (stuw, sluis) gehangen. Door drukenergie krijgt de ring rotatiesnelheid. In de spleet tussen de ring en stator wordt hierdoor een magnetisch veld geïnduceerd die zorgt voor stroomopwekking in de stator.



Figuur 5.1: voorstelling van de Hydroring; links: twee hydroringen in constructie; rechts: close-up van hydroring [1].

Voorlopig bestaat slechts een model van de HydroRing. De buitendiameter van de machine bedraagt 1,3 m en heeft een gewicht van 1350 kg. De cross-trough (opening) van het type voor bijvoorbeeld vispassage heeft een oppervlakte 1m^2 . Op volledige capaciteit draait de rotor aan 50 rpm en bedraagt de gemiddelde doorstroomsnelheid 3,5 m/s.

Een eenvoudige schuif wordt voor de machine gemonteerd om te fungeren als afsluitsysteem.

Voordelen:

- Door de magnetische lagering zijn er geen wrijvingscontacten. Hierdoor is slijtage beperkt en wordt een lange levensduur verwacht.
- Vanwege eenvoudige opbouw is de ring onderhoudsarm.
- Gemakkelijk en goedkoop integreerbaar in bestaande dammen.
- Door de opening in turbine en geringe hoogteverschil (lage stroomsnelheden en dus gering drukverschil) is deze toepassing vrij visvriendelijk.

- Economisch interessant vanwege eenvoudige opbouw (massa-productie) en bovendien lage civiel-technische kosten bij installatie (economy of numbers versus economy of scale).

Nadelen:

- Goede dichting tussen rotor en stator is vereist om intrede van fijn afval tegen te gaan. De ring is vooral gevoelig aan ijzerhoudende deeltjes die zich zouden kunnen ophopen ter hoogte van de permanente magneten. HydroRing bv kijkt naar de mogelijkheden om een gemagnetiseerd rooster voor de rotor te plaatsen om dergelijke partikels op te vangen.
- Geen debietregeling mogelijk. Dit kan tot complicaties leiden bij bijvoorbeeld integratie in stuw.
- Vermoedelijk heeft de turbine een eerder laag rendement (ondermeer t.g.v. de opening waardoor een groot debiet niet benut wordt). Geen specifieke gegevens zijn beschikbaar.

5.2.2 Toepassingen

De toepassingen voor de HydroRing zijn vooral gericht op locaties met kleine vervallen (2 - 3,5 m). De ontworpen eenheid levert een vermogen van 35 kW.

De ring is gemakkelijk en goedkoop te installeren en kan geïntegreerd worden in bestaande dammen of stuwen. Hiervoor zijn beperkte civiel technische wijzigingen nodig.

In het vierde kwartaal van 2009 wordt het systeem getest in een laboratorium op zijn weerstand tegen fijn afval. Vervolgens wordt in het eerste kwartaal van 2010 een testeenheid gemonteerd in een geselecteerde stuw door Rijkswaterstaat.

Economische gegevens zijn nog niet beschikbaar gezien het prille ontwikkelingsstadium. SenterNovem verwacht van de HydroRing om een van de goedkoopste bronnen van hernieuwbare energie te worden [2]. Bovendien kwam uit een haalbaarheidsonderzoek naar voren dat de HydroRing als volwaardig en concurrerend nieuw energieopwekkingsprincipe kan worden gekwalificeerd [2]. Speculaties van een competitieve kWh-prijs van 0,2 – 0,3 €/kWh komen naar boven.

5.2.3 Referenties

1. HydroRing bv: Internet: <http://www.hydrring.nl/>.
2. SenterNovem: Internet: <http://www.senternovem.nl/>.

5.3 VLH Turbine - Very Low Head Turbine

5.3.1 Werkingsprincipe

De VLH turbine is een axiale turbine bestaande uit acht verstelbare rotorbladen. De turbine is in feite een afgeleide van de Kaplan turbine en is uitgevoerd met een variabele snelheidsgenerator. Voor de rotor bevindt zich een statorring met 18 vaste leidschoepen. De openingen tussen de leidschoepen worden elk afgeschermd met drie vlakke staven welke fungeren als vuilrooster.



Figuur 5.2: overzicht van de VLH-turbine [1].

De designfilosofie van de turbine gaat in tegen de algemene ontwerptrend die uitgaat van een zo kleine mogelijke diameter om de turbinekosten te reduceren. Deze trend heeft echter het nadeel dat hierdoor snelheden toenemen en dus meer eisen aan civiele kosten worden gesteld. De diameter van de VLH is eerder groot om zo de civiele kosten te reduceren. Bovendien, als gevolg van de lage snelheden heeft de turbine een visvriendelijk karakter en is geen nageschakelde zuigbuis vereist aangezien er geen kinetische energie gerecupereerd dient te worden. De diameter varieert van 3,5 m tot 5,6 m [1]. (Ivm transport mogelijk beperkt tot 5m).

De turbine wordt gebouwd in een vast blok dat hellend opgesteld wordt (30° tot 50° t.o.v. een verticale). Deze helling is afhankelijk van de site, verval en de omstandigheden stroomafwaarts. Het blok fungeert als een soort dam waardoor, eenmaal de turbine in de waterloop wordt gekanteld, er een opstuwing stroomopwaarts plaatsvindt [1]. Door deze techniek kan de machine eenvoudig in kanalen of doorgangen geïntegreerd worden wat een reductie van de civiele kosten als gevolg heeft.

5.3.2 Toepassingen

De basiseenheid heeft een nominale rotatiesnelheid van 105 rpm en een nominaal doorstroomdebiet van 700 l/s. Een dergelijke eenheid werd geïnstalleerd in Millau in Frankrijk [1].

Grotere systemen zijn nu beschikbaar en hebben een vermogenrange die varieert van 100 – 500 kW. Debieten van 10 – 31 m³/s zijn verwerkbaar. Het turbinerendement ligt

tussen 72 en 80%. De machine is ontwikkeld voor lage hoogteverschillen van 1,4 tot 3,2 m. Het systeem kan perfect geïntegreerd worden bij stuwen en spuikanalen.

5.3.3 Referenties

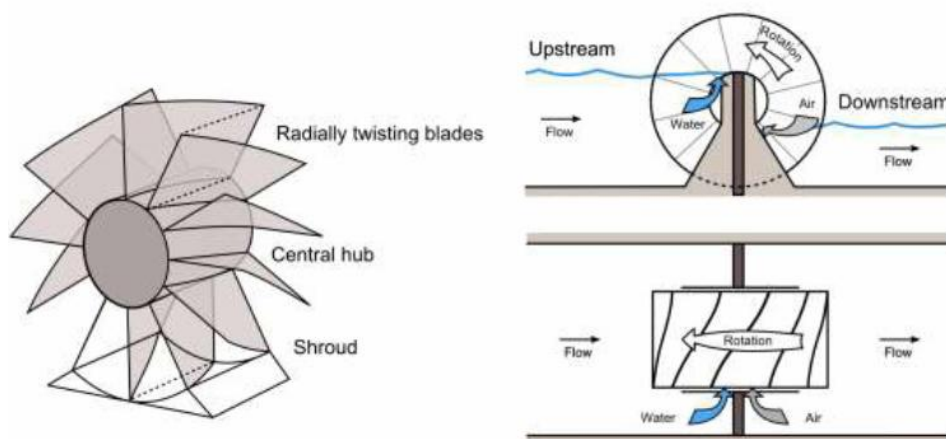
1. MJ2 Technologies S.A.R.L.: Internet: <http://www.vlh-turbine.com/>.
2. Stellba Hydro AG: Internet: <http://www.stellba.ch/>.

5.4 SPM - Stem Pressure Machine

De Stem Pressure Machine of ook wel Rotary Hydraulic Pressure Machine (RHPM) genoemd is een nieuw systeem dat toegepast kan worden voor lage vervaltoepassingen.

Het systeem bestaat uit een rad met een diameter tussen 1,5 en 7,5 m dat draait rond een horizontale as. Twee kritische componenten kunnen van de machine onderscheiden worden die de basis vormen voor de werking: de naaf en de rotorbladen. De naaf is een horizontale cilinder die zich over de volledige breedte van de machine uitstrekt. De diameter van deze cilinder is equivalent aan het verval van de site (zie figuur). De bovenzijde van de cilinder is dus gelijk met de hoogte van het waterpeil stroomopwaarts. De onderzijde met het peil stroomafwaarts. De machine creëert als het ware het verval.

De machine bestaat uit twaalf rotorbladen die radiaal gericht zijn. Ze worden diagonaal op de naaf geplaatst zodat de bladen in elkaar overlopen: het eindpunt van een blad wordt opgevolgd door start van het volgende blad aan de overzijde van de cilinder (zie stippellijn op figuur 5.3). Dat design is kritisch omdat de grote rotorbladen op die manier met een minimaal verlies het water in en uit draaien. Bovendien zorgt dit voor een continue energieoverdracht en rotatie.



Figuur 5.3: voorstelling van de RHPM. Links: voorstelling van de rotor; rechts schematisch overzicht.

Het waterdebiet door de RHPM is proportioneel met de rotatiesnelheid van het wiel. Het systeem kan toegepast worden in rivieren gezien het een eigen verval creëert. Bemerkt dat belangrijke debiet- en hoogtevariaties hierbij een probleem kunnen vormen. De machine is daarom meer geschikt bij bestaande stuw- of damconstructies waar getracht wordt een vrij constant verval te behouden. Door de volledige symmetrie kan het systeem ook ingezet worden voor bi-directionele werking in bijvoorbeeld getijde rivieren (mits het verticale getij klein is). De vervalhoogtes zijn lager dan 5 m. Rendementen tot 80% worden volgens proeven bereikt. Een casestudie werd uitgevoerd waarbij een Zuppinger waterrad vergeleken werd met de RHPM. Hieruit resulteerde dat de RHPM slechts 60% bedraagt van de investeringskosten van een Zuppinger waterrad wat resulteert in een 3000 €/kW.

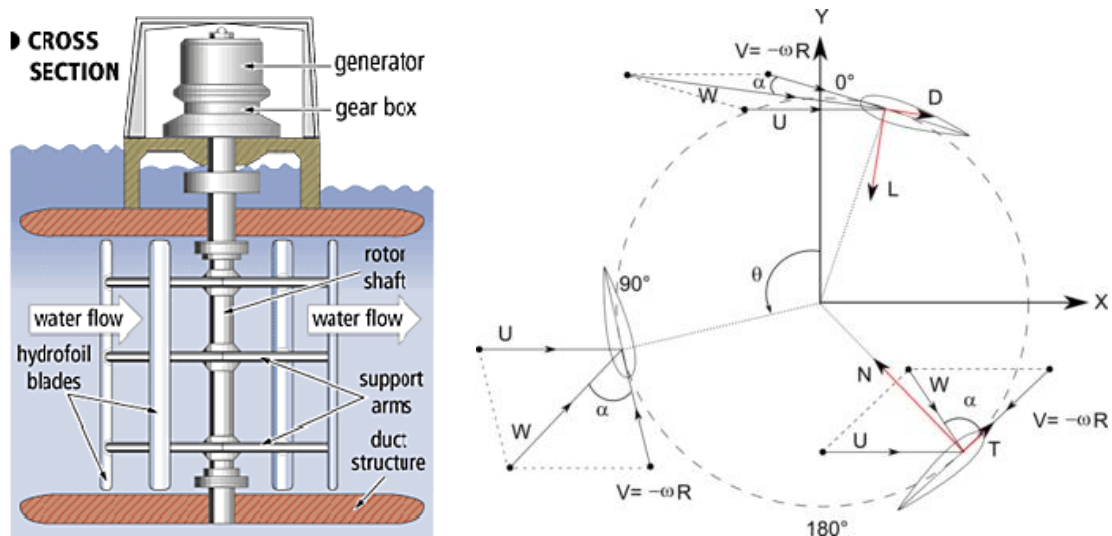
Öwatec heeft enkele prototypes gebouwd met een vermogen van meer 150 kW [1].

Referentie:

1. Öwatec Overa Hydro GmbH: Internet: <http://www.oewatec.de/>.

5.5 Verticale as turbines van het Darrieus type

Een verticale as turbine met rechte prismatische rotorbladen wordt getoond in figuur 5.4. De figuur toont verder een horizontale doorsnede waarbij een blad getekend is op drie posities. Bij windopwaartse en windafwaartse stand ondervindt een rotorblad lift met een tangentiële component in de looprichting (de component U in de figuur stelt de vrije stromingssnelheid voor). De kracht op een rotorblad is bij dit type cyclisch veranderend. Er moeten minimum drie bladen geplaatst worden om een voldoende constant koppel te bekomen.



Figuur 5.4: voorstelling van verticale as turbines. Links: schema van de verticale as turbine van BEC (zie 5.4.4); rechts: horizontale doorsnede van een verticale as turbine [1].

Verticale as turbines worden meestal uitgevoerd als Darrieustypes. In operatie ondervinden de verticale, rechte rotorbladen grote buigende momenten ten gevolge van de centrifugale kracht (combinatie van snelheid en massa water). Hierdoor dienen de afmetingen van de machine beperkt te worden wat voor nearshore toepassingen grenzen oplegt.

Aan deze beperking kan ontsnapt worden door de bladen te buigen in troposkin-vorm (troposkin is het Griekse woord voor draaiend touw). Bij deze vorm treedt enkel trekkracht op als resultaat van de centrifugale kracht en zwaartekracht. Per definitie wordt een dergelijke turbine meestal Darrieus-turbine [2]. De groep turbines is genoemd naar de Franse ingenieur Georges Darrieus (1931) die deze technologie ontwikkelde voor verticale as windturbines (VAWT's).

De voordelen van de verticale as turbines zijn dat de machine principieel richtingsongevoelig (getijdentoepassingen) is en dat deze in principe eenvoudiger opgesteld kan worden. Een bijzonder nadeel is dat de machine bij vaste schoepinstelling niet zelfstartend is en dat bij operatie altijd weerstand aanwezig (terugdraaiende rotorbladen tegen stromingsrichting in). Bovendien zijn altijd steunbalken nodig die ook weerstand genereren.

5.5.1 WPI Turbine - Water Power Industries Turbine

De WPI turbine is een verticale as turbine van het Darrieus type. Drie verticale rotorbladen worden via een horizontale ster in de stroming gehangen. De rotor heeft recht prismatische bladen. De generator bevindt zich boven de waterspiegel en is met de as verbonden aan het middelpunt van de horizontale ster (zie figuur 5.5).



Figuur 5.5: voorstelling van de WPI-turbine. Links: Schematische voorstelling; rechts: prototype [6].

De rotorbladen ondervinden door de stroming een liftkracht met een tangentiële component in de looprichting. De aanvalshoek van elk rotorblad wordt automatisch geregeld met onafhankelijke elektromotoren naargelang de snelheid van de stroming. De turbine kan hierdoor ook eenvoudig in of uit werking genomen worden door de rotorbladen resp. parallel of loodrecht op de stroomlijnen te richten.

Bovendien varieert bij normale werking de aanvalshoek van elk blad afzonderlijk zodat de individuele lift en weerstand wordt geoptimaliseerd gedurende een draaicyclus van de turbine. Hierdoor worden hoge rendementen bereikt. Volgens een derde, onbekende partij werden rendementen opgemeten van 49,9% [6]. Dit lijkt wat aan de hoge kant t.g.v. de weerstanden die de verticale as turbines ondervindt (steunbalken, rotorbladen).

Het Noorse bedrijf WPI ontwierp turbines met vermogens van 100 kW en 200 kW. De dimensies van de vrij omvangrijke turbine zijn niet beschikbaar. Het systeem is ontworpen om te opereren bij stromingssnelheden tussen 1 – 4 m/s. De turbine kan geplaatst worden in rivieren waar grote debieten en stromingssnelheden voorkomen. Gezien de omvang van de turbine wordt deze best geplaatst in onbevaarbare waterlopen wat de toepassingsmogelijkheden verkleint.

Het bedrijf richt zich vooral op toepassingen in (getijden)rivieren bij kribhoofden en bruggen. In dergelijke gevallen zijn de constructies al beschikbaar. Bij bruggen en kribben kunnen er problemen zijn met scheepvaart. Toepassingen bij kribben kunnen bovendien problemen ontstaan als gevolg van sediment. Sowieso zal ook de hoogte van de turbine beperkingen opleggen.

Het Noorse bedrijf richt zich ook op nearshore toepassingen. Grote krachten zullen echter moeten opgevangen worden. Door de doorbuiging van de rotorbladen tijdens werking presteren de boven- onderzones bovendien niet zo goed (mede door de horizontale steun sterren).

Water Power Industries Enterprises bv heeft in de herfst van 2008 drie prototypes met succes getest. In september 2009 zijn er plannen om in de Rijn bij Tolkamer een modelopstelling te plaatsen (bij de autosteiger; stroomsnelheid ca 1m/s; diameter 2m; opbrengst enkele kW). Het doel is om eind 2010 het product te commercialiseren. De 100 kW turbine zou volgens WPI bv neerkomen op 3400 €/kW geïnstalleerd vermogen [6]. Een levensverwachting van 20 jaar wordt geschat.

5.5.2 EnCurrent Turbine

Een eerste voorbeeld is de Encurrent verticale as turbine van het Canadese bedrijf New Energy Corporation Inc (zie figuur 5.6).

De machine werkt volgens hetzelfde principe als de WPI-turbine maar heeft vijf rotorbladen. De turbine draait steeds in dezelfde richting ongeacht de richting van de stroming en heeft een vermogenscoëfficiënt tussen 35 en 40%. De rotatiesnelheid bedraagt bij optimale werking ongeveer 2 – 2,5 maal de snelheid van de vrije stroming. Een permanente magneet generator is gemonteerd op de turbine-as en converteert het koppel gegenereerd door de rotor, om in elektriciteit.

Enkele prototypes van 5 kW en 25 kW werden met succes getest [3]. Voorlopig zijn nog geen dimensies en economische gegevens beschikbaar. De turbine lijkt eenvoudig en heeft een breed toepassingsgebied (rivieren, getijdenstromingen...)

5.5.3 Kobold turbine

Een tweede voorbeeld is de Kobold turbine van het Italiaanse bedrijf Ponte di Archimede International S.p.A [4].

Dergelijke turbines hebben een diameter van 6 m en een verticale bladlengte van 5 m (zie figuur 5.6). De rotor heeft drie bladen en het systeem genereert 25 kW bij een stromingssnelheid van 2 m/s. Het totale rendement is eerder aan de lage kant: 23%.

Recent werd een UNIDO project opgestart om een Kobold turbine te bouwen in Indonesië. Nog geen verder gegevens zijn hierover beschikbaar.

Het systeem is vooral geschikt voor nearshore toepassingen gezien de lengte van de verticale rotor. Prijsindicaties zijn eveneens nog niet beschikbaar.

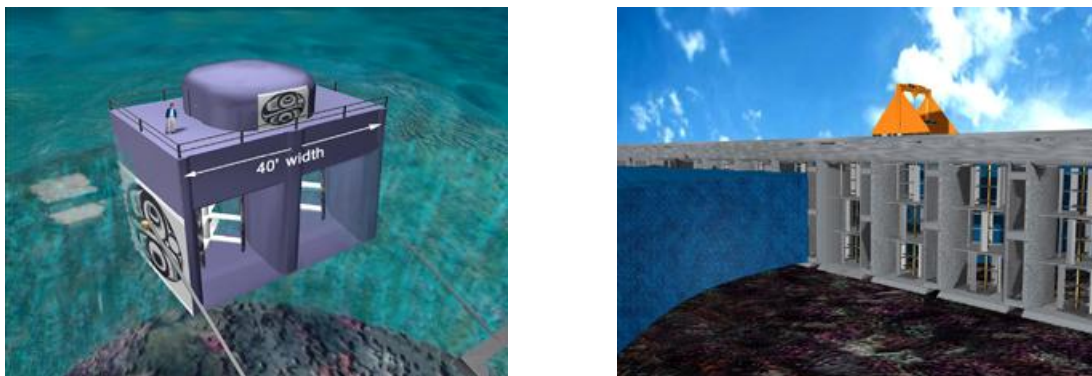


**Figuur 5.6: links: voostelling van de EnCurrent turbine [3];
rechts: voorstelling van de Kobold turbine [4].**

5.5.4 Davis Turbine

Het Canadese bedrijf Blue Energy Company Inc. (BEC) ontwikkelde in 2000 de omhulde Davis turbine bestaande uit vier rotorbladen. De turbine drijft een geïntegreerde versnellingsbak en elektrische generator aan. Oorspronkelijk ontwikkelde BEC turbines die in een soort van damconfiguratie opgesteld konden worden (zie figuur 5.7). De eenheden konden dan naast elkaar opgesteld worden en bijvoorbeeld geïntegreerd worden bij bruggen of stuwen.

De omhulling is convergerend voor de rotor waardoor het water door de turbine getrokken wordt. Na de rotor is de omhulling divergerend voor drukopbouw. Hierdoor kunnen hogere rendementen bekomen worden.



Figuur 5.7: Voorstelling van de Davis Turbine [1].

Tegenwoordig richt Blue Energy zich vooral op 'Midrange units'. Het zijn individuele eenheden van ongeveer 500 kW. Een dergelijke eenheid bestaat uit twee naast elkaar opgestelde 250 kW verticale as turbines met een diameter van 6 m. Ook kleinere systemen 'Micro Power Systems' zijn in ontwikkeling met een vermogenrange van 5 tot 25 kW.

Volgens Blue Energy is de technologie economisch competitief. Investeringskosten worden geschat op 2000 - 2500 €/kW.

5.5.5 Diffuser Augmented Water Current Turbine

Het Australische bedrijf Tidal Energy PTY LTD ontwikkelde de Diffuser Augmented Water Current turbine (zie figuur 5.8). Het betreft een verticale as turbine met een diameter van 1,2 m met een nageschakelde diffusor. De diffusor zorgt voor een drukopbouw na de turbine waardoor het rendement hoger wordt.

De turbine bestaat uit 4 rotorbladen en opereert bij stromingssnelheden vanaf 1 m/s. De machine is verdraaibaar opgesteld waardoor toepassingen in getijdenstromingen mogelijk zijn.

Vijf verschillende modellen zijn beschikbaar. Het kleinste model heeft een doorstromingsoppervlakte van 2,25 m² en genereert bij een vrije stromingssnelheid van 6 m/s 100 kW (maximale capaciteit).

Het kleinste model heeft een kostprijs van 50.000 €. Dit komt neer op een investering van 1500 – 2000 €/kW.



Figuur 5.8: Voorstelling van de Tidal Energy Turbine [5].

5.5.6 Referenties

1. BEC: Blue Energy Company Inc.: Internet: <http://www.bluenergy.com/>.
2. Dick E., *Turbomachines 2006-2007*. Cursusnota's Universiteit Gent, Laboratorium voor Stromingstechniek
3. New Energy Corporation Inc.: Internet: <http://www.newenergycorp.ca/>.
4. Ponte di Archimede International S.p.A.: Internet: <http://www.pontediarchimede.com/>.
5. Tidal Energy Pty Ltd: Internet: <http://www.tidalenergy.net.au/>.
6. Water Power Industries AS: Internet: <http://www.wpi.no/>.

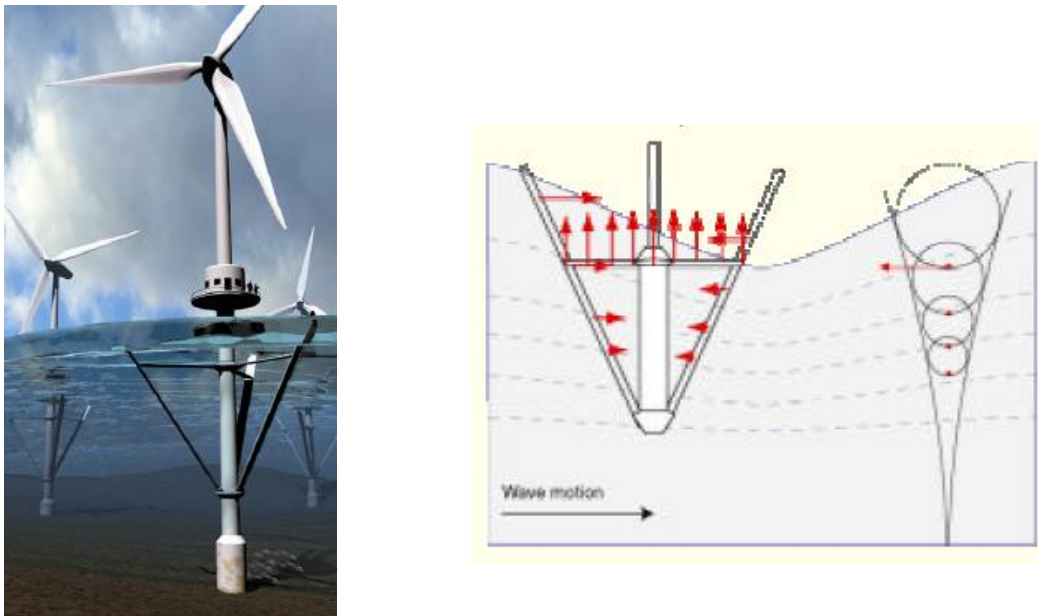
5.6 Wave Rotor

De Wave Rotor van het Nederlandse bedrijf Ecofys is een uniek systeem dat zowel stromingsenergie als golfenergie converteert naar elektriciteit. Ecofys installeerde en testte een eerste eenheid in augustus 2002 in Denemarken.

Om zowel de stromingsenergie als de op en neergaande beweging van golven en stromingen te benutten, combineert het systeem twee types rotoren: de Darrieus rotor (verticaal, hellende rotor) en de Wells rotor (horizontale rotor met verticale as).

Golfenergie bezit een geconcentreerde vorm van energie waarbij vermogens van 80 kW per meter kunnen voorkomen. De Wellsrotor extraheert deze energie t.g.v. de circulerende waterpartikels die een golfbeweging karakteriseren. De rotor beweegt dus niet op en neer maar ondervindt lift door de deze roterende partikels (zie figuur 5.9).

De Darrieusrotor benut de kinetische energie van de stroming.



Figuur 5.9: Voorstelling van de wave rotor. Links: visualisatie van het systeem geplaatst op een windturbine; rechts: schematische voorstelling van de werking [1].

Een eerste prototype werd getest en deze toonde een vermogenscoëfficiënt van 30 – 40%. Deze eenheid werd uitgevoerd met een diameter van 30 m en een hoogte van 15 tot 20 m. Het systeem levert een vermogen van 500 kW en produceert 2000 MWh op jaarbasis. Deze elektriciteitsproductie is equivalent met een windturbine van 1 MW.

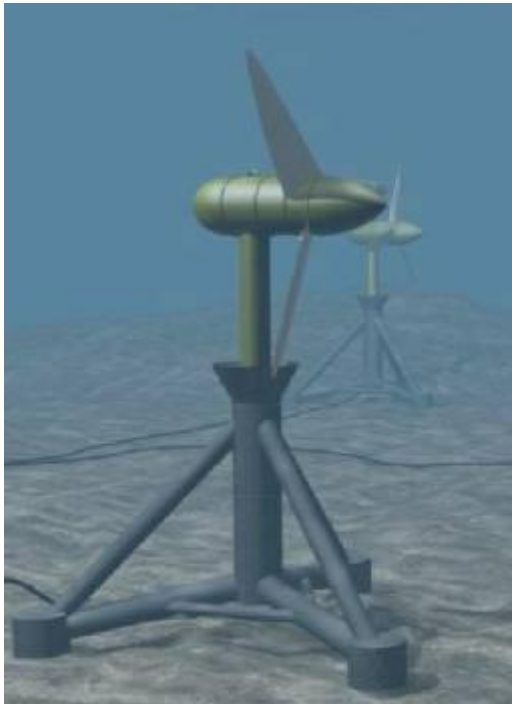
Kleinere turbines in de range van 30 – 60 kW worden ontwikkeld voor kleinschaligere toepassingen zoals bijvoorbeeld in getijdenrivieren. Deze modellen hebben een diameter van 10 m en een hoogte van 3,5 m en vereisen een stromingssnelheid van 2 m/s. Gezien de prille ontwikkelingsfase zijn nog geen betrouwbare economische gegevens beschikbaar.

Referentie:

1. Ecofys Netherlands bv: Internet: <http://www.ecofys.nl/>.

5.7 Swanturbines

Een gelijkaardige technologie aan de KHPS machine (zie paragraaf 4.3) werd ontwikkeld door Swanturbines Tidal Energy (bedrijf in de UK).

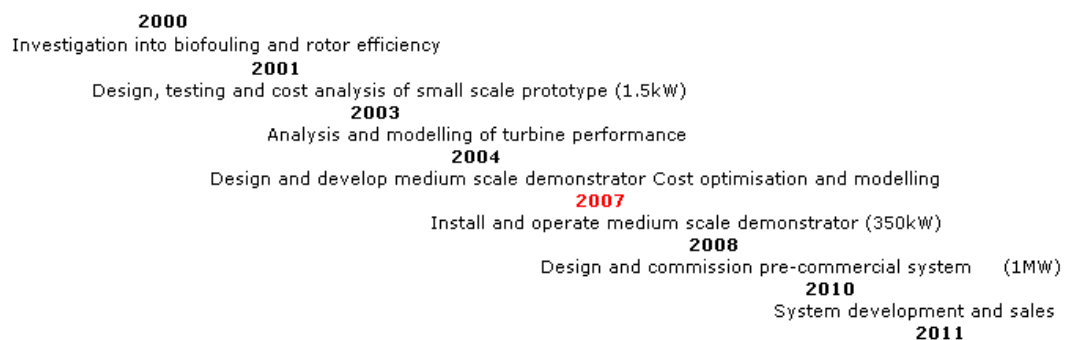


De eenheid is een axiale turbine bestaande uit drie rotorbladen. Een lage snelheidsgenerator biedt een hoog rendement in een breed snelheidsinterval en eist een minimum aan onderhoud. Een belangrijk voordeel is dat geen versnellingskast vereist is wat het globaal rendement doet toenemen en de investeringskosten drukt.

Bovendien zorgt een eenvoudig maar robuust kruismechanisme voor een maximale stroom opvang. De naafhoogte is in de hoogte ook verstelbaar. Het systeem bereikt hierdoor een vermogenscoëfficiënt C_p van 45% [1].

