

RAPPORT

**Onderzoek potentie energie uit
waterkracht in Provincie Gelderland**

Klant: Provincie Gelderland

Referentie: IEMR001D01

Versie: 01/Finale versie

Datum: 27 december 2016



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Jonkerbosplein 52
6534 AB Nijmegen
Netherlands
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 70 00 **T**
+31 24 323 93 46 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland

Ondertitel: Waterkracht provincie Gelderland
Referentie: IEMR001D01
Versie: 01/Finale versie
Datum: 27 december 2016
Projectnaam: Waterkracht provincie Gelderland
Projectnummer: BE3167
Auteur(s): Tom Van Den Noortgaete

Opgesteld door: Tom Van Den Noortgaete, Michel van Heereveld, Leon Claassen (Provincie Gelderland)

Gecontroleerd door: _____

Datum/Initialen: _____

Goedgekeurd door: _____

Datum/Initialen: _____

Classificatie
Open



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The quality management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.

Inhoud

1	Inleiding	9
1.1	Situatieschets	9
1.2	Leeswijzer	9
2	Technologisch kader	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Theoretische methodes voor energiewinning	12
2.2.1	Energiewinning uit verval	12
2.2.2	Energie uit stroming	13
2.2.3	Regio specifieke karakteristieken	14
3	Overzicht van de technologieën	15
3.1	Algemeen	15
3.2	Ecologie: oplossingsrichtingen voor vismigratie	17
3.3	Technologie voor energie uit verval	18
3.3.1	Bulb (Kaplan) turbine	18
3.3.2	Doorstroomturbine	19
3.3.3	Schroefmotor (of vijzel)	20
3.3.4	Bovenslaand waterrad	21
3.3.5	Middenslaand waterrad	22
3.3.6	Onderslaand waterrad	23
3.3.7	VLH – Very Low Head Turbine	24
3.3.8	Gravitation Water Vortex Power Plant	25
3.3.9	Horizontale turbine (Fishflow Innovations)	26
3.3.10	Lamella Turbine	27
3.3.11	Kata Max Wheel	28
3.3.12	Das Bewegliche Wasserkraftwerk	29
3.3.13	Hydro Generator	30
3.3.14	Overa Wheel	31
3.3.15	Ronamic	32
3.4	Technologie voor energie uit de snelheid van water	33
3.4.1	Tocado turbine	33
3.4.2	EnCurrent turbine	34
3.4.3	Oryon Watermill	35
3.4.4	KHPS – Kinetic Hydropower System	36
3.4.5	Wave rotor	37
3.4.6	Vivace	38
3.4.7	Water 2 energy	39
3.5	Technische innovaties en slimme combinaties	40
3.5.1	Inleiding	40
3.5.2	Energie-opslag als kans	40

3.5.3	Slim waterbeheer	40
3.5.4	Concepten slimme stuw	40
3.5.5	Concepten slimme sluis	41
3.5.6	Innovaties bij kribben	41
3.5.7	Malen op slimme tijden	41
3.5.8	Energieterugverdiëntijd van waterkrachttechniek	42
3.5.9	Koppeling met cultuurhistorie	42
3.5.10	Toekomst mini- of micro-opwekking	42
3.6	Samenvatting – Technologiematrix	43
4	Potentie van waterkracht in Gelderland	44
4.1	Inleiding	44
4.2	Methodiek	44
4.3	Potenties Gelderse rivieren	47
4.4	Potenties combi met opslag of slim malen	47
4.5	Locaties ter hoogte van effluent(-leidingen)	48
4.6	Potentiekaart	49
5	Economische analyse	50
5.1	Inleiding	50
5.2	Gebruikte financiële parameters	51
5.2.1	Kosten	51
5.2.2	Opbrengsten	51
5.2.3	Waarderingsparameters	51
5.3	Conclusies financiële haalbaarheid locaties	52
6	Bespreking actuele business cases in Provincie Gelderland	54
6.1	Case Doesburg	54
6.2	Case Berkel en Twentekanaal van Lochemenergie	56
6.3	Onderzoeksproject smartstuw Ommeren	60
6.4	Pilotproject Waterstroom Park Lingezege	62
6.5	Toekomstige initiatieven	64
7	Conclusies en aanbevelingen	66



Bijlagen

Bijlage 1	Potentiekaart Gelderland
Bijlage 2	Detailberekeningen cases Driel, Grave en de Pol
Bijlage 3	Uitvraag Rotatieturbine
Bijlage 4	Nautische belangen
Bijlage 5	Studie Alliander
Bijlage 6	Quick-scans potentie waterkracht
Bijlage 7	Potentie waterkracht ter hoogte van kribben



Managementsamenvatting

Waterkracht is een van de meest duurzame vormen van energie. Waterkracht heeft het voordeel dat de energievorm vrijwel continu aanwezig is en nagenoeg niet zichtbaar. De centrale bevindt zich immers in de waterloop en kan zelfs een fraaie toeristische trekpleister zijn. Bij de ontwikkeling van waterkrachtcentrales dient wel aandacht te gaan naar de ecologie en met name een veilige vispassage. Daarnaast dient natuurlijk ook rekening te worden gehouden met de scheepvaart.

Vaak zijn de opwekbare vermogens echter beperkt in onze lage landen waardoor de financiële haalbaarheid lastig is. Omwille van nieuwe technieken, maar ook innovatievere implementatiemogelijkheden is echter op kleinere schaal (vermogens < 1 MW) eveneens plaats voor rendabele waterkrachtprojecten. Een voorbeeld is de recent geopende waterkrachtcentrale HydroCatala van 110 kW in Drogenbos (België).

Om deze ontwikkelingen rond waterkracht te stimuleren nam de provincie Gelderland het initiatief om in haar provincie de potentie voor waterkracht in kaart te brengen zodat de uitkomsten gebruikt kunnen worden voor lokale partijen zoals ontwikkelaars en energiecoöperaties voor de ontwikkeling van waterkracht. Voorliggend rapport combineert hiervoor:

- een screening van de potentie van locaties in de provincie;
- een analyse van toepasbare technologie voor de productie van de energie;
- ten slotte gaat de studie in op enkele concrete haalbaarheidsstudies.

De Provincie Gelderland wenst hiermee een bijdrage te leveren in het aandeel groene stroomlevering. Deze groende stroomlevering uit rivieren en watergangen kan op twee verschillende wijzen gebeuren. De energie wordt gewonnen uit een lokaal verval ter plaatse van bijvoorbeeld een kunstwerk in een rivier of de energie wordt gehaald uit de rivierstroming (snelheid in het water).

In functie van enkele weloverwogen keuzecriteria zoals regio-specifieke karakteristieken, locatie-eigenschappen, lokale infrastructuur en literatuurwerk (zoals de techniekinventaris Pro-Tide) zijn toepasbare technieken geselecteerd. De beschikbare technieken voor de Gelderlandse situatie dienen uiteraard ook getoetst te worden aan een aantal parameters die de 'rijpheid' en omstandigheid definiëren waar en hoe de techniek toegepast kan worden. Hiervoor zijn zowel technische (vermogen, etc.) als institutionele (visvriendelijkheid, etc.) en financiële toetsingsparameters belangrijk. Deze drie pijlers vormen immers de dimensies van een business case en zijn belangrijk om inzichtelijk te hebben om als (aantrekkelijke) investeringscasus naar potentiële ontwikkelaars aan te bieden.

Deze oefening resulteert in onderstaande 'technologiematrix' die een overzicht biedt voor beleidsmakers, ontwikkelaars met welke technieken voor een bepaalde locatie van toepassing kunnen zijn.



	Algemeen		Technische karakteristieken				Financiële krakt.		Institutionele karakteristieken		
	Type	Vermogen (kW)	Verval (m)	Debiet (m³/s)	Snelheid (m/s)	Diameter (m)	CAPEX (€/kW)	Vis-vriendelijk	TRL	Referentie	
A. Technieken voor potentiële energie											
1	Bulb (Kaplan) turbine	Axiale turbine	50 - 5,000	2 - 15	1 - 100	-	750 - 2.500	--	9	Commercieel	
2	Cross-flow turbine	Radiale impulsturbine	10 - 2,000	1 - 200	0,04 - 10	-	1.000 - 2.500	--	9	Commercieel	
3	Vijzel	Axiale motor	1 - 500	0,5 - 10	0,01 - 10	-	1.000 - 2.500	++	9	Commercieel	
4	Bovenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	3 - 10	0,1 - 2,5	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel	
5	Middenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	1,5 - 4	0,5 - 7	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel	
6	Onderslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	0,5 - 2	0,5 - 20	-	4.000 - 5.500	++	9	Commercieel	
7	VLH	Axiale turbine	100 - 500	1,5 - 4,5	10 - 27	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel	
8	Gravitation Water Vortex Plant	Axiale turbine	0,4 - 40	0,7 - 2	0,02 - 20	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel	
9	Horizontale turbine	Axiale turbine	50 - ...	2 - ...	1 - 50	-	-	+	8	1 centrale (NL)	
10	Lamella turbine	Gravitair rad	10 - 1,000	0,5 - 10	0,5 - 10	-	-	++	8 / 9	2 centrales (DE)	
11	Kata Max Wheel	Gravitair rad	2,5 - 50	1,5 - 20	0,5 - 3	-	-	++	8 / 9	1 centrale (DE)	
12	Das Bewegliche Wasserkraftwerk	Axiale turbine	50 - 1,000	2 - 5	> 5	-	-	+	8 / 9	2 centrales (DE)	
13	Hydro Generator	Axiale turbine	10 - 200	2 - 10	1 - 10	-	-	++	8	2 centrales (PH)	
14	Overa Wheel	Gravitair rad	10 - 100	2 - 3,5	1 - 5	-	-	++	8	1 centrale	
B. Technieken voor kinetische energie											
15	Tocado	Horizontale asturbine	40 - 200	-	-	>1	3 - 9	3.000 - 4.000	+	8 / 9	5 centrales (NL)
18	EnCurrent turbine	Horizontale asturbine	5 - 25	-	-	>1	1,5 - 5	2.500 - 4.000	+	9	4 centrales
16	Oryon Watermill	Verticale asturbine	5 - 150	-	-	>1	0,5 - 10	2.500 - 4.000	+	8	1 centrale (NL)
17	Kinetic Hydropower System	Horizontale asturbine	40	-	-	>1	5	-	+	8	1 centrale (USA)
19	Wave Rotor	Verticale asturbine	30	-	-	>1	5	-	+	8	1 centrale
20	Vivace	Oscillator	1 - 100	-	-	>1	-	-	++	8	1 centrale
21	WZE	Verticale asturbine	10	-	-	>1	2	-	++	8	1 centrale

Parallel aan de technologie-inventarisatie is in de Provincie onderzocht welke locaties potentieel kunnen zijn voor de ontwikkeling van waterkracht. Deze analyse levert een 'gepersonaliseerde' waterkracht potentiekaart voor de Provincie Gelderland met als doel om voor ontwikkelaars kansen inzichtelijk te maken. Onderstaande figuur toont het overzicht van de locaties. De grens om locaties met potentie op kaart aan te geven is gelegd op 15 kW omdat hieronder commercieel met de huidige technieken minder tot niet haalbare businesscases zijn.





Op basis van deze locatie-inventarisatie zijn drie locaties aangewezen om daarvan de business case nader te onderzoeken (stuw Driel, stuw Grave en stuw de Pol).

De initiële haalbaarheid van waterkracht op een van deze locaties is bepaald door Reverse Financial Engineering: op basis van financiële doelstellingen (IRR, terugverdiëntijd) is bepaald wat de investering mag zijn gegeven een zekere energieopbrengst.

Een waterkrachtcentrale van 1.800 kW bij Driel levert op jaarbasis theoretisch 4.739 MWh aan energie (ca 1247 gezinnen). De inkomsten (na aftrek van operationele kosten) die daar bij horen liggen afhankelijk van de transactiepreisen tussen EUR 568.680 / jaar en EUR 758.240 / jaar. Om een redelijke IRR van 10 tot 12 procent te behalen mogen de investeringskosten tussen EUR 3.028.947 en EUR 3.905.762 liggen.

Uitgaande van kentallen kost een 1.800 kW centrale echter ongeveer EUR 7,2 miljoen. Dit geeft een aanzienlijk investeringstekort van EUR 3,3 tot 4,2 miljoen. Dit heeft alles te maken met de beperking in de aanwezige resource (de stuw is bijna 100 dagen gestreken). Een aanbeveling om de investering aantrekkelijker te maken is om bijvoorbeeld de investeringskosten te reduceren door de uitvoering bijvoorbeeld te combineren met onderhoud en uitbreidingswerkzaamheden van de bestaande stuw. Hierbij kan door slim gebruik te maken van de aanwezige civiele infrastructuur als draagconstructie flink bespaard worden in bouwkosten. Dit lijkt een haalbare kans, mits tijdig en zorgvuldig geïntegreerd.

Een waterkrachtcentrale te Grave van 5,95 MW (energieopbrengst 25,34 GWh/jaar of te wel 7.240 gezinnen) zou ongeveer een investering van EUR 23.800.000 ex BTW benodigd zijn. De terugverdiëntijd is hierbij 7,2 jaar. Voor de beeldvorming: indien genoeg genomen zou worden met een IRR van 5,5 procent dan mogen de kosten bij een gemiddelde energieprijs EUR 22 tot 26 miljoen bedragen afhankelijk van de energieprijsontwikkeling. De IRR is dan gelijk aan de disconteringsvoet.

Om de investering interessant te laten zijn moeten de investeringskosten gereduceerd worden, zoals uit bovenstaande blijkt is het kiezen van een lagere doel-IRR weinig effectief. Dit kan door bijvoorbeeld gebruik te maken van de bestaande constructie of de uitvoering te combineren met onderhoud en renovatie of uitbreiding van de stuw. In zo een geval kan mogelijk een aanzienlijke besparing gerealiseerd worden op de benodigde civiele werken in de orde van 10 miljoen waarmee een acceptabele IRR gehaald kan worden, hangende nadere detaillering. Private partijen zullen een hogere IRR willen hanteren, zeker indien ze ook het wegvallen van eventuele subsidieregelingen moeten dragen. Publieke partijen of partijen zonder winst oogmerk zouden een lagere IRR kunnen kiezen. In dat geval zou minder subsidie nodig zijn, maar moet het risico van wegvallen van subsidie wel ergens ingecalculereerd worden. Verder geldt hetzelfde mogelijkheid als bij sluis Driel dat door energie zelfstandig op te wekken voor lokaal gebruik de belasting op energie tarieven deels kan worden omzeild.

Een waterkrachtcentrale van 18 kW bij Stuw de Pol levert op jaarbasis theoretisch 75 MWh aan energie (ca 20 gezinnen). De inkomsten (na aftrek van operationele kosten) die daar bij horen liggen afhankelijk van de transactiepreisen tussen EUR 7.200 / jaar en EUR 12.000 / jaar. Om een redelijke IRR van 10 tot 12 procent te behalen mogen de investeringskosten tussen EUR 38.311 en EUR 61.813 liggen. Uitgaande van kentallen kost een 18 kW centrale ongeveer EUR 144.000 ex BTW. Dit project is derhalve geenszins haalbaar.

In de regio Gelderland is bewust gekozen om twee uitersten (hoog en laag vermogen) te onderzoeken. De stuw te Driel zou een haalbare kaart kunnen zijn indien het strijken van de stuw (100 dagen per jaar) zou opgegeven worden. Een extra energieproductie van 50% zou hierdoor te realiseren zijn wat het aantal gezinnen die voorzien kunnen worden van groene stroom doet opklimmen tot ongeveer 2.100 gezinnen / jaar. Natuurlijk heeft het strijken van de stuw weldegelijk ook zijn nut.



Een locatie waarbij een vermogen < 20 kW uit te bouwen is, is duidelijk niet haalbaar gebleken. Hierdoor is ook de grens voor het weerhouden van locaties in de potentiekaart gelegd op 15 – 20 kW.

Er zijn natuurlijk ook nog andere locaties die de moeite waard zijn om nader te onderzoeken (met name de klasse > 50 kW). Zeker indien de ontwikkeling van een waterkrachtcentrale zou samengaan met de renovatie van een stuw of sluis.

Verder blijkt dat het belangrijk is om ook andere baten door te rekenen die vaak indirect worden gerealiseerd door een waterkrachtproject. Hierbij is er veelal een kans voor de combinatie met energieopslag en ook opsparen (d.m.v. sturen in peilen) en turbineren als de energie vraag het hoogste is.

Een andere aanbeveling om de investering aantrekkelijker te maken is om bijvoorbeeld de investeringskosten te reduceren door de uitvoering bijvoorbeeld te combineren met onderhoud en uitbreidingswerkzaamheden van de bestaande stuw, sluis of krib. Hierbij kan door slim gebruik te maken van de aanwezige civiele infrastructuur als draagconstructie flink bespaard worden in bouwkosten. Dit lijkt een haalbare kans, mits tijdig en zorgvuldig geïntegreerd.

Er kan ook geopteerd worden voor een niet-commerciële doelstelling en de waterkrachtcentrale voor eigen energievoorziening te gebruiken en zodoende de opslagen op het elektriciteitsstarief van het net te reduceren. Dit sluit aan bij beleidsdoelstellingen energie en klimaatneutraal die waterschappen en Rijkswaterstaat zich hebben opgelegd.

Uit de projecten op het gebied van waterkracht die momenteel in Gelderland in voorbereiding zijn dan wel al lopen, blijkt wel dat er in Gelderland potentie zit om daadwerkelijk meer energie uit water te gaan produceren. Een aantal van deze cases (case Doesburg, case Berkel en Twentekanaal van Lochemenergie, case smartstuw Ommeren en pilotproject Waterstroom Park Lingezegen) is in dit rapport beschreven en tonen een mooie potentie. De kansen liggen er en verschillende initiatieven worden op dit moment verder uitgewerkt, meestal door samenwerking tussen overheden en lokale initiatieven of energie coöperaties.



1 Inleiding

1.1 Situatieschets

De provincie Gelderland heeft bij lokale energiemaatschappijen gevraagd of er behoefte is aan het in kaart brengen van de potenties van energieopwekking uit waterkracht. Het merendeel heeft aangegeven baat te hebben bij zo een onderzoek. De algemene opvatting is nog vaak dat energiewinning uit waterkracht niet rendabel is.

Omwille van nieuwe technieken, maar ook innovatievere implementatiemogelijkheden is echter op kleinere schaal (vermogens < 1 MW) eveneens plaats voor rendabele waterkrachtprojecten. Een voorbeeld is de recent geopende waterkrachtcentrale HydroCatala van 110 kW in Drogenbos (België).

Het doel van dit onderzoek is dan ook om deze potentie in kaart te brengen zodat de uitkomsten gebruikt kunnen worden voor lokale partijen zoals ontwikkelaars en energiecoöperaties voor de ontwikkeling van waterkracht.

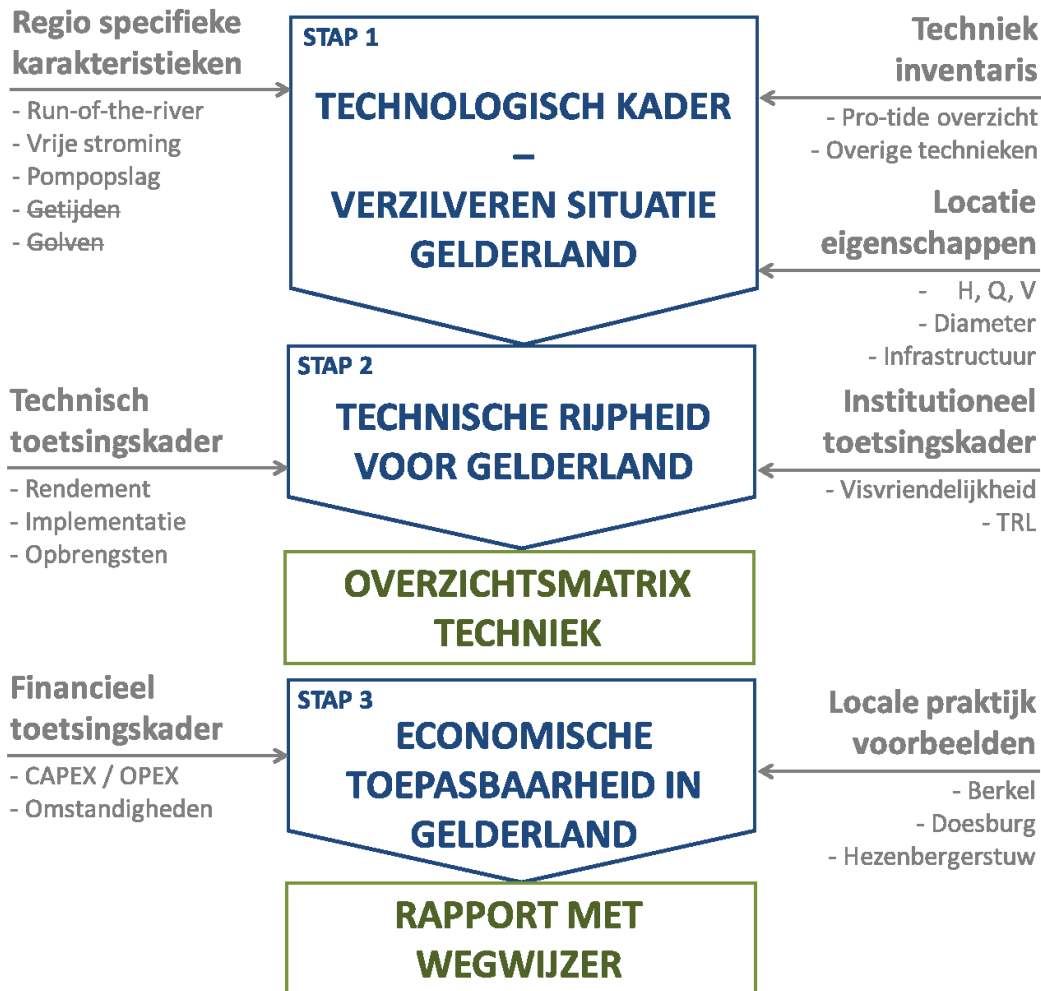
De Provincie Gelderland wenst hiermee een bijdrage te leveren in het aandeel groene stroomlevering. Waterkracht heeft hierbij het voordeel dat de energievorm vrijwel continu aanwezig is en nagenoeg niet zichtbaar. De centrale bevindt zich immers in de waterloop en kan zelfs een fraaie toeristische aantrekkingspool zijn. Aandacht dient wel te gaan naar de ecologie en met name een veilige vispassage. Daarnaast dient natuurlijk ook rekening te worden gehouden met de scheepvaart.

1.2 Leeswijzer

Onderstaande figuur toont het plan van aanpak:

- Vooreerst wordt onderzocht wat het technologische kader is van de studie. M.a.w. **welke mogelijkheden voor waterkracht** zijn er aanwezig in de Provincie Gelderland en welke technologieën zijn hiervoor toepasbaar. Deze analyse wordt uitgewerkt in hoofdstuk 2.
- In hoofdstuk 3 worden de verschillende technologieën meer in detail bestudeerd en objectief via een aantal criteria vergeleken. Deze analyse levert een **technologiematrix** op specifieke voor de Provincie Gelderland.
- Parallel aan de technologie-inventarisatie wordt in de Provincie onderzocht welke locaties potentievol kunnen zijn voor de ontwikkeling van waterkracht. Hiervoor worden zowel de regionale als de Rijkswateren bestudeerd. Deze analyse levert een 'gepersonaliseerde' **waterkracht potentiekaart** voor de Provincie Gelderland met als doel om voor ontwikkelaars kansen inzichtelijk te maken. De analyse wordt in hoofdstuk 4 beschreven.
- Hoofdstuk 5 behandelt vervolgens de financiële haalbaarheid volgens de 'reversed financial engineering' methodiek (**bepaling (on)rendabele top**) van 2 welgekozen locaties.
- Een beschrijving van lokale praktijkvoorbeelden wordt behandeld in hoofdstuk 6. Hierbij wordt gekeken naar de business case en de '**lessons-learned**' van de (toekomstige) waterkrachtcentrale.

- Ten slotte worden in hoofdstuk 7 de conclusies weergegeven.



Figuur 1-1 Plan van aanpak waterkrachtstudie Provincie Gelderland.

2 Technologisch kader

2.1 Inleiding

Energiewinning uit rivieren en watergangen door middel van waterkracht kan op twee principiële verschillende wijzen gebeuren. De energie wordt gewonnen uit een lokaal verval ter plaatse van bijvoorbeeld een kunstwerk in een rivier. Hierbij wordt de potentiële energie in het water gebruikt om energie op te wekken. Een tweede manier is om energie te halen uit de rivierstroming (snelheid in het water). In dit geval wordt de kinetische energie in het water gebruikt.

Voor beide principes zijn er een aantal (commerciële) technieken die dergelijke energiewinning mogelijk maken. Gezien de omvang en grootte van vermogens die in de regio Provincie Gelderland economisch exploiteerbaar zijn, richt dit rapport zich enkel op kleinschalige waterkracht (zie verder). Kleinschalige waterkracht wordt gedefinieerd volgens de definities van UNIDO¹. Een overzicht van deze indeling volgens geïnstalleerd vermogen in kW (lees kilowatt = 1.000 Watt) wordt gegeven in onderstaande Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Classificatie voor waterkracht volgens UNIDO

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

De winning van golfenergie is per definitie een derde manier om in het studiegebied groene energieproductie te realiseren. Golven die door de wind of scheepvaart op de rivieren of andere oppervlaktewateren gevormd worden, bevatten immers een bepaalde energie die in theorie gewonnen kan worden. De energie-inhoud is echter minimaal vanwege de beperkte strijklengte in de meest voorkomende windrichting voor de ontwikkeling van golven in het studiegebied waardoor de haalbaarheid eerder twijfelachtig is. Deze wijze van energieopwekking wordt daarom niet verder behandeld. De winning van energie uit osmose is eveneens niet van toepassing in het studiegebied aangezien geen zouthoudende wateren aanwezig zijn.

In de volgende paragrafen wordt de verschillende technieken toegelicht. Deze dienen als een basis voor de laatste paragraaf van dit hoofdstuk: de selectie van de toepasbare technologie voor de provincie Gelderland.

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

2.2 Theoretische methodes voor energiewinning

2.2.1 Energiewinning uit verval

De valhoogtes die in de Gelderlandse rivieren voorkomen zijn laag ($\ll 10\text{m}$). Daardoor zijn de te installeren vermogens beperkt tot maximaal 10 - 15 MW. Toch kunnen ook bij lagere vervallen waterkrachtcentrales een interessante toepassing zijn.

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

$$(2.1) \quad P = \eta_t \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \quad (\text{in W})$$

In deze formule staat g (m/s^2) voor de gravitatie, ρ (kg/m^3) 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 opgewekte elektrisch vermogen. η_t is het product van een aantal deelrendementen waaronder het turbinerendement (feitelijk is motorrendement η_m een juistere benaming aangezien niet alle machines turbines zijn). Onder het motorrendement vallen het generatorrendement, overbrengingsrendement (niet alle machines vereisen overbrengingsystemen), en eventuele andere deelrendementen. 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.

Opgemerkt zij 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 vuilrooster. 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 2.1 is het dus mogelijk om met een klein verval en een groot debiet toch een vrij aanzienlijke hoeveelheid energie op te wekken. Zo is bijvoorbeeld bij de stuw te Driel bij een klein verval van 1,7 m en debiet van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ het vermogen circa 1 MW of 1.000 kW. Dit is in Nederland een veelvoorkomende situatie. Toch beperken de randvoorwaarden met betrekking tot de locatie doorgaans de keuze van techniek al enigszins (zie verder).



2.2.2 Energie uit stroming

Systemen die de kinetische energie van een waterstroom benutten voor het produceren van elektrische energie (of andere vormen van energie) 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):

$$(2.2) P = (\rho \cdot A \cdot v) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot v^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W})$$

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 verachtvoudiging 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, etc.). Het totaal aan verliezen, inclusief de C_p factor, wordt in rekening gebracht door de factor η . De formule (2.2) is aldus te herschrijven als:

$$(2.3) P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{in W})$$

Opgemerkt zij op een dergelijke formulering 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 dichtheid van lucht. Zodoende kunnen stromingsturbines economisch rendabel zijn vanaf snelheden van ongeveer 1,5 – 2,0 m/s . Dergelijke situaties kunnen in de Nederlandse rivieren voorkomen. Dat is meestal het geval bij bochten of vernauwingen waar het water door gedwongen wordt (zoals openingen in estuaria, nauwe doorgangen, (spui)sluizen).

2.2.3 Regio specifieke karakteristieken

De keuze van een turbine en daarmee het type waterkrachtcentrale wordt ingegeven door locatie-specifieke omstandigheden (verval, debiet, snelheid, etc.). Draaien we dit om, dan bepaalt de regio Gelderland in feite uit welke waaier van technieken een ontwikkelaar, energiecoöperatie of overheid kan kiezen bij het ontwikkelen van een waterkrachtcentrale.

In functie van enkele weloverwogen keuzecriteria is het daarom raadzaam om een eliminatieproces te doorlopen om zodoende enkel werkelijk toepasbare technieken op te nemen in voorliggende studie. Voor het eliminatieproces gebruiken we volgende criteria:

Om tot een goede selectie van In het eliminatieproces worden volgende keuzecriteria gehanteerd:

- **Regio-specifieke karakteristieken:** welke locaties komen überhaupt voor in de Provincie Gelderland?
Golf- en getijdenenergie zijn niet van toepassing waardoor enkele turbinefamilies niet meegenomen dienen te worden. De focus komt hierdoor te liggen op verval locaties (run-of-the-river), vrije stromingslocaties en pompslag.
- **Locatie-eigenschappen:** wat zijn typische locatiekarakteristieken zoals vervallen, debieten of snelheden in de Provincie Gelderland? Op basis van ervaring, GIS-data en gesprekken met de drie Waterschappen² in de Provincie Gelderland zijn volgende criteria gehanteerd:
 - Vervallen (H): < 10 m
 - Debieten (Q): geen beperking
 - Watersnelheden (v) > 1 m/s voor minimaal 3.000 draaiuren per jaar
 - Diameter van turbines (bepaald door breedte / diepte rivier) < 5 m
- **Lokale infrastructuur:** Vervolgens zijn er nog een aantal infrastructuurafhankelijke toepassingen zoals integraties bij sluizen of pijpleidingen. Hiervoor zijn dan ook specifiekere technieken beschikbaar (bijvoorbeeld lucht sifonturbine, etc.). Deze worden eveneens meegenomen in de beschouwing.
- **Techniekinventaris Pro-Tide.** Op basis van voorgaande eliminatieparameters worden de toepasbare technieken geselecteerd uit het pro-tide³ overzicht. Bijkomend worden overige technieken meegenomen die niet vermeld zijn in het pro-tide overzicht.