Figuur 5.10: voorstelling van de Swanturbine [1].

In samenwerking met de Universiteit van Wales Swansea werd in 2001 een eerste prototype van 1,5 kW ontwikkeld (zie tijdslijn [1]). Het systeem had een diameter van 1 m.



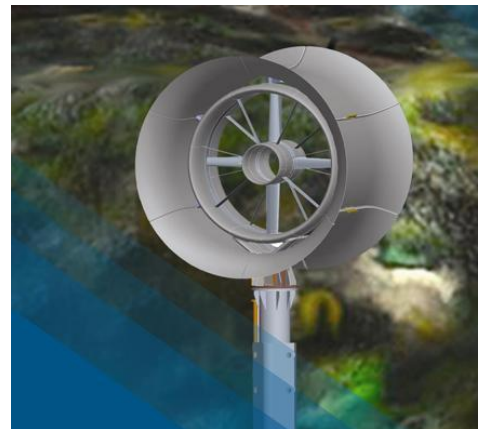
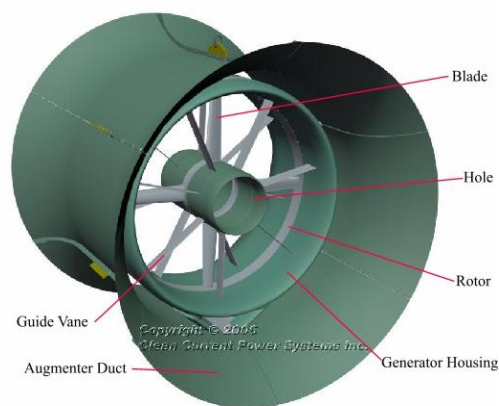
Ondertussen is een turbine van 350 kW ontwikkeld en wordt er gekeken naar grotere toepassingen (1 MW). Het bedrijf richt zich vooral op getijdentoeepassingen. Maar het systeem kan uiteraard ook ingezet worden in rivieren. De vereiste stromingsnelheid is allicht gelijkaardig aan deze van de KHPS turbine (bij 2 m/s economisch rendabel). Verdere economische gegevens zijn voorlopig nog niet beschikbaar.

Referentie:

1. Swanturbines Tidal Energy: Internet: <http://www.swanturbines.co.uk/>.

5.8 Tidal Turbine Generator

Het Canadese bedrijf Clean Current Power Systems ontwikkelde de Tidal Turbine Generator. Het is een horizontale as turbine die omhuld is een tunnel die voor de rotor convergeert en na de rotor divergeert. Dit houdt in dat, net zoals bij de UEK turbine (zie paragraaf 4.5), de stromingssnelheid voor de rotor toeneemt t.g.v. de lage drukzone. Na de rotor neemt de diameter van de omhullende buis terug toe. De zogenaamde diffusor zorgt voor een drukopbouw na de rotor zodat de stroming hersteld wordt en het turbinerendement in principe verhoogd kan worden.



Figuur 5.11: voorstelling van de Tidal Turbine Generator [1].

Net zoals bij de HydroRing (zie paragraaf 5.2) vervult de rotor zowel de functie van turbine als generator: de rotorbladen hebben aan de tip permanente magneten. De machine bestaat dus uit een direct aangedreven permanente magneet generator en heeft geen overbrengingssysteem. De machine bereikt door zijn opbouw een hoog totaal rendement η_t van 50%. Het model heeft een diameter van 14 m en treedt in werking vanaf een stromingssnelheid van 1 m/s. De rotorsnelheid bedraagt 20 tot 70 rotaties per minuut waardoor de machine een visvriendelijk karakter heeft. Het systeem levert een vermogen van 250 kW en heeft een levensverwachting van 25 tot 30 jaar. De investeringskosten komen neer op 2000 – 2500 €/kW.

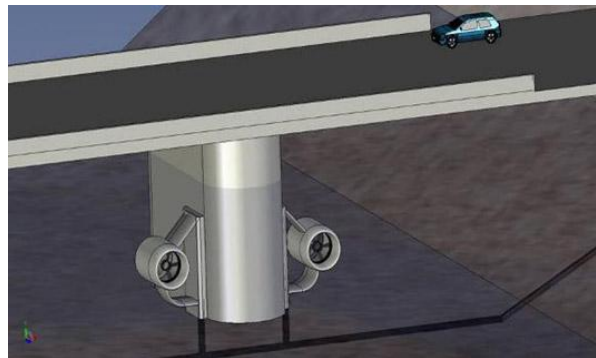
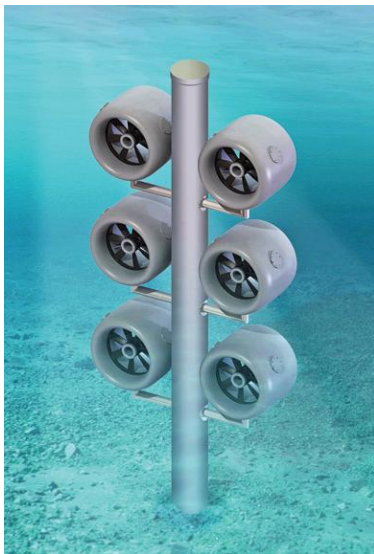
Alstom heeft een overeenkomst met het bedrijf Clean Current om in 2012 de machine commercieel op de markt te brengen [1]. Hierbij zouden velden in oceanen van 20 tot 500 eenheden uitgebouwd worden. Drie eenheden zijn ontwikkeld met diameters van 17 m.

Referenties

1. Clean Current Power Systems Incorporated: Internet: <http://www.cleancurrent.com/>.

5.9 SmartTurbine

Het Amerikaanse bedrijf Free Flow Power Corporation (FFP) ontwikkelde een turbine met een geïntegreerde generator. De zogenaamde SmartTurbine heeft een gelijkaardige opbouw als de Tidal Turbine Generator (zie paragraaf 5.8). Het systeem is eveneens omhuld door een tunnel zodat de stroming voor de rotor eerst versneld wordt. Na de rotor zorgt de diffusor voor een snelheidsdaling en dus een drukopbouw. In de machine zijn bovendien micro- processors gebouwd om de turbine en generator op afstand fijn te regelen bij variërende werkingcondities.



Figuur 5.12: voostelling van de Free Flow Power turbines [1]

Een prototype met een diameter van 1,4 m werd succesvol getest in Alden Labs [2]. Het Amerikaanse bedrijf Free Flow Power ontwikkelt nu systemen met een diameter van 3 m die getest zullen worden in de Mississippi rivier [2]. Bij een stroming van 2,25 m/s genereert de machine een vermogen van 10 kW. De minimale vrije stromingssnelheid is allicht gelijkwaardig als deze bij de Tidal Turbine Generator (ongeveer 1 m/s).

De machine kent heel wat mogelijke toepassingen in rivieren. Een voorstelling van twee turbines verbonden aan een brug is te zien in figuur 5.12. Het is niet zeker dat de turbine bi-directioneel kan werken. Voor toepassingen in getijdenstromingen kan dan gedacht worden aan een verdraaibaar systeem (verdraaibare verticale as waar turbines op gemonteerd worden.)

Referenties:

1. Free Flow Power Corporation: Internet: <http://free-flow-power.com/>.
2. Technisch blad: *International Water Power & Dam Construction*, volume july 2009.

5.10 Hydrohélix Turbine

De Hydrohelix turbine van het Franse bedrijf Hydrohélix Energies, is een turbine die opnieuw omhuld is door een tunnel met als doel een verhoging van de vermogenscoëfficiënt C_p . Het systeem is symmetrisch ontworpen zodat een bi-directionele werking mogelijk is. De turbines hebben een diameter van 8 m en worden opgesteld in matrixvorm. De rotor draait met een zeer lage snelheid van 6 rotaties per minuut en genereert hierbij een vermogen van 250 kW. De cut-in speed (minimaal vereiste snelheid) zal hierdoor vermoedelijk vrij laag liggen ($\approx 1\text{ m/s}$).



Figuur 5.13: overzicht van de Hydrohélix turbine [1].

Het voordeel van deze turbine is het visvriendelijke karakter t.g.v. de lage omloopsnelheid. Het Franse Centrum voor Wetenschappelijk Onderzoek maakte een studie naar het visvriendelijke karakter van de turbine. Een nadeel is de grote diameter van de machine wat toepassingen in de Nederlandse rivieren beperkt.

Opmerkelijk is ook de montage van de matrix op de bodem zoals voorgesteld in figuur 5.13. Door het grenslaageffect bedraagt de snelheid dicht bij de bodem lager dan de snelheid 8 m hoger (diameter van turbine). De ontwikkelde lift op de rotorbladen kan hierdoor onderaan de rotor lager zijn dan bovenaan wat de opbrengst benadeelt.

Een demonstratieproject van een 1 MW matrix is onder ontwikkeling in de Engelse kanaalzone. Het systeem zal investeringskosten hebben van ongeveer 3000 €/kW.

Referenties

1. Hydrohélix Energies: Internet: <http://www.hydrohelix.fr/>.

=0=0=0=

B Annex 2: Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland - HKV LIJN IN WATER & Royal Haskoning (door drs. Nadine Slootjes & ir. Tom Van Den Noortgaete)



Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland

9V3951.B0

Waterkracht Deltares

9V3951.B0/R0002/BJON/ILAN/Rott



HASKONING BELGIUM NV/SA

George Hintzenweg 85
Postbus 8520
3009 AM Rotterdam
(010) 443 36 66 Telefoon
(010) 443 36 88 Fax
info@rotterdam.royalhaskoning.com E-mail
www.royalhaskoning.com Internet
Arnhem 09122561

Documenttitel	Studie naar potentiële energieopbrengst bij kunstwerken in Nederland
Verkorte documenttitel	22 oktober 2009
Status	Waterkracht Deltares
Datum	9V3951.B0
Projectnaam	Deltares
Projectnummer	9V3951.B0/R0002/BJON/ILAN/Rott
Opdrachtgever	22 oktober 2009
Referentie	Waterkracht Deltares

Auteur(s)	Tom Van Den Noortgaete (Royal Haskoning) en Nadine Slootjes (HKV <u>LIJN IN WATER</u>)
Collegiale toets	Paul Termes (HKV <u>LIJN IN WATER</u>)
Datum/paraaf	22 oktober 2009
Vrijgegeven door	Bas Jonkman (Royal Haskoning)
Datum/paraaf	22 oktober 2009

INHOUDSOPGAVE

	Blz.
1 INLEIDING	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	1
1.3 Leeswijzer	1
2 BEPALING POTENTIEEL KANSRIJKE LOCATIES	2
2.1 Selectiecriteria	2
2.1.1 Verval en debiet	2
2.1.2 Stuwontwerp	2
2.1.3 Scheepvaart	2
2.1.4 Theoretisch en technisch potentieel	3
2.2 Inventarisatie	4
2.2.1 Totaaloverzicht	4
2.2.2 Potentieel kansrijke locaties	5
2.3 Analyse meerjarige meetreeksen	7
2.3.1 Stuw Driel – Neder-Rijn	9
2.3.2 Stuw Borgharen - Maas	9
2.3.3 Stuw Roermond - Maas	10
2.3.4 Stuw Belfeld - Maas	11
2.3.5 Stuw Sambeek - Maas	11
2.3.6 Stuw Grave - Maas	12
2.3.7 Sluis Heel	13
2.3.8 Spijkenissebrug - Spui	14
2.3.9 Alblaserdamsebrug - Noord	15
2.3.10 Suurhofbrug - Hartelkanaal	16
2.3.11 Oosterscheldekering	16
2.3.12 Spuisluizen IJmuiden	17
2.3.13 Spuisluizen Afsluitdijk	18
2.4 Conclusie	20
3 BEPALING VAN HET POTENTIEEL	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Terminologie	21
3.3 Theoretisch potentieel	22
3.3.1 Algemeen	22
3.3.2 Theoretisch opgewekt vermogen	22
3.4 Technisch potentieel	25
4 STUWCENTRALES: OPBRENGST PER LOCATIE	26
4.1 Algemeen	26
4.2 Turbinekeuze	26
4.3 Aannames	27
4.4 Potentiële opbrengst per locatie	28
5 SPUISLUISCENTRALES: OPBRENGST PER LOCATIE	29
5.1 Algemeen	29

5.2	Turbinekeuze	29
5.3	Aannames	29
5.4	Potentiële opbrengst per locatie	30
5.4.1	Spuisluizen in de Afsluitdijk	30
5.4.2	Oosterscheldekering	31
5.4.3	Spuisluizen IJmuiden	31
6	SCHUTSLUISCENTRALES: THEORETISCHE MOGELIJKHEDEN	32
6.1	Inleiding	32
6.2	Functioneel en ruimtelijk ontwerp sluiscentrale algemeen bekeken	32
7	VRIJE STROMINGSTOEPASSINGEN: THEORETISCHE MOGELIJKHEDEN	34
7.1	Inleiding	34
7.2	Theoretische mogelijkheden	34
8	REFERENTIES	36

BIJLAGEN

Bijlage 1 – Totaallijst stuwen, sluizen en bruggen in beheer bij Rijkswaterstaat

Bijlage 2 – Berekeningen energiepotentieel van de geselecteerde locaties

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Binnen het Waterinnovatieprogramma van Rijkswaterstaat wordt verkend wat de mogelijkheden zijn van energieopwekking uit water. Op een aantal plaatsen in Nederland is reeds een waterkrachtstation aanwezig, maar waarschijnlijk kunnen veel meer mogelijkheden worden benut. Het ministerie van Verkeer en Waterstaat en het ministerie van Economisch Zaken hechten belang aan het beter in kaart brengen van de mogelijkheden. Rijkswaterstaat wil tevens de benodigde energie in het eigen beheersgebied minder uit fossiel brandstoffen betrekken en daarnaast de energiebehoefte terugdringen. Eén van de alternatieven is het gebruik van waterkracht.

Het project 'Potentie duurzame energie bij kunstwerken', getrokken door Deltares, beoogt de innovatie te stimuleren van technieken om duurzame energie uit water te winnen. Doel van het project is om nader aan te geven op welke locaties in Nederland elektriciteit uit waterkracht opgewekt zou kunnen worden en met welke middelen dat zou kunnen gebeuren. Het project richt zich specifiek op kansrijke locaties in de Rijkswateren. De te winnen energie kan in het landelijke net worden gebracht of gebruikt worden ten behoeve van het energieneutraal bedienen van de kunstwerken van Rijkswaterstaat.

Dit rapport is een bijlage (Annex 2) bij het hoofdrapport "Potentie Duurzame Energie bij Kunstwerken" van Deltares. Naast deze bijlage is er nog een bijlagerapport (Annex 1) met de titel "Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht" van Royal Haskoning.

1.2 Doel

Deze verkenning is uitgevoerd door Royal Haskoning en HKV LIJN IN WATER in opdracht van Deltares. De werkzaamheden HKV LIJN IN WATER hadden tot doel kansrijke locaties in Nederland te identificeren waar elektriciteit uit waterkracht kan worden opgewekt. De werkzaamheden van Royal Haskoning bestonden uit het inventariseren van de technische systemen die daarbij in aanmerking komen en de economische haalbaarheid te verkennen. De economische haalbaarheid van een project is doorslaggevend voor een uiteindelijk besluit kan genomen worden voor de eventuele uitbouw van een waterkrachtcentrale.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 volgt een beschrijving van de aanpak om tot een selectie te komen van potentieel kansrijke locaties om waterkracht op te wekken en geeft ook de resultaten van de inventarisatie. Hoofdstuk 3 beschrijft de theorie om het potentieel te bepalen. In hoofdstuk 3 wordt de wijze waarop het potentieel vermogen werd bepaald behandeld en in hoofdstuk 4 en 5 worden de mogelijk opbrengst per kunstwerk behandeld. In hoofdstuk 6 en 7 wordt apart aandacht gegeven aan de mogelijkheden bij schutsluizen en bruggen.

2 BEPALING POTENTIEEL KANSRIJKE LOCATIES

2.1 Selectiecriteria

In overeenkomst met de doelstelling van dit onderzoek ligt de nadruk op het selecteren van de meest geschikte locaties op het technische potentieel. De selectiecriteria die hierop betrekking hebben zijn de volgende:

- Verval
- Debiet
- Stuwontwerp
- Scheepvaart
- Theoretisch en technisch potentieel

2.1.1 Verval en debiet

De meest kansrijke locaties voor energieopwekking zijn locaties waar hydraulisch verval en debiet geconcentreerd aanwezig zijn en waar hydraulische energie ongebruikt blijft. Locaties waar alleen verval aanwezig is, zonder debietfunctie is ook kansrijk als de debietfunctie kan worden uitgebreid. Maar ook locaties met alleen een debiet en een gering verval kunnen kansrijk zijn door plaatsing van een molen. Bij de inventarisatie is voor wat betreft de geschikte locaties daarom een aantal categorieën onderscheiden:

- Stuwen: waar hydraulisch verval en debiet geconcentreerd aanwezig is en waar hydraulische energie ongebruikt blijft.
- Schutsluizen: waar hydraulisch verval aanwezig is, maar een debietfunctie ontbreekt of gering is.
- Bruggen: waar met zeer beperkte inspanning voor wat betreft de civiele constructies en door middel van plaatsing van een molen waterkracht kan worden opgewekt.

2.1.2 Stuwontwerp

Het stuwontwerp is eveneens een belangrijk criterium voor de locatieselectie. Het gaat hierbij vooral om de beschikbare ruimte rond de stuw voor het inpassen van een centrale en eventueel een bypass systeem voor vispassage. Bovendien moet hierbij eveneens gedacht worden aan de invloed van de centrale op de scheepvaart door de naastgelegen sluizen.

2.1.3 Scheepvaart

Scheepvaart speelt een rol in de kansrijkheid en haalbaarheid van een locatie. Scheepvaart bepaalt de kansrijkheid waar het schutsluizen betreft in de zin dat het aantal scheepvaartbewegingen per dag bepalen hoeveel energie opgewekt kan worden. De haalbaarheid van een locatie wordt door scheepvaart beïnvloed doordat scheepvaart en waterkracht letterlijk in mekaars vaarwater zijn gelegen. Het betreft hier locaties bij bruggen waar vaak de ruimte niet beschikbaar is om turbines te plaatsen in verband met benodigde ruimte voor de scheepvaart.



Figuur 2-1: **Scheepvaart onder de Van Brienenoordbrug.**

2.1.4 Theoretisch en technisch potentieel

De energieopbrengst van de centrale speelt een cruciale rol m.b.t. de economische rendabiliteit van de centrale. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen theoretisch en technisch potentieel.

Theoretisch potentieel

Het theoretische potentieel is de maximale hoeveelheid energie die op jaarbasis op een locatie beschikbaar is [4]. Dit is gelijk aan het vermogen van de centrale, vermenigvuldigd met de tijdsduur dat dit vermogen geleverd wordt. Gezien in dit rapport enkel locaties aan bod komen waar een verval aanwezig is, is het vermogen afhankelijk van het bruto maximale verval over het kunstwerk en het bijhorende debiet.

Technisch potentieel

Het theoretische potentieel van een bepaalde locatie is niet winbaar. Dit is enerzijds het gevolg van verliezen. Dergelijke verliezen zijn bijvoorbeeld verliezen in de aan- en afvoerleidingen, turbineverliezen, generatorverliezen (zie ook Annex 1 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning). Anderzijds is er geen sprake van een constant verval en debiet en dienen de economische factoren in rekeningen gebracht te worden.

Het technische potentieel is daarom gedefinieerd als de maximale hoeveelheid energie die bij een stuwcentrale te winnen is, gegeven een bepaald turbinetype en verloop van verval en debiet in de tijd [4]. Het technische potentieel bestaat dus uit een correctie van het theoretische potentieel.

Het theoretisch en technisch potentieel zijn de directe parameters waarop de keuze voor een bepaalde locatie gemaakt zal worden. Het theoretische en technische potentieel zijn op hun beurt weer afhankelijk van de hiervoor beschreven criteria.

2.2 Inventarisatie

Bij de inventarisatie zijn 3 stappen gevolgd:

- Stap 1: Opstellen van een totaaloverzicht
- Stap 2: Selecteren van potentieel kansrijke locaties op basis van gemiddelde gegevens
- Stap 3: Analyse van meerjarige meetreeksen Rijkswaterstaat

Op basis van de analyse van de meerjarige meetreeksen is bepaald wat de potentiële opbrengst per locatie is. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.

2.2.1 Totaaloverzicht

De eerste stap van de inventarisatie was het opstellen van een overzicht met alle sluizen, stuwen en bruggen die in beheer zijn van Rijkswaterstaat, inclusief de locaties waar reeds energie uit waterkracht opgewekt wordt. Het overzicht is gemaakt als:

1. Excel-tabel
2. Google Earth toepassing
3. GIS-database

De Excel-tabel met het totaaloverzicht is opgenomen in bijlage 1.1, 1.2 en 1.3 bij dit rapport. De Google Earth en GIS-gegevens zijn opgenomen op de cd bij dit rapport.

Huidige locaties met waterkracht

Op verschillende locaties in Nederland wordt reeds waterkracht, op grotere of kleinere schaal, opgewekt. Tabel 2-1 geeft een overzicht van de locaties in de *Rijkswateren* met het bijbehorende vermogen.

Waterweg	Naam	Vermogen [MW]
Neder-Rijn / Lek	Stuw Amerongen	10
Neder-Rijn / Lek	Stuw Hagestein	1,8
Maas	Stuw Linne	11,5
Maas	Stuw Lith	14
Zuid-Willemsvaart	Nederweert	0,035

Tabel 2-1: Overzicht locaties Rijkswater waar energie uit waterkracht wordt opgewekt [www.microhydropower.net].



Figuur 2-2: Stuw Hagestein.

2.2.2 Potentieel kansrijke locaties

Tabel 2-2 en Tabel 2-3 geven een overzicht van de potentieel kansrijke locaties die zijn geselecteerd op basis van het verval en debiet. De kansrijke locaties zijn met name gelegen bij stuwen. De reden is dat hier zowel een verval als een debietfunctie aanwezig is. Het is gebleken dat bij Stuw Borgharen reeds vergevorderde initiatieven lopen voor het installeren van een waterkrachtcentrale. Ook bij de sluizen Bosscheveld, Born en Maasbracht lopen waterkrachtinitiatieven. Bij sluis Bosscheveld wordt binnenkort al gestart met de aanleg van de turbines (mondelinge toelichting van dhr. Aubel van Rijkswaterstaat Limburg). De locaties waar al initiatieven voor waterkracht lopen, zijn verder in deze studie buiten beschouwing gelaten.

Waterweg	Naam	Plaats	Verval [m]	Debiet (gemiddeld) [m ³ /s]	Opmerking
Neder-Rijn	Stuw Driel	Doorwerth	2,6-3,2 ¹	375 ¹	
Maas	Stuw Borgharen	Borgharen	6 ¹	187 ¹	Waterkracht initiatief
Maas	Stuw Belfeld	Baarlo	3,3 ¹	312 ¹	
Maas	Stuw Sambeek	Sambeek	3,3 ¹	317 ¹	
Maas	Stuw Grave	Grave	3,0 ¹	318 ¹	
Oosterschelde	Oosterschelde-kering	-	Varieert	Niet gemeten	Getij; enkele keren per jaar dicht
Noordzeekanaal	Spuisluizen IJmuiden	IJmuiden	Varieert	95	Spuibeheer van belang
IJsselmeer	Spuisluizen	Kornwerder-zand/ Den Oever	Varieert	300	Spuibeheer van belang Waterkracht initiatief

Tabel 2-2: Overzicht potentieel kansrijke locaties waar verval en debietfunctie aanwezig is.

Waterweg	Naam	Plaats	Verval [m]	Debiet (gemiddeld) [m ³ /s]	Opmerking
Maas	Sluis Bosscheveld	Boscherveld	3,65 ²	Onbekend	Waterkracht -initiatieven
Julianakanaal	Sluis Born	Born	11,4 ²	50	Waterkracht -initiatieven
Julianakanaal	Sluis Maasbracht	Maasbracht	11,8 ²	47	Waterkracht -initiatieven
Maas	Sluis Heel	Heel	6,4 ³	Onbekend	
Zuid-Willemsvaart	Sluis Panheel	Panheel	5	Vrijwel geen	
Kanaal Zutphen-Enschede	Sluis Delden	Ambt-Delden	7	Onbekend	
Kanaal Zutphen-Enschede	Sluis Hengelo	Hengelo (Ov)	9	Onbekend	
Kanaal Zutphen-Enschede	Sluis Eefde	Eefde	6,5	Onbekend	Verval afhankelijk van waterstand IJssel

Tabel 2-3: Overzicht potentieel kansrijke locaties waar wel verval, maar nauwelijks of geen debietfunctie is.

¹ Uit Lenstra, 1981[5]

² Mondelinge toelichting dhr. Aubel van Rijkswaterstaat Limburg

³ Uit Wateralmanak Vaargegevens, 2007 [2]

Het bleek niet mogelijk om op basis van alleen literatuur en gesprekken met Rijkswaterstaat de potentieel kansrijke locaties bij bruggen te selecteren. Selectie van bruggen was alleen mogelijk op basis van meetgegevens van stroomsnelheden en veldbezoek. Dit is daarom alleen gedaan op basis van meerjarige meetreeksen en komt in de volgende paragraaf aan de orde.

2.3 Analyse meerjarige meetreeksen

Rijkswaterstaat meet niet bij iedere sluis of brug het debiet en het verval cq. de stroomsnelheid. Wel wordt bij vrijwel alle stuwen de waterstand boven- en benedenstrooms gemeten. Per potentieel kansrijke locatie waar meetgegevens beschikbaar waren, is een analyse uitgevoerd. De analyse bestond voor de stuwen en spuisluizen uit het bepalen van de overschrijdingsduur van het verval en/of debiet in dagen per jaar. Voor de bruggen is de overschrijdingsduur bepaald van de stroomsnelheid in uren per dag. Dit kon slechts van drie bruggen, omdat van overige bruggen geen informatie beschikbaar was.

Voor schutsluizen geldt dat er in principe geen of nauwelijks debietfunctie aanwezig is. Of een schutsluis kansrijk is, is mede afhankelijk van de mogelijkheid om een debietfunctie te creëren en het aantal scheepvaartschuttingen door de sluis. Informatie hierover was niet eenvoudig beschikbaar, waardoor schutsluizen verder niet zijn geanalyseerd. In hoofdstuk 6 is daarom wel een beschrijving opgenomen van de mogelijkheden van energieopwekking in schutsluizen.

Tabel 2-4 en Tabel 2-5 geven een overzicht van de periode van de meetreeksen waarop de analyse is gebaseerd. In de volgende paragrafen zijn de resultaten gegeven van de analyse met een toelichting hierbij.

Locatie	Periode waterstandsmetingen	Periode debietmetingen
Stuw Driel	1993 – 2009	1996 – 2009
Stuw Borgharen	1993 – 2006	1990 – 2008
Stuw Roermond	1990 – 1995	1990 – 2008 (Borgharen)
Stuw Belfeld	1997 – 2002	1990 – 2008 (Borgharen)
Stuw Sambeek	1999 – 2009	1990 – 2008 (Borgharen)
Stuw Grave	1996 – 2009	1996 – 2007 (Lith)

Tabel 2-4: Overzicht periode meetreeksen waterstand en debiet bij stuwen, waarop de analyse is gebaseerd.

Locatie	Periode stroomsnelheidmetingen
Spijkenissebrug	2002 – 2008
Alblasserdamsbrug	1998 – 2009
Suurhofbrug	1999 – 2000

Tabel 2-5: Overzicht periode meetreeksen stroomsnelheid bij bruggen, waarop de analyse is gebaseerd.

Locatie	Periode waterstandsmetingen	Periode debietmetingen
Oosterscheldekering	1994 – 2008	n.v.t.
Spuisluizen IJmuiden	1996 – 2008	1990 - 2007
Spuisluizen Den Oever	1994 – 2008	1990 - 2007

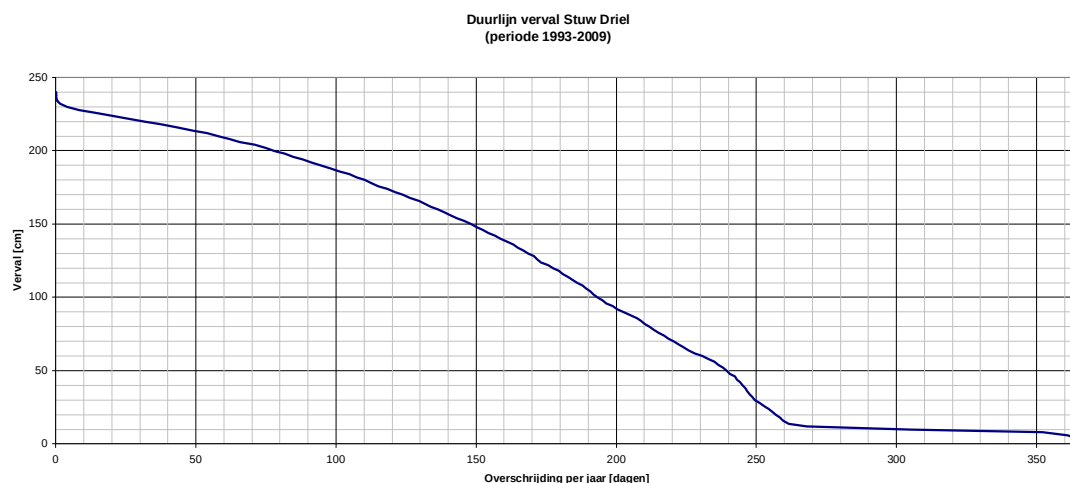
Tabel 2-6: Overzicht periode meetreeksen waterstand en debiet bij spuisluizen/keringen, waarop de analyse is gebaseerd.