Deze eliminatieprocedure resulteert in een selectie van toepasbare technieken voor de Provincie Gelderland. Deze technieken worden in het volgende hoofdstuk toegelicht.

² Rijn en IJssel, Rivierenland en Vallei en Veluwe.
³ www.pro-tide.eu/

3 Overzicht van de technologieën

3.1 Algemeen

Het selecteren van een technologie (turbine / motor) is afhankelijk van een aantal variabelen waaronder debiet en verval in eerste instantie bepalend zijn. De eerder genoemde lagere vervalhoogtes vernauwen de keuze aangezien dergelijke systemen tot voor kort niet als economisch rendabel beschouwd werden. Voor energie uitstroming is de snelheid van het water bepalend.

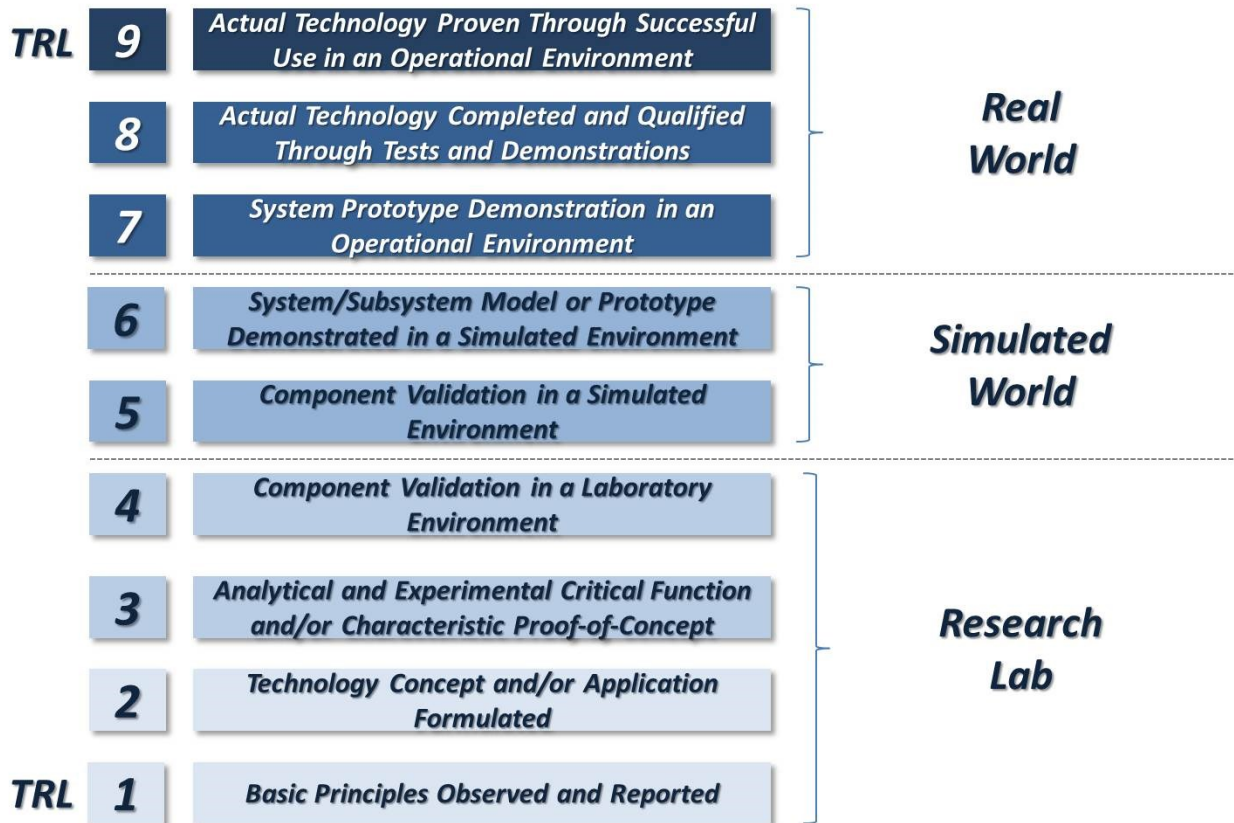
De beschikbare technieken voor de Gelderlandse situatie dienen uiteraard ook getoetst te worden aan een aantal parameters die de 'rijpheid' en omstandigheid definiëren waar en hoe de techniek toegepast kan worden. Hiervoor zijn zowel technische (vermogen, etc.) als institutionele (visvriendelijkheid, etc.) en financiële (zie volgend hoofdstuk) toetsingsparameters belangrijk. Deze drie pijlers vormen immers de dimensies van een business case en zijn belangrijk om inzichtelijk te hebben om als (aantrekkelijke) investeringscasus naar potentiële ontwikkelaars aan te bieden.

Zodoende kan een 'technologiematrix' opgebouwd worden die een overzicht biedt van deze toetsingsparameters. Zodoende is het voor beleidsmakers, ontwikkelaars inzichtelijk welke technieken voor een bepaalde locatie van toepassing kunnen zijn

Volgende parameters worden gehanteerd:

- **Technische karakteristieken** (randvoorwaarden waarbij de techniek ingezet kan worden):
 - minimaal en maximaal verval, debiet, snelheid en vermogen;
 - rendement van de turbine;
 - diameter van de turbine.
- **Financiële karakteristieken**
 - Per techniek zal op basis van leveranciersgegevens de CAPEX (investeringskosten) in €/kW worden opgenomen. De genoemde investeringskosten zijn enkel voor de mechanische componenten (turbine t.e.m. klemmen generator);
 - De OPEX (operationele kosten) van de techniek. Deze is per locatie afhankelijk (hoeveelheid puin, sedimentatie, toegankelijkheid, cascade, etc.) waardoor deze niet wordt meegenomen in deze studie.
- **Institutionele karakteristieken**
 - Visvriendelijkheid: de visvriendelijkheid is nogal verschillend van de diverse type machines. Daarom wordt hier aandacht aan besteed. Bovendien zijn mitigerende maatregelen nodig bij visonvriendelijke machines (bypass, afscherming, afschrikken, etc.). De visvriendelijkheid van de techniek wordt kwalitatief aangeduid met ++, +, - en – quotatie. In hoofdstuk 3.2 wordt voorafgaand aan het technologieoverzicht nog even dieper ingegaan op mitigatiemaatregelen.
 - TRL⁴: niveau van technische rijpheid van de techniek. Hiervoor worden de gangbare 9 levels (EU policy) gehanteerd. Enkele technologie met een TRL > 7 wordt meegenomen. In Figuur 3-1 wordt het overzicht en de definitie van de verschillende TRL niveaus gegeven.
 - Referentie: aanduiding van (een) waterkrachtcentrale(s) met deze toepassing.

4 ec.europa.eu/



Figuur 3-1 Overzicht en definitie van de TRL niveaus. (Bron: ec.europa.eu/.)

In de volgende paragraaf worden de technologieën beschreven (fact-sheet vorm). Als laatste paragraaf worden de technologieën samengevat in de technologiematrix.

3.2 Ecologie: oplossingsrichtingen voor vismigratie

De inbouw van een waterkrachtcentrale kan een gelegenheid zijn om juist de vismigratie te bevorderen. Een stuw of sluis is immers vaak een knelpunt voor de migratie van vissen. Er zijn twee opties om de vismigratie bij stuwen of sluizen te verbeteren indien dit een probleem blijkt te zijn omdat bijvoorbeeld KRW-doelstellingen niet worden gehaald:

- Aangepast stuwbeheer
- Aanleg vispassage

De aanleg van een vispassage ter hoogte van een stuwcomplex vraagt om een aangepast ontwerp. De ruimte is vaak beperkt en het verval over de stuw is aanzienlijk. Technische oplossingen hebben daarom de voorkeur gezien hun beperkte ruimtebeslag⁵. Volgend ontwerprichtlijnen voor vispassage worden gehanteerd:

Ontwerprichtlijnen vispassage

- | | |
|---|---|
| - Positie: | Passage naast de wkc-unit i.v.m. lokstroom. |
| - Minimaal debiet: | 250 l/s (i.v.m voldoende lokstroom) |
| - Minimale waterdiepte: | 20 cm |
| - Maximale stroomsnelheid: | < 0,5 - 1 m/s (verval = < 10 cm/m), bij grotere lengte variërend |
| - Minimale breedte | watervoerend 1,2 m |
| - Functioneren (minimaal): | <ul style="list-style-type: none"> • Paaitrek in voorjaar. Hoogtepunt vaak in de periode half april – half mei, mede afhankelijk van afvoeren en dagtemperaturen. • Najaarstrek: half oktober – half december |
| - Aansluiting op bodem, zowel beneden- als bovenstrooms | |
-

Stuwen en stuwcomplexen zijn uitermate cultuurtechnische landschappen. Het gebrek aan ruimte vraagt daarbij voor de aanleg van een vispassage al om een efficiënt ruimtegebruik. De inpassing van een vispassage kan en mag daarom ook een sterk cultuurtechnische inslag hebben. De meest voor de hand liggende oplossing in dat licht is de toepassing van een Vertical slot of De Wit-passage of afgeleiden daarvan.

Compacte Vertical slot en de Wit passages bestaan uit een hellende of getrapte goot, gecompartmenteerd door schotten. In die schotten zitten vensters c.q. doorgangen van verschillende formaten en positie ten opzichte van elkaar waardoor een variabel stromingsbeeld wordt verkregen met luwten. Ook bij lagere debieten is nog vismigratie mogelijk. De compacte uitvoering maakt dat de passages wel gevoelig zijn voor verstopping door drijfvuil. Periodiek controle en onderhoud zijn noodzakelijk. Toepassing van een vissluis lijkt gezien de ervaringen bij elders in het land, minder effectief dan reguliere schuttingen.

De eventuele passage van vissen door de visvriendelijke turbines verloopt naar verwachting zonder noemenswaardig schade. De instroomopeningen van de turbines worden gewoonlijk voorzien van grof vuil-afvangers. Door dat raster te verfijnen kan dit ook nog dienst doen als viswering, zodat het risico nog verder wordt geminimaliseerd. Door dat verfijnde raster in zowel horizontale als verticale richting diagonaal te plaatsen, ontstaat tevens vis- en vuilgeleiding van de instroomopening af.

⁵ Kroes, M.J. & S. Monden (red), 2005. *Vismigratie; een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland*. OVB/AMINAL, Brussel.

3.3 Technologie voor energie uit verval

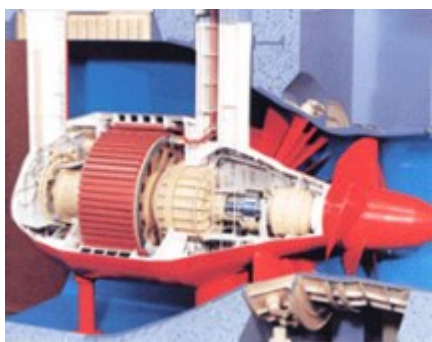
3.3.1 Bulb (Kaplan) turbine

Beschrijving

Een Kaplan turbine is een axiale turbine. Een axiale turbine kan worden voorgesteld als een omgekeerd werkende scheepsschroef. Bij de uitvoering als Bulb of bol turbine 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 zeer hoog (turbinerendementen tot 94%).

Een belangrijk nadeel is de moeilijke toegankelijkheid van de generator voor onderhoud. Door de geringe diameter beschikt het systeem over een lage rotatietraagheid maar vrij hoge omloopsnelheid. Dat laatste is dan weer nadelig voor vispassage. De rotordiameter is meestal maximaal 6 m. Voor de bolgenerator wordt dan een diameter van 3 m aangehouden.



Karakteristieken

Vermogen: 50 – 5.000 kW

Verval: 1 tot 15m

Debiet: 1 – 100 m³/s (per turbine)

Rendement η_t : 75 – 88% (in functie van verval)

CAPEX: 750 – 2.000 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine is omwille van de drukverschillen over de rotor en de omloopsnelheid van de rotor niet visvriendelijk.

Referentie project(en)

1. Waterkrachtcentrale Linne (Nederland): 11,5 MW (bouwjaar 1989). Bij de waterkrachtcentrale te Linne wordt met behulp van vier bulb -turbines, met een schoepenrad van 4 meter doorsnede, per jaar zo'n 52 miljoen kWh opgewekt. (Zie onderstaande foto.)
2. Talloze referenties in het buitenland.

Bronnen

Alstom Power: Internet:

<http://www.power.alstom.com/>

Andritz Hydro GmbH: Internet:

<http://www.andritz.com/>

Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG:

Internet: <http://www.voithhydro.com/>



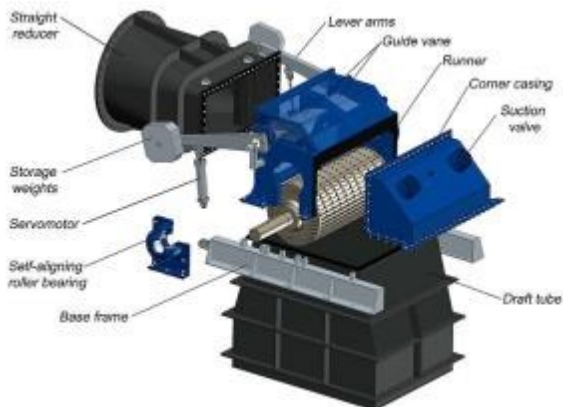
3.3.2 Doorstroomturbine

Beschrijving

Doorstroomturbines zijn radiale impulsturbines. Het water wordt vooreerst doorheen een verstelbaar statorapparaat geleid om vervolgens via straalpijpwerking de schoepen van de cilindrische rotor te bestralen (zie onderstaande figuur). De rotorschoepen worden tweemaal geraakt, eerst van de buiten- naar de binnenzijde en vervolgens van de binnenzijde naar de buitenzijde.

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.

Een sterk argument is dat de doorstroomturbine dus een breed toepassingsgebied heeft. Bemerk wel dat de rotor – gezien deze bij atmosferische druk draait – altijd boven de benedenwaterstand geplaatst moet worden. Dit kan bij een sluiscentrale tot complicaties leiden.



Karakteristieken

Vermogen: 10 – 3.000 kW
 Verval: 2 tot 200 m
 Debiet: 0,04 – 13 m³/s (per turbine)
 Rendement η_i : 65 – 70% (in functie van verval)

CAPEX: 1.000 – 2.500 €/kW

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine is omwille van de relatief snel draaiende rotor niet visvriendelijk.

Referentie project(en)

1. Waterkrachtcentrale te Lautrach (Duitsland): 73 kW: diameter rotor: 6 m.
2. Waterkrachtcentrale te Stausee (Duitsland): 25 kW: diameter rotor: 4,5 m.

Bronnen

Hydrowatt Ltd: Internet:
<http://www.hydrowatt.de/>.

Ossberger GmbH + Co: Internet:
<http://www.ossberger.de/>.

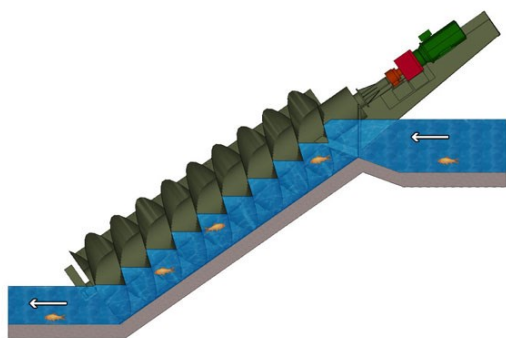


3.3.3 Schroefmotor (of vijzel)

Beschrijving

Vijzelgeneratoren zijn geschikt voor kleine waterkrachtinstallaties met weinig maar constant verval en een laag debiet. Het robuuste systeem behaalt totale rendementen die gelijkwaardig zijn aan conventionele turbines die gebruikt worden voor hogere vermogens (bijvoorbeeld Kaplan turbines). Bovendien behoudt het systeem deze hoge efficiëntie bij deellast condities zonder hierbij dure maatregelen te voorzien zoals verstelbare rotor- en statorschoepen bij turbines. Zo kan de schroef steeds gedimensioneerd worden voor een hoog vermogen, waarbij ook een lager debietaanbod met hoge efficiëntie wordt omgezet tot elektriciteit.

De schroefvijzel bestaat meestal uit een vaste, gesloten of halfopen buitencilinder waarin een binnencilinder met schroefbladen verdraait. De vijzel is een omvangrijke machine (grote diameter door lage vullingsgraad en de hellingsgraad met de horizontale is 20° tot 30° wat de opstelling lang maakt).



Karakteristieken

Vermogen: 1 – 500 kW

Verval: 0,5 tot 10m

Debiet: 0,1 – 10 m³/s (per turbine)

Rendement η_t : 70 – 80% (in functie van verval)

CAPEX: 1.000 – 2.500 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: visvriendelijk door lage rotatiesnelheden.

Referentie project(en)

1. Waterkrachtcentrale Drogenbos (België): 110 kW (bouwjaar 2014).
2. Waterkrachtcentrale Hezenbergerstuw (Nederland): 28 kW (bouwjaar 2012).
3. Talloze referenties in o.a. Duitsland.

Bronnen

Andritz Hydro GmbH: Internet:

<http://www.andritz.com/>

Spaans Babcock: Internet:

<http://www.spaansbabcock.com/>

Landustrie: Internet:

<http://www.landustrie.nl/>

Fishflow Innovations: Internet:

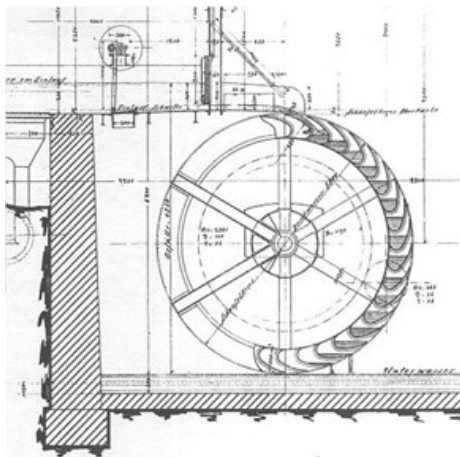
<http://www.fishflowinnovations.nl/>



3.3.4 Bovenslaand waterrad

Beschrijving

Een bovenslaand waterrad behoort tot de familie van de waterraderen. Dit type rad ontvangt het water aan de bovenzijde. 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. 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 diameter van het waterrad en daarmee de grootte van de installatie wordt bepaald door het te overwinnen hoogteverschil. De optimale rotatiesnelheid van het rad bedraagt ongeveer 7 – 10 rpm.



Karakteristieken

Vermogen: 1 – 100 kW
 Verval: 2,5 tot 10m
 Debiet: 0,1 – 2,5 m³/s (per turbine)
 Rendement η_t : 65 – 75% (in functie van verval)

CAPEX: 3.000 – 4.500 €/kW (hoge CAPEX door typisch lage ontwerpvermogens).

TRL: 9
 Visvriendelijkheid: visvriendelijk door lage rotatiesnelheden.

Referentie project(en)

1. Waterkrachtcentrale De Hamermolen Ugchelen (Gelderland, Nederland): <10 kW.
2. Talloze referenties in het binnen- en buitenland. Niet elke molen is echter gerestaureerd tot een waterkrachtcentrale. Het overzicht van de molens in Nederland is te vinden op:
https://nl.wikipedia.org/wiki/Lijst_van_watergedreven_molens_in_Nederland/.

Bronnen

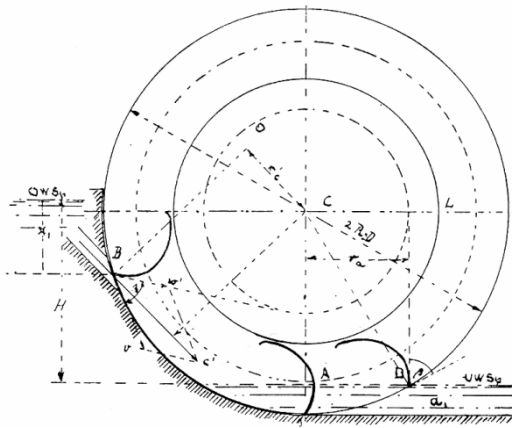
Hydrowatt Ltd: Internet:
<http://www.hydrowatt.de/>.
 Water Wheel Factory: Internet:
<http://www.waterwheelfactory.com/>.



3.3.5 Middenslaand waterrad

Beschrijving

Een middenslaand waterrad behoort tot de familie van de waterraderen. Onderstaande figuur toont een doorsnede van een middenslaand waterrad. Het water bestraalt de cellen met een vrij grote helling waardoor een snelle vulling wordt gegarandeerd. Hierdoor kan een dergelijk rad een groter debiet verwerken dan een bovenslaand waterrad. 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.



Karakteristieken

Vermogen: 1 – 100 kW

Verval: 1,5 tot 4m

Debiet: 0,5 – 7 m³/s (per turbine)

Rendement η_t : 55 – 70% (in functie van verval)

CAPEX: 3.000 – 4.500 €/kW (hoge CAPEX door typisch lage ontwerpvermogens).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: visvriendelijk door lage rotatiesnelheden.

Referentieproject(en)

1. Waterkrachtcentrale Molen van Otten in Wijlre (Nederland): <10 kW.
2. Talloze referenties in het binnen- en buitenland. Niet elke molen is echter gerestaureerd tot een waterkrachtcentrale. Het overzicht van de molens in Nederland is te vinden op:
https://nl.wikipedia.org/wiki/Lijst_van_watergedreven_molens_in_Nederland/.

Bronnen

Hydrowatt Ltd: Internet:

<http://www.hydrowatt.de/>.

Water Wheel Factory: Internet:

<http://www.waterwheelfactory.com/>.

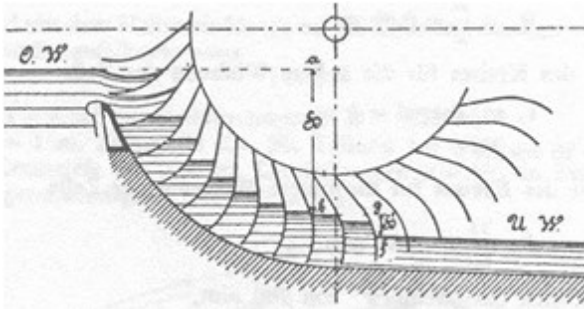


3.3.6 Onderslaand waterrad

Beschrijving

Een onderslaand waterrad behoort tot de familie van de waterraderen. Onderslaande waterraderen werden ontwikkeld voor zeer lage hoogteverschillen. Dergelijke wielen werd eerst ingezet als impulsraden (stromingsraden) waarbij de kinetische energie van de stroming benut werd. De Zwitserse ingenieur Zuppinger optimaliseerde ten slotte het model van onderslaande waterraden door de bladen licht achteruit te hellen. Dergelijke waterraderen worden daarom ook Zuppinger raden genoemd.

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



Karakteristieken

Vermogen: 1 – 100 kW
 Verval: 0,5 tot 2 m
 Debiet: 0,5 – 20 m³/s (per turbine)
 Rendement η_t : 50 – 55% (in functie van verval)

CAPEX: 4.000 – 5.500 €/kW (hoge CAPEX door typisch lage ontwerpvermogens).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: visvriendelijk door lage rotatiesnelheden.

Referentieproject(en)

1. Waterkrachtcentrale Volmolen in Waalre (Nederland): <10 kW.
2. Talloze referenties in het binnen- en buitenland. Niet elke molen is echter gerestaureerd tot een waterkrachtcentrale. Het overzicht van de molens in Nederland is te vinden op: https://nl.wikipedia.org/wiki/Lijst_van_watervedreven_molens_in_Nederland/.

Bronnen

Hydrowatt Ltd: Internet:

<http://www.hydrowatt.de/>.

Water Wheel Factory: Internet:

<http://www.waterwheelfactory.com/>.



3.3.7 VLH – Very Low Head Turbine

Beschrijving

De VLH turbine is een axiale turbine (afgeleide van de Kaplan turbine) bestaande uit verstelbare rotorbladen. Net voor de rotor bevindt zich een statorring met vaste leidschoepen. De openingen tussen de leidschoepen worden elk afgeschermd met drie vlakke staven welke fungeren als vuilrooster. De turbine wordt gebouwd in een vast frame dat hellend opgesteld wordt (30° tot 50° ten opzicht van het aanstromende water). Het frame fungeert als een soort dam waardoor, eenmaal de turbine in de waterloop wordt gekanteld, er een opstuwing stroomopwaarts plaatsvindt. Door het toepassen van deze techniek kan de machine eenvoudig in een stuwdoorgang geïntegreerd worden, wat een reductie van de civiele kosten als gevolg heeft.

De designfilosofie van de VLH-turbine gaat in tegen de algemene ontwerptrend die uitgaat van een zo kleine mogelijke diameter om de turbinekosten te reduceren. Deze trend (bijvoorbeeld Kaplan turbines) heeft echter het nadeel dat hierdoor snelheden toenemen en dus meer constructieve eisen aan de civiele opbouw (complexe inlaat, uitlaat) worden gesteld wat hogere bouwkosten impliceert. Door de juist grote diameter van de VLH-turbine zijn de drukverschillen tussen inlaat en uitlaat laag waardoor deze turbines een visvriendelijk karakter krijgen.



Karakteristieken

Vermogen: 100 – 500 kW

Verval: 1,5 tot 4,5 m

Debiet: 10 – 27 m³/s (per turbine)

Rendement η : 75 – 80% (in functie van verval)

CAPEX: 1.500 – 2.500 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine is omwille van de lage drukverschillen over de rotor en de lage omloopsnelheid van de rotor visvriendelijk.

Referentie project(en)

1. Waterkrachtcentrale Marcinelle (België): 2 x 323 kW.
2. Talloze referenties in het buitenland. Een overzichtkaart met de referenties is te vinden op: <http://www.vlh-turbine.com/referencespage/list/>.

Bronnen

MJ2 Technologies: Internet:
<http://www.vlh-turbine.com/>

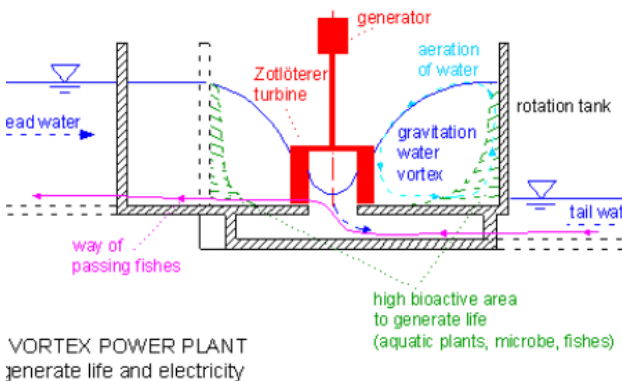


3.3.8 Gravitation Water Vortex Power Plant

Beschrijving

De GWVPP bestaat een spiraalvormig bassin met in het centrum een turbine (Zotlöterer turbine, naar de uitvinder). Het water wordt naar het bassin of tank geleid waar het door de specifieke configuratie van de tank roteert. Hierdoor wordt de centrale turbine met vrij hoog rendement aangestroomd (weinig turbulentie). Onder de turbine en de rotatietank stroomt het water terug naar de rivier.

De Zotlöterer turbine is in feite een waterrad type met een verticale as. Door de optimale aanstroming behaalt de turbine rendement die vergelijkbaar zijn met de bovenslaande waterraderen. Door de relatief lage watersnelheden draait de turbine aan een lage snelheid (maximum 45 rpm). Hierdoor heeft de turbine een visvriendelijk karakter en kunnen de vissen vlot migreren via de rotatietank zonder een vis bypass.



Karakteristieken

Vermogen: 0,2 – 40 kW
 Verval: 0,7 tot 2 m
 Debiet: 0,02 – 20 m³/s (per turbine)
 Rendement η_t : 75 – 80% (in functie van verval)

CAPEX: 1.500 – 2.500 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine is omwille van de lage omloopsnelheid van de rotor visvriendelijk.

Referentie project(en)

1. Tiental referenties: en overzichtkaart met de referenties is te vinden op:
<http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/reference-plants/>.

Bronnen

Zotlöterer: Internet:
[/http://www.zotloeterer.com/](http://www.zotloeterer.com/)



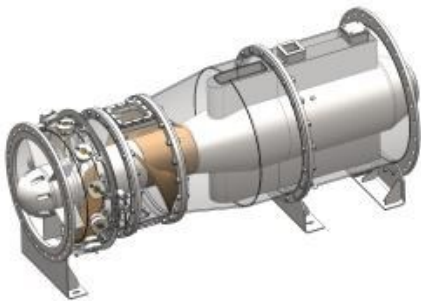
3.3.9 Horizontale turbine (Fishflow Innovations)

Beschrijving

De Horizontale turbine (in feite een axiale stromingsturbine) is een turbine waarbij de rotor axiaal doorstroomd wordt (Nederlandse technologie). Net zoals bij de bulb turbine leent de uitvoering met horizontale as zich bij uitstek voor lage-drukcentrales vanwege de gunstige hydraulische eigenschappen. Omwille van regelbare loopschoepen, kunnen deze turbines bij lagere debieten met een hoog rendement draaien.