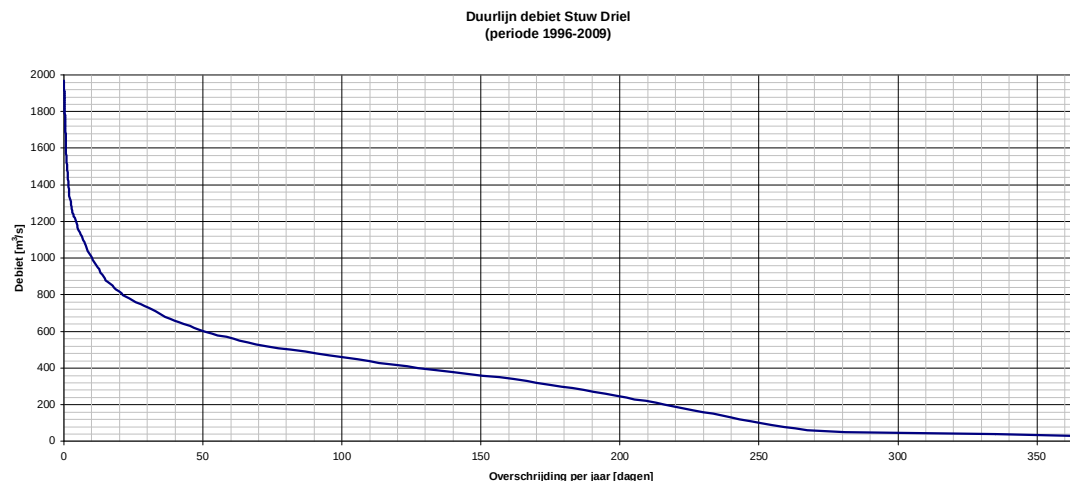
Figuur 2-3: Locaties analyse meerjarige meetreeksen.

2.3.1 Stuw Driel – Neder-Rijn

Bij Stuw Driel in de Neder-Rijn wordt zowel de waterstand als het debiet gemeten. Figuur 2-4 en Figuur 2-5 geven de duurlijnen bij Stuw Driel weer voor beide parameters. Uit de duurlijn van het verval blijkt dat de stuw ongeveer 100 dagen per jaar gestreken is. Het verval is dan slecht enkele centimeters.



Figuur 2-4: Duurlijn verval Stuw Driel.

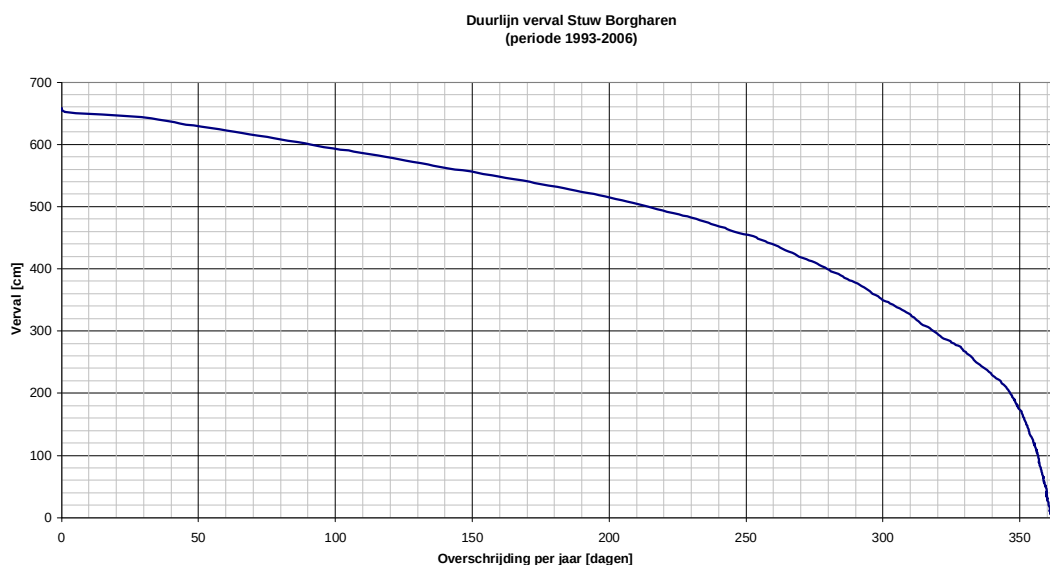


Figuur 2-5: Duurlijn debiet Stuw Driel.

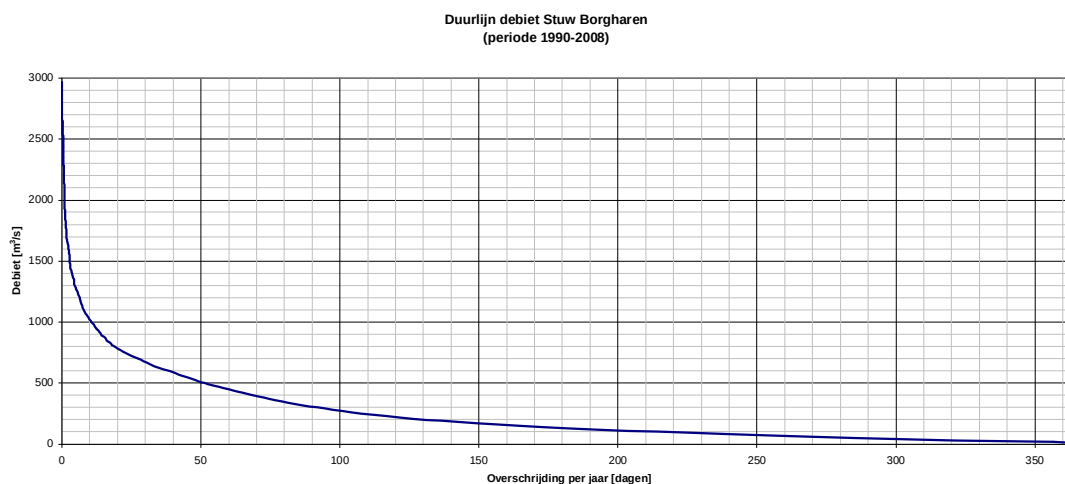
2.3.2 Stuw Borgharen - Maas

Niet bij iedere stuw in de Maas wordt het debiet gemeten. Daarom is het debiet bij Borgharen representatief gesteld voor Roermond, Belfeld en Sambeek. Voor de volledigheid is daarnaast ook de overschrijdingsduurlijnen van het verval bij Borgharen berekend. Hiervoor zijn geen waterstandsgegevens bovenstrooms van de stuw gebruikt, maar is een vast peil gehanteerd van 44 m+NAP. Borgharen is in deze studie verder niet geanalyseerd op waterkrachtpotentieel, omdat hier reeds gevorderde plannen voor energieopwekking uit waterkracht zijn uitgewerkt. Figuur 2-6 en Figuur 2-7 geven

respectievelijk de overschrijdingsduurlijn weer in dagen per jaar van het verval en het debiet bij Stuw Borgharen.



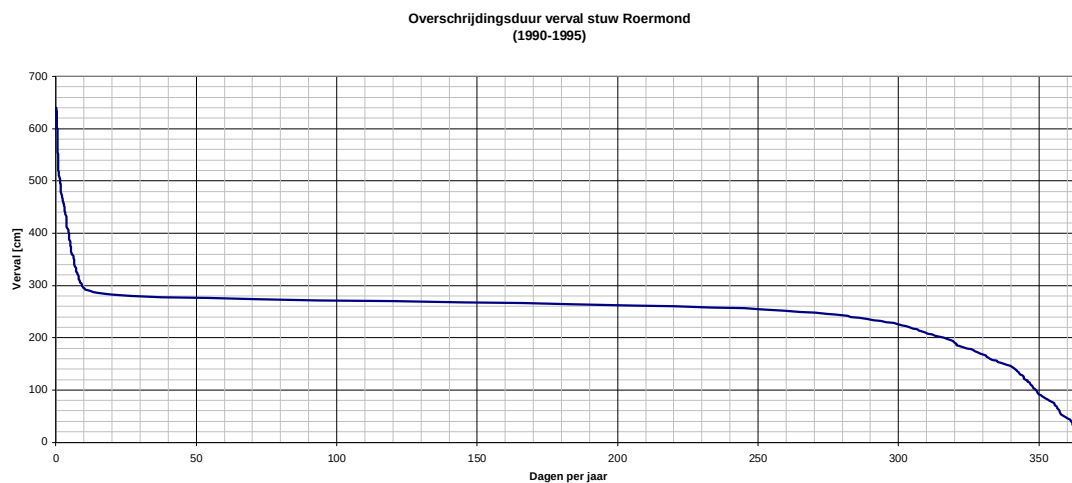
Figuur 2-6: Duurlijn verval Stuw Borgharen.



Figuur 2-7: Duurlijn debiet Stuw Borgharen.

2.3.3 Stuw Roermond - Maas

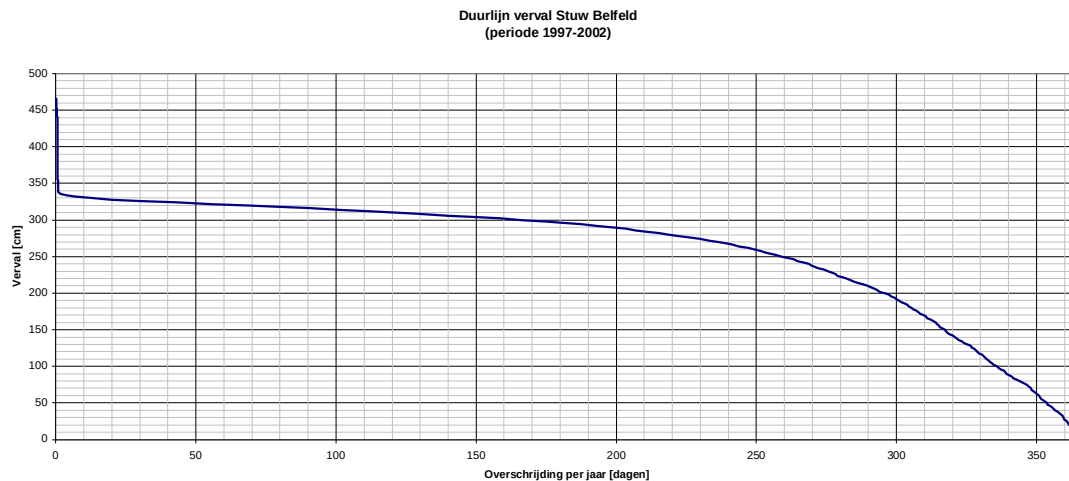
Bij Roermond in de Maas wordt alleen de waterstand boven en onder de stuw gemeten en geen debiet. Om wel een indicatie te krijgen van het debiet, is het debiet bij Borgharen representatief gesteld voor Roermond. Figuur 2-8 geeft de duurlijn weer voor het verval bij de Stuw Roermond. Voor het debiet bij Stuw Borgharen wordt verwezen naar Figuur 2-7.



Figuur 2-8: Duurlijn verval Stuw Roermond.

2.3.4 Stuw Belfeld - Maas

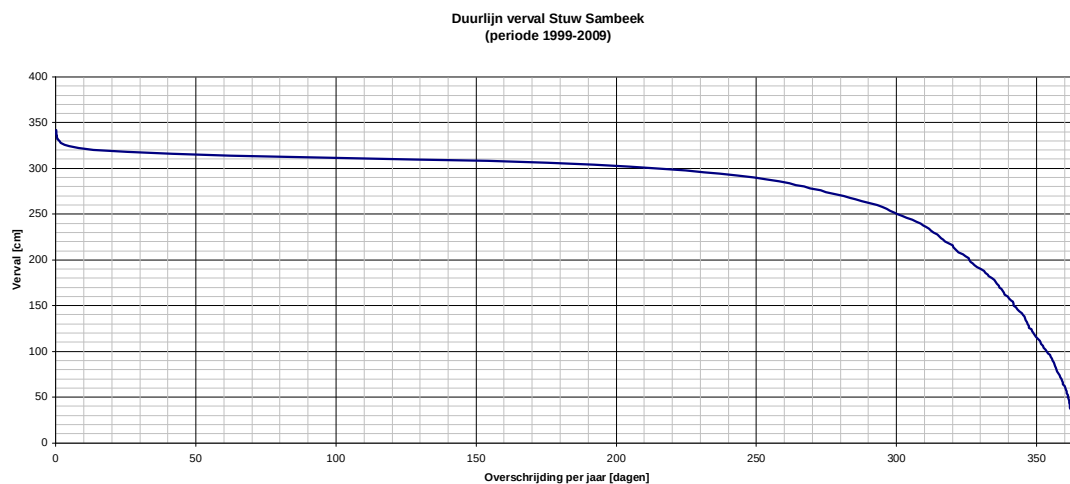
Bij Belfeld in de Maas wordt ook alleen de waterstand boven en onder de stuw gemeten en geen debiet. Ook hier is het debiet bij Borgharen representatief gesteld voor Belfeld. Figuur 2-9 geeft de duurlijn weer voor het verval bij de Stuw Belfeld. Voor het debiet bij Borgharen wordt verwezen naar Figuur 2-7.



Figuur 2-9: Duurlijn verval Stuw Belfeld.

2.3.5 Stuw Sambeek - Maas

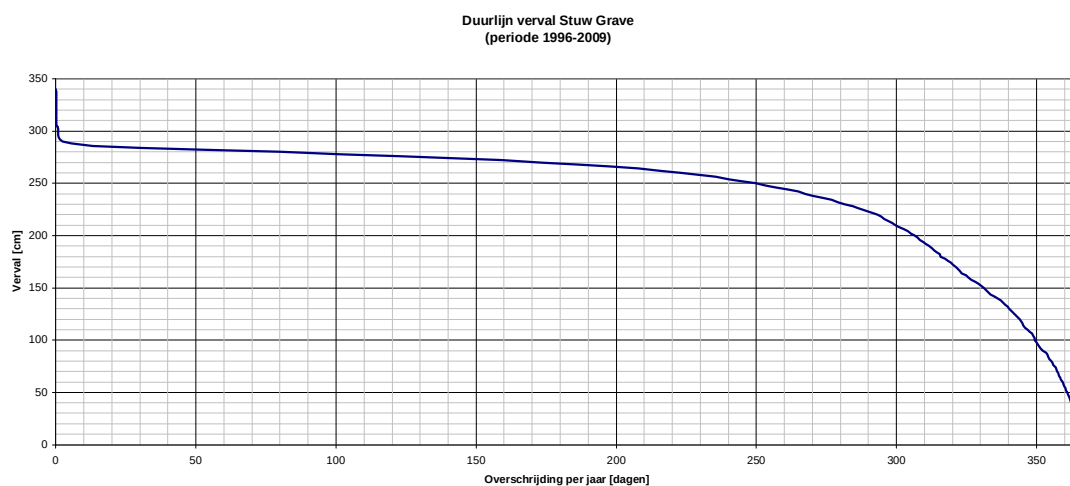
Ook bij Sambeek waren alleen waterstandsmetingen beschikbaar. Figuur 2-10 geeft de duurlijn bij Sambeek weer. Voor Sambeek is het debiet bij Borgharen representatief verondersteld. Hiervoor wordt verwezen naar Figuur 2-7.



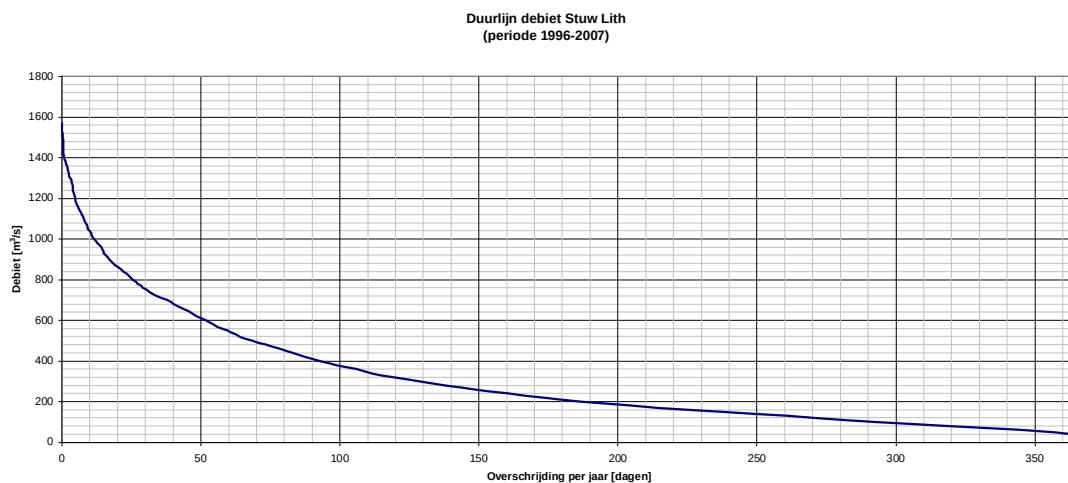
Figuur 2-10: Duurlijn verval Stuw Sambeek.

2.3.6 Stuw Grave - Maas

Ook voor Grave geldt dat er wel waterstandmetingen beschikbaar zijn, maar geen debietmetingen. Voor de debietmetingen is gebruik gemaakt van het debiet bij Lith dat 25 kilometer benedenstrooms is gelegen van Grave. Figuur 2-11 geeft de duurlijn van het verval weer bij Stuw Grave, Figuur 2-12 de duurlijn van het debiet bij Lith.



Figuur 2-11: Duurlijn verval Stuw Grave.



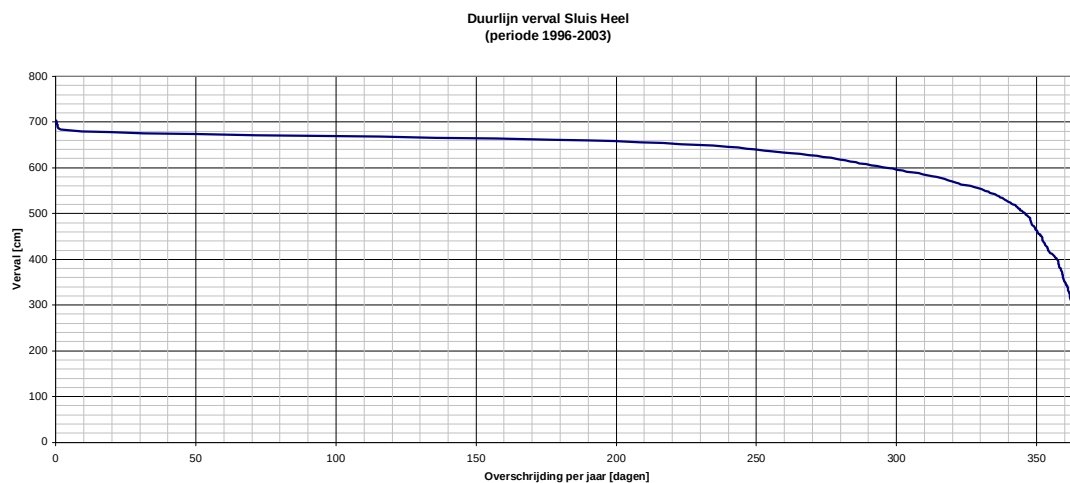
Figuur 2-12: Duurlijn debiet Stuw Lith.

2.3.7 Sluis Heel

Bij Sluis Heel zijn meerjarige waterstandmetingen geanalyseerd over de periode 1996 – 2003. Het is niet bekend wat het debiet is door sluis Heel. De Maasafvoer loopt in principe via de stuw bij Linne. De verwachting is dat het debiet door sluis Heel daarom niet hoog is, maar een en ander is afhankelijk van het aantal scheepvaartschuttingen. Enige energiewinning door het verval over een schutsluis is echter ook mogelijk zonder de eis aan een debietfunctie. Een opmerking hierover wordt geformuleerd in hoofdstuk 4, paragraaf 4.4.



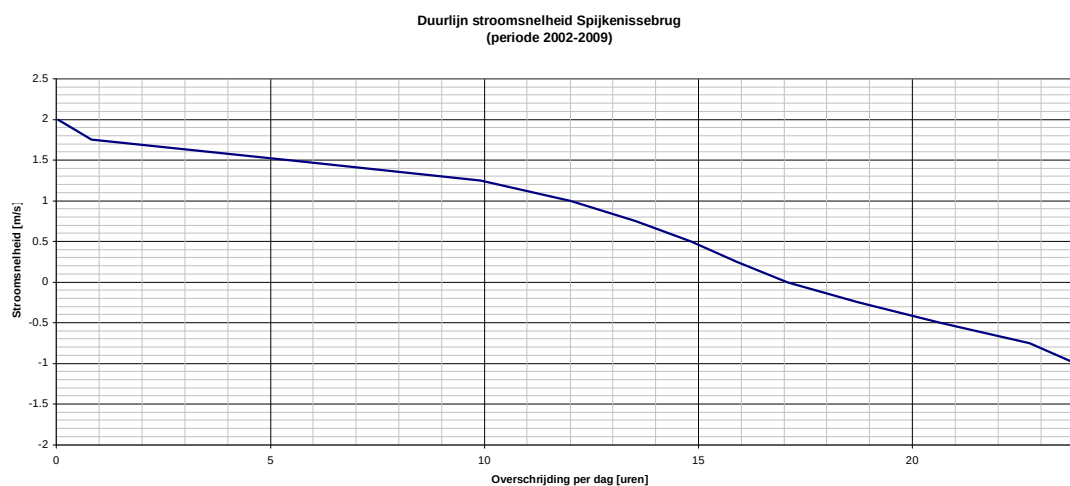
Figuur 2-13: Ligging sluis Heel en Stuw Linne.



Figuur 2-14: Duurlijn verval Sluis Heel.

2.3.8 Spijkenissebrug - Spui

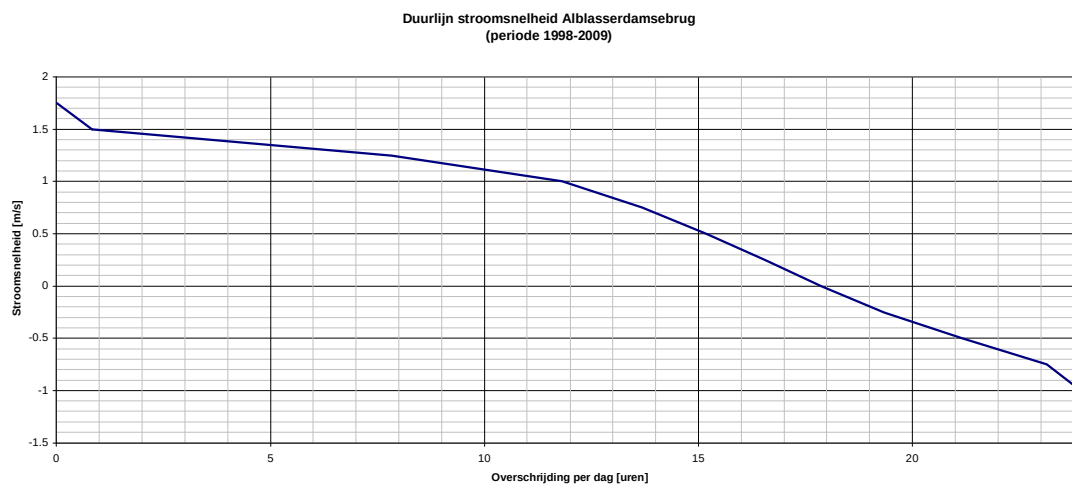
Bij de Spijkenissebrug over het Spui wordt de stroomsnelheid gemeten. De stroomsnelheden van dit meetstation zijn geanalyseerd, waarbij de duurlijn van de stroomsnelheid is bepaald (Figuur 2-15). Stroomsnelheden groter dan 1 m/s treden ongeveer 12 uur per dag op. Dit is de kritische stroomsnelheid vanaf welk moment een locatie interessant wordt (zie bijlage 1 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning').



Figuur 2-15: Duurlijn stroomsnelheid Spijkenissebrug.

2.3.9 Alblasserdamsebrug - Noord

De stroomsnelheden van de Alblasserdamsebrug over de Noord zijn op dezelfde wijze geanalyseerd en weergegeven in Figuur 2-16. Ook hier geldt dat stroomsnelheden groter dan 1 m/s ongeveer 12 uur per dag optreden.



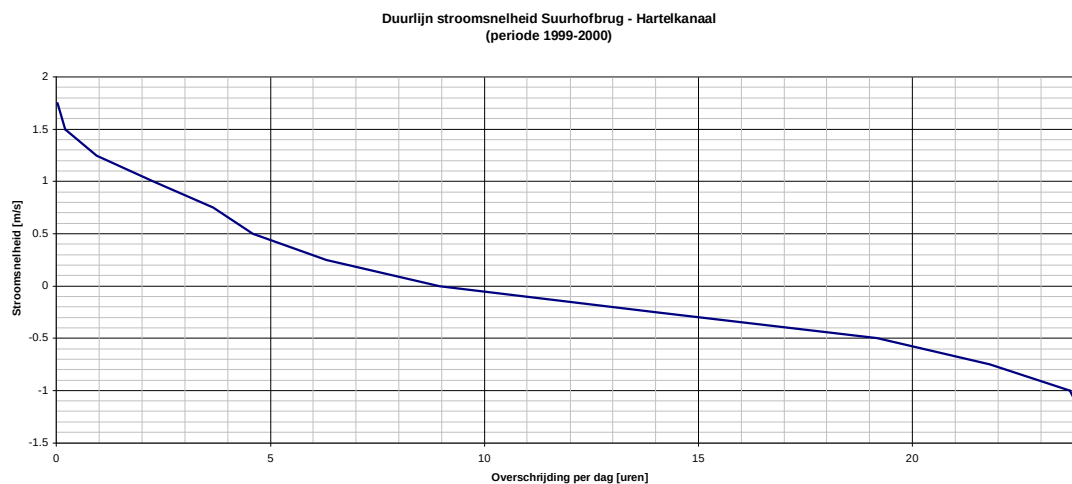
Figuur 2-16: Duurlijn stroomsnelheid Alblasserdamsebrug.



Figuur 2-17: Alblasserdamsebrug [BRON: HKV].

2.3.10 Suurhofbrug - Hartelkanaal

Figuur 2-18 geeft de resultaten weer voor de Suurhofbrug gelegen in het Hartelkanaal. De stroomsnelheden in het Hartelkanaal liggen lager dan bij de hierboven besproken locaties. Stroomsnelheden van 1 m/s treden slechts 2 uur per dag op. Hiermee valt deze locatie af als potentieel kansrijk.



Figuur 2-18: Duurlijn stroomsnelheid Suurhofbrug.

2.3.11 Oosterscheldekering

De Oosterscheldekering bestaat uit 65 pijlers en 62 openingen. Globaal komt het neer op een breedte per poortje van 42 m. De onderkant van de bovenbalk ligt op 1,0 m+NAP, de hoogte van dorpelbalk varieert van 4,5 tot ruim 10,0 m-NAP.

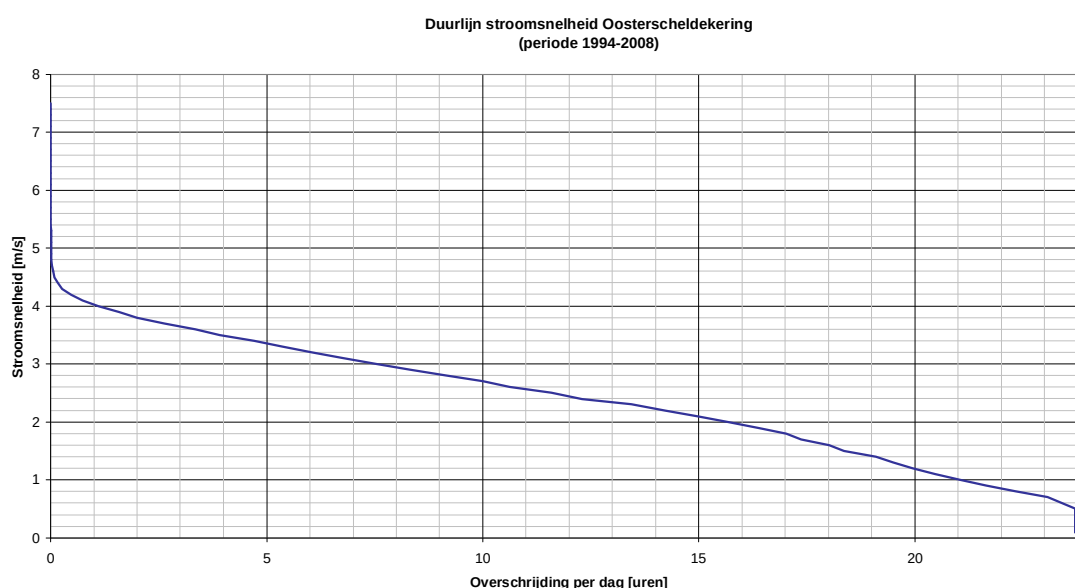


Figuur 2-19: Spuiopening tussen twee pijlers in de Oosterscheldekering [BRON: HKV].

De stroomsnelheden in de Oosterscheldekering worden niet gemeten en zijn daarom berekend op basis van het verval over de kering. Op de locaties Roompot Binnen en Roompot buiten zijn iedere 10 minuten waterstandsmetingen verricht. De stroomsnelheid in de openingen is vervolgens benaderd door toepassing van de wet van Bernoulli met de formule:

$$v = \sqrt{(2g \cdot h)}$$

Dit heeft geresulteerd in een duurlijn van de stroomsnelheid zoals weergegeven in Figuur 2-20. De stroomsnelheden blijken gedurende het overgrote deel van de dag hoger te zijn dan 1 m/s en bijna tweederde van de dag hoger dan 2 m/s.



Figuur 2-20: Duurlijn stroomsnelheid Oosterscheldekering.