Deze turbine van Fishflow Innovations is een visvriendelijke variant van een Kaplan (bulb) turbine. De innovatie zit in de vorm van de rotorschoepen in combinatie met de dubbele regulering door leidschoepverstelling en toerentalregeling. Door gebruikmaking toerentalregeling in plaats van loopschoepverstelling, zijn de loopschoepen fixed. Dit betekent dat er geen complex mechanisme in de rotor aanwezig is en resulteert ook in minder onderhoud/downtime. Ook is hierdoor de naaf van de turbine compleet olievrij.

De visvriendelijke lagedruk waterturbine van Nijhuis Pompen / Fishflow Innovations, is succesvol op visvriendelijkheid is getest. Dit gebeurde met een prototype met een rotordiameter van 800 millimeter bij gemaal De Leeghwater in Buitenkaag . Dat is echter ook de enige test dat het bedrijf heeft uitgevoerd waardoor de techniek nog niet als commercieel toepasbaar wordt beschouwd.



Karakteristieken

Vermogen: 50 – 5.000 kW (of meer in de toekomst)

Verval: 2 tot 10 m (of meer)

Debiet: 1 – 50 m³/s (per turbine)

Rendement η_t : 75 – 80% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL, maar zal naar verwachting gelijkaardig zijn als de bulb / VLH turbine.

TRL: 8

Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van zijn ontwerp (zie boven) een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Testlocatie De Leeghwater (Nederland).

Bronnen

Fishflow Innovation:

<http://www.fishflowinnovations.nl/>

Nijhuis pompen : Internet:

<http://www.hollandpompgroep.nl/>



3.3.10 Lamella Turbine

Beschrijving

De Lamella Turbine is een Oostenrijkse technologie en behoort tot de familie van de onderslaande waterraderen. Dit betekent dat het water versneld wordt door het betrekkelijk lage hoogteverschil om zodoende de Lamella turbine te bestralen. Hierdoor wordt de energie van het water omgezet naar elektrische energie. Strikt genomen is de technologie geen turbine maar een motor (de energie wordt opgewekt door de zwaartekracht of te wel verdringing).

Het verschil zit in de vorm van de rotorbladen. De bladen zoals die gekend zijn bij conventionele raderen zijn vervangen door een individueel vormgegeven lamellen of bundels van lamellen. De filosofie is dat deze (bundels) lamellen in functie van het verval worden geoptimaliseerd om zodoende hogere rendementen te bekomen in vergelijking met hun familie.

Door meerdere Lamella wielen naast elkaar te schakelen, kan een groter debiet verwerkt worden. Door de lage rotatiesnelheden alsook het werkingsprincipe heeft deze technologie een visvriendelijk karakter.



Karakteristieken

Vermogen: 10 – 1.000 kW

Verval: 2,5 tot 10m

Debiet: 0,5 – 10 m³/s (per turbine)

Rendement η_t : 65 – 75% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL, maar zal naar verwachting lager zijn dan de onderslaande waterraderen aangezien grotere vermogens per machines realistisch zijn.

TRL: 8/9 (twee operationele testprojecten)

Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Testproject(en)

1. Twee operationele testlocaties te Graz (42 kW) en Wiener Neustädter Kanal (10 kW) in Oostenrijk. Beide zijn sinds 2008 operationeel.

Bronnen

Lamella Turbines: Internet:
<http://www.bew-power.at/>.



3.3.11 Kata Max Wheel

Beschrijving

Het Kata Max waterrad is een Duitse technologie en behoort tot de familie van de bovenslaande waterraderen. De filosofie is echter dat het rad niet rond is maar samengedrukt tot een balkvorm om zodoende ruimte te besparen (compact). De Kata Max ontvangt het water aan de bovenzijde. Een klepsysteem (sluis) regelt de toevoer. Het water wordt vervolgens opgevangen in nauwkeurig ontworpen 'bakken' waarna het rad verdraait ten gevolge van de zwaartekracht van het water.

De bakken werden in het originele ontwerp (dus ook bij de testlocaties) vervaardigd uit staal. Deze bakken werden vervolgens uit roterend gemonteerd op het balkvormig wiel. Hierdoor waren er te veel roterende delen wat nadelig is voor onderhoud. In hun laatste ontwerp is het wiel ontworpen in kunststof en bezit hierdoor geen roterende onderdelen. Bemerkt dat kunststof ook verslijt.

De hoogte van het waterrad en daarmee de grootte van de installatie wordt bepaald door het te overwinnen hoogteverschil. De optimale rotatiesnelheid van het rad bedraagt ongeveer 7 – 10 rpm.



Karakteristieken

Vermogen: 2,5 – 50 kW

Verval: 1,5 tot 20m

Debiet: 0,5 – 3 m³/s (per turbine)

Rendement η_i : 65 – 75% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL, maar zal naar verwachting gelijkaardig zijn dan de bovenslaande waterraderen. Mogelijk kan de kostprijs zelfs iets lager uitvallen door eenvoudig fabricerbare rotor (kunststof).

TRL: 8/9 (een operationele testproject)

Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Referentie project(en)

1. Testlocatie te Heuberg-Water-Supply (Duitsland): ca 150 kW. (Operationeel sinds 2007.)

Bronnen

Kata Max Wheel: Internet:
<http://www.sustainableinnovations.org>



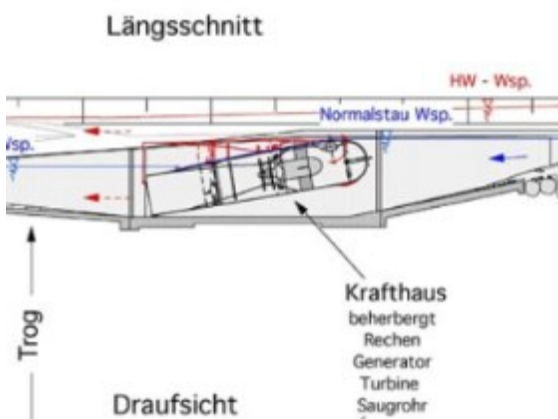
3.3.12 Das Bewegliche Wasserkraftwerk

Beschrijving

Das Bewegliche Wasserkraftwerk is een Duitse technologie en behoort tot de familie van Kaplan turbines. Het unieke van de technologie is dat het elektriciteitsopwekking combineert met tijdelijke vispassage, sediment- en (hoog) waterafvoer door het feit dat de gehele constructie beweegbaar is. De turbine- en generatorhuis kunnen immers roteren rond de ophangingsas. Het nadeel is dan weliswaar dat niet altijd het volledige debiet wordt aangewend voor energieopwekking.

Het principe is als volgt: bij hoogwater situaties (situatie waarbij meer debiet afgevoerd moet worden dan de turbine aankan) wordt de centrale gekanteld waardoor een opening onder de turbine ontstaat. Deze opening kan worden gebruikt voor de afvoer van het extra water en sediment. Bij een normale of lage afvoer, sluit de turbinegroep als het water de volledige opening en gaat het debiet integraal door de turbine. (Zie onderstaande figuur voor de twee standen.)

De turbine is afgesloten door een bolvormig rooster aan de inlaat. De continue reiniging van het rooster is hierdoor een aandachtspunt. Omwille van de korte inlaat is het rendement lager dan bij een conventionele bulb turbine.



Karakteristieken

Vermogen: 50 – 1.000 kW
 Verval: 2 tot 5 m
 Debiet: 1 – 10 m³/s (per turbine)
 Rendement η_t : 65 – 75% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL.

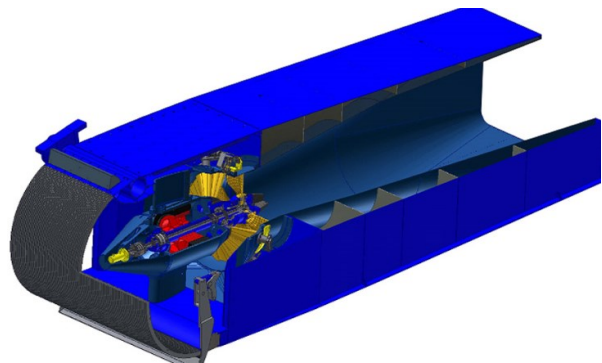
TRL: 8/9 (twee operationele testprojecten)
 Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Testproject(en)

1. Twee operationele testlocaties te Gegenbach (530 kW) en Offenburg (475 kW). Beide zijn sinds 2012 operationeel.

Bronnen

Das Bewegliche Wasserkraftwerk: Internet:
<http://www.das-bewegliche-wasserkraftwerk.de/>



3.3.13 Hydro Generator

Beschrijving

Het Nederlandse bedrijf CCM (Centre for Concept and Mechanics) ontwikkelt een innovatieve techniek waarbij een rotor zowel als waterkracht turbine en als generator fungeert. Hierdoor is de techniek uiterst compact en kan deze eenvoudiger in kunstwerken zoals stuw en sluis worden geïntegreerd. De technologie was oorspronkelijk gekend onder de naam HydroRinG.

De Hydro Generator bestaat uit een stator met daarin een ingebouwde, as-loze rotor. De rotor is een ring die aan de buitenzijde gelagerd is met permanente magneten. In de spleet tussen de ring en stator wordt hierdoor een magnetisch veld geïnduceerd die zorgt voor stroomopwekking in de stator. 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. Een eenvoudige schuif wordt voor de machine gemonteerd om te fungeren als afsluitsysteem.



Karakteristieken

Vermogen: 10 – 200 kW
 Verval: 2 tot 10 m
 Debiet: 1 – 10 m³/s (per turbine)
 Rendement η_t : 65 – 75% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL.

TRL: 8
 Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Testproject(en)

1. Testlocaties te Dordrecht (530 kW) en Offenburg (50 kW). Test is in 2012 uitgevoerd..

Bronnen

Hydro Generator: Internet:
<http://www.ccm.nl>

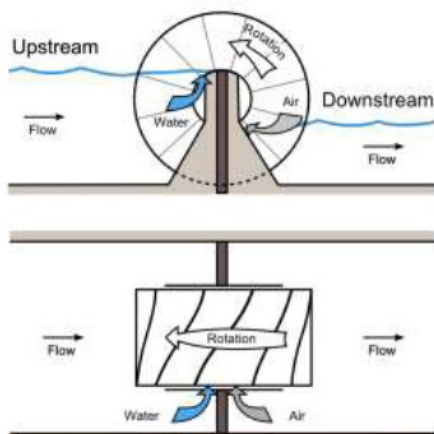


3.3.14 Overa Wheel

Beschrijving

Het Duitse bedrijf Öwatec is gekend omwille van hun vijzeltechnologie (Overa S). Het bedrijf ontwikkelt echter ook een innovatief waterrad (Overa W). Het systeem bestaat uit een rad 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 rotorbladen die radiaal gericht zijn. 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.

Het waterdebiet door de Overa W 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.



Karakteristieken

Vermogen: 10 – 100 kW

Verval: 2 tot 3,5 m

Debiet: 1 – 5 m³/s (per turbine)

Rendement η_i : 55 – 70% (in functie van verval)

CAPEX: nog niet gekend omwille van lage TRL.

TRL: 8

Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Testproject(en)

1. Testlocaties in Duitsland (150 kW).

Bronnen

Overa W: Internet:
<http://www.overa.de/>



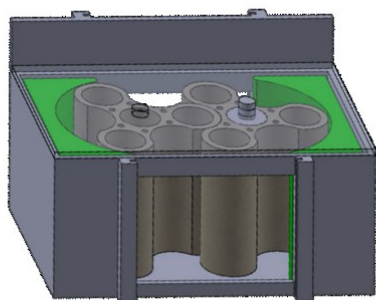
3.3.15 Ronamic

Beschrijving

De RONAMIC Pomp en Turbine (PaT) is een hydrostatische machine dat naast energieopwekking kan pompen. Het werkingsprincipe van de PaT is gebaseerd op twee in elkaar draaiende rotoren (het verdringer-principe) die door waterdruk in beweging worden gebracht. De rotoren bevinden zich in een caisson die tevens als een onderdeel van een dam/civiele constructie kan dienen. De generator bevindt zich buiten het caisson en is daardoor goed toegankelijk voor bijvoorbeeld onderhoud.

RONAMIC PaT levert optimale prestaties bij laag verval (2 tot 5 m) en heeft een laag toerental (max. 20 rpm). Een laag toerental maakt in combinatie met aanvullende maatregelen de PaT visvriendelijk.

Karakteristieken



Vermogen: 60 – 120 kW

Verval: 2 tot 5 m

Debiet: 3 m³/s (per 1 PaT module met 1 rotorset)

Rendement η_t : 60%

CAPEX: 2.000 – 1.000 €/kW bij verval 2 - 5m. Dit is inclusief transport op elke locatie in Nederland.

TRL: 6 (hierdoor niet weergegeven in de samenvattende tabel van paragraaf 3.6)

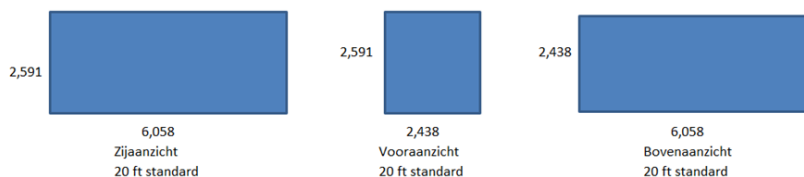
Visvriendelijkheid: visvriendelijk karakter door werkingsprincipe.

Testproject(en)

1. Testlocaties in Nederland.

Bronnen

Ronamic: Internet:
<http://www.ronamic.nl/>



3.4 Technologie voor energie uit de snelheid van water

3.4.1 Tocardo turbine

Beschrijving

De Tocardo turbine van het Nederlandse bedrijf Tocardo BV International is een axiale stromingsturbine. 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 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.

Drie types zijn momenteel commercieel: T1, T2 en R1. Voor deze studie is vooral de T1 interessant aangezien deze turbine ontwikkeld is voor lagere vermogensranges. De T1 is beschikbaar met een diameter van 2.5 tot 4.5 m en heeft nominaal vermogen van 35 tot 50 kW. Het vermogen dat effectief opgewekt wordt is afhankelijk van de diameter en stromingssnelheid van het water.



Karakteristieken

Vermogen: 40 – 200 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 3 – 9 m
 Rendement η_t : 30 – 35%

CAPEX: 3.000 – 4.000 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Referentie project(en)

1. Operationeel project: Oosterscheldekering (Nederland): 1 MW (operationeel sinds 2015) en te Khurkot (Nepal).
2. Testprojecten te Den Oever en Texel.