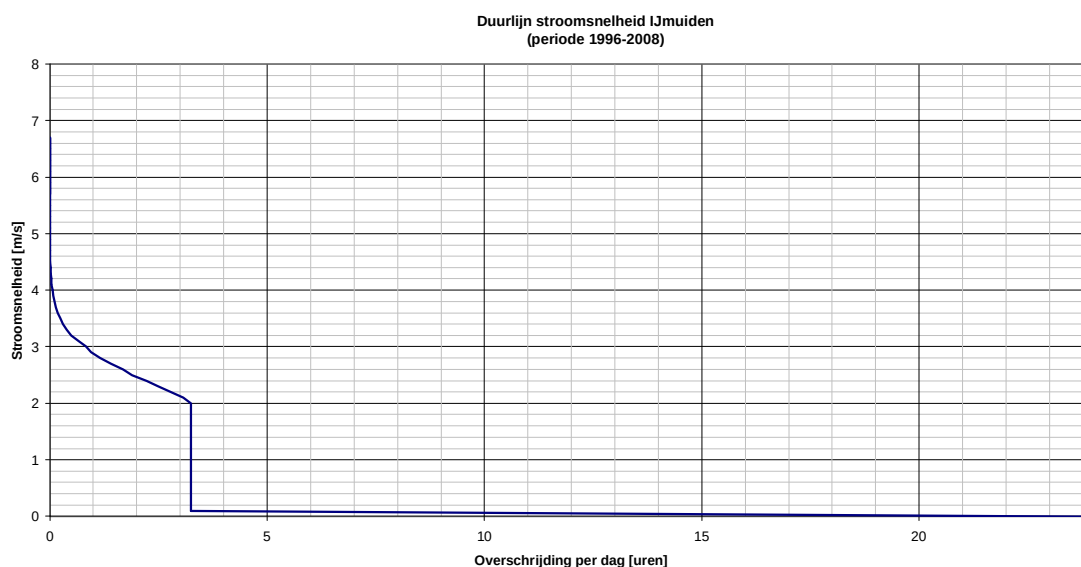
2.3.12 Spuisluizen IJmuiden

Ook voor de spuisluizen in IJmuiden geldt dat er geen stroomsnelheden zijn gemeten. De stroomsnelheden zijn hier tevens bepaald op basis van het verval. Daarnaast is ook het debiet gemeten. Voor zowel de stroomsnelheid als het debiet zijn de duurlijnen berekend per dag en per jaar.

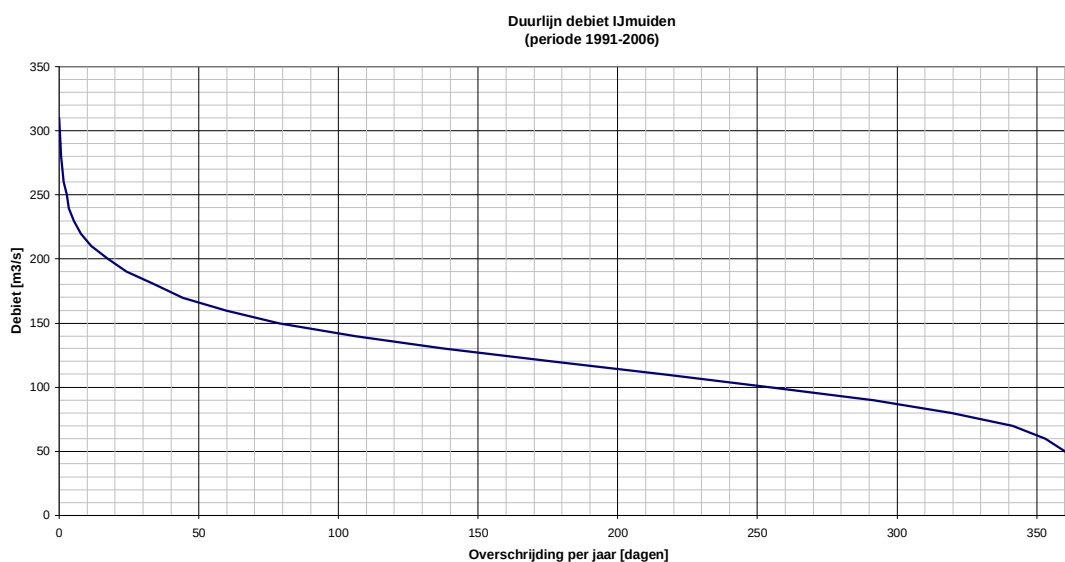
De spuisluis bij IJmuiden bestaat uit 7 kokers. De afmeting van elke koker is 4,80 m x 5,90 m. De kokers bevinden zich te allen tijde onder water. In elke koker bevinden zich 2 stalen schuiven waarmee de afvoer kan worden geregeld. De schuiven worden geopend bij een verval van 15-20 cm en gesloten bij 12 cm om zoutindringing te voorkomen. Bij het berekenen van de stroomsnelheid is hier rekening mee gehouden. Dit veroorzaakt de vrij abrupte knik in het verloop in Figuur 2-21.

Zodra gespuid wordt, zijn de stroomsnelheden altijd hoger dan 2 m/s. De periode per dag waarin gespuid kan worden is echter slechts enkele uren per dag.

Figuur 2-22 geeft de overschrijding weer van een bepaald *daggemiddeld* debiet in aantal dagen per jaar. Uit Figuur 2-21 blijkt dat slechts een paar uur per dag gespuild wordt. Het gemiddelde spuidebiet van dit aantal uren is in Figuur 2-22 als het gemiddelde over 24 uur beschouwd. Beide grafieken mogen daarom niet los van elkaar worden geïnterpreteerd.



Figuur 2-21: Duurlijn stroomsnelheid IJmuiden.

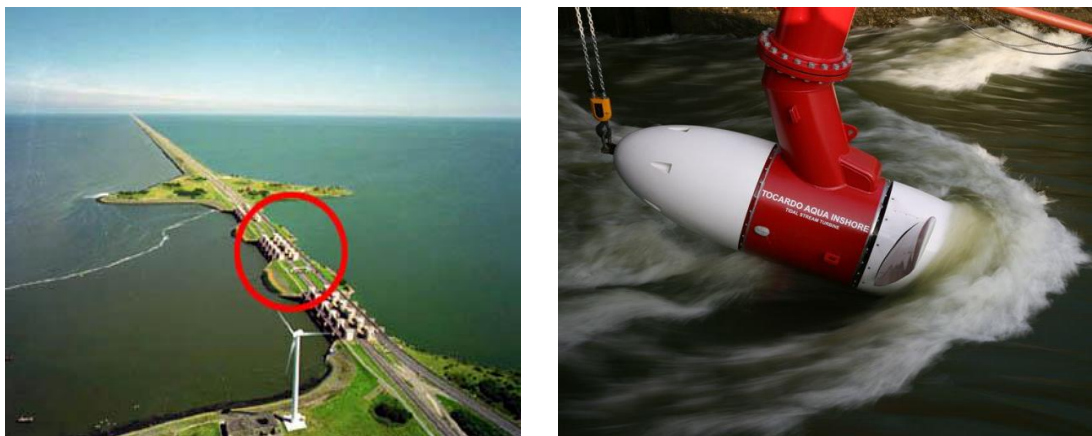


Figuur 2-22: Duurlijn daggemiddeld debiet IJmuiden.

2.3.13 Spuisluizen Afsluitdijk

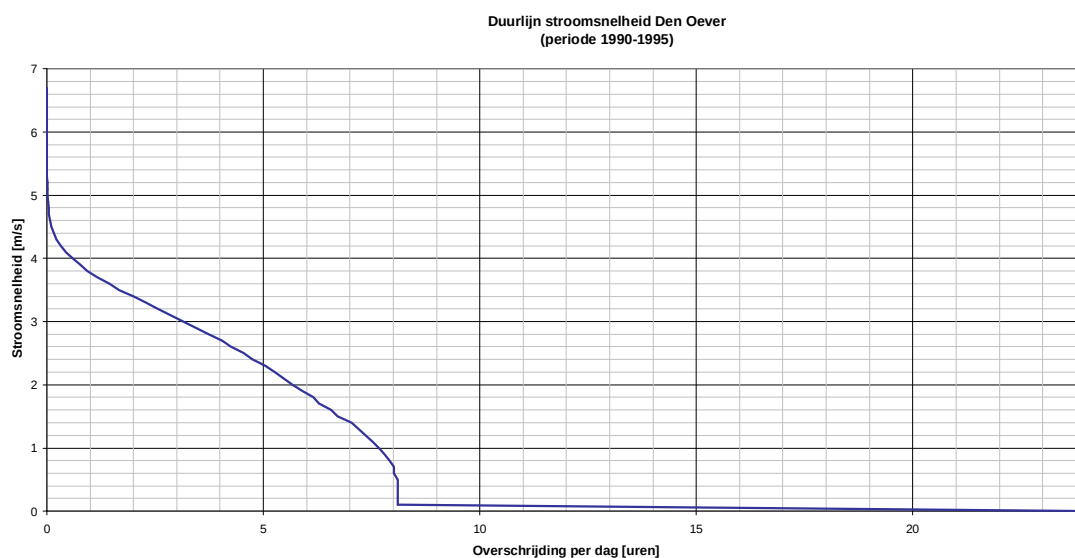
Op dit moment is een 45 kW Tocardo T50 turbine geïnstalleerd op een proeflocatie in Den Oever (Figuur 2-23). Voor een verdere beschrijving van deze turbine wordt

verwezen naar Annex 1 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning'.

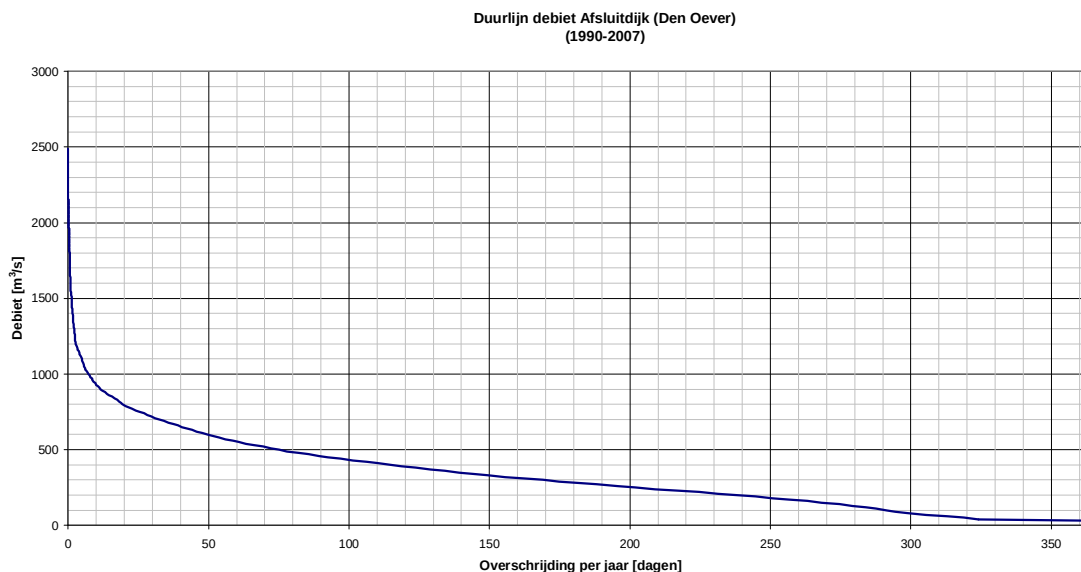


Figuur 2-23: Proeflocatie Tocardo T50 in Den Oever [BRON: WWW.TOCARDO.COM].

De gegevens van Den Oever zijn ondanks de proefopstelling wel geanalyseerd. Ook hier is de stroomsnelheid berekend op basis van het verval.



Figuur 2-24: Duurlijn stroomsnelheid Den Oever.



Figuur 2-215: Duurlijn daggemiddeld debiet spuisluizen Den Oever.

Bij Den Oever geldt net als bij IJmuiden dat Figuur 2-25 de overschrijding weergeeft van een bepaald *daggemiddeld* debiet. Uit Figuur 2-24 blijkt echter dat slechts een paar uur per dag gespuid wordt. Het gemiddelde spuidebiet van dit aantal uren is in Figuur 2-25 als het gemiddelde over 24 uur beschouwd. Beide grafieken mogen daarom niet los van elkaar worden geïnterpreteerd.

In de Afsluitdijk zijn bij Kornwerderzand ook 10 spuiokers aanwezig. De debieten en stroomsnelheden van deze spuisluizen zijn niet geanalyseerd. De verwachting is dat het debiet ongeveer 2/3 van het debiet bij Den Oever zal zijn. Dit is wel afhankelijk van het spuibeheer.

2.4 Conclusie

Voor de geanalyseerde stuwen geldt het volgende:

- Stuw Driel in de Neder-Rijn heeft gedurende 200 dagen per jaar een verval groter dan 1 m en een debiet groter dan 200 m³/s.
- De stuwen in de Maas hebben allen gedurende 250-300 dagen per jaar een verval groter dan 2,5 m. Het debiet is bovenstrooms in de Maas gedurende 150 dagen per jaar groter dan 200 m³/s. Verder benedenstrooms bij Lith is het debiet groter is gedurende 300 dagen per jaar 200 m³/s beschikbaar.
- De stroomsnelheid bij de bruggen is altijd lager dan 2 m/s. Alleen de Alblasterdamsebrug en Spijkenissebrug hebben stroomsnelheden die 12 uur per dag hoger zijn dan 1 m/s.
- Voor de spuisluizen geldt dat door het getij slechts een paar uur per dag kan worden gespuid. Bij IJmuiden zijn de stroomsnelheden slechts vier uur per dag hoger dan 2 m/s.
- Bij de Oosterscheldekering is het getij juist een voordeel, omdat de stroomsnelheden vrijwel de hele dag hoger zijn dan 1 m/s en 15 uur per dag hoger dan 2 m/s.

3 BEPALING VAN HET POTENTIEEL

3.1 Inleiding

Op basis van de analyse van de meerjarige meetreeksen kan een studie uitgevoerd worden naar de potentiële hydraulische energie die ter hoogte van kunstwerken kan worden opgewekt. In de voorliggende studie wordt energiewinning ter hoogte van de geselecteerde stuwen en spuisluizen bestudeerd (zie hoofdstuk 2). De aangeduide schutsluizen en bruggen (zie wederom hoofdstuk 2) worden niet verder geanalyseerd. Ter hoogte van de geselecteerde bruggen geldt immers dat de stroomsnelheden te laag zijn (< 1 m/s) gedurende een belangrijk gedeelte van de dag waardoor rendabele exploitatie van waterkracht in het gedrang komt. Bij schutsluizen is er nauwelijks of geen debietfunctie aanwezig. Bovendien zijn geen specifieke gegevens m.b.t. het aantal scheepvaartschuttingen door de sluis bekend wat een conceptstudie naar potentieel onmogelijk maakt.

In hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 wordt de mogelijkheid van energiewinning ter hoogte van schutsluizen respectievelijk bruggen wel theoretisch aangehaald.

Op basis van het verloop van het beschikbaar debiet over een gemiddeld jaar en het verval als functie van het beschikbaar debiet wordt op theoretische verantwoorde wijze het hydraulische energie potentieel bepaald.

Vervolgens dient op basis van dit energiepotentieel de technische wetmatigheden in rekening gebracht te worden. Dergelijke wetmatigheden omvatten het optreden van wrijvingsverliezen, aanwezig zijn van verliezen bij het omzetten van mechanische naar elektrische energie en een aantal economische factoren. Van belang hierbij is de afweging van de kosten tegenover de opbrengsten bij toename of afname van de maximale capaciteit van een centrale.

Indien deze factoren in rekening gebracht worden, kan vanuit theoretisch oogpunt een optimale ontwerpcapaciteit van een turbine bepaald worden.

Nadien kan dan, rekening houdende met een aantal afwegingen van eerder pragmatische aard en met afwegingen van technische of andere randvoorwaarden, een concrete turbineconfiguratie voorgesteld worden (wordt niet behandeld in deze studie).

Het te berekenen potentieel wordt dus opgesplitst in het theoretische potentieel en het technische potentieel. Beide benaderingen worden in wat volgt kort uitgewerkt. Vooreerst wordt ingegaan op de gebruikte terminologie in dit rapport.

3.2 Terminologie

Ter verduidelijking worden voorafgaand aan de eigenlijke studie enkele begrippen eenduidig gedefinieerd:

- *Het (bruto) beschikbaar debiet:* hieronder wordt het debiet verstaan dat in de huidige toestand integraal over de stuw afgevoerd wordt. Dit debiet wordt bekomen door het debiet nodig voor de schutten van schepen langs de sluis in mindering te brengen van het volledige debiet dat bovenstrooms aangeboden wordt.
- *Het gereserveerde debiet:* een gedeelte van het bruto beschikbaar debiet dient in de praktijk prioritair aangewend te worden voor andere doeleinden (bijvoorbeeld voor bypass systeem voor vispassage) dan voor de opwekking van groene stroom. Deze

hoeveelheden worden best op voorhand vastgelegd zodat achter geen economisch nadelige gevolgen optreden.

- *Het (netto) turbineerbaar debiet:* dat is het debiet dat daadwerkelijk geturbineerd kan worden, in zoverre dat vanuit technisch en economisch oogpunt wenselijk is.
- *Het bruto verval:* dat is het verticale verschil in hoogte gemeten tussen het normale voorwaterpeil (stroomopwaarts) en het normale achterwaterpeil (stroomafwaarts).
- *Het netto verval:* dat is het werkelijke verval ter hoogte van de plaats waar het water effectief het hoogteverschil overbrugt, i.e. de plaats ter hoogte van de turbine. Het verschil met het bruto verval zit in de verschillende valhoogteverliezen die te wijten zijn aan de weerstand die de waterstroom ondervindt. Dergelijk weerstanden zijn bijvoorbeeld t.g.v. het vuilrooster, de instroom, de piping, bochtstukken, contracties, enz.

3.3 Theoretisch potentieel

3.3.1 Algemeen

Het theoretische potentieel, E_{th} , is de maximale hoeveelheid energie die op jaarbasis op een locatie beschikbaar is. Deze energie is gelijk aan het verlies aan potentiële energie van de waterstroom:

$$E_{th} = \int_0^T P(t) \cdot dt \quad (\text{in kWh}) \quad (1)$$

In deze formule is $P(t)$ het vermogen in kW op een bepaald tijdstip en T het aantal uren in een beschouwde tijdperiode (bijvoorbeeld voor een jaar is $T = 8760$ uren). Het theoretische potentieel van een locatie, E_{th} , is dus het product van vermogen en tijd, waarbij het vermogen $P(t)$ in formule 1 gedefinieerd wordt als:

$$P(t) = \eta_t \cdot g \cdot Q(t) \cdot H(t) \quad (\text{in kW}) \quad (2)$$

Voor meer details omtrent formule 2 wordt de geïnteresseerde lezer verwezen naar Annex 1: 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning.

Het beschikbare vermogen $P(t)$ van een rivier op een bepaald punt en tijdstip wordt berekend op basis van afvoergegevens en vervalgegevens over een voldoende lange waarnemingsperiode (minstens 10 – 15 jaar). Uit deze gegevens wordt respectievelijk een debiet-frequentie curve en een verval-frequentie curve, die representatief zijn voor een gemiddeld jaar, opgesteld. Dergelijke curven geven het verloop weer van het bruto beschikbaar debiet en verval gedurende een gemiddeld jaar (zie hoofdstuk 2).

Voor een tijdsperiode van een jaar kan nu m.b.h. van de debiet- en vervalgegevens een eerste idee verkregen worden van het theoretisch potentieel.

3.3.2 Theoretisch opgewekt vermogen

Aangezien het verval en debiet niet constant zijn, varieert het aangeboden vermogen, $P(t)$, in de tijd. Zodoende kan niet zomaar ontworpen worden naar het maximale aangeboden vermogen P_{max} dat voortkomt in een gemiddeld jaar. De turbine zou dan overgedimensioneerd zijn aangezien qua rendementsoogpunt deze niet optimaal zou opereren bij de lagere, meer voorkomende, vermogenranges.

Het nominale vermogen van een turbine wordt bepaald door vooreerst het nominale debiet (uitbouwdebiet) te definiëren.

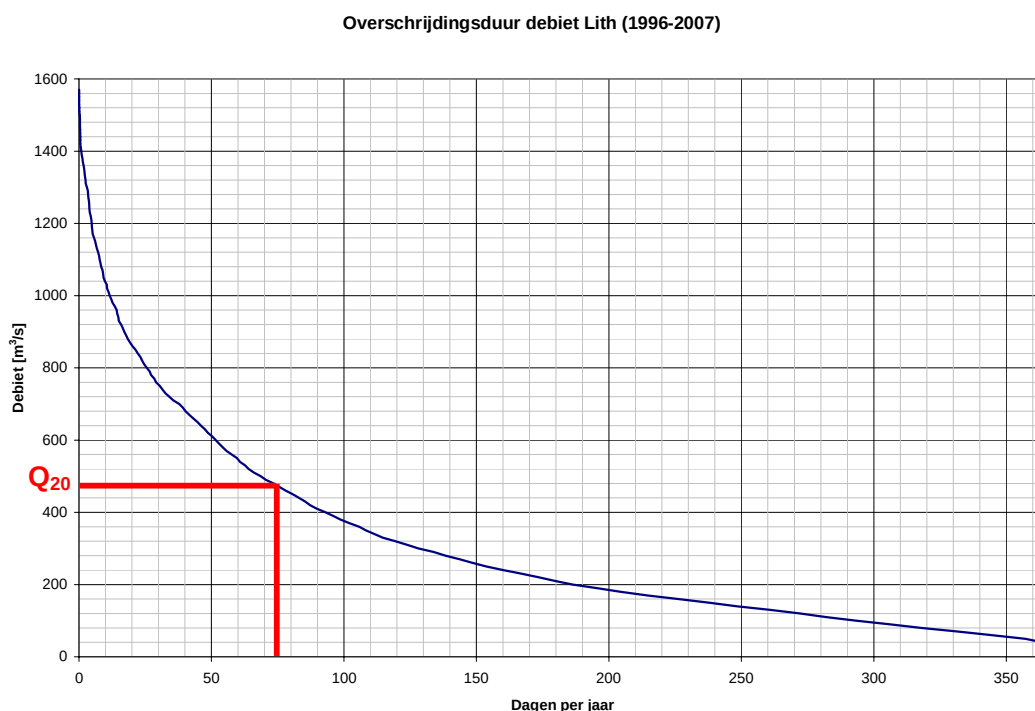
Uitbouwdebiet of capaciteit van een turbine

Bij bepaling van het geleverd vermogen is de grootte van het uitbouwdebiet van belang. Onder het uitbouwdebiet wordt verstaan de afvoer waarop een machine wordt gedimensioneerd. Een dergelijk debiet wordt bepaald uit de debiet-frequentie curve en is het beschikbare debiet dat gedurende een bepaalde tijd aangeboden wordt.

Uit de curve kunnen immers verschillende waarden gedistilleerd worden zoals bijvoorbeeld: Q_{20} , Q_{50} , Q_{80} , enz. Q_x is de ondergrens van het beschikbare debiet dat gedurende x% van een gemiddeld jaar aanwezig is. Het is dus een hoeveelheid water per tijdseenheid (uitgedrukt in m^3/s) die gedurende het percentage x van een gemiddeld jaar minimaal afgevoerd wordt.

Tegenwoordig wordt een uitbouwdebiet gehanteerd voor de dimensionering van de turbines dat slechts 60 tot 100 dagen overschreden wordt. Dit is mogelijk aangezien de hedendaagse turbines of motoren vlakke rendementscurven hebben, i.e. hoge rendementen die binnen een breed debietinterval gehaald worden.

In het geval van Grave is bijvoorbeeld $Q_{20} = 480 m^3/s$ het debiet dat 73 dagen overschreden wordt (zie figuur 3.1).



Figuur 3-1: Debiet-frequentie te Lith. In deze studie worden deze gegevens gebruikt te Grave (zie hoofdstuk 2).

Merk op dat enkel het meetpunt te Driel genomen is ter hoogte van de stuw (zie hoofdstuk 2). Een bepaald debiet dient nog in de andere gevallen voorbehouden te worden voor de scheepvaart. Dit 'gereserveerd' debiet kan in eerste instantie rekening

gebracht worden door een absoluut debiet in mindering te brengen van het beschikbaar debiet.

Bovendien wordt een gedeelte van het (bruto) beschikbaar debiet gereserveerd voor bijvoorbeeld het voeden van een visbypass. Een goede benadering is om in absolute waarde hiervoor ongeveer 5 m³/s in mindering te brengen van het aangeboden debiet.

De valhoogte wordt bepaald als functie van het (bruto) beschikbaar debiet. In normale omstandigheden wordt getracht het verval zo constant mogelijk te houden in de tijd. Het verval kan echter variëren onder invloed van schommelingen die meestal functie zijn van het af te voeren debiet.

Ontwerpvermogen

Met behulp van de duurlijnen voor afvoer en valhoogte en na keuze van het uitbouwdebiet kan vermogensdiagram geconstrueerd worden volgens formule 2.

De hoeveelheid energie die door een waterkrachtcentrale geleverd wordt in één jaar (formule 1) wordt voorgesteld door de oppervlakte onder het vermogensdiagram.

Het ontwerpvermogen van de turbine wordt soms benaderd door het gemiddelde vermogen. Dit kan echter tot onwerkbare resultaten leiden wat meestal het geval is in de Nederlandse rivieren. Als ontwerpvermogen wordt daarom gekozen voor een waarde die tussen de maximale en de gemiddelde waarde ligt [6].

$$P_R = \frac{P_{\max} - P_{\text{gem}}}{2} \quad (\text{in kW}) \quad (3)$$

Het vermogen P_R is dus het vermogen dat maximaal door de turbine opgewekt kan worden.

3.4 Technisch potentieel

De theoretische opbrengst wordt beperkt door verliezen eigen aan de volledige machine zoals turbineverliezen, generatorverliezen, enz. Deze verliezen werden besproken in het Bijlage 1 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht'. Deze verliezen werden vervat in het totale rendement η_t (zie ook formule 2).

Bemerkt dat ook de hydraulische verliezen hiermee in rekening gebracht zijn. Deze bestaan uit stromings- en wrijvingsverliezen in de inlaat en de uitlaat van de installatie maar ook uit verliezen van valhoogte in bochten en vernauwingen. Ook extra weerstanden zoals deze t.g.v. een vuilrooster (krooshekken) hebben een invloed op het totale rendement.

Een eerste goede benadering is om η_t gelijk te stellen aan 75% (axiale turbines) [1,3]. Hiermee brengen we ook de extra weerstanden in rekening. In wat volgt zullen de berekeningen uitgevoerd worden met dit rendement.

Vervolgens is het van belang om de jaaropbrengst van de turbine te beschouwen. Deze jaaropbrengst wordt enerzijds bepaald door de debietverliezen die op een bepaalde locatie optreden en anderzijds door de draaitijd.

Elk turbine heeft bij een gegeven valhoogte een maximum debiet dat kan worden verwerkt: het uitbouwdebiet. Een groter debiet moet elders worden afgevoerd en neemt niet deel aan de levering van groene stroom.

T.g.v. van onderhoudsredenen of door slijtage of beschadiging wordt een machine een aantal uren/dagen uit werking genomen. Hierdoor daalt de opbrengst of draairendement op jaarbasis. Deze invloeden worden in een eerste benadering in rekening gebracht door een correctie op T (formule 1) uit te voeren.

Nog andere verliezen kunnen volgen uit slecht eigengebruik van de machine. Voor een eerste benadering worden deze verliezen – afgezien van het buiten gebruik stellen van de turbines als gevolg van een te klein verval – achterwege gelaten.

4 STUWCENTRALES: OPBRENGST PER LOCATIE

4.1 Algemeen

Uit voorgaande kan nu theoretisch een idee gevormd worden van de mogelijke locaties. Bemerk dat het hier gaat om een eerste, goede schatting.

In wat volgt worden eerst de aannames voor de berekeningen opgesomd. Vervolgens worden de theoretische vermogenopbrengsten ter hoogte van de stuw van Belfeld, Driel, Grave, Roermond en Sambeek opgesomd. De tabellen met berekeningen zelf worden als bijlage toegevoegd.

Ten slotte wordt er nog een opmerking geformuleerd m.b.t. de sluiscentrale te Heel. Gezien het vrij grote beschikbare verval (ongeveer 6,5 m) ter hoogte van de sluis zou de aanwezigheid van een beperkt debiet een belangrijke energiewinning kunnen verzekeren.

4.2 Turbinekeuze

In het rapport 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning worden de technieken beschreven die inzetbaar zijn bij sites waar een bepaald verval aanwezig is. Een onderscheid kon gemaakt worden tussen nieuwe en bestaande technieken.

De bestudeerde locaties (paragraaf 4.3) hebben de karakteristiek dat relatief grote debieten (uitbouwdebieten tussen 200 – 400 m³/s) afgevoerd worden. Dit beperkt al enigszins de turbine- of motorkeuze.

Doorstroomturbines, waterraderen en schroefmotoren van Archimedes hebben het nadeel dat ze slechts lage debieten kunnen verwerken. Ontwerp naar een groter uitbouwdebiet zou leiden tot te grote diameters en/of een te groot aantal parallel geschakelde machines.

Axiale turbines zijn daarentegen wel in staat dergelijke debieten te verwerken. Gezien het debiet vrij belangrijk varieert in de tijd worden propeller turbines niet overwogen en wordt er dus geopteerd voor Kaplan turbines. Dergelijke turbines zijn rendabel voor kleine waterkrachtcentrales (geïnstalleerd vermogen tussen 2 MW – 10 MW, wat hier het geval is, zie bijlage 1). De machines scoren immers voor deze vermogenrange het hoogst vanuit rendementsoogpunt en hebben bovendien een vlakke rendementscurve in een breed debietinterval. Dit komt ook ten behoeve van de pay-back time van dergelijke machines.

Nog een voordeel zijn de relatief lage investeringskosten van de Kaplan turbines. Dit wordt echter grotendeels teniet gedaan door de hoge hydraulische eisen die aan het volledige systeem gesteld worden wat relatief hoge civiele kosten met zich meebrengt.

Een belangrijk nadeel bij inzet van Kaplan machines is de hoge vismortaliteit als gevolg van het drukverschil dat de waterstroom ondergaat in de machine en eventueel door contact met de rotorbladen. Maatregelen dienen worden genomen om vispassage te vermijden zoals een rooster met kleine maasgrootte (duur). Toch is volledige visafscherming onhaalbaar hoewel ook loksystemen gebruikt worden om de vissen naar de visbypass te leiden, weg van de turbine.

Een mogelijkheid zou zijn om een schroef van Archimedes of een waterrad parallel te schakelen met de Kaplan turbine(s) voor een beperkt uitbouwdebiet. Dergelijke machines zorgen een relatief veilige visdoorgang.