Bronnen

Tocado turbines: Internet:
<http://www.tocado.com/>



3.4.2 EnCurrent turbine

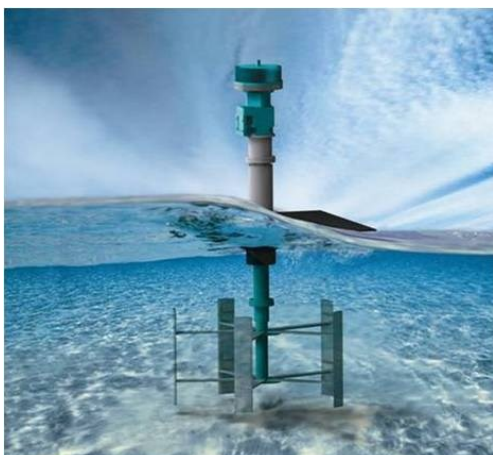
Beschrijving

De Encurrent turbine is een verticale as turbine van het Canadese bedrijf New Energy Corporation Inc. De voordelen van een verticale as turbines zijn dat de machine principieel richtingsongevoelig (ideaal voor getijdentoeepassingen) is en dat deze in principe eenvoudiger opgesteld kan worden dan een horizontale asturbine. 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 (horizontale) steunbalken nodig die ook weerstand genereren.

De Encurrent turbine heeft vier of vijf rotorbladen. De turbine draait steeds in dezelfde richting ongeacht de richting van de stroming. De rotatiesnelheid bedraagt bij optimale werking ongeveer 75 – 90 rpm.

Verskillende modellen zijn beschikbaar: Enc-005, Enc-010, Enc-025 en de Enc-125 (de cijfercode is een indicatie voor het maximum vermogen in kW en dus voor de omvang van de turbine).

De EnCurrent turbine heeft eveneens een uitvoering waarbij de turbine en generatorgroep gemonteerd zijn op een drijvende constructie. Hierdoor kan de drijvende waterkrachtcentrale flexibel ingezet worden.



Karakteristieken

Vermogen: 5 – 125 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 1,5 – 5 m
 Rendement η_t : 25 – 30%

CAPEX: 2.500 – 4.000 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 9

Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Operationele projecten te Nepal, Myanmar en Canada.

Bronnen

KHPS turbine: Internet:
<http://www.newenergycorp.ca>



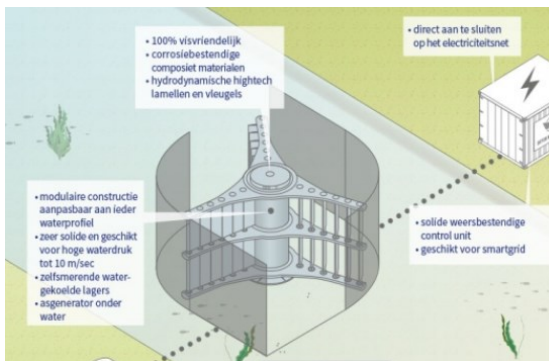
3.4.3 Oryon Watermill

Beschrijving

De Oryon Water Mill is een verticale as motor van het Nederlandse Deepwater Energy. De machine is strikt genomen geen turbine aangezien de rotor draait door verdringing of weerstand: de bladen bewegen om een verticale draaiingsas. De balden staan loodrecht op de stroming als ze met de stroming meebewegen en er druk op wordt uitgeoefend (verdringing). De bladen staan in vaanstand wanneer ze tegen de stroming in bewegen. De rotorbladen richten zich dus gedeeltelijk met de stromingsrichting mee- en tegen, wat het tot een weerstandsmachine maakt. Het effect van lift zoals gangbaar is bij turbines, is dus niet van toepassing.

De voordelen van de motor zijn dat deze principieel richtingsongevoelig (ideaal voor getijdentoeepassingen) is en zelf-startend. De rotatiesnelheid is bij optimale werking vrij laag waardoor deze techniek een visvriendelijk karakter heeft.

Omheen de motor is een specifieke behuizing ontwikkeld die de aanstroming van het water zo hydraulisch optimaliseert.



Karakteristieken

Vermogen: 5 – 3.000 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 0,5 – 10 m / hoogte: 5 – 10 m
 Rendement η_t : 25 – 30%

CAPEX: 2.250 €/kW (gemiddeld)

TRL: 8

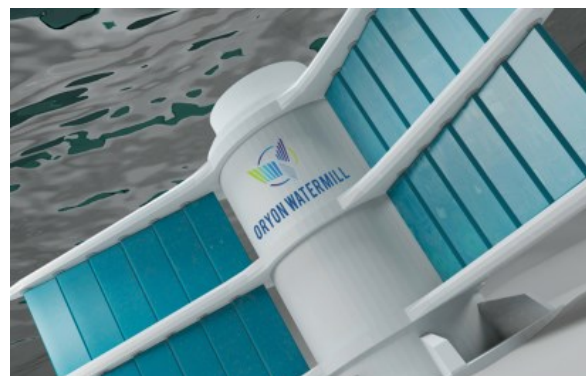
Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Tolkamer Rijn: vrije stroming (Nederland)
2. Testlocatie Ulft (Nederland).
3. Marin Wageningen (Nederland)

Bronnen

Oryon Watermill: Internet:
<http://www.oryonwatermill.com>



3.4.4 KHPS – Kinetic Hydropower System

Beschrijving

Het Canadese bedrijf Verdant Power ontwikkelde een axiale stromingsturbine, de KHPS of Kinetic Hydropower System genaamd, met een diameter van 5 m (Gen 5). De rotor bestaat uit 3 bladen en heeft een nominaal vermogen van 40 kW. De gondel – waarin zich de versnellingsbak en generator bevinden – is gepositioneerd voor de rotor. Deze opstelling bevordert uiteraard het vaaneffect (zelfstandig positioneren van de turbine volgens de stromingsrichting) maar stelt strenge eisen aan de gondel. Deze dient immers zo gestroomlijnd te zijn dat de stromingslijnen zo min mogelijk verstoord worden voor de rotor.

De turbine is gemonteerd op een pyloon. Deze pyloon heeft de vorm van een laminair vleugelprofiel om ook hier 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.



Karakteristieken

Vermogen: 40 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 5 m
 Rendement η_i : 30 – 35%

CAPEX: 3.000 – 4.000 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 8

Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Operationeel testproject: RITE project: zes pre-commerciële modellen met een diameter van 5 m in de New Yorkse rivier. Elk model produceert een piekvermogen van 35,9 kW. Dit was goed voor een totale nominale capaciteit van 150 – 200 kW. Parallel aan deze demonstratiefase werd ook een onderzoek uitgevoerd naar het effect op de vismigratie.

Bronnen

KHPS turbine: Internet:
<http://www.verdantpower.com>



3.4.5 Wave rotor

Beschrijving

De Wave Rotor turbine – destijds een ontwikkeling en design van het Nederlandse bedrijf Ecofys – is een uniek systeem dat zowel stromingsenergie als golfenergie converteert naar elektriciteit. 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).

Destijds Ecofys installeerde en testte een eerste eenheid in augustus 2002 in Denemarken. Momenteel staat er een installatie in Borssele in de Westerschelde. De turbine heeft een diameter van 5 m en een hoogte van 5 m. De rotor heeft een piekvermogen van 30 kWp. De optimale stromingssnelheid van deze turbine bedraagt 2 tot 2,5 m/s.

C-energy heeft nog geen commerciële modellen beschikbaar maar kijkt uit naar nieuwe testlocaties om hun model te testen.

IHC Merwede heeft in 2012 de overeenkomst getekend voor de overdracht van de Wave Rotor technologie van Ecofys.



Karakteristieken

Vermogen: 30 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 5 m
 Hoogte: 5 m
 Rendement η_t : 30 – 35%

CAPEX: 3.000 – 4.000 €/kW (ifv ontwerpvermogen).

TRL: 8
 Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Operationeel testproject te Borssele (Nederland): 30 kW.

Bronnen

Wave rotor: Internet:
<http://www.ihcmerwede.com/>



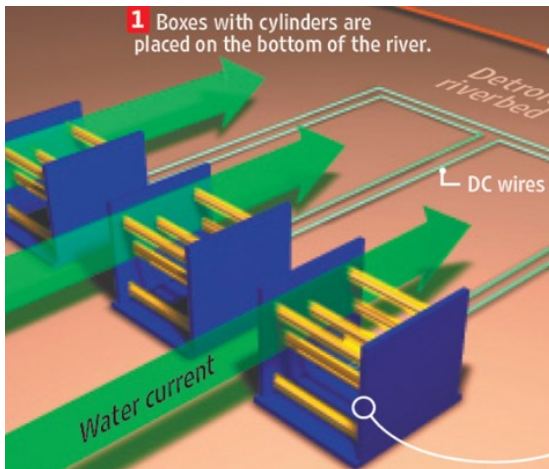
3.4.6 Vivace

Beschrijving

De Vivace technologie (Amerikaans technologie) bestaat uit cilinders die door trilling als gevolg van de stroming van het water elektriciteit opwekken. Wanneer een voorwerp zich in een stroming bevindt ontstaan achter het voorwerp wervelingen (vortexen). Wanneer deze vortexen ontstaan wordt er kracht uitgeoefend op het voorwerp in de waterstroom en zal dit voorwerp gaan vibreren (Vortex Induced Vibration). Bij een constante stroom zal het een trilling zijn met een bepaalde (eigen-)frequentie. Bij het Vivace systeem wordt de energie die vrijkomt bij deze trillende beweging omgezet in stroom.

De trillingen generen vervolgens een gelijkstroom (DC). Op deze wijze kunnen de verschillende cilinders elektrisch gekoppeld worden. Een AC/DC convertor zet de gelijkstroom vervolgens om naar wisselstroom (AC) die geschikt is voor het elektrische net.

Het werkingsprincipe is uniek en kan bij lage snelheden reeds energie opwekken. Omwille van de vorm van de machine (horizontale cilinders) heeft de technologie een visvriendelijk karakter. Een aandachtspunt zijn echter de dichtingen tussen de individuele cilinders en hun respectievelijke generator. Ook kan omwille van de vorm puinophoping een issue zijn. De machine zal hierdoor goed afgeschermd moeten worden.



Karakteristieken

Vermogen: 1 – 100 kW

Watersnelheid: > 1 m/s

Breedte: nog geen data beschikbaar.

Hoogte: nog geen data beschikbaar

Rendement nog geen data beschikbaar

CAPEX: nog geen data beschikbaar.

TRL: 8

Visvriendelijkheid: de technologie heeft omwille van de opbouw een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. De technologie werd in 2012 getest bij de locatie te Ulft.
2. Overige testlocaties zijn te Port Huron (Michigan USA).

Bronnen

Vivace: Internet:

<http://www.vortexhydroenergy.com/>



3.4.7 Water 2 energy

Beschrijving

De W2E technologie is een verticale as turbine van het Nederlandse bedrijf Water 2 Energy. De verticale as turbines is uitgevoerd als een Darrieustype: in operatie ondervinden de verticale, rechte rotorbladen grote buigende momenten ten gevolge van de centrifugale kracht (combinatie van snelheid en massa water). Net zoals bij de EnCurrent turbine zijn ook hier de voordelen dat de machine principieel richtingsongevoelig (ideaal voor getijdentoepassingen) is en dat deze in principe eenvoudiger opgesteld kan worden dan een horizontale asturbine. 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 (horizontale) steunbalken nodig die ook weerstand genereren.

De W2E turbine heeft drie rotorbladen. De turbine draait steeds in dezelfde richting ongeacht de richting van de stroming. Er is momenteel een model beschikbaar. Deze wordt gebruikt als testturbine.



Karakteristieken

Vermogen: 10 kW
 Watersnelheid: > 1 m/s
 Diameter: 2 m
 Hoogte: 2 m
 Rendement η_t : 25 – 30%

CAPEX: nog geen data beschikbaar.

TRL: 8

Visvriendelijkheid: de turbine heeft omwille van de relatief lage rotatiesnelheden een visvriendelijk karakter.

Test project(en)

1. Twee testlocaties met dezelfde machine: De Lek (Nederland, 2013) en Temse (België, 2015).

Bronnen

W2E turbine: Internet:
<http://www.water2energy.nl/>



3.5 Technische innovaties en slimme combinaties

3.5.1 Inleiding

Naast de beschreven technieken staat de ontwikkeling van nieuwe technieken of concepten niet stil. Vaak zijn er slimme combinaties van functies in een gebied te bedenken waardoor investeren in waterkracht de business case kan versterken (win-win). In deze paragraaf worden enkele zaken benoemd die momenteel in ontwikkeling zijn, de meeste in het beginstadium.

3.5.2 Energie-opslag als kans

Nadelen van energie uit zon en wind is dat deze vaak worden opgewekt als de vraag naar energie laag is. Opslag van deze energie is dan nodig. Dit kunnen grote investeringen zijn, vaak in combinatie met verzwaring van het netwerk, wat maatschappelijk gezien hoge kosten zijn. Een meestal goedkope vorm van energie opslag is het opzetten van het waterpeil door water op te pompen en deze later weer door de waterkrachtinstallatie op het net te injecteren in tijden dat er een grote vraag is naar stroom en de stroom ook veel opbrengt. Waterkracht kan dus bijdragen aan het opheffen van de onbalans op het net. Het is ook mogelijk om de waterkrachtinstallatie meteen al bij aanleg zo te bouwen dat deze twee kanten op kan lopen, dus zowel oppompen als turbineren. In paragraaf 6.2 is een case in ontwikkeling die daarin voorziet.

Er zijn plekken in Gelderland waar de combinatie met energie-opslag mogelijk is, zie hiervoor paragraaf 4.4. Ook de businesscase van Lochemenergie bij Eefde is mede gebaseerd op het opslag verhaal, zie paragraaf 6.2. Een bijkomend voordeel van oppompen van water uit lager gelegen delen (zoals grote rivieren) is dat in de zomer ook een deel van het water gebruikt zou kunnen worden voor andere functies zoals doorspoeling, tegengaan verdroging (landbouw en natuur) en verkoeling.

3.5.3 Slim waterbeheer

Om rekening te houden te houden met het zo maximaal mogelijk rendement te halen uit de opwekking door turbinatie is het vaak mogelijk om te sturen via het peilbeheer. Bijvoorbeeld als de energieprijs laag is kan men kiezen om minder te turbineren en waterpeil in achterland tijdelijk iets te laten oplopen om dat in tijden van pieken weer versneld af te voeren.

Nog slimmer is de sturing van waterdoorlaat in turbine te koppelen aan de actuele energieprijismarkt en ook nog rekening te houden met de verwachte weersomstandigheden. Bijvoorbeeld als er een grote regenval op komst is zal er daarvoor meer geturbineerd worden om de bergingscapaciteit in het watersysteem gereed te hebben voor de piekbui. Ook is de waterbeheerregeling te koppelen aan functies die op dat moment water nodig hebben zoals landbouw en natuur.

Er zijn twee projecten waar men proeven wil doen om deze systemen te bouwen en in te regelen, zie smart stuw (paragraaf 6.3) en installatie in Park Lingezege (paragraaf 6.4).

3.5.4 Concepten slimme stuw

Een toekomstbeeld is dat er veel stuwen geschikt gemaakt kunnen worden om stroom op te wekken. Zekers als de stuw aan vervanging toe is en de stuw ligt in stedelijk gebied waar ook nog een opslagmogelijkheid ligt, zijn er (financiële) kansen. Naast de smart stuw (zie paragraaf 6.3) is er nog een innovatief concept in langzaam stromende wateren met relatief laag debiet dat nog doorontwikkeld zou kunnen worden en dat heet de Rotatieturbine. De gedachte is dat water niet alleen over een stuwklep overstort maar via een te regelen onderwaterstuwklep. Dit is optimaler voor de aanstroming van water (minder energieverliezen) waardoor naar verwachting het rendement hoger wordt. De Rotatieturbine® is een modulair ontworpen mini/micro waterkrachtcentrale voor gebruik in langzaam stromend water $\geq 5,5$



cm/s en laag verval ≥ 50 cm. Het turbinevermogen is uitbreidbaar bij hogere waterdoorstroomhoeveelheden zonder civieltechnische- en mechanische verbouwing. De bestaande stuwklep blijft aanwezig waardoor de techniek modulair inpasbaar is.