Naast de Kaplan turbines zou kunnen gekeken worden naar nieuwere systemen. Voor lage vervaltoepassingen met variabele debiet- en vervalfuncties zou een keuze gemaakt kunnen worden voor de VLH-turbine. Deze turbine heeft t.g.v. zijn opbouw een visvriendelijk karakter. Het nadeel is dat de eerste modellen slechts afvoeren tot 700 l/s verwerken waardoor de nieuwe technologie voorlopig niet in aanmerking komt. Bij Borgharen is het overwogen waard om dergelijke turbines te installeren. Daarmee is de energieopbrengst wel minder, maar wordt de vismortaliteit beperkt.

Ten slotte kan ook vanuit theoretisch oogpunt de Hydroring overwogen worden. Deze techniek is echter nog in prototypefase waardoor ook deze optie niet overwogen wordt.

4.3 Aannames

In hoofdstuk 3, paragraaf 3.4 werd een aanname gedaan van het totale rendement ($\eta_t = 75\%$) dat hier verder gehanteerd wordt.

Uit de debietanalyses blijkt dat het uitbouwdebiet bepaald wordt op een debiet Q_x . In deze studie wordt Q_{20} gehanteerd. In de durlijnen van het bruto beschikbaar debiet zijn de gereserveerde debieten nog niet in rekening gebracht. Een gedeelte van het bruto beschikbaar debiet wordt immers afgehouden voor scheepvaart (niet in Driel) en een bypass-systeem voor vispassage. Een goede benadering is dat 10 m³/s afgehouden wordt van het (bruto) beschikbaar debiet. In Driel zal slechts 5 m³/s worden gereserveerd.

Uit de vervalanalyses blijkt dat het verval over de stuw ongeveer constant wordt gehouden bij normale debieten. Enkel bij zeer hoge debieten zal het verval gevoelig dalen. Bij hogere debieten daalt het verval proportioneel met het debiet. Een correctie op het bruto verval werd reeds in rekening gebracht in het totale rendement η_t .

Ten slotte dient nog rekening gehouden te worden met de effectieve draaiuren van een turbine of motor. Uit bedrijfseconomisch standpunt wordt steeds gekozen voor meer dan een turbine zodat defecten, schadegevallen of gewoon onderhoud slechts een zeer beperkte impact hebben op de continuïteit van het elektriciteitsleveren. Verder bieden gestandaardiseerde machines vele voordelen t.o.v. 'tailor made'-machines. Een betrouwbare constructeur met een duidelijke catalogus van standaardmachines met gekende en gegarandeerde rendementen en minimale onderhoudskosten verdient de voorkeur.

In deze studie wordt niet onderzocht wat de optimale turbineconfiguratie zou zijn. Er wordt uitgegaan van het uitbouwdebiet om de opbrengst te berekenen. Hierbij wordt een virtuele turbine voorgesteld die het uitbouwdebiet verwerkt. Een correctie op T , i.e. het aantal draaiuren van deze virtuele turbine, wordt dan eenvoudig doorgerekend. Gezien in de realiteit twee of meer turbines geïnstalleerd worden nemen we een correctie factor van 90%. De virtuele turbine draait m.a.w. 90% van de tijd op jaarbasis.

4.4 Potentiële opbrengst per locatie

In onderstaande tabel worden de resultaten samengevat. In deze tabel wordt het ontwerpvermogen vermeld alsook de jaaropbrengst en het aantal gezinnen die door de waterkrachtcentrale voorzien kunnen worden. Het gemiddeld verbruik voor een gemiddeld gezin in Nederland op jaarbasis bedraagt 3600 kWh.

De details van deze berekeningen zijn terug te vinden in de bijlagen.

Locaties	Ontwerp vermogen (MW)	Jaarlijkse Energie- opbrengst (GWh/jaar)	Aantal gezinnen
Stuw Belfeld	5.0	16.3	4530
Stuw Driel	2.3	5.1	1408
Stuw Grave	7.5	28.4	7890
Stuw Roermond	6.5	18.6	5160
Stuw Sambeek	8.5	22.9	6345
<i>Totaal</i>	29.8	91.26	25333

Tabel 4-1: Overzicht van de potentiële opbrengst per locatie.

In Tabel 4-1 kan het theoretisch bepaalde ontwerpvermogen gezien worden als een te installeren vermogen. Uit de tabel volgt dus dat een totaal van ongeveer 30 MW geïnstalleerd vermogen extra kan uitgebouwd worden op de geselecteerde kansrijkste locaties. Dit zou een totaal van 91 GWh groene stroom op jaarbasis zou opleveren wat goed is om het verbruik van ongeveer 25300 gezinnen te dekken.

Bemerk ten slotte dat de sluiscentrale te Heel, gelegen naast de stuw van Linne (zie paragraaf 2.3.7), een belangrijk verval waarborgt (ongeveer 6,5 m). De debietfunctie ter hoogte van de schutsluis is afhankelijk van de scheepvaartpassage. Extra debiet onttrekken voor het aandrijven van een turbine zou debiet ontnemen aan de waterkrachtcentrale Linne.

Er zou echter geopteerd kunnen worden om een weinig, eventueel continu, debiet (bv. 20 m³/s) te laten lopen om profijt te hebben van het hoge verval en tegelijkertijd de negatieve gevolgen voor de centrale van Linne binnen de perken te houden. Dit zou een geïnstalleerd vermogen kunnen opleveren van 1,2 MW.

Rekening houdend met het vrij hoge verval en het belang van vismigratie, zou hier geopteerd kunnen worden voor een schroefmotor van Archimedes. De huidige uitvoeringen van de schroefmotor kunnen een maximaal debiet verwerken van 5,5 m³/s. Het doorvoerdebiet zal in deze situatie allicht wat lager zijn ten gevolge van het grote verval waardoor de motor grote afmetingen inneemt. Om een debiet van ongeveer 20 m³/s te verwerken kunnen dus meerdere schroeven, 5 tot 10, in parallel geschakeld worden. Uitvoeringen met of zonder meedraaiende mantel zijn hierbij mogelijk. De keuze zal afhangen van dimensioneringsbeperkingen en/of visvriendelijkheidseisen. Een uitvoering met meedraaiende mantel heeft enerzijds het nadeel een hoge belasting op de rotatieas uit te oefenen (eigengewicht en gewicht water) maar anderzijds heeft deze uitvoering het voordeel iets visvriendelijker te zijn.

Wordt tabel 4.1 erbij gehaald dan zou, bij installatie van een centrale van 1,2 MW te Heel, het totale nieuw te installeren vermogen op basis van verval in de Nederlandse rivieren 31 MW kunnen bedragen.

5 SPUISLUSCENTRALES: OPBRENGST PER LOCATIE

5.1 Algemeen

Drie locaties kunnen worden gezien als potentieel kansrijk voor de exploitatie van waterkracht. De geselecteerde locaties betreffen de spuisluizen van de Oosterscheldekering, spuisluizen van de Afsluitdijk en de spuisluizen van IJmuiden.

In alle drie de gevallen kan worden gekeken naar stromingsturbines die in sluiskokers in het water kunnen worden gehangen voor de exploitatie van de aangeboden kinetische energie van het water.

De bepaling van de potentiële opbrengst gebeurt grotendeels op basis van de methodologie gezien in hoofdstuk 3. Gezien hier echter geen sprake is van verval wordt er gerekend met de snelheidsduurlijnen (bepaald over een voldoende lange periode) per locatie. Deze duurlijnen werden opgesteld in hoofdstuk 2.

5.2 Turbinekeuze

Voor een overzicht van de stromingsturbines wordt de lezer verwezen naar het rapport 'Overzicht stand van techniek voor kleinschalige waterkracht' van Royal Haskoning (zie Annex 1). Als type van stromingsturbine zal voor de berekeningen de Tocardo turbine in acht genomen worden. De Tocardo turbine heeft immers een beperkte diameter (2,5 – 4,5 m) en kan hierdoor in smalle kokers geplaatst worden. Vanwege de eenvoudige opbouw kunnen er eventueel meerdere naast elkaar opgesteld worden. Bovendien is de turbine eenvoudig in en uit de stroming te kantelen. Dit in tegenstelling tot een eerder omvangrijk stromingswiel of KHPS turbine (Kinetic Hydropower System). Het toepassen van de UEK turbine (Underwater Electric Kite) lijkt eveneens een mogelijkheid. Toch kan de omhullende kap tot complicaties leiden m.b.t. ruimte-inname.

Nieuwe systemen worden voorlopig niet in acht genomen.

5.3 Aannames

De Tocardo turbine heeft een vermogenscoëfficiënt C_p van 42%. Deze factor geeft het effectieve vermogen aan dat vanuit de waterstroom overgedragen wordt op de as van de turbine. Verliezen zoals bijvoorbeeld het generatorrendement dienen dus nog in rekening gebracht te worden. Een goede aanname is om een extra rendementsfactor van 90% mee te nemen in de berekeningen bovenop de vermogenscoëfficiënt C_p . Het totale rendement van de installatie (water-to-wire rendement) is dan $\eta_t = 37.8\%$ (= product C_p met rendementsfactor).

Vervolgens dient rekening gehouden te worden met de werkelijke draaitijd van de turbine op jaarbasis. Het draairendement van de machine wordt in eerste instantie bepaald door de snelheidsduurlijnen.

De Tocardo turbine heeft een cut-in speed van 1 m/s. Onder deze stromingssnelheid wordt er vanuit gegaan dat de turbine niet in werking treedt. Een bovengrens wordt opgelegd door twee factoren. Enerzijds door het maximale vermogen van de turbine, i.e. 50 kW en anderzijds door de weerstand die de turbine in de koker creëert. Een bepaalde volumeverplaatsing door de kokers per tijdsinterval dient immers gegarandeerd te worden. Bij een te hoge afvoer kan het zijn dat aan deze eis niet meer voldaan wordt en bijgevolg de turbines uit de stroming getild moeten worden. Bovendien dienen de machines onderworpen te worden aan onderhoud. Ook dan worden zij uit werking genomen.

Om deze factoren theoretisch in rekening te brengen kan een extra reductiefactor vermenigvuldigd worden met de totale vermogensopbrengst op jaarbasis. Een coëfficiënt van 85% lijkt in eerste instantie een goede aanname.

Ten slotte kunnen drijvend of zwevend puin een gevoelige impact hebben op een goede operatie van de turbines. Het oplopen van schade is hierbij niet uitgesloten. Het is niet zo eenvoudig om doeltreffende maatregelen hiervoor te ondernemen. Het plaatsen van een rooster zou civieltechnisch een enorme meerkost betekenen. Het rooster creëert eveneens een extra weerstand en zou tot ophoping van puin kunnen leiden. Een extra mechanisme om het rooster uit de stroming te halen zou moeten voorzien worden.

De aannames die hier besproken werden kunnen nu gehanteerd worden op de jaarlijkse opbrengst per locatie in te schatten. Per locatie wordt specifiek gekeken naar de mogelijk inplantbare turbines. Deze situatie varieert immers per locatie.

5.4 Potentiële opbrengst per locatie

Op basis van bovenstaande aannames kan een eerste idee van het opwekbaar vermogen ter hoogte van de locaties gevormd worden. In onderstaande tabel worden de resultaten samengevat. In deze tabel wordt het ontwerpvermogen vermeld alsook de jaaropbrengst en het aantal gezinnen die door de waterkrachtcentrale voorzien kunnen worden. Het gemiddeld verbruik voor een gemiddeld gezin in Nederland op jaarbasis bedraagt 3600 kWh.

Locaties	Aantal turbines	Geïnstalleerd vermogen (kW)	Jaarlijkse Energie-opbrengst (MWh/jaar)	Aantal gezinnen
Spuisluizen Afsluitdijk	18	900	1124	312
Spuisluizen Oosterscheldekering	20	1000	3489	969
Spuisluizen IJmuiden	7	350	147	41
<i>Totaal</i>		2250	4760	1322

Tabel 5-1: Overzicht van de potentiële opbrengst per locatie.

In de volgende subparagrafen wordt kort uiteen gezet welke verdere aannames per locatie genomen worden. De details van de berekeningen zelf zijn terug te vinden in de bijlagen.

5.4.1 Spuisluizen in de Afsluitdijk

In de Afsluitdijk zijn 25 spuikokers voorzien. Elke spuikoker is 12 m breed. Dit biedt de mogelijkheid op per koker meerdere Tocardo turbines met een diameter van 3 m naast elkaar te plaatsen (bijvoorbeeld drie). Om dan per koker energiewinning mogelijk te maken dient de koker dan minimaal tot 5 m gevuld te worden zodat de turbines volledig ondergedompeld zijn. Indien de cut-in speed van een Tocardo turbine 1 m/s bedraagt vereist deze situatie een minimaal debiet van 60 m³/s per koker. Uit de debietgegevens blijkt dit bij hoge stroomsnelheden het geval te zijn. D.w.z. dat de het debiet geen beperking vormt voor de energiewinning bij hoge doorstroomsnelheden voor een koker.

Meerdere kokers zouden kunnen bezet worden met Tocardo turbines aangezien de Afsluitdijk uit 25 spuikokers bestaat. Bemerk dat voor elke koker dan een minimum debiet van 60 m³/s aangeboden moet worden om werking te garanderen. Het is al snel

duidelijk dat het vanuit economisch oogpunt van belang is om een hoge bezettingsgraad per kokers met Tocardo turbines te hebben.

Voor de berekeningen zal worden uitgegaan van drie turbines per koker. Kijkend naar de afvoergegevens zouden 6 van de 25 beschikbare kokers gekozen kunnen worden voor het plaatsen van de turbines (eerste aanname). Dit maakt een totaal van 18 Torcardo turbines met een maximaal vermogen van 50 kW. Dit levert een totaal geïnstalleerd vermogen van 0,9 MW op.

In deze situatie is een minimum debiet van 360 m³/s vereist om alle turbines te laten opereren. Gedurende de tijd dat hoge snelheden gemeten worden, is dit debiet uit debietgegevens beschikbaar.

Met in acht name van een goed 'kokerbeheer' zou kunnen geopteerd worden om meer kokers in te zetten. Goed 'kokerbeheer' zou betekenen dat afhankelijk van het debiet in eerste instantie een of meerdere kokers met turbines ingezet worden voor het spuien zodat maximale energiewinning op jaarbasis bevoordeeld wordt.

5.4.2 Oosterscheldekering

In de Oosterscheldekering zijn er 62 sluispoorten met een breedte van 42 m. Exploitatie van waterkracht ligt hier vrij moeilijk. De beschikbare doorstroomoppervlakte is momenteel nipt voldoende om de hoge debietafvoer te garanderen. Het bezetten van een aantal poorten met turbines zou enkel de weerstand verhogen.

In deze studie worden twee kokers benut voor energiewinning. Theoretisch kunnen er per poort 10 Tocardo turbines met een diameter van 3 m en maximaal vermogen van 50 kW per koker geplaatst worden. Dit levert een totaal geïnstalleerd vermogen van 1 MW op.

5.4.3 Spuisluizen IJmuiden

De spuisluis bij IJmuiden bestaat uit zeven kokers. Elke koker is 5,90 m breed en heeft een hoogte van 4,80 m. De kokers bevinden zich te allen tijde onder water. In elke koker bevinden zich twee stalen schuiven waarmee de afvoer kan worden geregeld.

De schuiven worden geopend bij een verval van 15 - 20 cm tussen boven- en benedenwaterstand en gesloten bij een verval van 12 cm om zoutindringing te voorkomen.

De zeven kokers kunnen voor een eerste aanname bezet worden met Tocardo turbines. De geïnstalleerde turbines zouden een diameter van 3 m hebben en een maximaal vermogen van 50 kW.

Bemerk dat hoge snelheden slechts gedurende een beperkte tijd voorkomen. Hier reist de vraag of exploitatie van waterkracht wel nuttig is.

6 SCHUTSLUISCENTRALES: THEORETISCHE MOGELIJKHEDEN

6.1 Inleiding

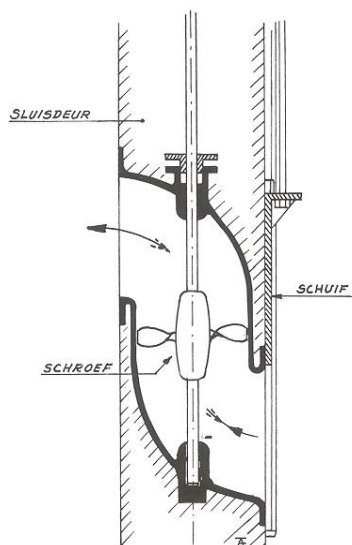
Zoals al aangehaald wordt een turbine gedimensioneerd op basis van een nominaal debiet en verval. Het opvangen van grote debietvariaties kan gebeuren door meerdere kleinere turbines te installeren. Dit is meestal het geval bij een stuwcentrale waar getracht wordt het verval vrij constant te houden gedurende een bepaalde tijd. Bij een toename van het afvoerdebiet worden dan systematisch turbines ingeschakeld.

Bij een sluiscentrale vormt dit al een ontwerpprobleem gezien er geen sprake is van een constant verval en debiet. Het op te wekken vermogen bij een sluiscentrale is niet afhankelijk van de condities bovenstrooms maar van het verval over de sluishoofden. De keuze van turbine is hier hoofdzakelijk afhankelijk van de inpassingsmogelijkheden en beschikbare ruimte.

6.2 Functioneel en ruimtelijk ontwerp sluiscentrale algemeen bekeken

Energiewinning door het verval over een schutsluis kan op enkele manieren gebeuren:

1. Turbines zouden bijvoorbeeld kunnen geplaatst worden in het vulsysteem van de sluizen met kleine vervallen. De kolk tussen de sluizen communiceert immers met het bovenwaterbekken en benedenwaterbekken via waterkanalen. De energie van het verplaatsende water zou op die manier benut kunnen worden. De vraag is of deze methode rendabel kan zijn gezien het aangeboden vermogen per turbine eerder laag is en vooral slechts op discrete tijdstippen aangeboden wordt.
2. Bij sluizen met grote vervallen worden doorgaans omloopriolen in combinatie met een woelkelder toegepast voor de energievernietiging. Een dergelijk type vulsysteem is veel omvangrijker dan het voorgaande en biedt daarom ook meer mogelijkheden voor de integratie van een waterkrachtcentrale.
3. Een derde mogelijkheid is het plaatsen van een turbine in de deuren van de sluis. In een van de sluizen van het Noordzeekanaal is een proef gedaan met een schroef in de sluisdeur. Het doel was echter niet het opwekken van groene netenergie maar het produceren van voldoende energie voor de aandrijving van sluisdeuren. Deze resultaten vielen echter tegen: de deuren vielen stil en moesten op andere manieren gesloten worden. Als de loopschoepen van de turbine verstelbaar zijn, kan een hoog rendement gehaald worden bij een variabel debiet waardoor deze optie mogelijkheden voor energiewinning. Uiteraard wordt dan de kolk gevuld via de sluisdeur. Het nadeel van dit systeem is echter dat de ontwerp mogelijkheden beperkt zijn. Het gewicht van deur en turbine mag niet te hoog worden. Bovendien is sowieso een bestaande, brede deur een vereiste. Nog een belangrijk nadeel is dat afval meegevoerd kan worden tijdens het nivelleren. De turbine wordt hieraan blootgesteld.



Figuur 6-1: Turbine in sluisdeur [4].

7 VRIJE STROMINGSTOEPASSINGEN: THEORETISCHE MOGELIJKHEDEN

7.1 Inleiding

Stromingsturbines, turbines die de kinetische energie van het water benutten, kunnen theoretisch eenvoudig geconstrueerd worden daar waar een kunstwerk aanwezig is in een stroming. Met een beperkte inspanning m.b.t. civiele constructies kan ter hoogte van het kunstwerk de turbine in het water gehangen worden zonder hierbij complexe inlaat- en uitlaat middelen te voorzien of zonder een verval te creëren. Om de exploitatie van waterkracht rendabel te maken dient de vrije stromingssnelheid ter hoogte van het kunstwerk relatief hoog te zijn gedurende een belangrijk deel van de tijd.

Locaties waar geen kunstwerk ter verankering van de turbine aanwezig is maar waar zich wel hoge stromingssnelheden voordoen, kunnen mits plaatsing van een verankeringmechanisme (bijvoorbeeld het plaatsen van een fundering) eveneens benut worden. Hier zouden de civiele kosten een beperking kunnen opleggen aan de exploitatie van waterkracht.

7.2 Theoretische mogelijkheden

Enkele situaties voor de exploitatie van waterkracht uit stromingsenergie kunnen voor ogen gehouden worden:

- Ter hoogte van bruggen kan aan energiewinning gedaan worden. Turbines zoals de Smartturbine kunnen aan een brugpeiler in de stroming gehangen worden waarbij een vermogen opgewekt kan worden. Het belangrijkste probleem hierbij is de passage van scheepvaart. Een dergelijke turbine komt letterlijk in het vaarwater te liggen van de scheepvaart. Het is immers zo dat de stromingskarakteristieken (stromingssnelheid, diepte) van een rivier optimaal zijn daar waar de scheepvaart eveneens passeert. Het plaatsen van turbines in deze doorgangen is daarom vaak uitgesloten. Een tweede nadeel is dat de stromingskarakteristieken in de regio van de peiler niet meer optimaal zijn. Er vindt opstuwung plaats voor de peiler waardoor de stromingssnelheid afneemt en lichte turbulentie ontstaat ter hoogte van de inlaat van de turbine. Het voordeel van de Smartturbine is dat de omhulling (convergerende/divergerende tunnel) deze nadelige invloed deels tegengaat.
- Er zijn heel wat turbines (bijvoorbeeld: Swanturbine, Diffuser Augmented Water Current Turbine, KHPS-turbine...) die, mits plaatsing van een fundering op de bodem van de rivier, exploitatie van waterkracht in snelstromende rivieren ($v > 1$ m/s) mogelijk maken. Deze turbines zijn meestal gebouwd op een peiler en zijn vrij om te roteren rond deze peiler met de richting van de stroming. Locaties waar hogere snelheden optreden in de Nederlandse rivieren doen zich vooral voor ter hoogte van vernauwingen in de rivier. Het dwarsprofiel van de rivier is dan kleiner voor hetzelfde doorstroomdebiet. Ook in de buitenzijde van bochten ontstaat er een snelheidstoename van de stroming. Opnieuw komen deze locaties in conflict met de scheepvaartdoorgangen waardoor uitbuiting van waterkracht op deze locaties moeilijk is.

In alle bovenstaande situaties dient rekening gehouden te worden met een aantal invloeden die exploitatie van waterkracht lastig kunnen maken. Belangrijk is de mogelijke schade van zwevend of drijvend puin. De turbines zouden op een eenvoudige

manier afgeschermd moeten worden om nadelige invloeden te vermijden. Het plaatsen van een rooster net voor de inlaat van de turbine zorgt echter wel voor een belangrijke weerstand. Een tweede nadeel is het effect van zomer- en winterbekken. Hierdoor wordt de turbine gedwongen meer in het midden van de stroming gehangen te worden en komt weer in conflict met de scheepvaart. Bij plaatsing tegen de oever zou de turbine in de zomer droog kunnen komen te staan.

Ten slotte dient rekening gehouden te worden met recreatiedoeleinden. Er moet gewaakt worden over menselijke activiteiten rond de turbines. Een drijvende boei zou als waarschuwingmiddel kunnen dienen.

8

REFERENTIES

1. Akkerman G.J., *Haalbaarheidsstudie waterkrachtcentrales Grave en Sambeek*. Bureau studie, Waterloopkundig Laboratorium, januari 1997.
2. ANWB, 2007. *Wateralmanak Vaargegevens*. Den Haag. ISBN 978-90-18-02449-9.
3. Barneveld H.J., Boogaard A., Callander S.J., *Waterkrachtcentrale Borgharen*. Verslag bureau studie, Waterloopkundig Laboratorium, oktober 1991.
4. Lammeren, van, S.A., *Sluiscentrales in Nederland: Een studie naar de haalbaarheid van waterkracht uit schutsluizen en spuisluizen*. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen, Afdeling Waterbouwkunde, 2003.
5. Lenstra, J., *Waterkracht, mogelijkheden voor ons land*. Stichting Energie Anders. Hoek van Holland, mei 1981.
6. Terwisga, van, R.H., *Waterkracht in de Maas en Nederrijn*. Vakgroep Waterbouwkunde, Afdeling der Civiele Techniek, Technische Hoogeschool Delft, 1982.

Bijlage 1

Totaallijst stuwen, sluizen en bruggen in beheer bij Rijkswaterstaat

Bijlage 1.1 – Totaaloverzicht stuwen in beheer bij Rijkswaterstaat

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam	Verval	Afvoer	Aanvullende Informatie
212953	443170	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	54.65	Stuw Amerongen	Amerongen	3.2	922	Waterkrachtcentrale aanwezig
212724	442279	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	24.00	Stuw Driel	Doorwerth	2.6-3.2	891.5	
243082	444841	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	78.10	Stuw Hagestein	Ossenwaard	1.4-2.5	946.8	Waterkrachtcentrale aanwezig
135564	370412	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	68.09	Stuw Belfeld	Baarlo	3.30		
150023	419906	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	140.87	Stuw Grave	Nederasselt	3.00	176.7	
134558	354092	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	0.95	Stuw Linne	Linne	3.30		Waterkrachtcentrale aanwezig
192162	350237	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	40.26	sluis Maasbracht	Maasbracht	11.80		Waterkrachtinitiatieven lopen hier
135770	358109	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	8.20	Stuw Roermond	Roermond	2.70		Waterkrachtcentrale aanwezig
134826	405815	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	113.50	Stuw Sambeek	Sambeek	3.25	146.6	
177026	319459	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	14.90	Stuw Borgharen	Borgharen	Ca 6 m (Varieert wel)		Plannen zijn uitgewerkt. Geen vergunning RWS door geen ruimte voor aanleg waterkrachtcentrale en vistrap. Vermogen van 7 MW en een elektriciteitsproductie van 30 GWh per jaar
158802	424435	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	166.30	Stuw Lith	Lith	3.70	200.9	Waterkrachtcentrale aanwezig

Bijlage1.2 – Totaaloverzicht (schut)sluizen in beheer bij Rijkswaterstaat

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam	Verval
177099	319796	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	126.68	Sluis Bosscheveld	Maastricht	3.65
189267	338486	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	27.24	sluis Born	Born	11.40
176838	411099	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	7.13	Sluis 0	's-Hertogenbosch	2.5
178625	406698	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	17.24	Sluis Schijndel	Schijndel	2.5
179789	402238	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	24.92	Sluis 4	Veghel	2.5
180051	398725	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	30.15	Sluis 5	Erp	2.5
180392	394565	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	35.33	Sluis 6	Beek en Donk	2.5
174651	386502	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	44.79	Sluis Helmond	Helmond	2.5
116666	380904	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	50.47	Sluis 10	Asten	2.5
181055	378584	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	53.47	Sluis 11	Asten	2.5
188235	373710	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	58.64	Sluis 12	Someren	2.5
142466	371334	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	61.03	Sluis 13	Someren-Eind	2.5
167343	364927	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	67.97	Sluis 15	Nederweert	2.5
117110	361831	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	74.50	Sluis 16	Weert	2.5
130518	365479	Noordervaart	0.22	Sluis Hulsen	Nederweert	0
125964	389940	Amertak en Wilhelminakanaal	40.35	Sluis IV	Haghorst	2.5
201379	391449	Amertak en Wilhelminakanaal	65.68	Sluis V	Lieshout	0
183931	400965	Amertak en Wilhelminakanaal	20.35	Sluis II	Tilburg	2.5
156644	399307	Amertak en Wilhelminakanaal	23.75	Sluis III	Tilburg	2.5
137705	399304	Amertak en Wilhelminakanaal	23.77	Sluis III	Tilburg	5
150152	473930	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	36.22	Sluis Delden	Ambt-Delden	7.00
159541	474069	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	45.10	Sluis Hengelo	Hengelo (Ov)	9.00
45616	455853	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	1.03	Muntsluis	Utrecht	
45814	451429	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	6.13	Noordersluis, Utrecht	Utrecht	
65653	450949	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	6.66	Zuidersluis, Nieuwegein	Nieuwegein	
59225	449380	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	0.11	Doorslagsluis	Nieuwegein	
70201	447455	Lekkanaal	2.72	Prinses Beatrixsluizen	Vreeswijk	
158181	474874	Vaarweg vanaf het IJmeer via de Randmeren naar het Ketelmeer	25.83	Nijkerkersluis	Nijkerk	0.25
148809	506357	Vaarweg vanaf het IJmeer via de Randmeren naar het Ketelmeer	70.76	Roggebotssluis	Dronten	0.25
176083	504309	Vaarweg van Amsterdam via de Houtribsluizen naar Lemmer	34.02	Houtribsluizen	Lelystad	0.25
171902	488282	Noordzeekanaal, Aangesloten-IJ en Buiten-IJ	26.52	Oranjesluizen	Schellingwoude	0.40
134652	517130	Zijtak naar het Zwarte Water via de Grote Kolksluis	0.76	Grote Kolksluis	Zwartsluis	
151629	372705	Toeleidingskanaal via de Oostsluis/Oostbuitenhaven naar de Westerschelde	0.52	Oostsluis, Terneuzen	Terneuzen	
132159	426965	Vaarweg van het Hollandsch Diep via de Goereesluis naar de Noordzee	32.32	Goereesluis	Stellendam	
147874	564714	Vaarweg van Urk naar Kornwerderzand	54.71	Lorentzsluizen	Kornwerderzand	1.00
160739	549289	Vaarweg van Enkhuizen naar Den Oever	32.17	Stevensluis	Den Oever	1.00
186761	522707	Vaarweg van Amsterdam via de Krabbersgatluizen naar Lemmer	31.42	Krabbersgatsluis	Enkhuizen	0.25
153020	522661	Vaarweg door het naviduct Krabbersgat	2.09	Naviduct Krabbersgat	Lelystad	0.25
192510	424845	Otterkanaal (n.o. gedeelte), Kikvorskil, Helsloot en Helkanaal	2.72	Helsluis	Dordrecht	