De technologie is echter nog in ontwikkeling en dient vooreerst nog verder ontworpen en getest te worden.

Een dergelijk type waterkrachtcentrale is bij uitstek geschikt voor plaatsing in het verlengde van een stuwklepcompartiment. Via de uitstroomregeling is deze inkoppelbaar in een lokaal 'Smart-Grid' en dan vraag-instelbaar voor vermogen en/of waterdoorstroomhoeveelheid (debiet). Gegevens van deze uitvinding en nog te onderzoeken vragen zijn opgenomen in bijlage 3. Andere gedachten om kosten van een aanpassing van de stuw zelf te minimaliseren zijn door gebruik te maken van technieken (zoals waterrad) die achter de stuw in een drijfconstructie worden aangelegd. Voorbeelden daarvan zijn te zien op de websites opgenomen in de voetnoot⁶.

In de studie naar mogelijkheden in twee stuwen op de Regge: zie rapport "waterkracht op de Regge" op te vragen bij Eelerwoude.

3.5.5 Concepten slimme sluis

Rijkswaterstaat (RWS) heeft voor enkele van haar eigen sluisen gekeken of er tijdens schutten energie opgewekt kan worden. Zie hiervoor bijvoorbeeld www.sluispedia.nl/Basisvariant. RWS gaat in Tilburg in Wilhelminakanaal een sluis met vijzelgemaal bouwen dat twee kanten opwerkt. De technieken en optimalisaties hiervan staan niet stil en ze dragen zeker bij aan het energieneutraal maken van de locatie waar energie nodig is voor het pompen voor de sluisfunctie. De eerste gedachten in Gelderland zijn om de sluislocaties waar rivieren in verbinding staan met de kanalen (zoals Maas-Waal kanaal) nader te onderzoeken op de mogelijkheden.

3.5.6 Innovaties bij kribben

Het bedrijf Deepwater Energy is met de techniek Oryon Watermill bezig om projecten van de grond te krijgen waarbij net buiten de vaarweg een gedeelte van de kribkop wordt verwijderd en hier een betonnen bak wordt geplaatst met daarin de installatie. Ook bij aan te leggen langskribben (in de geul) en kribverlaging kan dit concept worden geïntegreerd. Dit is interessant omdat hier de stroomsnelheden vaak hoger zijn dan bij normale kribben.

Vrijgekomen materialen (zoals stortsteen) zouden weer kunnen worden ingezet voor andere locaties. Voordelen van de integratie installatie in krib is dat het stromingsbeeld rond kribben nu veelal leidt tot ongewenste turbulentie en daardoor aanzanding of juist erosie. Het idee is dat het afvangen van deze stroming door een installatie gaat leiden tot een rustiger stromingsbeeld (voorkomen kribvlammen) wat gunstig is voor beheer en onderhoud en tevens kan bijdragen aan verhogen van ecologische kwaliteiten bij een slim ontwerp. Een slim ontwerp kan er zelf toe leiden dat er juist slib bezinkt tussen de kribben waar het relatief makkelijk weggehaald zou kunnen worden indien nodig. Dit verse slib is tegenwoordig meestal zodanig van kwaliteit dat het als vruchtbare bodem kan worden ingezet.

3.5.7 Malen op slimme tijden

In Gelderland zijn er met name in de Betuwe gebieden die bemalen moeten worden en in tijden van waterbehoefte voor beregening (met name tuinders in voorjaar) moet water worden opgepompt. Hier is weliswaar geen directe koppeling met opwekken energie uit waterkracht te halen maar het waterschap

⁶ Centrales: www.oblinark.com of www.flusstrom.de



kan wel sturen in het moment waarop zij de pompen aanzet. Dit kan bijvoorbeeld op het moment dat zij zelf een overschot aan energie opwekt of juist gekoppeld aan de laagste tarieven op het net, dit draagt weer bij aan opheffen energie-onbalans. In bijlage 5 en in par 4.4 wordt dit ook aangehaald. Distributienetbeheerder Alliander heeft een rekenmodel REX wat software levert om installatie slim aan te sturen op basis van (voorspellingen) in energieprijzen. Verder is er in sommige situaties een koppeling mogelijk met het concept smartpolder⁷. Ook hier wordt ingegaan op pompen op gunstig tijdstip van lage energieprijzen maar vooral op het bufferen, onbalans wegnemen in energienet en in combinatie met warmte terugwinning uit opgepompt water.

3.5.8 Energieterugverdientijd van waterkrachttechniek

Bij nieuwe technieken wordt ook kritisch gekeken of de productie-input qua energie en grondstoffen om installaties te produceren en weer te recyclen (na levensduur) wel opweegt tegen de energie-opbrengsten die kunnen worden genereerd. In rapport van Ecofys⁸ is de volgende conclusie getrokken: De techniek heeft een energierugverdientijd van 1 tot 2,8 jaar. Dit betekent een energierugverdientijd die in de zelfde orde van grote ligt als windenergie (tussen de 0,5 en 2,5 jaar afhankelijk van locatie).

3.5.9 Koppeling met cultuurhistorie

Er zijn locaties waar van oudsher al watermolens staan. Deze watermolens zijn vaak met wat aanpassingen om te bouwen zodat er stroom opgewekt wordt. Nu zijn er watermolens die stil staan en dat is jammer voor de aantrekkelijkheid van de plek. Een mooie combinatie is de stroom die ter plekke is opgewekt beschikbaar te stellen aan e-bikes of e-auto's en dat er een watermolenroute in Gelderland wordt ontwikkeld. Bepaalde bedrijven hebben zich in dergelijke ontwikkelingen gespecialiseerd zoals Aqwatt (BE) en BAT Sittard (NL)

3.5.10 Toekomst mini- of micro-opwekking

Het rapport gaat niet in op de kleinschalige opwekking van de mini- of micro-opwekking (definitie zie hoofdstuk 1). Toch liggen ook hier nog wel kansen, technieken staan ook hier niet stil. En voor een groep individuele bewoners kan het een zinvolle investering zijn omdat waterkracht vaak meer continuïteit heeft dan zon of wind. De installatie in Ommeren die in paragraaf 6.3 wordt beschreven is slechts bijvoorbeeld voor 1 huishouden (hier alleen voor eigen gebruik).

⁷ www.smartpolder.nl

⁸ "Water als duurzame energiebron, Aanbevelingen en energierugverdientijden van acht technologieën" d.d. 19 februari 2010,

3.6 Samenvatting – Technologiematrix

Onderstaande tabel vat de technologieën samen alsook de karakteristieken per techniek. De bedrijven achter de technologie alsook diens contactgegevens zijn in onderstaande tabel weggelaten om de tabel niet te overladen.

Algemeen		Technische karakteristieken				Finciële krakt.	Institutionele karakteristieken				
Type	Vermogen (kW)	Verval (m)	Debiet (m ³ /s)	Snelheid (m/s)	Diameter (m)	CAPEX (€/kW)	Vis-vriendelijk	TRL	Referentie		
<i>A. Technieken voor potentiële energie</i>											
1	Bulb (Kaplan) turbine	Axiale turbine	50 - 5,000	2 - 15	1 - 100	-	-	750 - 2.500	--	9	Commercieel
2	Cross-flow turbine	Radiale impulsturbine	10 - 2,000	1 - 200	0,04 - 10	-	-	1.000 - 2.500	--	9	Commercieel
3	Vijzel	Axiale motor	1 - 500	0,5 - 10	0,01 - 10	-	-	1.000 - 2.500	++	9	Commercieel
4	Bovenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	3 - 10	0,1 - 2,5	-	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel
5	Middenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	1,5 - 4	0,5 - 7	-	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel
6	Onderslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	0,5 - 2	0,5 - 20	-	-	4.000 - 5.500	++	9	Commercieel
7	VLH	Axiale turbine	100 - 500	1,5 - 4,5	10 - 27	-	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel
8	Gravitation Water Vortex Plant	Axiale turbine	0,4 - 40	0,7 - 2	0,02 - 20	-	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel
9	Horizontale turbine	Axiale turbine	50 - ...	2 - ...	1 - 50	-	-	-	+	8	1 centrale (NL)
10	Lamella turbine	Gravitair rad	10 - 1,000	0,5 - 10	0,5 - 10	-	-	-	++	8 / 9	2 centrales (DE)
11	Kata Max Wheel	Gravitair rad	2,5 - 50	1,5 - 20	0,5 - 3	-	-	-	++	8 / 9	1 centrale (DE)
12	Das Bewegliche Wasserkraftwerk	Axiale turbine	50 - 1,000	2 - 5	> 5	-	-	-	+	8 / 9	2 centrales (DE)
13	Hydro Generator	Axiale turbine	10 - 200	2 - 10	1 - 10	-	-	-	++	8	2 centrales (PH)
14	Overa Wheel	Gravitair rad	10 - 100	2 - 3,5	1 - 5	-	-	-	++	8	1 centrale
<i>B. Technieken voor kinetische energie</i>											
15	Tocado	Horizontale asturbine	40 - 200	-	-	> 1	3 - 9	3.000 - 4.000	+	8 / 9	5 centrales (NL)
18	EnCurrent turbine	Horizontale asturbine	5 - 25	-	-	> 1	1,5 - 5	2.500 - 4.000	+	9	4 centrales
16	Oryon Watermill	Verticale asturbine	5 - 150	-	-	> 1	0,5 - 10	2.500 - 4.000	+	8	1 centrale (NL)
17	Kinetic Hydropower System	Horizontale asturbine	40	-	-	> 1	5	-	+	8	1 centrale (USA)
19	Wave Rotor	Verticale asturbine	30	-	-	> 1	5	-	+	8	1 centrale
20	Vivace	Oscillator	1 - 100	-	-	> 1	-	-	++	8	1 centrale
21	W2E	Verticale asturbine	10	-	-	> 1	2	-	++	8	1 centrale

Figuur 3-2 Technologiematrix voor de Provincie Gelderland

4 Potentie van waterkracht in Gelderland

4.1 Inleiding

Zoals overal in Nederland kan ook voor de Provincie Gelderland onderscheid gemaakt worden tussen de Rijkswateren en regionale wateren.

Voor de Rijkswateren zijn de Maas en de Waal de meest kenmerkende rivieren. Voor de rivieren is ter hoogte van de kunstwerken data opgevraagd bij de betreffende dienst van Rijkswaterstaat. Veel van de nodige data zit verwerkt in het rapport 'Potentie duurzame energie bij kunstwerken'⁹. De informatie nodig voor de inventarisatie van locaties alsook voor de opbouw van de potentiekaart is hierop gebaseerd.

Voor de regionale wateren zijn vrijwel altijd de waterschappen beheerder. Aan de hand van literatuuronderzoek en waterdata van de betreffende waterschappen is een overzicht verkregen van de potentiële locaties in de regionale wateren. Het contact met de waterschappen was tevens belangrijk in verband met eventuele natuurontwikkeling of trajecten om stuwen te laten vervallen of vispassages te realiseren ter plaatse van de gevonden locaties.

4.2 Methodiek

Het theoretisch potentieel op deze locaties is vervolgens geschat met behulp van de formule uit paragraaf 2.2.1. Het vermogen van een waterkrachtcentrale is evenredig met het product van het debiet (m^3/s) door en het verval (m) over de centrale. Bij de waterschappen zijn locaties opgevraagd met een minimaal verval van 0,5m, omdat energieopwekking bij een kleiner verval technisch niet meer haalbaarheid is. We spreken in dat geval van energieopwekking door kinetische energie. Hierna zullen de waterschappen apart besproken worden.



Waterschap Rijn&IJssel

Waterschap Rijn&IJssel (WRIJ) heeft een zeer uitgebreide, online waterinformatie-website. Op deze site zijn meetgegevens te vinden van waterhoeveelheden (waterstanden, afvoeren en stuwpeilen). De meetgegevens zijn afkomstig uit meetnetten van het waterschap.

De meest kansrijke locaties bevinden zich in de grotere watergangen van het waterschap, omdat die ook (langer) water afvoeren, zoals de Oude IJssel en de Berkel. In de kleinere watergangen is in de zomer vaak nauwelijks afvoer, waarbij een aantal zelfs droog valt.

WRIJ heeft in 2011 door Witteveen&Bos een bureaustudie laten uitvoeren naar de haalbaarheid van kleinschalige waterkracht bij acht locaties in de Berkel en de waterlopen van de Oude IJssel. Deze acht locaties zijn overgenomen voor deze studie en opnieuw beoordeeld door eventueel gerealiseerde of geplande vispassages op te nemen.

⁹ Potentie duurzame energie bij kunstwerken, 2009, de Jong R., Van Den Noortgaete T. en Sloopjes N.

Stuwnaam	Rivier	kWh/jaar gemiddeld	Vermogens-klasse	Vispassage aangelegd	Vispassage gepland
Doesburg	Oude IJssel	900.000	> 100 kW	Nee	Ja
De Pol	Oude IJssel	750.000	50 - 100 kW	Nee	Ja
Uift	Oude IJssel	400.000	20 - 50 kW	Ja (ca. 2004)	-
Voorst	Aa Strang	250.000	20 - 50 kW	Ja (2014)	-
Eefde	Berkel	750.000	50 - 100 kW	Nee	Nee
Haarlo	Berkel	400.000	20 - 50 kW	Ja (ca. 2008)	-
Malle	Berkel	300.000	20 - 50 kW	Ja (eind 2010)	-
Rekken	Berkel	250.000	20 - 50 kW	Ja (eind 2010)	-



Waterschap Vallei&Veluwe

Door Waterschap Vallei&Veluwe zijn vervalhoogtes van een groot aantal stuwen aangeleverd, maar gemiddelde afvoeren waren veelal onbekend. Daarom is een ruwe schatting van de gemiddelde afvoer afgeleid voor locaties waar getallen bekend zijn van eens per 10 jaar gebeurtenissen.

In de grafiek van Figuur 4-1 Grafiek voor het bepalen van de afvoerfrequentie. (Bron: Waterschap Vallei&Veluwe). is te zien dat een afvoer die eens per 10 jaar voorkomt ongeveer 140% van de afvoer Q_h is, die 1 à 2 dagen per jaar voorkomt. Met behulp van deze grafiek is een 1/10jaar-afvoer ook te vertalen naar een afvoer die de helft van de tijd wordt overschreden: ongeveer 180 dagen komt overeen met circa 10% van Q_h . Stel dat de 1/10jaar-afvoer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ is, dan $Q_h = 7,14 \text{ m}^3/\text{s}$. De afvoer die ongeveer de helft van de tijd wordt overschreden is 10% van Q_h , dus $0,71 \text{ m}^3/\text{s}$.