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam	Verval
196526	422860	Heusdensch Kanaal en Afgedamde Maas	12.59	Wilhelminasluis, Andel	Andel	
205454	411824	Vaarweg van het Hollandsch Diep naar de Schelde-Rijnverbinding, Krammer	2.08	Volkeraksluizen	Willemstad	
196320	412217	Jachtensluis-Volkeraksluizen en Hellegat	2.33	Volkeraksluizen, jachtensluis	Willemstad	
179287	422871	Wantij en Otterkanaal	7.30	Ottersluis	Dordrecht	
159581	421300	Vaarweg Nieuwe Merwede-Amer door de Spieringsluis	0.60	Spieringsluis	Werkendam	
187098	424074	Vaarweg Spijkerboor-Werkendam	11.12	Biesboschsluis	Werkendam	
184942	436897	Sluis te Krimpen aan den IJssel en voorhavens	0.24	Algerasluis	Capelle aan den IJssel	
146113	423201	Kanaal van Sint Andries	1.15	St. Andries, sluis	Heerewaarden	
158802	424435	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	166.30	Prinses Maxima Sluizen	Lith	3.70
164961	420056	Maas-Waalkanaal	1.43	Heumen, sluis	Heumen	0
176285	415698	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	0.73	Henriettesluis (Schutsluis Engelen)	Engelen	varieert
127572	406746	Markkanaal	0.50	Marksuis	Oosterhout	0.60
200212	406314	Amertak en Wilhelminakanaal	8.13	Sluis I	Oosterhout	2.5
243082	444841	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	78.10	Hagestein, sluis	Ossenwaard	1.4-2.5
110021	502549	Zwolle-IJsselkanaal, Zwarte Water, Zwolsche Diep, Ramsdiep en Schokkerf	0.73	Spoldersluis	Zwolle	
135957	463846	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanaalen	3.07	Voorsluis Eefde	Eefde	
152847	463902	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanaalen	3.31	Sluis Eefde	Eefde	6.50
49420	446628	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	11.52	Koninginnensluis	Vreeswijk	
45650	446932	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	32.63	Waaiersluis	Gouda	
70785	434897	Amsterdam-Rijnkanaal	71.64	Prins Bernhardsluis	Echteld	
74615	372842	Route via Middensluis/Westbuitenhaven naar de Westerschelde	1.83	Middensluis, Terneuzen	Terneuzen	
113278	372025	Kanaal van Gent naar Terneuzen met de Zijkanalen en havens	30.30	Westsluis, Terneuzen	Terneuzen	
131654	409420	Zuid-Grevelingen, Grevelingen, Geul van Bommenede, Rede Brouwershave	1.57	Grevelingensluis	Bruinisse	
62120	396111	Zandkreek en Veerse Meer	4.53	Zandkreeksluis	Kats	
99392	386230	Kanaal door Zuid-Beveland	8.34	Hansweert, sluis	Hansweert	
87585	408833	Vaarweg van het Hollandsch Diep naar de Schelde-Rijnverbinding, Krammer	22.31	Krammersluizen	Bruinisse	
86890	409179	Zuid Vlije, Jachtensluis Krammersluizen en Krammer-Sport	2.26	Krammerjachtensluis	Bruinisse	
111895	404678	Oosterschelde	43.40	Roempotsluis	Vrouwenpolder	
111859	391922	Tholensche Gat naar de Bergsediepsluis en Oosterschelde	3.70	Bergsediepsluis	Tholen	
119780	385138	Schelde-Rijnverbinding	24.65	Kreekraksluizen	Rilland	
192162	350237	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	40.26	sluis Maasbracht	Maasbracht	11.80
150023	419906	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	140.87	sluis Grave	Nederasselt	3.00
168816	429398	Maas-Waalkanaal	11.80	Weurt, sluis	Nijmegen	
130538	353996	Kanaal Wessem-Nederweert	2.68	Sluis Panheel	Panheel	5.00
212724	442279	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	24.00	Driel, sluis	Doorwerth	2.6-3.2 1.5
212953	443170	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	54.65	Amerongen, sluis	Amerongen	3.2
251745	354019	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	45.29	sluis Heel	Heel	6.40
134558	354092	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	0.95	sluis Linne	Linne	3.30
135770	358109	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	8.20	sluis Roermond	Roermond	2.70
135564	370412	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	68.09	sluis Belfeld	Baarlo	3.30
134826	405815	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	113.50	sluis Sambeek	Sambeek	3.25
70202	440717	Prinses Marijkesluis en Voorhavens	0.24	Prinses Marijkesluis	Rijswijk (Gld)	0
37109	442179	Amsterdam-Rijnkanaal	59.51	Prinses Irenesluis	Wijk bij Duurstede	3.50

Bijlage 1.3 – Totaaloverzicht bruggen in beheer bij Rijkswaterstaat

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
187773	557763	Kanaal van het Nieuwediep naar de Heeresloot	8.46	Hooibrug	Haskerdijken
235997	581510	Winschoterdiep, Rensel en havens te Winschoten	0.89	Hoge Euvelgunnerbrug	Groningen
236676	580268	Winschoterdiep, Rensel en havens te Winschoten	2.36	Gideonbrug (in A7)	Groningen
255820	576328	Winschoterdiep, Rensel en havens te Winschoten	22.54	Zuidbroek, brug in de N-33	Zuidbroek (Gr)
163870	563503	Vaarweg van het Johan Friskanaal (ten oosten van Heeg) naar Bolsward	13.62	Kruiswaterbrug	Bolsward
75154	435381	Calandkanaal met aanliggende havens	1.83	Calandbrug, verkeers-/spoorbrug	Rozenburg
74082	435496	Hartelkanaal	10.46	Harmsenbrug	Rotterdam
66952	439539	Hartelkanaal	18.95	Suurhoffbrug, verkeers-/spoorbrug	Rotterdam
182109	550348	Vaarweg van het Oudhof naar het Tjeukemeer	8.88	Scharsterrijnbrug	Scharsterbrug
236813	582872	Eemskanaal	1.17	Driebondsbrug	Groningen
254787	592700	Eemskanaal	21.78	Eelwerderbrug	Appingedam
158770	576751	Van Harinxmakanaal	2.17	Koningsbrug	Harlingen
177862	578775	Van Harinxmakanaal	22.59	Westergobrug	Deinum
96892	435395	Nieuwe Maas, Nieuwe Waterweg en Maasmond	5.84	Van Brienenoordbrug	Rotterdam
225140	550382	Vaarweg van Het Deel langs Akkrum en Gorredijk naar de Drentsche Hoofd	57.03	Witte-Wijksbrug	Hijersmilde
124765	483316	Weespertrekvaart	2.13	Duivendrechtsebrug	Duivendrecht
146181	415643	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	0.82	Henriettesluis, brug over bovenhoofd	Engelen
149248	411642	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	6.18	Orthenbrug	's-Hertogenbosch
149540	411432	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	6.55	Kasterenbrug	's-Hertogenbosch
150005	411108	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	7.11	Hinthamersbrug	's-Hertogenbosch
150121	411059	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	7.24	Sint-Anthoniebrug	's-Hertogenbosch
153655	410231	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	10.87	Den Dungenesebrug	Poeldonk
168016	399626	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	28.94	Erpsebrug	Keldonk
168814	398727	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	30.15	Sluis 5, brug over benedenhoofd	Erp
171899	394568	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	35.33	Sluis 6, brug over benedenhoofd	Beek en Donk
172693	393415	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	36.73	Beeksebrug	Beek en Donk
176837	380908	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	50.47	Sluis 10, brug over benedenhoofd	Asten
179640	374996	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	57.35	Brug Half Twaalf	Someren-Eind
179789	373710	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	58.64	Sluis 12, brug over benedenhoofd	Someren
180050	371337	Gekan, Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	61.03	Sluis 13, brug over benedenhoofd	Someren-Eind
151507	565216	Vaarweg van Urk naar Kornwerderzand	55.23	Kornwerderzand, brug in de A-7	Kornwerderzand
151497	565259	Vaarweg van Urk naar Kornwerderzand	55.27	Kornwerderzand, brug in de A-7	Kornwerderzand
131797	549734	Vaarweg van Enkhizen naar Den Oever	32.74	Den Oever, brug in A-7	Den Oever
131767	549768	Vaarweg van Enkhizen naar Den Oever	32.79	Den Oever, brug in A-7	Den Oever
90764	464142	Vaarweg van het Rijn-Schiekanaal naar Katwijk	3.62	Leiden, brug in de A-44	Leiden
147957	522795	Vaarweg van Amsterdam via de Krabbersgatsluizen naar Lemmer	31.54	Krabbersgatsluis, brug over buitenhoofd	Enkhizen
116666	406746	Markkanaal	0.50	Vrachelsebrug	Oosterhout
160739	474874	Vaarweg vanaf het IJmeer via de Randmeren naar het Ketelmeer	25.83	Nijkerkersluis, brug over benedenhoofd	Nijkerk
186745	506458	Vaarweg vanaf het IJmeer via de Randmeren naar het Ketelmeer	70.86	Zwolsse Brug	Dronen
201773	516930	Meppelerdiep	0.30	Meppelerdiepbrug	Zwartsluis
201385	517134	Zijtak naar het Zwarte Water via de Grote Kolksluis	0.75	Grote Kolksluis, brug over binnenhoofd	Zwartsluis
201323	517093	Zijtak naar het Zwarte Water via de Grote Kolksluis	0.83	Grote Kolksluis, brug over buitenhoofd	Zwartsluis
158185	504389	Vaarweg van Amsterdam via de Houtribsluizen naar Lemmer	34.10	Houtribsluizen, brug over midden sluis	Lelystad
134637	455788	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	1.13	Muntsluis, brug over bovenhoofd	Utrecht
134964	455451	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	1.61	Muntbrug	Utrecht
134776	446360	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	11.79	Emmabrug, Nieuwegein	Nieuwegein
134826	446631	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	11.52	Wilhelminabrug, Nieuwegein	Nieuwegein
131659	422853	Heusdensch Kanaal en Afgedamde Maas	12.58	Wilhelminasluis, Andel, brug over bovenhoofd	Andel
133033	482098	Vecht	41.76	Vechtbrug, Muiden	Muiden
133314	482503	Vecht	42.25	Groote Zeesluis, Muiden, brug over binnenhoofd	Muiden

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
275993	578331	Westerwoldse Aa, Pekel-Aa en Pekelerhoofd	6.59	Nieuweschan, brug in de A-7	Nieuweschan
109561	493993	Vaarweg Noordzeekanaal-Spaarne-Kagerplassen	0.26	Buitenhuizerbrug	Buitenhuizen
107804	492706	Vaarweg Noordzeekanaal-Spaarne-Kagerplassen	2.49	Spaarndam, brug in de A-9	Spaarndam
97958	471003	Vaarweg Noordzeekanaal-Spaarne-Kagerplassen	29.44	Kaagbrug	Sassenheim
124891	450948	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	14.62	Montfoort, brug	Montfoort
119561	448247	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	21.80	Cosijnbrug	Oudewater
87000	415007	Vaarweg van het Hollandsch Diep via de Goereesluis naar de Noordzee	3.06	Haringvlietbrug	Numansdorp
62151	426939	Vaarweg van het Hollandsch Diep via de Goereesluis naar de Noordzee	32.28	Goereesluis, brug over binnenhoofd	Stellendam
62020	427051	Vaarweg van het Hollandsch Diep via de Goereesluis naar de Noordzee	32.46	Goereesluis, brug in de N-57	Stellendam
45616	372842	Route via Middelsluis/Westbuitenhaven naar de Westerschelde	1.83	Middelsluis, Terneuzen, brug over binnenhoofd	Terneuzen
45578	373008	Route via Middelsluis/Westbuitenhaven naar de Westerschelde	2.00	Middelsluis, Terneuzen, brug over buitenhoofd	Terneuzen
45814	372704	Toeleidingskanaal via de Oostsluis/Oostbuitenhaven naar de Westerschelde	0.52	Oostsluis, Terneuzen, brug over binnenhoofd	Terneuzen
45776	373052	Toeleidingskanaal via de Oostsluis/Oostbuitenhaven naar de Westerschelde	0.87	Oostsluis, Terneuzen, brug over buitenhoofd	Terneuzen
200310	502675	Zwolle-IJsselkanaal, Zwarte Water, Zwolsche Diep, Ramsdiep en Schokkerh	0.89	Spooldersluis, brug over binnenhoofd	Spoolde
185873	514137	Zwolle-IJsselkanaal, Zwarte Water, Zwolsche Diep, Ramsdiep en Schokkerh	34.59	Ramspolbrug	Ens
233592	580244	Noord-Willemskanaal	27.09	Julianabrug, Groningen	Groningen
65542	409519	Zuid-Grevelingen, Grevelingen, Geul van Bommenede, Rede Brouwershaver	1.72	Grevelingensluis, brug in de N-59	Bruinisse
65525	409532	Zuid-Grevelingen, Grevelingen, Geul van Bommenede, Rede Brouwershaver	1.74	Grevelingensluis, fietsbrug over binnenhoofd	Bruinisse
120438	544498	Balgzandkanaal, Amstelmeer en Waardkanaal	6.08	Balgzandbrug	Van Ewijcksluis
99363	436816	Sluis te Krimpen aan den IJssel en voorhavens	0.33	Algerabrug	Krimpen aan den IJssel
49420	396111	Zandkreek en Veerse Meer	4.53	Zandkreeksluis, brug over buitenhoofd	Kats
58994	390727	Kanaal door Zuid-Beveland	3.82	Postbrug	
59036	387584	Kanaal door Zuid-Beveland	6.97	Vlakebrug	Schorebrug
59225	386230	Kanaal door Zuid-Beveland	8.34	Hansweert, sluisdeur in binnenhoofd	Hansweert
59282	385944	Kanaal door Zuid-Beveland	8.63	Hansweert, sluisdeur in buitenhoofd	Hansweert
44666	361199	Kanaal van Gent naar Terneuzen met de Zijkanalen en havens	18.63	Sas van Gent, brug	Sas van Gent
46768	368318	Kanaal van Gent naar Terneuzen met de Zijkanalen en havens	26.40	Sluiskil, verkeers-/spoorbrug	Sluiskil
45650	372024	Kanaal van Gent naar Terneuzen met de Zijkanalen en havens	30.30	Westsluis, Terneuzen, Zuidbrug	Terneuzen
45502	372341	Kanaal van Gent naar Terneuzen met de Zijkanalen en havens	30.65	Westsluis, Terneuzen, Noordbrug	Terneuzen
87268	411558	Vaarweg van het Hollandsch Diep naar de Schelde-Rijnverbinding, Krammer	2.49	Volkeraksluizen, brug over benedenhoofd	Willemstad
70228	408833	Vaarweg van het Hollandsch Diep naar de Schelde-Rijnverbinding, Krammer	22.28	Krammersluizen, brug in de N-257	Bruinisse
70202	409179	Zuid Vlije, Jachtensluis Krammersluizen en Krammer-Sport	2.26	Krammerjachtensluis, sluisdeur in binnenhoofd	Bruinisse
70122	409176	Zuid Vlije, Jachtensluis Krammersluizen en Krammer-Sport	2.34	Krammerjachtensluis, sluisdeur in buitenhoofd	Bruinisse
95914	462499	Oude Rijn	49.07	Zoeterwoude-Rijndijk, brug in de A-4	Zoeterwoude-Rijndijk
116037	480683	Vaarweg van het Afgesloten-IJ naar de Oude Rijn	11.74	Schipholbrug, brug in de A-9	Schiphol-Oost
89151	438133	Vaarweg vanaf de Oude-Wetering via Leiden en Delft naar Rotterdam	48.18	Giessenbrug	Rotterdam
133369	442322	Merwedekanaal (bezuiden de Lek)	4.45	Bolgerijensebrug	Vianen
152934	423297	Kanaal van Sint Andries	1.28	St. Andries, brug in de N-322	Heerewaarden
108117	425216	Wantij en Otterkanaal	2.48	Wantijbrug, brug in de N-3	Dordrecht
111910	422846	Wantij en Otterkanaal	7.33	Ottersluis, voetbrug over buitenhoofd	Dordrecht
115946	497398	Zaan, Tap- of Tochtsloot, Markervaart en Alkmaardermeer	5.58	Coenbrug	Koog aan de Zaan
126363	487898	Noordzeekanaal, Afgesloten-IJ en Buiten-IJ	27.07	Schellingwouderbrug	Schellingwoude
37110	404678	Oosterschelde	43.40	Roompotsluis, sluisdeur in binnenhoofd	
37083	404680	Oosterschelde	43.43	Roompotsluis, sluisdeur in buitenhoofd	Vrouwenpolder
104176	424978	Oude Maas	1.90	Dordrecht, brug	Dordrecht
82869	430631	Oude Maas	26.57	Spijkensluisbrug	Spijkensluis
70785	391922	Tholensche Gat naar de Bergsediepsluis en Oosterschelde	3.70	Bergsediepsluis, brug over binnenhoofd	Tholen
74615	385138	Schelde-Rijnverbinding	24.65	Kreekraksluizen, sluisdeur in benedenhoofd	Rilland
74650	384813	Schelde-Rijnverbinding	24.98	Kreekraksluizen, sluisdeur in bovenhoofd	Rilland
181738	365757	Noordervaart	0.96	Leveroijse brug	Eind

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
182918	366402	Noordervaart	2.31	Niesakkerbrug	Kreijel
124339	426635	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	98.19	Merwedebrug, Gorinchem	Gorinchem
108023	426306	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	115.04	Merwedebrug, Papendrecht	Papendrecht
104509	430008	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	121.76	Alblasserdamsebrug	Alblasserdam
176751	317782	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	4.44	St. Servaasbrug	Maastricht
185073	429668	Maas-Waalkanaal	12.10	Weurt, brug over buitenhoofd	Nijmegen
135391	397678	Amertak en Wilhelminakanaal	29.25	Brug Enschootsestraat	Tilburg
135663	397187	Amertak en Wilhelminakanaal	29.82	Brug Bosscheweg	Tilburg
135857	396665	Amertak en Wilhelminakanaal	30.38	Brug Oisterwijksebaan	Tilburg
136366	395266	Amertak en Wilhelminakanaal	31.86	Trappistenbrug	Tilburg
138503	392173	Amertak en Wilhelminakanaal	35.72	Brug Biesthoutakker	Biest
139400	391392	Amertak en Wilhelminakanaal	36.92	Brug Holenakker	Biest-Houtakker
142463	389940	Amertak en Wilhelminakanaal	40.34	Sluis IV, brug over benedenhoofd	Haghorst
145497	389983	Amertak en Wilhelminakanaal	43.38	Brug Kattenberg	Landgoed Baest
146910	389999	Amertak en Wilhelminakanaal	44.79	Brug Groenewoud	Groenewoud
148660	390099	Amertak en Wilhelminakanaal	46.54	Brug Heuvel	Oirschot
160880	390627	Amertak en Wilhelminakanaal	59.15	Brug Houtens	Houtens
162299	390699	Amertak en Wilhelminakanaal	60.58	Hefbrug Son	Son
163508	390853	Amertak en Wilhelminakanaal	61.79	Brug Hooijdonk	Hooijdonk
165502	391164	Amertak en Wilhelminakanaal	63.81	Brug Stad van Gerwen	Stad van Gerwen
167412	391459	Amertak en Wilhelminakanaal	65.75	Sluis V, brug over bovenhoofd	Achterbosch
172563	392215	Amertak en Wilhelminakanaal	70.99	Brug Oranjelaan	Laarbeek
111903	421276	Vaarweg Nieuwe Merwede-Amer door de Spieringsluis	0.65	Spieringsluis, brug over benedenhoofd	Werkendam
119780	424066	Vaarweg Spijkerboor-Werkendam	11.11	Biesboschsluis, brug over binnenhoofd	Werkendam
100495	434920	Bakkerskil	2.32	Krimpen aan de Lek, brug	Krimpen aan de Lek
97053	435028	Zuiddiepje en Kreeksehaven	0.50	Van Brienenoordbrug	Rotterdam
187618	557739	Kanaal van het Nieuwediep naar de Heeresloot	8.62	Heabrege, brug in de A32	Haskerdijken
179765	554150	Vaarweg van het Sneekmeer door de Goengarijsterpoelen naar de Langw	7.26	Boornzwaag, brug in de A-7	Boornzwaag
193658	549147	Kuinder of Tjonger	10.47	Schoterbrug	Heerenveen
193707	549156	Kuinder of Tjonger	10.52	Skoaterbrege, brug in A32	Heerenveen
214175	591004	Stroomkanaal naar de Friese Sluis te Zoutkamp	10.88	Munnekezijl, brug	Munnekezijl
222210	597927	Mensingeweesterloopdiep, Hoornse Vaart of Hulpkanaal over den Hoorn en	9.44	Fietsbrug in de weg Leens - Wehe-den Hoorn	Leens
222213	597911	Mensingeweesterloopdiep, Hoornse Vaart of Hulpkanaal over den Hoorn en	9.46	Valgebrug	Leens
235969	587702	Boterdiep	4.05	Zuidwolde, brug in de N-46	Zuidwolde
259524	579060	Termunterzijldiep	2.88	Scheemderzwaag, brug in de A-7	Scheemderzwaag
174050	559460	Vaarweg van Sneek door de Woudvaart naar het Oudhof	1.03	Sneek, brug in de N-7	Sneek
186744	576054	Vaarweg van het Van Harinxmakanaal langs Wartena naar het Prinses Marg	0.15	Langdeelsbrug (brug in de N-31)	Boarnsterhim
198125	541939	Boven-Linde naar de stuw bij de voormalige Lindesluis	8.74	Wolvega, brug in de A-32	Wolvega
101807	410078	Roode Vaart of Zevenbergsche Haven	2.95	Moerdijk, brug in de A-17	Moerdijk
217324	439910	Oude IJssel	15.54	Doetinchem, brug in de A-18	Doetinchem
189014	553522	Vaarweg van het Prinses Margrietkanaal naar de Kuinder of Tjonger	13.27	Heerenveen, brug in de A-7	Heerenveen
179765	544190	Vaarweg van het Prinses Margrietkanaal naar de Ossenzijlersloot	4.01	Tjeukemeerbrug, brug in de A-6	
201456	447717	Oude Rivierarm bij De Steeg	0.14	Middachterbrug (in A348)	De Steeg
198162	561740	Vaarweg van Het Deel langs Akkrum en Gorredijk naar de Drentsche Hoofd	18.49	Terwispel, brug in de A-7	Terwispel
127547	510968	Beemsterringvaart	19.54	Beets, brug in de A-7	Beets
131129	547079	Den Oeversche Vaart en de geul door de Zuiderhaven van Den Oever	8.65	Robbenoord, brug in de A-7	Robbenoord
124453	483345	Weespertrekvaart	1.80	Duivendrecht, brug in verbindingsweg A-10	Duivendrecht
124590	483308	Weespertrekvaart	1.94	Duivendrecht, brug in de A-10	Duivendrecht
124704	483291	Weespertrekvaart	2.06	Duivendrecht, brug in de Gooiseweg	Duivendrecht
128385	481152	Weespertrekvaart	6.94	Amsterdam, brug in de A-9	Amsterdam-Zuidoost

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
108738	488504	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	8.08	Haarlemmerliede, brug in de A-9	Haarlemmerliede
115154	482965	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	18.38	Badhoevedorp, brug in de A-4	Badhoevedorp
115205	482930	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	18.44	Badhoevedorp, brug in de A-4	Badhoevedorp
115415	482784	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	18.69	Oude Rijkswegbrug, Badhoevedorp	Badhoevedorp
178491	555171	Fammens-Rakken	2.16	Boornzwaag over de Wielen, brug in de A-7	Boornzwaag over de Wielen
180258	577733	Sneekertrekvaart of Zwette	0.18	Leeuwarden, brug in de N-31	Leeuwarden
174551	517661	Nagelervaat	2.62	Nagele, brug in de A-6	Nagele
109772	504777	Vaargeul naar Uitgeest	2.65	Uitgeest, brug in de A-9	Uitgeest
147327	414002	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	2.92	Engelen, brug in de A-59 (Diezenbrug)	Engelen
152265	410558	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	9.44	Bosscheveldbrug, brug in de A-2	's-Hertogenbosch
160265	406102	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	18.82	Harry Kinnardbrug	Heeswijk
176719	381505	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	49.86	Kempen-Peellandbrug	Lierop
180411	368116	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	64.27	Brug 14	Nieuw- en Winnerstraat
180649	366033	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	66.37	Brug 15, Nederweert	Nederweert
180688	365734	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	66.67	Randwegbrug	Nederweert
180397	364929	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	67.96	Sluis 15, brug over benedenhoofd	Nederweert
179627	364598	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	68.80	Brug Rijksweg A2	Weert
178414	363935	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	70.19	Laarderbrug	Weert
174659	361835	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	74.49	Sluis 16, brug over benedenhoofd	Weert
176079	319799	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	126.68	Sluis Bosscheveld, brug over benedenhoofd	Maastricht
103146	414534	Nieuwe Merwede en Hollandsch Diep	22.38	Moerdijkbrug, brug in de A-16	Moerdijk
253264	563654	Vaarweg Veendam-Stadskanaal-Ter Apel	7.10	Wildervank, brug in de N-33	Wildervank
176906	556271	Gudsekop, Statenbocht en Hoitesloot	3.50	Uitwellingerga, brug in de A-7	Uitwellingerga
160745	472533	Toegangsgemaal, Arkervaat en haven van Nijkerk	2.26	Hardenbergerbrug	Nijkerk
136086	480909	Naardertrekvaart	3.61	Muiderberg, brug in de A-6	Muiderberg
136252	480808	Naardertrekvaart	3.80	Muiderberg, brug in de A-1 / A-6	Muiderberg
137948	479783	Naardertrekvaart	5.78	Naarden, brug in de A-1	Naarden
149502	470097	Eem en havens van Amersfoort	10.22	Baarn, brug in de A-1	Baarn
115106	453019	Dubbele Wiericke	6.05	Waarder, brug in de A-12	Waarder
89880	396075	Mark-Vlietkanaal en havens van Roosendaal	1.68	Roosendaal, brug in de A-17	Roosendaal
138072	482001	Vaarweg van de Pampusgeul naar het Gooimeer	8.70	Hollandse Brug	Muiderberg
150017	479517	Vaarweg vanaf het IJmeer via de Randmeren naar het Ketelmeer	12.57	Stichtse brug	Huizen
87659	437752	Schie en havens te Schiedam	2.01	Schiedam, brug in de A-20	Schiedam
196422	443065	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	4.92	Arnhem, brug in de A-12	Arnhem
205964	448152	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	20.36	Doesburg, brug	Doesburg
209707	459183	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	37.95	Brug Cortenoever	Zutphen
208213	471744	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	54.74	Deventer, brug in de A-1	Deventer
207630	473741	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	57.10	Wilhelminabrug, Deventer	Deventer
200529	501248	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	92.18	Katerveer, brug	Katerveer
200290	501563	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	92.58	Katerveer, brug in de A-28	Katerveer
191971	506194	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	105.85	Molenbrug, Kampen	Kampen
202278	503484	Stadsgrachten en havens te Zwolle	1.26	Beatrixbrug, Zwolle	Zwolle
206381	504830	Overijsselsche Vecht	28.27	Bruggenhoek, brug	Bruggenhoek
206370	504919	Overijsselsche Vecht	28.36	Bruggenhoek, brug in de A-28	Bruggenhoek
136058	452326	Merwedekanaal (benoorden de Lek)	5.18	Vierlingbrug	Utrecht
136937	417056	Heusdensch Kanaal en Afgedamde Maas	0.51	Wijk en Aalburg, brug in de N-831	Wijk en Aalburg
97211	470687	Sassenheimervaat	0.73	Sassenheimerbrug	Sassenheim
125488	476776	Holendrecht en Angstel (Abcoude-Loenersloot)	2.08	Abcoude, brug in de A-2	Abcoude
123128	482479	Duivendrechtse Vaart (industriehaven)	1.24	Duivendrecht, brug in de A-10	Duivendrecht
132999	447840	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	2.96	Nieuwegein, brug in de A-2	Nieuwegein

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
123964	450153	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	15.86	Waardsebrug	Montfoort
122440	483539	Amstel-Gouwevaart (Amstel en Aarkanaal)	5.45	Utrechtse Brug	Amsterdam
121737	482902	Amstel-Gouwevaart (Amstel en Aarkanaal)	6.52	Rozenoordbrug, brug in de A-10	Amsterdam
121692	482826	Amstel-Gouwevaart (Amstel en Aarkanaal)	6.61	Rozenoordbrug, brug in de A-10	Amsterdam
121187	478625	Amstel-Gouwevaart (Amstel en Aarkanaal)	12.48	Amstelveen, brug in de A-9	Amstelveen
127660	464786	Heinoomsvaart, Geer, Bijleveld, Groote Heijcop, Kerkvaart en Danne	9.95	Breukelen, brug in de A-2	Breukelen
127758	464834	Heinoomsvaart, Geer, Bijleveld, Groote Heijcop, Kerkvaart en Danne	10.06	Breukelen, brug	Breukelen
127781	428652	Linge	1.96	Gorinchem, brug in de A-15	Gorinchem
142126	433327	Linge	28.13	Beesd, brug in de A-2	Beesd
148229	432980	Linge	36.75	Geldermalsen, brug in de N-833	Geldermalsen
91895	467626	Laeck, Spriet, Warmonderleede en Oegstgeesterkanaal	6.08	Oegstgeesterbrug	Oegstgeest
189838	553892	Deel, Monnikerak en Heeresloot	6.36	Heerenveen, brug in de A-7	Heerenveen
122857	477900	Bullewijk, Waver, Winkel, Vinkeveense Plassen, Geuzensloot, Angstel en t	1.89	Ouder-Amstel, brug in de A-9	Ouderkerk
127459	470590	Bullewijk, Waver, Winkel, Vinkeveense Plassen, Geuzensloot, Angstel en t	12.92	Loenersloot, brug in de A-2	Loenersloot
136160	449583	Lekkanaal	0.54	Overeindsebrug	Nieuwegein
135962	447469	Lekkanaal	2.70	Prinses Beatrixsluizen, brug over benedenhoofd	Vreeswijk
93674	402605	Mark en Dintel	25.80	Standdaarbuiten, brug in de A-17	Standdaarbuiten
86416	406500	Mark en Dintel	35.44	Zoombruggen in de A-29	Dinteloord
201025	503576	Zwolle-IJsselkanaal, Zwarte Water, Zwolsche Diep, Ramsdiep en Schokkerh	2.04	Voorsterbrug	Zwolle
191030	443073	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	15.74	John D. Frostbrug	Arnhem
181081	441554	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	27.19	Brug Heteren, brug in de A-50	Heteren
136271	445942	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	79.98	Hagesteinsebrug	Hagestein
133794	445524	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	82.61	Lekbrug, Vianen	Vianen
145205	484983	Vaarweg van de Hoge Vaart via Almere-Stad naar Lange Wetering	9.64	Almere, brug in de A-6	Almere
146319	484776	Lange Wetering	1.09	Almere, brug in de N-305	Almere
181020	524555	Lemster- en Zwolsevaart	16.23	Emmeloord, brug in de A-6	Emmeloord
225897	579452	Gave en Munniksloot naar Leekstermeer en Rodenervaat	1.79	Oostwold, brug in de A-7	Oostwold
236421	564570	Noord-Willemskanaal	10.17	Heidenheim, brug in de A-28	Vries
131201	531806	Vaarweg Stolpen-Schagen-Kolhorn-Medemblik-IJsselmeer	23.62	Hoomse brug (in de A7)	
99422	436796	Hollandsche IJssel	18.03	Algerabrug	Krimpen aan den IJssel
125728	486537	Amsterdam-Rijnkanaal	1.82	Amsterdamsebrug	Amsterdam
126335	485548	Amsterdam-Rijnkanaal	3.05	Zeeburgerbrug	Amsterdam
129600	482790	Amsterdam-Rijnkanaal	7.37	Brug Muiden	Diemen
130055	479502	Amsterdam-Rijnkanaal	10.71	Weesperbrug	Weesp
128996	470924	Amsterdam-Rijnkanaal	19.38	Loenerslootsebrug	Loenersloot
128194	464465	Amsterdam-Rijnkanaal	25.92	Breukelerbrug	Breukelen
131167	460652	Amsterdam-Rijnkanaal	30.92	Maarssebrug	Maarssen
133763	456665	Amsterdam-Rijnkanaal	36.05	Hogeweidebrug	Utrecht
134036	454574	Amsterdam-Rijnkanaal	38.16	De Meernbrug	Utrecht
135134	452537	Amsterdam-Rijnkanaal	40.48	Galecopperbrug	Utrecht
135579	451639	Amsterdam-Rijnkanaal	41.48	Jutphasebrug	Nieuwegein-Noord
137378	448568	Amsterdam-Rijnkanaal	45.10	Houtensebrug	Houten
141263	446355	Amsterdam-Rijnkanaal	49.68	Schalkwijksebrug	Schalkwijk
145407	444416	Amsterdam-Rijnkanaal	54.26	Goyerbrug	't Goy
150152	442179	Amsterdam-Rijnkanaal	59.51	Prinses Irenesluis, brug over binnenhoofd	Wijk bij Duurstede
152810	440658	Amsterdam-Rijnkanaal	62.59	Prinses Marijkesluis, brug over buitenhoofd	Rijswijk (Gld)
154269	439805	Amsterdam-Rijnkanaal	64.29	Ravenswaaijsebrug	Rijswijk (Gld)
157676	437214	Amsterdam-Rijnkanaal	68.57	Rooijensteijnsebrug	Tiel
159512	434974	Amsterdam-Rijnkanaal	71.56	Prins Bernhardsluis, brug in de A-15	Tiel
86793	412136	Jachtensluis-Volkeraksluizen en Hellegat	2.45	Volkeraksluizen, brug over jachtensluis	Willemstad

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
70216	409180	Zuid Vlije, Jachtensluis Krammersluizen en Krammer-Sport	2.25	Krammerjachtensluis, brug in de N-257	Bruinisse
124553	427483	Kanaal van Steenenhoek	2.20	Gorinchem, brug in de A-27	Gorinchem
164783	501710	Lage Vaart	27.03	Lelystad, brug in de A-6	Lelystad
146948	485812	Hoge Vaart	7.31	Almere, brug in de A-6	Almere
133820	454944	Oude Rijn	0.14	Oudenrijn, brug over keersluis	Oudenrijn
133741	454951	Oude Rijn	0.22	Oudenrijn, brug in de A-2	Oudenrijn
133647	454953	Oude Rijn	0.31	Oudenrijn, fiets/voetbrug	Oudenrijn
155289	388468	Beatrixkanaal	0.82	Best, brug in de A-58	Best
157737	383426	Beatrixkanaal	6.71	Eindhoven, brug in de A-2	Eindhoven
84844	453495	Vaarweg vanaf de Oude-Wetering via Leiden en Delft naar Rotterdam	29.53	Voorburg, brug in de A-12	Voorburg
83452	450833	Vaarweg vanaf de Oude-Wetering via Leiden en Delft naar Rotterdam	32.85	Het Fortuin, brug in de A-4	Rijswijk
186202	418539	Kraaijenbergse Plassen	0.79	Cuijk, brug in de A-73	Cuijk
93066	439686	Schie-Schiekanaal, Noorderkanaal, Rotte, Hennipsloot en Ringvaart van de Z	4.43	Rotterdam, brug in de A-20	Rotterdam
134849	443784	Merwedekanaal (bezuiden de Lek)	2.35	Vianen, brug in de A-2	Vianen (ZH)
132162	440842	Merwedekanaal (bezuiden de Lek)	6.39	Lexmond, brug in de A-27	Lexmond
126888	428763	Merwedekanaal (bezuiden de Lek)	21.16	Gorinchem, brug in de A-15	Gorinchem
163178	499417	Larservaart	0.56	Lelystad, brug in de A-6	Lelystad
86704	414275	Haringvliet, zuidelijke doorvaart Haringvlietbrug	1.72	Haringvlietbrug	Numansdorp
123866	491558	Noordhollandsch Kanaal	4.13	Amsterdam, brug in de A-10	Amsterdam
124292	502763	Noordhollandsch Kanaal	17.00	Purmerend, brug in de A-7	Purmerend
37096	404679	Oosterschelde	43.41	Noordlandbrug	Vrouwenpolder
72334	403318	Schelde-Rijnverbinding	5.22	Slaakbrug	Sint Philipsland
72815	400137	Schelde-Rijnverbinding	8.61	Vossemeersebrug	Nieuw-Vossemeer
74913	394850	Schelde-Rijnverbinding	14.73	Tholensebrug	Tholen
74815	382835	Schelde-Rijnverbinding	26.97	Kreekrakbrug in de N-289	Rilland
74828	382682	Schelde-Rijnverbinding	27.12	Kreekrakbrug in de A-58	Rilland
75140	379885	Schelde-Rijnverbinding	29.93	Bathsebrug	Bath
177097	320540	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	7.23	Limmel, brug over bovenhoofd	Maastricht
177943	322498	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	9.37	brug Itteren	Itteren
178706	324053	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	11.11	brug Bunde	Bunde
179876	326041	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	13.42	brug Geulle	Geulle
181268	329103	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	16.84	brug Elsloo	Elsloo
180929	330028	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	17.91	Scharbergbrug	Stein
180634	331297	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	19.36	brug Stein	Stein
181779	333555	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	21.89	brug Urmond	Urmond
182201	335018	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	23.42	brug Berg	Berg
183074	336718	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	25.34	brug Obbicht	Obbicht
183800	338639	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	27.40	Born, brug over benedenhoofd	Born
184510	340920	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	29.79	brug Illikhoven	Illikhoven
185712	343414	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	32.56	brug Roosteren	Roosteren
187357	346467	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	36.03	brug Echt	Echt
189388	350438	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	40.50	Maasbracht, brug over benedenhoofd	Maasbracht
190237	352378	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	42.64	Brug Wessem	Maasbracht
192236	354199	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	45.48	Heel, brug over benedenhoofd	Heel
194641	357198	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	49.39	Hornerbrug	Horn
181053	365479	Noordervaart	0.22	Sluis Hulsen, brug over benedenhoofd	Nederweert
69391	439323	Dintelhaven	0.49	Dintelhavenbrug, brug in de A-15	Rotterdam
188328	429341	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	25.67	Waalbrug, Nijmegen	Nijmegen
179143	433031	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	35.81	Ewijk, brug in de A-50	Ewijk
146276	425542	Boven-Rijn, Waal, Boven-Merwede, Beneden-Merwede en Noord	75.23	Martinus Nijhoffbrug	Zaltbommel

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
98114	465895	Zijp en Achtergat, Sting en Zuidzijdervaart	3.43	Oud-Ade, brug in de N-445	Oud-Ade
98576	464729	Zijp en Achtergat, Sting en Zuidzijdervaart	4.74	Hoogmade, brug in de A-4	Hoogmade
192620	354359	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	1.24	Linne, brug over benedenhoofd	Linne
196480	356713	Afgesneden Maas en havengebied te Roermond	6.78	Maasbrug	Roermond
189869	353199	Kanaal Wessem-Nederweert	0.86	Polbrug	Wessem
189064	353591	Kanaal Wessem-Nederweert	1.76	Trambrug	Panheel
188246	353991	Kanaal Wessem-Nederweert	2.67	Panheel, brug over benedenhoofd	Panheel
187302	354627	Kanaal Wessem-Nederweert	3.84	Napoleonsbrug-Zuid	Panheel
187288	354649	Kanaal Wessem-Nederweert	3.87	Napoleonsbrug-Noord	Panheel
185619	357419	Kanaal Wessem-Nederweert	7.10	Vosbergerbrug	Hunsel
184327	359601	Kanaal Wessem-Nederweert	9.64	Eilbrug	Eil
183653	360738	Kanaal Wessem-Nederweert	10.96	Kelperbrug	Kelpen
181512	364310	Kanaal Wessem-Nederweert	15.12	Schoorbrug	Schoor
190065	352586	Maas van Wessem naar Ohe en Laak	0.65	Brug Wessem	Wessem
159585	424600	Stuwkanaal Lith	0.90	Lith, voetbrug over stuw	Lith
177011	316926	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	3.54	John F. Kennedybrug, Maastricht	Maastricht
176730	318047	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	4.71	Wilhelminabrug, Maastricht	Maastricht
207900	374372	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	73.11	Zuiderbrug, Venlo	Venlo
208305	378741	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	78.18	Noorderbrug, Grubbenvorst	Grubbenvorst
204384	395707	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	98.64	Koninginnebrug, Well	Well (L)
194901	408474	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	116.75	Boxmeer, brug in de A-77	Boxmeer
194508	411754	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	120.08	Gennep, brug	Gennep
186144	418963	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	133.07	Heumen, brug in de A-73	Heumen
179145	420133	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	141.14	Grave, brug over benedenhoofd	Nederasselt
174072	422908	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	147.35	Ravenstein, brug in de A-50	Ravenstein
149269	416672	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	182.70	Empel, brug in de A-2	Empel
146807	416786	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	185.29	Hedel, brug	Hedel
120677	414652	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	213.16	Keizersveer, brug in de A-27	Keizersveer
186276	421879	Maas-Waalkanaal	3.43	Maldense brug	Malden
184099	427751	Maas-Waalkanaal	9.95	Neerbossche brug	Nijmegen
117361	410201	Amertak en Wilhelminakanaal	3.84	Ir. Hamersbrug, in de A-59	Oosterhout
136089	396013	Amertak en Wilhelminakanaal	31.07	Tilburg, brug in oude rijksweg Tilburg - Eindhoven	Tilburg
136335	395347	Amertak en Wilhelminakanaal	31.78	Tilburg, brug in de A-58	Tilburg
148759	390107	Amertak en Wilhelminakanaal	46.64	Oirschot, brug in de A-58	Oirschot
151594	390026	Amertak en Wilhelminakanaal	49.51	Miekoeksebrug	Oirschot
157012	390157	Amertak en Wilhelminakanaal	55.21	Wilhelminabrug, Best	Best
157215	390277	Amertak en Wilhelminakanaal	55.45	Airbornebrug in de A-2	Best
161039	390635	Amertak en Wilhelminakanaal	59.31	Houtens, brug in A-50	Houtens
171407	391837	Amertak en Wilhelminakanaal	69.77	Laar, brug in de Laarweg	Laar
127105	411922	Haven van Sprang-Capelle of Capelse Haven	1.85	Sprang-Capelle, brug in de A-59	Sprang-Capelle
231438	557321	Drentsche Hoofdvaart	0.39	Kloosterveen, brug in A28	Kloosterveen
210012	527151	Drentsche Hoofdvaart	38.55	Havelte, brug in de A-32	Havelte
250127	528132	Hoogeteense Vaart en Verlengde Hoogeteense Vaart	47.96	Holsloot, brug in de N-34	Holsloot
251082	527320	Hoogeteense Vaart en Verlengde Hoogeteense Vaart	49.21	Den Hool, brug in de N-37 (Veenstukken)	Den Hool
211725	463703	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	2.05	Eefdesbrug	Eefde
212939	463899	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	3.29	Sluisbrug, Eefde	Eefde
217001	464574	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	7.43	Almensebrug	Almen
219309	464641	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	9.74	Ehzerbrug	Almen
220780	464684	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	11.21	Dochterensebrug	Groot Dochteren
223949	464760	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	14.38	Exelsebrug	Lochem

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
225797	464640	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	16.23	Lochemsebrug	Lochem
228548	465789	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	19.30	Mogezompse brug	
229865	466887	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	21.01	Grensbrug	
232008	468518	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	23.71	Markelosebrug	
233357	469672	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	25.49	Diepenheimsebrug	Diepenheim
236439	471299	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	29.04	Weldammerbrug	Goor
238057	471709	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	30.71	Hengelerbrug	Goor
240655	472861	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	33.55	Dorrebbrug	Wiene
243070	473922	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	36.20	Delden, brug over benedenhoofd	Ambt-Delden
244565	474621	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	37.88	St. Annabrug	Delden
246032	474647	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	39.35	Vossenbrinkbrug	Delden
248346	474551	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	41.67	Loofriet, brug in de A-35	Oele
249247	474477	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	42.57	Oelerbrug	Hengelo (Ov)
250738	474226	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	44.08	Boekelose brug	Hengelo (Ov)
254327	472515	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	48.21	Lonnekerbrug	Enschede
241321	473828	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	0.76	Tankinkbrug	Wiene
241193	474513	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	1.46	Cottwicherbrug	Delden
240757	476944	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	3.93	Warmtinkbrug	Delden
240446	479056	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	6.07	Linschotbrug	Deldenerbroek
240033	480879	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	7.94	Vredesbrug	Bornerbroek
239673	482438	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	9.54	Hoeselderbrug	Almelo
239291	483672	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	10.83	Leemslagenbrug	Almelo
238913	486063	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	13.28	Wierdense brug	Almelo
117423	505807	Knollendamervvaart	3.88	Spijkerboor, brug	Spijkerboor
172474	513903	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	128.21	Ketelbrug	Swifterbant
118177	483486	Vaarweg van het Afsesloten-IJ naar de Oude Rijn	7.34	Schinkelbrug, brug in de A-10	Amsterdam
118183	483389	Vaarweg van het Afsesloten-IJ naar de Oude Rijn	7.44	Schinkelbrug, brug in de A-10	Amsterdam
117110	406315	Amertak en Wilhelminakanaal	8.13	Sluis I, brug over benedenhoofd	Oosterhout
132601	398931	Amertak en Wilhelminakanaal	25.86	Brug Dr. Deelenlaan	Tilburg
133470	398843	Amertak en Wilhelminakanaal	26.74	Brug Waalstraat	Tilburg
134024	398935	Amertak en Wilhelminakanaal	27.31	Brug Lijnsheike	Tilburg
134850	398403	Amertak en Wilhelminakanaal	28.35	Brug Heikantsebaan	Tilburg
73802	435209	Scheepvaartkanaal en Voedingskanaal en Brielse Meer	10.69	Brielse brug	Brielle
119478	404663	Amertak en Wilhelminakanaal	11.34	Oosterhoutsebrug, in de A-27	Oosterhout
122374	403861	Amertak en Wilhelminakanaal	14.34	Rijensebrug	Dongen
132748	398904	Amertak en Wilhelminakanaal	26.01	Tilburg, brug in de Midden-Brabantweg (N261)	Tilburg
209405	521096	Hoogeveense Vaart en Verlengde Hoogeveense Vaart	3.02	Meppel, brug in Rijksparellwegde N-32	Meppel
209454	521104	Hoogeveense Vaart en Verlengde Hoogeveense Vaart	3.07	Meppel, brug in de A-32	Meppel
227616	525478	Hoogeveense Vaart en Verlengde Hoogeveense Vaart	23.45	Hoogeveen, brug in de A-28	Hoogeveen
251727	474072	Kanaal Zutphen-Enschede van de Twenthekanalen	45.08	Hengelo, brug over benedenhoofd	Hengelo (Ov)
156298	407946	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	14.42	Malroise brug	Middelrode
176285	386507	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	44.78	Sluis Helmond, fietsbrug over benedenhoofd	Helmond
179062	420071	Stuwkanaal Grave	0.89	Grave, brug over stuw	Grave
187053	510709	Geldersche IJssel, Keteldiep en Ketelmeer	112.89	Eilandbrug, Kampen	Kampen
175426	579944	Vaarweg van Leeuwarden naar Berlikum	3.17	Menaldumervaaftsbrug, Zuidelijke rijbaan	
175402	579962	Vaarweg van Leeuwarden naar Berlikum	3.20	Menaldumervaaftsbrug, Noordelijke rijbaan	
133736	445502	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek	82.67	Jan Blankenbrug	Vianen
115127	453095	Dubbele Wiericke	6.13	Waarder, brug in de A-12	Waarder
185919	513974	Kattendiep en Ramsgeul	7.26	Ramspolbrug	Ens
255778	568431	Industriehaven te Veendam	0.77	Veendam, brug in de N-33	Veendam

X	Y	Vaartnaam	Meetpunt	Naam	Plaatsnaam
151286	480765	Hoge Vaart	14.10	Almere, brug in de A-27	
163031	403828	Gekan. Dieze, Zuid-Willemsvaart, Verbindingskanaal in het Bossche Veld	22.42	Julian J. Ewellbrug	Veghel
152846	440718	Prinses Marijkesluis en Voorhavens	0.24	Prinses Marijkesluis, brug over benedenhoofd	Rijswijk (Gld)
127561	510953	Beemsterringvaart	19.56	Beets, brug in de A-7	Beets
125400	492946	Trekvaart van Het Schouw naar Monnickendam	0.10	Het Schouw, brug	Het Schouw
108709	488496	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	8.05	Haarlemmerliede, brug in de A-9	Haarlemmerliede
108766	488512	Ringvaart van de Haarlemmermeerpolder (noordelijk gedeelte)	8.11	Haarlemmerliede, brug in de A-9	Haarlemmerliede
163193	499397	Larservaart	0.58	Lelystad, brug in de A-6	Lelystad
107231	405699	Mark en Dintel	10.01	Nieuwveer, brug in de A-16	Breda
49232	396088	Zandkreek en Veerse Meer	4.72	Hongersdijkbrug	Kats
134490	453675	Amsterdam-Rijnkanaal	39.17	Prins Clausbrug, Utrecht	Utrecht
116354	426040	Giessen	0.27	Hardinxveld-Giessendam, brug in A-15	Hardinxveld-Giessendam
164815	501729	Lage Vaart	27.06	Lelystad, brug in de A-6	Lelystad
74825	382724	Schelde-Rijnverbinding	27.08	Kreekrakbrug in de A-58	Rilland
176841	317422	Maas, Julianakanaal, Bergsche Maas en Amer	4.07	Hoegh Brok (Hoge brug), Maastricht	Maastricht
126591	485463	Amsterdam-Rijnkanaal	3.32	Nesciobrug	Amsterdam
191485	575448	Prinses Margrietkanaal	21.64	Fonejachtbrug	Warten
65642	409429	Zuid-Grevelingen, Grevelingen, Geul van Bommenede, Rede Brouwershaven	1.58	Den Ysere Ryve, brug	Bruinisse
157112	574790	Harlingervaart	2.60	Harlingen, brug in de N-31	Harlingen
110027	446929	Hollandsche IJssel (beoosten Gouda)	32.62	Waaiersluis, brug over bovenhoofd	Gouda
135965	447479	Lekkanaal	2.69	Beatrixbrug	Vreeswijk
239554	482853	Zijkanaal naar Almelo van de Twenthekanalen	9.97	Almelo, brug in A35	Almelo

Bijlage 2

Berekeningen energiepotentieel van de geselecteerde locaties

Belfeld

Type Turbine(s)	Kaplan
Totaal rendement	75%
Uitbouwdebiet (Q20)	340 m³/s
Minimaal debiet (per turbine)	30 m³/s
Minimale benodigde valhoogte	1 m
Draaiuren/dag	24
Werkelijke draaitijd turbine (jaarbasis)	90%
Gereserveerd debiet	10 m³/s
Gemiddeld Verbruik / Gezin (Nederland)	3600 kWh/jaar
<i>Theoretische energie-opbrengst</i>	<i>16.31 GW/jaar</i>
<i>Gezinnen</i>	<i>4531 gezinnen/jaar</i>
<i>Maximaal theoretisch vermogen</i>	<i>6.97 MW</i>
<i>Gemiddeld theoretisch vermogen</i>	<i>3.34 MW</i>
<i>Theoretisch ontwerpvermogen</i>	<i>5.16 MW</i>

Aantal dagen	Bruto Verval (cm)	Debiet (m³/s)	Netto debiet (m³/s)	Theoretisch Vermogen (kW)	Turb. Debiet (m³/s)	Turbine-vermogen (kW)	Draai-uren	Energie op-brengst (kWh)
0	334	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
5	332	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
10	330	20.00	10.00	323.73	0.00	0.00	0	0.00
15	328	30.00	20.00	643.54	0.00	0.00	0	0.00
20	326	30.00	20.00	643.54	0.00	0.00	0	0.00
25	326	30.00	20.00	639.61	0.00	0.00	0	0.00
30	326	30.00	20.00	639.61	0.00	0.00	0	0.00
35	326	30.00	20.00	639.61	0.00	0.00	0	0.00
40	324	30.00	20.00	635.69	0.00	0.00	0	0.00
45	324	30.00	20.00	635.69	0.00	0.00	0	0.00
50	324	40.00	30.00	953.53	0.00	0.00	0	0.00
55	322	40.00	30.00	947.65	0.00	0.00	0	0.00
60	322	40.00	30.00	947.65	0.00	0.00	0	0.00
65	320	40.00	30.00	941.76	0.00	0.00	0	0.00
70	320	50.00	40.00	1255.68	40.00	941.76	120	113011.20
75	318	50.00	40.00	1247.83	40.00	935.87	120	112304.88
80	318	50.00	40.00	1247.83	40.00	935.87	120	112304.88
85	318	50.00	40.00	1247.83	40.00	935.87	120	112304.88
90	316	60.00	50.00	1549.98	50.00	1162.49	120	139498.20
95	316	60.00	50.00	1549.98	50.00	1162.49	120	139498.20
100	314	60.00	50.00	1540.17	50.00	1155.13	120	138615.30
105	314	70.00	60.00	1848.20	60.00	1386.15	120	166338.36
110	312	70.00	60.00	1836.43	60.00	1377.32	120	165278.88
115	312	70.00	60.00	1836.43	60.00	1377.32	120	165278.88
120	310	80.00	70.00	2128.77	70.00	1596.58	120	191589.30
125	308	80.00	70.00	2115.04	70.00	1586.28	120	190353.24
130	308	80.00	70.00	2115.04	70.00	1586.28	120	190353.24
135	306	90.00	80.00	2401.49	80.00	1801.12	120	216133.92
140	306	90.00	80.00	2401.49	80.00	1801.12	120	216133.92
145	304	100.00	90.00	2684.02	90.00	2013.01	120	241561.44
150	304	100.00	90.00	2684.02	90.00	2013.01	120	241561.44
155	302	100.00	90.00	2666.36	90.00	1999.77	120	239972.22
160	302	110.00	100.00	2962.62	100.00	2221.97	120	266635.80
165	300	110.00	100.00	2943.00	100.00	2207.25	120	264870.00
170	298	120.00	110.00	3215.72	110.00	2411.79	120	289414.62
175	298	120.00	110.00	3215.72	110.00	2411.79	120	289414.62
180	296	130.00	120.00	3484.51	120.00	2613.38	120	313606.08
185	294	130.00	120.00	3460.97	120.00	2595.73	120	311487.12
190	292	140.00	130.00	3723.88	130.00	2792.91	120	335148.84
195	290	140.00	130.00	3698.37	130.00	2773.78	120	332853.30
200	288	150.00	140.00	3955.39	140.00	2966.54	120	355985.28
205	286	150.00	140.00	3927.92	140.00	2945.94	120	353513.16
210	284	160.00	150.00	4179.06	150.00	3134.30	120	376115.40
215	280	170.00	160.00	4394.88	160.00	3296.16	120	395539.20
220	278	170.00	160.00	4363.49	160.00	3272.62	120	392713.92
225	274	180.00	170.00	4569.50	170.00	3427.12	120	411254.82
230	272	190.00	180.00	4802.98	180.00	3602.23	120	432267.84
235	268	200.00	190.00	4995.25	190.00	3746.44	120	449572.68
240	264	210.00	200.00	5179.68	200.00	3884.76	120	466171.20
245	260	220.00	210.00	5356.26	210.00	4017.20	120	482063.40
250	254	230.00	220.00	5481.83	220.00	4111.37	120	493364.52
255	250	240.00	230.00	5640.75	230.00	4230.56	120	507667.50
260	244	250.00	240.00	5744.74	240.00	4308.55	120	517026.24
265	238	260.00	250.00	5836.95	250.00	4377.71	120	525325.50
270	232	280.00	270.00	6144.98	270.00	4608.74	120	553048.56
275	224	290.00	280.00	6152.83	280.00	4614.62	120	553754.88
280	216	310.00	300.00	6356.88	300.00	4767.66	120	572119.20
285	210	330.00	320.00	6592.32	320.00	4944.24	120	593308.80
290	202	350.00	340.00	6737.51	340.00	5053.13	120	606375.72
295	192	370.00	360.00	6780.67	340.00	4802.98	120	576357.12
300	182	400.00	390.00	6963.14	340.00	4552.82	120	546338.52
305	170	420.00	410.00	6837.57	340.00	4252.64	120	510316.20
310	158	460.00	450.00	6974.91	340.00	3952.45	120	474293.88
315	142	480.00	470.00	6547.19	340.00	3552.20	120	426264.12
320	132	510.00	500.00	6474.60	340.00	3302.05	120	396245.52
325	118	550.00	540.00	6250.93	340.00	2951.83	120	354219.48
330	102	590.00	580.00	5803.60	340.00	2551.58	120	306189.72
335	90	630.00	620.00	5473.98	0.00	0.00	0	0.00
340	78	680.00	670.00	5126.71	0.00	0.00	0	0.00
345	64	730.00	720.00	4520.45	0.00	0.00	0	0.00
350	46	790.00	780.00	3519.83	0.00	0.00	0	0.00
355	28	890.00	880.00	2417.18	0.00	0.00	0	0.00
360	2	1020.00	1010.00	198.16	0.00	0.00	0	0.00
365	0	1280.00	1270.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Totaal							6360	18.12
Correctie							5724	16.31
								GW/jaar
								GW/jaar

Driel

Type Turbine(s)	Kaplan
Totaal rendement	75%
Uitbouwdebiet (Q20)	500 m³/s
Minimaal debiet (per turbine)	30 m³/s
Minimale benodigde valhoogte	0.9 m
Draaiuren/dag	24
Werkelijke draaitijd turbine (jaarbasis)	90%
Gereserveerd debiet	5 m³/s
Gemiddeld Verbruik / Gezin (Nederland)	3600 kWh/jaar
<i>Theoretische energie-opbrengst</i>	<i>5.07 GWh/jaar</i>
<i>Gezinnen</i>	<i>1408 gezinnen/jaar</i>
<i>Maximaal theoretisch vermogen</i>	<i>3.02 MW</i>
<i>Gemiddeld theoretisch vermogen</i>	<i>1.36 MW</i>
<i>Theoretisch ontwerpvermogen</i>	<i>2.19 MW</i>

Aantal dagen	Bruto Verval (cm)	Debiet (m³/s)	Netto debiet (m³/s)	Theoretisch Vermogen (kW)	Turb. Debiet (m³/s)	Turbine-vermogen (kW)	Draai-uren	Energie op-brengst (kWh)
0	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
5	228	20.00	15.00	335.50	0.00	0.00	0	0.00
10	226	40.00	35.00	775.97	35.00	581.98	120	69837.39
15	226	40.00	35.00	775.97	35.00	581.98	120	69837.39
20	224	40.00	35.00	769.10	35.00	576.83	120	69219.36
25	222	40.00	35.00	762.24	35.00	571.68	120	68601.33
30	220	40.00	35.00	755.37	35.00	566.53	120	67983.30
35	218	50.00	45.00	962.36	45.00	721.77	120	86612.49
40	216	50.00	45.00	953.53	45.00	715.15	120	85817.88
45	214	50.00	45.00	944.70	45.00	708.53	120	85023.27
50	212	50.00	45.00	935.87	45.00	701.91	120	84228.66
55	210	50.00	45.00	927.05	45.00	695.28	120	83434.05
60	208	50.00	45.00	918.22	45.00	688.66	120	82639.44
65	206	50.00	45.00	909.39	45.00	682.04	120	81844.83
70	202	50.00	45.00	891.73	45.00	668.80	120	80255.61
75	200	50.00	45.00	882.90	45.00	662.18	120	79461.00
80	196	50.00	45.00	865.24	45.00	648.93	120	77871.78
85	194	50.00	45.00	856.41	45.00	642.31	120	77077.17
90	190	60.00	55.00	1025.15	55.00	768.86	120	92263.05
95	188	60.00	55.00	1014.35	55.00	760.77	120	91291.86
100	184	60.00	55.00	992.77	55.00	744.58	120	89349.48
105	182	70.00	65.00	1160.52	65.00	870.39	120	104447.07
110	178	80.00	75.00	1309.64	75.00	982.23	120	117867.15
115	174	90.00	85.00	1450.90	85.00	1088.17	120	130580.91
120	170	110.00	105.00	1751.09	105.00	1313.31	120	157597.65
125	166	120.00	115.00	1872.73	115.00	1404.55	120	168545.61
130	162	130.00	125.00	1986.53	125.00	1489.89	120	178787.25
135	158	150.00	145.00	2247.47	145.00	1685.60	120	202272.39
140	154	170.00	165.00	2492.72	165.00	1869.54	120	224344.89
145	150	180.00	175.00	2575.13	175.00	1931.34	120	231761.25
150	144	190.00	185.00	2613.38	185.00	1960.04	120	235204.56
155	140	210.00	205.00	2815.47	205.00	2111.60	120	253392.30
160	134	220.00	215.00	2826.26	215.00	2119.70	120	254363.49
165	130	240.00	235.00	2996.96	235.00	2247.72	120	269725.95
170	124	250.00	245.00	2980.28	245.00	2235.21	120	268225.02
175	118	260.00	255.00	2951.83	255.00	2213.87	120	265864.61
180	112	280.00	275.00	3021.48	275.00	2266.11	120	271933.20
185	106	290.00	285.00	2963.60	285.00	2222.70	120	266724.09
190	98	300.00	295.00	2836.07	295.00	2127.05	120	255246.39
195	94	310.00	305.00	2812.53	305.00	2109.40	120	253127.43
200	88	330.00	325.00	2805.66	0.00	0.00	0	0.00
205	84	340.00	335.00	2760.53	0.00	0.00	0	0.00
210	78	350.00	345.00	2639.87	0.00	0.00	0	0.00
215	72	360.00	355.00	2507.44	0.00	0.00	0	0.00
220	66	370.00	365.00	2363.23	0.00	0.00	0	0.00
225	62	380.00	375.00	2280.83	0.00	0.00	0	0.00
230	58	380.00	375.00	2133.68	0.00	0.00	0	0.00
235	50	390.00	385.00	1888.43	0.00	0.00	0	0.00
240	42	400.00	395.00	1627.48	0.00	0.00	0	0.00
245	30	410.00	405.00	1191.92	0.00	0.00	0	0.00
250	24	420.00	415.00	977.08	0.00	0.00	0	0.00
255	16	430.00	425.00	667.08	0.00	0.00	0	0.00
260	14	440.00	435.00	597.43	0.00	0.00	0	0.00
265	12	460.00	455.00	535.63	0.00	0.00	0	0.00
270	12	470.00	465.00	547.40	0.00	0.00	0	0.00
275	12	480.00	475.00	559.17	0.00	0.00	0	0.00
280	12	490.00	485.00	570.94	0.00	0.00	0	0.00
285	12	500.00	495.00	582.71	0.00	0.00	0	0.00
290	12	510.00	505.00	594.49	0.00	0.00	0	0.00
295	12	520.00	515.00	606.26	0.00	0.00	0	0.00
300	12	530.00	525.00	618.03	0.00	0.00	0	0.00
305	10	550.00	545.00	534.65	0.00	0.00	0	0.00
310	10	570.00	565.00	554.27	0.00	0.00	0	0.00
315	10	590.00	585.00	573.89	0.00	0.00	0	0.00
320	10	610.00	605.00	593.51	0.00	0.00	0	0.00
325	10	640.00	635.00	622.94	0.00	0.00	0	0.00
330	10	660.00	655.00	642.56	0.00	0.00	0	0.00
335	10	700.00	695.00	681.80	0.00	0.00	0	0.00
340	10	740.00	735.00	721.04	0.00	0.00	0	0.00
345	10	770.00	765.00	750.47	0.00	0.00	0	0.00
350	8	820.00	815.00	639.61	0.00	0.00	0	0.00
355	8	890.00	885.00	694.55	0.00	0.00	0	0.00
360	2	1010.00	1005.00	197.18	0.00	0.00	0	0.00
365	0	1160.00	1155.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Totaal							4560	5.63 GWh/jaar
Correctie							4104	5.07 GWh/jaar

Grave

Type Turbine(s)	Kaplan
Totaal rendement	75%
Uitbouwdebiet (G20)	450 m³/s
Minimaal debiet (per turbine)	40 m³/s
Minimale benodigde valhoogte	1 m
Draaiuren/dag	24
Werkelijke draaitijd turbine (jaarbasis)	90%
Gereserveerd debiet	10 m³/s
Gemiddeld Verbruik / Gezin (Nederland)	3600 kWh/jaar
<i>Theoretische energie-opbrengst</i>	<i>28.40 GWh/jaar</i>
<i>Gezinnen</i>	<i>7888 gezinnen/jaar</i>
<i>Maximaal theoretisch vermogen</i>	<i>10.41 MW</i>
<i>Gemiddeld theoretisch vermogen</i>	<i>5.49 MW</i>
<i>Theoretisch ontwerpvermogen</i>	<i>7.95 MW</i>

Aantal dagen	Bruto Verval (cm)	Debiet (m³/s)	Netto debiet (m³/s)	Theoretisch Vermogen (kW)	Turb. Debiet (m³/s)	Turbine-vermogen (kW)	Draai-uren	Energie op-brenst (kWh)
0	340	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
5	290	20.00	10.00	284.49	0.00	0.00	0	0.00
10	288	50.00	40.00	1130.11	0.00	0.00	0	0.00
15	286	60.00	50.00	1402.83	50.00	1052.12	120	126254.70
20	286	60.00	50.00	1402.83	50.00	1052.12	120	126254.70
25	286	60.00	50.00	1402.83	50.00	1052.12	120	126254.70
30	286	70.00	60.00	1683.40	60.00	1262.55	120	151505.64
35	284	70.00	60.00	1671.62	60.00	1253.72	120	150446.16
40	284	80.00	70.00	1950.23	70.00	1462.67	120	175520.52
45	284	80.00	70.00	1950.23	70.00	1462.67	120	175520.52
50	284	80.00	70.00	1950.23	70.00	1462.67	120	175520.52
55	282	90.00	80.00	2213.14	80.00	1659.85	120	199182.24
60	282	90.00	80.00	2213.14	80.00	1659.85	120	199182.24
65	282	100.00	90.00	2489.78	90.00	1867.33	120	224080.02
70	282	100.00	90.00	2489.78	90.00	1867.33	120	224080.02
75	282	100.00	90.00	2489.78	90.00	1867.33	120	224080.02
80	282	110.00	100.00	2766.42	100.00	2074.82	120	248977.80
85	280	110.00	100.00	2746.80	100.00	2060.10	120	247212.00
90	280	120.00	110.00	3021.48	110.00	2266.11	120	271933.20
95	280	120.00	110.00	3021.48	110.00	2266.11	120	271933.20
100	280	130.00	120.00	3296.16	120.00	2472.12	120	296654.40
105	278	130.00	120.00	3272.62	120.00	2454.46	120	294535.44
110	278	140.00	130.00	3545.33	130.00	2659.00	120	319080.06
115	278	140.00	130.00	3545.33	130.00	2659.00	120	319080.06
120	278	140.00	130.00	3545.33	130.00	2659.00	120	319080.06
125	276	150.00	140.00	3790.58	140.00	2842.94	120	341152.56
130	276	150.00	140.00	3790.58	140.00	2842.94	120	341152.56
135	276	160.00	150.00	4061.34	150.00	3046.01	120	365520.60
140	276	160.00	150.00	4061.34	150.00	3046.01	120	365520.60
145	274	170.00	160.00	4300.70	160.00	3225.53	120	387063.36
150	274	170.00	160.00	4300.70	160.00	3225.53	120	387063.36
155	274	170.00	160.00	4300.70	160.00	3225.53	120	387063.36
160	272	180.00	170.00	4536.14	170.00	3402.11	120	408252.96
165	272	180.00	170.00	4536.14	170.00	3402.11	120	408252.96
170	272	190.00	180.00	4802.98	180.00	3602.23	120	432267.84
175	270	200.00	190.00	5032.53	190.00	3774.40	120	452927.70
180	270	200.00	190.00	5032.53	190.00	3774.40	120	452927.70
185	270	210.00	200.00	5297.40	200.00	3973.05	120	476766.00
190	268	210.00	200.00	5258.16	200.00	3943.62	120	473234.40
195	268	220.00	210.00	5521.07	210.00	4140.80	120	496896.12
200	266	230.00	220.00	5740.81	220.00	4305.61	120	516673.08
205	266	240.00	230.00	6001.76	230.00	4501.32	120	540158.22
210	264	250.00	240.00	6215.62	240.00	4661.71	120	559405.44
215	264	250.00	240.00	6215.62	240.00	4661.71	120	559405.44
220	262	260.00	250.00	6425.55	250.00	4819.16	120	578299.50
225	260	270.00	260.00	6631.56	260.00	4973.67	120	596840.40
230	258	280.00	270.00	6833.65	270.00	5125.23	120	615028.14
235	258	290.00	280.00	7086.74	280.00	5315.06	120	637806.96
240	256	300.00	290.00	7282.94	290.00	5462.21	120	655464.96
245	252	310.00	300.00	7416.36	300.00	5562.27	120	667472.40
250	250	320.00	310.00	7602.75	310.00	5702.06	120	684247.50
255	248	330.00	320.00	7785.22	320.00	5838.91	120	700669.44
260	246	350.00	340.00	8205.08	340.00	6153.81	120	738457.56
265	242	370.00	360.00	8546.47	360.00	6409.85	120	769182.48
270	240	380.00	370.00	8711.28	370.00	6533.46	120	784015.20
275	236	400.00	390.00	9029.12	390.00	6771.84	120	812621.16
280	232	410.00	400.00	9103.68	400.00	6827.76	120	819331.20
285	228	440.00	430.00	9617.72	430.00	7213.29	120	865595.16
290	224	460.00	450.00	9888.48	450.00	7416.36	120	889963.20
295	218	480.00	470.00	10051.33	450.00	7217.71	120	866124.90
300	210	500.00	490.00	10094.49	450.00	6952.84	120	834340.50
305	204	520.00	510.00	10206.32	450.00	6754.19	120	810502.20
310	194	550.00	540.00	10276.96	450.00	6423.10	120	770771.70
315	184	580.00	570.00	10288.73	450.00	6092.01	120	731041.20
320	174	620.00	610.00	10412.33	450.00	5760.92	120	691310.70
325	162	650.00	640.00	10171.01	450.00	5363.62	120	643634.10
330	154	690.00	680.00	10273.03	450.00	5098.75	120	611849.70
335	142	720.00	710.00	9890.44	450.00	4701.44	120	564173.10
340	132	760.00	750.00	9711.90	450.00	4370.36	120	524442.60
345	118	810.00	800.00	9260.64	450.00	3906.83	120	468819.90
350	100	870.00	860.00	8436.60	0.00	0.00	0	0.00
355	82	940.00	930.00	7481.11	0.00	0.00	0	0.00
360	56	1040.00	1030.00	5658.41	0.00	0.00	0	0.00
365	4	1190.00	1180.00	463.03	0.00	0.00	0	0.00
Totaal							8040	31.55 GWh/jaar
Correctie							7236	28.40 GWh/jaar

Roermond

Type Turbine(s)	Kaplan
Totaal rendement	75%
Uitbouwdebiet (G20)	360 m³/s
Minimaal debiet (per turbine)	30 m³/s
Minimale benodigde valhoogte	1 m
Draaiuren/dag	24
Werkelijke draaitijd turbine (jaarbasis)	90%
Gereserveerd debiet	10 m³/s
Gemiddeld Verbruik / Gezin (Nederland)	3600 kWh/jaar
<i>Theoretische energie-opbrengst</i>	<i>18.58 GWh/jaar</i>
<i>Gezinnen</i>	<i>5160 gezinnen/jaar</i>
<i>Maximaal theoretisch vermogen</i>	<i>9.60 MW</i>
<i>Gemiddeld theoretisch vermogen</i>	<i>3.88 MW</i>
<i>Theoretisch ontwerpvermogen</i>	<i>6.74 MW</i>

Aantal dagen	Bruto Verval (cm)	Debiet (m³/s)	Netto debiet (m³/s)	Theoretisch Vermogen (kW)	Turb. Debiet (m³/s)	Turbine-vermogen (kW)	Draai-uren	Energie op-brengst (kWh)
0	366	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
5	296	20.00	10.00	290.38	0.00	0.00	0	0.00
10	286	30.00	20.00	561.13	0.00	0.00	0	0.00
15	284	30.00	20.00	557.21	0.00	0.00	0	0.00
20	282	30.00	20.00	553.28	0.00	0.00	0	0.00
25	280	30.00	20.00	549.36	0.00	0.00	0	0.00
30	280	30.00	20.00	549.36	0.00	0.00	0	0.00
35	278	30.00	20.00	545.44	0.00	0.00	0	0.00
40	278	30.00	20.00	545.44	0.00	0.00	0	0.00
45	278	40.00	30.00	818.15	0.00	0.00	0	0.00
50	276	40.00	30.00	812.27	0.00	0.00	0	0.00
55	276	40.00	30.00	812.27	0.00	0.00	0	0.00
60	276	40.00	30.00	812.27	0.00	0.00	0	0.00
65	276	50.00	40.00	1083.02	40.00	812.27	120	97472.16
70	274	50.00	40.00	1075.18	40.00	806.38	120	96765.84
75	274	50.00	40.00	1075.18	40.00	806.38	120	96765.84
80	274	50.00	40.00	1075.18	40.00	806.38	120	96765.84
85	274	60.00	50.00	1343.97	50.00	1007.98	120	120957.30
90	272	60.00	50.00	1334.16	50.00	1000.62	120	120074.40
95	272	60.00	50.00	1334.16	50.00	1000.62	120	120074.40
100	272	70.00	60.00	1600.99	60.00	1200.74	120	144089.28
105	272	70.00	60.00	1600.99	60.00	1200.74	120	144089.28
110	272	70.00	60.00	1600.99	60.00	1200.74	120	144089.28
115	272	80.00	70.00	1867.62	70.00	1400.87	120	168104.16
120	270	80.00	70.00	1854.09	70.00	1390.57	120	166868.10
125	270	80.00	70.00	1854.09	70.00	1390.57	120	166868.10
130	270	90.00	80.00	2118.96	80.00	1589.22	120	190706.40
135	270	90.00	80.00	2118.96	80.00	1589.22	120	190706.40
140	268	100.00	90.00	2366.17	90.00	1774.63	120	212955.48
145	268	100.00	90.00	2366.17	90.00	1774.63	120	212955.48
150	268	100.00	90.00	2366.17	90.00	1774.63	120	212955.48
155	268	110.00	100.00	2629.08	100.00	1971.81	120	236617.20
160	268	110.00	100.00	2629.08	100.00	1971.81	120	236617.20
165	266	120.00	110.00	2870.41	110.00	2152.80	120	258336.54
170	266	120.00	110.00	2870.41	110.00	2152.80	120	258336.54
175	266	130.00	120.00	3131.35	120.00	2348.51	120	281821.68
180	264	130.00	120.00	3107.81	120.00	2330.86	120	279702.72
185	264	140.00	130.00	3366.79	130.00	2525.09	120	303011.28
190	264	140.00	130.00	3366.79	130.00	2525.09	120	303011.28
195	264	150.00	140.00	3625.78	140.00	2719.33	120	326319.84
200	264	150.00	140.00	3625.78	140.00	2719.33	120	326319.84
205	262	160.00	150.00	3855.33	150.00	2891.50	120	346979.70
210	262	170.00	160.00	4112.35	160.00	3084.26	120	370111.68
215	262	170.00	160.00	4112.35	160.00	3084.26	120	370111.68
220	260	180.00	170.00	4336.02	170.00	3252.02	120	390241.80
225	260	190.00	180.00	4591.08	180.00	3443.31	120	413197.20
230	258	200.00	190.00	4808.86	190.00	3606.65	120	432797.58
235	258	210.00	200.00	5061.96	200.00	3796.47	120	455576.40
240	258	220.00	210.00	5315.06	210.00	3986.29	120	478355.22
245	256	230.00	220.00	5524.99	220.00	4143.74	120	497249.28
250	254	240.00	230.00	5731.00	230.00	4298.25	120	515790.18
255	252	250.00	240.00	5933.09	240.00	4449.82	120	533977.92
260	250	260.00	250.00	6131.25	250.00	4598.44	120	551812.50
265	250	280.00	270.00	6621.75	270.00	4966.31	120	595957.50
270	246	290.00	280.00	6757.13	280.00	5067.85	120	608141.52
275	244	310.00	300.00	7180.92	300.00	5385.69	120	646282.80
280	240	330.00	320.00	7534.08	320.00	5650.56	120	678067.20
285	236	350.00	340.00	7871.54	340.00	5903.66	120	708438.96
290	232	370.00	360.00	8193.31	360.00	6144.98	120	737398.08
295	226	400.00	390.00	8646.53	360.00	5986.06	120	718327.44
300	220	420.00	410.00	8848.62	360.00	5827.14	120	699256.80
305	210	460.00	450.00	9270.45	360.00	5562.27	120	667472.40
310	202	480.00	470.00	9313.61	360.00	5350.37	120	642044.88
315	192	510.00	500.00	9417.60	360.00	5085.50	120	610260.48
320	180	550.00	540.00	9535.32	360.00	4767.66	120	572119.20
325	168	590.00	580.00	9558.86	360.00	4448.82	120	533977.92
330	156	630.00	620.00	9488.23	360.00	4131.97	120	495836.64
335	146	680.00	670.00	9596.14	360.00	3867.10	120	464052.24
340	124	730.00	720.00	8758.37	360.00	3284.39	120	394126.56
345	92	790.00	780.00	7039.66	0.00	0.00	0	0.00
350	78	890.00	880.00	6733.58	0.00	0.00	0	0.00
355	48	1020.00	1010.00	4755.89	0.00	0.00	0	0.00
360	2	1280.00	1270.00	249.17	0.00	0.00	0	0.00
365	0	2970.00	2960.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Totaal							6720	20.64 GWh/jaar
Correctie							6048	18.58 GWh/jaar

Sambeek

Type Turbine(s)	Kaplan
Totaal rendement	75%
Uitbouwdebiet (G20)	360 m³/s
Minimaal debiet (per turbine)	30 m³/s
Minimale benodigde valhoogte	1 m
Draaiuren/dag	24
Werkelijke draaitijd turbine (jaarbasis)	90%
Gereserveerd debiet	10 m³/s
Gemiddeld Verbruik / Gezin (Nederland)	3600 kWh/jaar
<i>Theoretische energie-opbrengst</i>	<i>22.85 GWh/jaar</i>
<i>Gezinnen</i>	<i>6346 gezinnen/jaar</i>
<i>Maximaal theoretisch vermogen</i>	<i>12.96 MW</i>
<i>Gemiddeld theoretisch vermogen</i>	<i>4.83 MW</i>
<i>Theoretisch ontwerpvermogen</i>	<i>8.89 MW</i>

Aantal dagen	Bruto Verval (cm)	Debiet (m³/s)	Netto debiet (m³/s)	Theoretisch Vermogen (kW)	Turb. Debiet (m³/s)	Turbine-vermogen (kW)	Draai-uren	Energie op-brengst (kWh)
0	324	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
5	324	20.00	10.00	317.84	0.00	0.00	0	0.00
10	322	30.00	20.00	631.76	0.00	0.00	0	0.00
15	320	30.00	20.00	627.84	0.00	0.00	0	0.00
20	320	30.00	20.00	627.84	0.00	0.00	0	0.00
25	320	30.00	20.00	627.84	0.00	0.00	0	0.00
30	318	30.00	20.00	623.92	0.00	0.00	0	0.00
35	318	30.00	20.00	623.92	0.00	0.00	0	0.00
40	318	30.00	20.00	623.92	0.00	0.00	0	0.00
45	316	40.00	30.00	929.99	0.00	0.00	0	0.00
50	316	40.00	30.00	929.99	0.00	0.00	0	0.00
55	316	40.00	30.00	929.99	0.00	0.00	0	0.00
60	316	40.00	30.00	929.99	0.00	0.00	0	0.00
65	314	50.00	40.00	1232.14	40.00	924.10	120	110892.24
70	314	50.00	40.00	1232.14	40.00	924.10	120	110892.24
75	314	50.00	40.00	1232.14	40.00	924.10	120	110892.24
80	314	50.00	40.00	1232.14	40.00	924.10	120	110892.24
85	314	60.00	50.00	1540.17	50.00	1155.13	120	138615.30
90	314	60.00	50.00	1540.17	50.00	1155.13	120	138615.30
95	314	60.00	50.00	1540.17	50.00	1155.13	120	138615.30
100	312	70.00	60.00	1836.43	60.00	1377.32	120	165278.88
105	312	70.00	60.00	1836.43	60.00	1377.32	120	165278.88
110	312	70.00	60.00	1836.43	60.00	1377.32	120	165278.88
115	312	80.00	70.00	2142.50	70.00	1606.88	120	192825.36
120	312	80.00	70.00	2142.50	70.00	1606.88	120	192825.36
125	312	80.00	70.00	2142.50	70.00	1606.88	120	192825.36
130	310	90.00	80.00	2432.88	80.00	1824.66	120	218959.20
135	310	90.00	80.00	2432.88	80.00	1824.66	120	218959.20
140	310	100.00	90.00	2736.99	90.00	2052.74	120	246329.10
145	310	100.00	90.00	2736.99	90.00	2052.74	120	246329.10
150	310	100.00	90.00	2736.99	90.00	2052.74	120	246329.10
155	308	110.00	100.00	3021.48	100.00	2266.11	120	271933.20
160	308	110.00	100.00	3021.48	100.00	2266.11	120	271933.20
165	308	120.00	110.00	3323.63	110.00	2492.72	120	299126.52
170	308	120.00	110.00	3323.63	110.00	2492.72	120	299126.52
175	308	130.00	120.00	3625.78	120.00	2719.33	120	326319.84
180	306	130.00	120.00	3602.23	120.00	2701.67	120	324200.88
185	306	140.00	130.00	3902.42	130.00	2926.81	120	351217.62
190	306	140.00	130.00	3902.42	130.00	2926.81	120	351217.62
195	304	150.00	140.00	4175.14	140.00	3131.35	120	375762.24
200	304	150.00	140.00	4175.14	140.00	3131.35	120	375762.24
205	302	160.00	150.00	4443.93	150.00	3332.95	120	399953.70
210	302	170.00	160.00	4740.19	160.00	3555.14	120	426617.28
215	300	170.00	160.00	4708.80	160.00	3531.60	120	423792.00
220	300	180.00	170.00	5003.10	170.00	3752.33	120	450279.00
225	298	190.00	180.00	5262.08	180.00	3946.56	120	473587.56
230	298	200.00	190.00	5554.42	190.00	4165.82	120	499897.98
235	296	210.00	200.00	5807.52	200.00	4355.64	120	522676.80
240	294	220.00	210.00	6056.69	210.00	4542.52	120	545102.46
245	292	230.00	220.00	6301.94	220.00	4726.46	120	567174.96
250	290	240.00	230.00	6543.27	230.00	4907.45	120	588894.30
255	288	250.00	240.00	6780.67	240.00	5085.50	120	610260.48
260	286	260.00	250.00	7014.15	250.00	5260.61	120	631273.50
265	282	280.00	270.00	7469.33	270.00	5602.00	120	672240.06
270	278	290.00	280.00	7636.10	280.00	5727.08	120	687249.36
275	274	310.00	300.00	8063.82	300.00	6047.87	120	725743.80
280	272	330.00	320.00	8538.62	320.00	6403.97	120	768476.16
285	268	350.00	340.00	8938.87	340.00	6704.15	120	804498.48
290	264	370.00	360.00	9323.42	360.00	6992.57	120	839108.16
295	258	400.00	390.00	9870.82	360.00	6833.65	120	820037.52
300	252	420.00	410.00	10135.69	360.00	6674.72	120	800966.88
305	246	460.00	450.00	10859.67	360.00	6515.80	120	781896.24
310	238	480.00	470.00	10973.47	360.00	6303.91	120	756468.72
315	228	510.00	500.00	11183.40	360.00	6039.04	120	724684.32
320	218	550.00	540.00	11548.33	360.00	5774.17	120	692899.92
325	204	590.00	580.00	11607.19	360.00	5403.35	120	648401.76
330	192	630.00	620.00	11677.82	360.00	5085.50	120	610260.48
335	178	680.00	670.00	11699.41	360.00	4714.69	120	565762.32
340	160	730.00	720.00	11301.12	360.00	4237.92	120	508550.40
345	142	790.00	780.00	10865.56	360.00	3761.15	120	451338.48
350	116	890.00	880.00	10014.05	360.00	3072.49	120	368699.04
355	104	1020.00	1010.00	10304.42	360.00	2754.65	120	330557.76
360	104	1280.00	1270.00	12957.05	360.00	2754.65	120	330557.76
365	0	2970.00	2960.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Totaal							7200	25.39 GWh/jaar
Correctie							6480	22.85 GWh/jaar

Afsluitdijk met Tocardo Turbines (Den Oever)

Maximaal Vermogen	50 kW
Vermogenscoëfficiënt	42%
Reductie rendement	90%
Aantal turbines	18
Draaitijd jaarbasis	85%
Diameter turbine	3.00 m
Minimale snelheid	1.00 m/s
Minimaal debiet turbine	7.07 m ³ /s
Breedte koker	12.00 m
Benodigde hoogte	5.00 m
Minimaal debiet	60.00 m ³ /s

Gemiddeld verbruik gezin NL 3600 kWh/jaar

<i>Opgewekt vermogen 1 turbine</i>	<i>62.44 MWh/jaar</i>
<i>Aantal gezinnen 1 turbine</i>	<i>17.3 gezinnen</i>
<i>Opgewekt vermogen meerdere turbine.</i>	<i>1123.98 MWh/jaar</i>
<i>Aantal gezinnen meerdere turbines</i>	<i>312.2 gezinnen</i>

Gegevens HKV		Berekening 1 Turbine				Meerdere turbines	
Uren	Snelheid	Vermogen (kW)	Draai-uren	Energie (kWh/dag)	Energie (MWh/jaar)	Dag (kWh/dag)	Jaar (MWh/jaar)
24	0	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.8	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.5	4.51	1	4.51	1.65	81.16	29.62
6	1.9	9.16	1	9.16	3.34	164.94	60.20
5	2.4	18.47	1	18.47	6.74	332.43	121.34
4	2.8	29.33	1	29.33	10.70	527.89	192.68
3	3.1	39.80	1	39.80	14.53	716.39	261.48
2	3.5	50.00	1	50.00	18.25	900.00	328.50
1	3.8	50.00	1	50.00	18.25	900.00	328.50
SUM			24	201.27	73.46	3622.81	1322.33

Oosterscheldekering met Tocardo Turbines

Maximaal Vermogen	50 kW
Vermogenscoëfficiënt	42%
Reductie rendement	90%
Aantal turbines	20
Draaitijd jaarbasis	85%

Diameter turbine	3.00 m
Minimale snelheid	1.00 m/s
Minimaal debiet turbine	7.07 m³/s

Breedte koker	42.00 m
Benodigde hoogte	5.00 m
Minimaal debiet	210.00 m³/s

Gemiddeld verbruik gezin NL 3600 kWh/jaar

<i>Opgewekt vermogen 1 turbine</i>	<i>174.44 MWh/jaar</i>
<i>Aantal gezinnen 1 turbine</i>	<i>48.5 gezinnen</i>
<i>Opgewekt vermogen meerdere turbines</i>	<i>3488.77 MWh/jaar</i>
<i>Aantal gezinnen meerdere turbines</i>	<i>969.1 gezinnen</i>

Gegevens HKV		Berekening 1 Turbine				Meerdere turbines	
Uren	Snelheid	Vermogen (kW)	Draai-uren	Energie (kWh/dag)	Energie (MWh/jaar)	Dag (kWh/dag)	Jaar (MWh/jaar)
24	0	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.8	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.9	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
21	1.1	1.78	1	1.78	0.65	35.56	12.98
20	1.2	2.31	1	2.31	0.84	46.17	16.85
19	1.5	4.51	1	4.51	1.65	90.18	32.91
18	1.7	6.56	1	6.56	2.40	131.27	47.91
17	1.9	9.16	1	9.16	3.34	183.27	66.89
16	2	10.69	1	10.69	3.90	213.75	78.02
15	2.1	12.37	1	12.37	4.52	247.45	90.32
14	2.3	16.25	1	16.25	5.93	325.09	118.66
13	2.4	18.47	1	18.47	6.74	369.37	134.82
12	2.5	20.87	1	20.87	7.62	417.49	152.38
11	2.6	23.48	1	23.48	8.57	469.62	171.41
10	2.8	29.33	1	29.33	10.70	586.54	214.09
9	2.9	32.58	1	32.58	11.89	651.66	237.85
8	3	36.07	1	36.07	13.17	721.42	263.32
7	3.1	39.80	1	39.80	14.53	795.99	290.54
6	3.3	48.01	1	48.01	17.52	960.21	350.48
5	3.4	50.00	1	50.00	18.25	1000.00	365.00
4	3.5	50.00	1	50.00	18.25	1000.00	365.00
3	3.7	50.00	1	50.00	18.25	1000.00	365.00
2	3.9	50.00	1	50.00	18.25	1000.00	365.00
1	4.1	50.00	1	50.00	18.25	1000.00	365.00
SUM			24	562.25	205.22	11245.04	4104.44

IJmuiden met Tocardo Turbines

Maximaal Vermogen 50 kW
 Vermogenscoëfficiënt 42%
 Reductie rendement 90%
 Aantal turbines 7
 Draaitijd jaarbasis 85%

Diameter turbine 3.00 m
 Minimale snelheid 1.00 m/s
 Minimaal debiet turbine 7.07 m³/s

Breedte koker 5.90 m
 Benodigde hoogte 4.80 m
 Minimaal debiet 28.32 m³/s

Gemiddeld verbruik gezin NL 3600 kWh/jaar

Opgeweekt vermogen 1 turbine	21.00 MWh/jaar
Aantal gezinnen 1 turbine	5.8 gezinnen
Opgeweekt vermogen meerdere turbines	146.99 MWh/jaar
Aantal gezinnen meerdere turbines	40.8 gezinnen

Gegevens HKV		Berekening 1 Turbine				Meerdere turbines	
Uren	Snelheid	Vermogen (kW)	Draai-uren	Energie (kWh/dag)	Energie (MWh/jaar)	Dag (kWh/dag)	Jaar (MWh/jaar)
24	0	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.1	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2.2	14.23	1	14.23	5.19	99.58	36.35
2	2.5	20.87	1	20.87	7.62	146.12	53.33
1	2.9	32.58	1	32.58	11.89	228.08	83.25
SUM			24	67.68	24.70	473.78	172.93