Met deze aanpak komt enkel de Hezenbergerstuw naar voren als een kansrijke locatie, waar reeds een centrale is gerealiseerd in 2010. Er blijven nog steeds tientallen locaties waarvoor geen gegevens beschikbaar zijn.

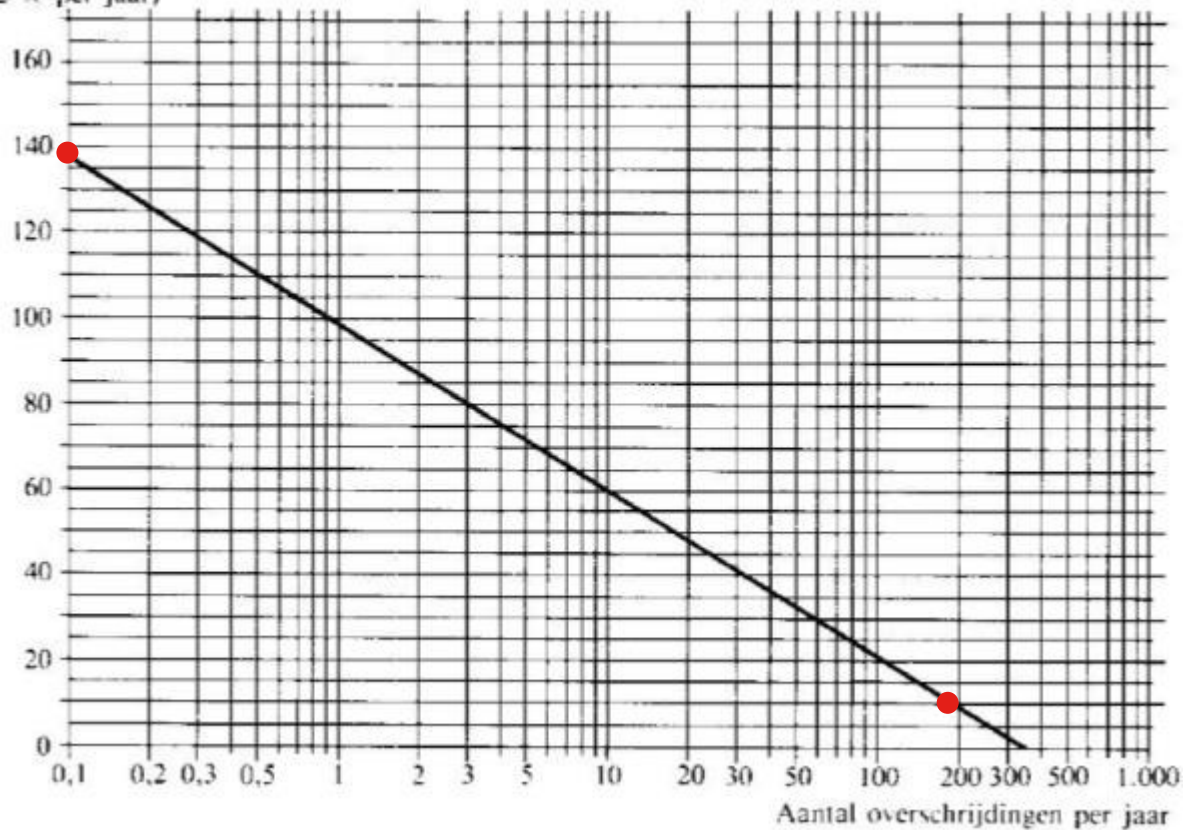


Waterschap Rivierenland

Waterschap Rivierenland (WSRL) heeft in 2010 meegewerkt aan het project Trias Energetica waarbij duurzame energieopwekking bij stuwen in het regionale watersysteem werd besproken. Een eerste inschatting uit deze studie was dat er in het beheersgebied van WSRL een twintigtal locaties zouden zijn waar dit rendabel kan zijn.

Door WSRL zijn vervalhoogtes en “maatgevende afvoerdebieten” aangeleverd: theoretische debieten die 1 à 2 dagen per jaar voorkomen. Wanneer wordt gerekend met de afvoer die ongeveer de helft van het jaar wordt overschreden (zie aanpak Waterschap Vallei&Veluwe), blijken echter in het beheersgebied van WSRL geen locaties te zijn die voor deze studie voldoende vermogen op zullen leveren. Dat wil zeggen vermogens groter dan 15 kW.

Afvoer in procenten
van de afvoer Q_h
(1 à 2 × per jaar)



Figuur 4-1 Grafiek voor het bepalen van de afvoerfrequentie. (Bron: Waterschap Vallei&Veluwe).



4.3 Potenties Gelderse rivieren

In Gelderland zijn er 4 rivieren:

- IJssel
- Nederrijn (met stukje Pannerdens kanaal en Bovenrijn) en Lek
- Waal
- Maas

Om een case voor waterkracht in rivieren te hebben is de stelregel dat de snelheid dan minimaal 1 m/s zou moeten zijn. Om deze reden valt de rivier de Nederrijn in principe af als kans omdat de snelheid daar het grootste gedeelte van het jaar lager is omdat de stuw bij Driel de doorstroming belemmert.

De IJssel als rivier is het meest interessant, omdat deze een relatief hoge snelheid kent zeker in het eerste gedeelte waar de rivier smal is. De snelheid is in een rivier lokaal variabel. In buitenbochten is deze vaak hoger en ook rondom kribben en vernauwingen bij bijvoorbeeld bruggen en bij langsdammen is er meestal een hogere snelheid. Deze plekken zijn het meest interessant.

Om een installatie in de rivier te bouwen zal rekening moeten worden gehouden met een aantal factoren, waarvan hinder door de scheepvaart de belangrijkste is, dit is verder uitgewerkt in bijlage 4 (nautische belangen).

Een kans voor waterkracht in de rivieren is installatie op een kribkop. In paragraaf 3.5.6 is dit principe geschetst. Verdere onderzoeken moeten hiernaar worden uitgevoerd, maar er zijn wellicht ook koppelkansen te benutten als:

- Combinatie met toch al voorziene aanpassingen van kribben
- Verbetering van ecologie in aan te passen kribvak
- Combinatie met slibvang en voorkomen erosie
- Flexibele hoogte-instelling van de installatie (bijvoorbeeld via lucht of waterkussens) afhankelijk van rivierstand

De gedachte dat bekabeling van deze installaties in niet bebouwde gebieden tot hoge kosten kunnen leiden is niet het geval. Juist omdat kribben in uiterwaarden liggen is te werken met de sleufloze techniek waarbij er met een trekker met soort holle woelpoot een kabel te trekken is op ca 1m diepte.

Een andere kans voor installaties in rivieren is een ponton net buiten de vaarweg afmeren (of bestaande steigers/bruggen benutten) en daaronder een installatie monteren. Bijvoorbeeld in Zutphen of Tolkamer zijn hier mogelijkheden.

Er zijn cases in voorbereiding met de techniek Oryon Watermill op twee locaties in de IJssel momenteel: Dieren en Bronckhorst, waarvan de laatste op een kribkop. Op deze locaties zijn ook de snelheden gemeten en is een businesscase doorgerekend (nog niet gereed).

4.4 Potenties combi met opslag of slim malen

In hoofdstuk 3 is beschreven dat er met benutten watersystemen, zoals opslag en peilbeheer handig ingespeeld kan worden met het rendabeler maken van een locatie voor een turbine. Op basis van een snelle scan zijn er locaties bepaald die potentie hebben om water op te slaan in het achterliggende watersysteem en weer op te pompen uit de andere waterloop. Deze locaties zijn niet volledig en daarom verder niet op kaart aangegeven.

- Voor de IJssel is dit van Noord naar Zuid: Schipbeek, Berkel, Twentekanaal, Baaksebeek, , Apeldoorns kanaal, Oude IJssel.



- Uitstromen Pannerdens kanaal: oude Rijn en Linge
- Maas-Waal kanaal
- Amsterdam Rijnkanaal (bij Tiel)
- Valleikanaal/Grift met koppeling aan IJsselmeer(Eemmeer) en/of Nederrijn
- Park Lingezegen als buffer (zie paragraaf 6.4)

4.5 Locaties ter hoogte van effluent(-leidingen)

Ten slotte is eveneens gekeken of waterkracht ter hoogte van een effluent(-leidingen) kansrijk kan zijn. Typische locaties waarbij een dergelijke situatie zich voordoet zijn deze bij een waterzuivering, energiecentrale of industrie. Een vrij omvangrijk debiet aan water wordt bij dergelijke centrales vrij continue afgevoerd.

Royal HaskoningDHV voerde destijds een aantal studies uit naar de potentie voor waterkracht voor RWZI's. Hieronder wordt een overzicht gegeven van RWZI's in het gebied van de provincie Gelderland:

- RWZI Nieuwgraaf: waterkracht op basis van verval: 2,2 – 6 kW
- RWZI Olburgen: waterkracht op basis van verval: 0,9 – 3,5 kW
- RWZI Apeldoorn: waterkracht op basis van verval: 3 – 14 kW
- RWZI Hardewijk: waterkracht op basis van verval: 6 kW

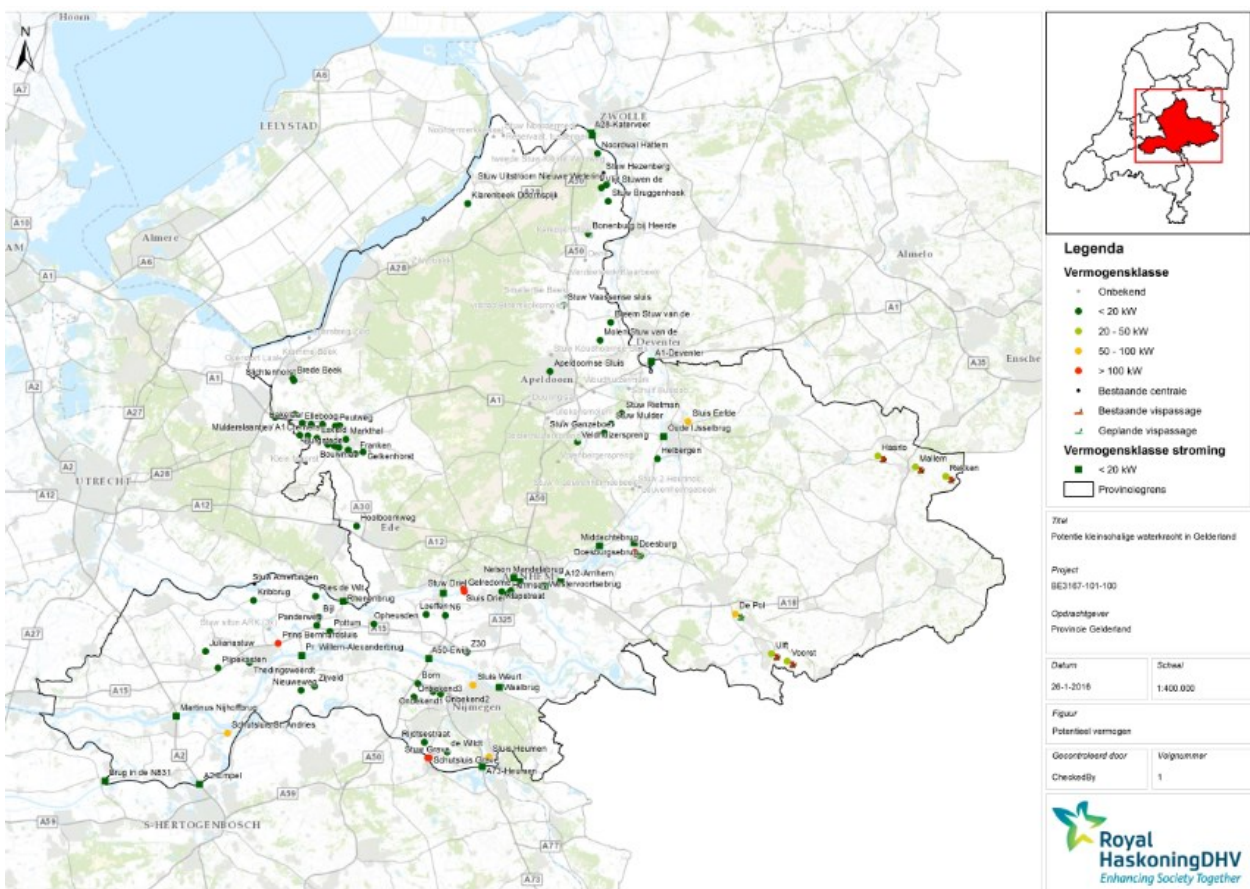
De vermogensrange valt steeds onder de grens van 15 kW. Deze locaties zijn daarom niet opgenomen in de potentiekaart.

4.6 Potentiekaart

In de bijlage is een kaart¹⁰ gepresenteerd met potentiële locaties voor het winnen van kleinschalige waterkracht binnen de Provincie Gelderland. Hierbij staat het ronde symbool voor een locatie waar energiewinning uit verval zou kunnen plaatsvinden en het vierkante symbool duidt een locatie aan waar energie uit stroming zou kunnen worden gewonnen. Met behulp van kleurenschaal worden de verschillende vermogenscategorieën aangeduid: donkergroen voor locaties waar naar verwachting niet meer dan tussen de 15 en 20 kW zou kunnen worden gewonnen, grasgroen voor de categorie 20 – 50 kW, donkergeel voor 50 – 100 kW en rood voor de locaties waar meer dan 100 kW zou kunnen worden gewonnen. We hanteren geen klasse < 15 kW omdat we binnen de scope van deze studie niet alle locaties (kleine beekjes, etc.) kunnen achterhalen.

Daarnaast is voor het Waterschap Rijn&IJssel bekend dat op een aantal locaties vispassages zijn gerealiseerd of gepland staan. Op de kaart wordt dit aangegeven met een rood en groen vis-symbool respectievelijk.

In onderstaande figuur is de kaart gecomprimeerd weergegeven ter illustratie. Op de kaart zijn de potenties in de rivieren bij kribben, (langs)dammen of bruggen en steigers nog niet meegenomen. Dit wordt mogelijk in de toekomst verder in beeld gebracht. De locaties die daarbij zeker in beeld zijn, zijn de geulen achter langsdammen waar stroomsnelheden relatief hoog zijn.



Figuur 4-2 Potentiekaart voor waterkracht in de Provincie Gelderland;

¹⁰ Bronnen: Kleinschalige waterkracht in Nederland, 1985, Rapport Tauw; Potentie duurzame energie bij kunstwerken, 2009, Rapport Deltares; Haalbaarheid kleinschalige waterkracht, 2011, Rapport Witteveen+Bos.



5 Economische analyse

5.1 Inleiding

In voorliggend hoofdstuk wordt een beoordeling op hoofdlijnen van de financiële haalbaarheid van het ontwikkelen van een waterkrachtcentrale bij enkele potentieel interessante locaties.

In nauw overleg met de opdrachtgever (Provincie Gelderland) en de sturgroepleden zijn op basis van de locatie-inventarisatie in vorig hoofdstuk drie locaties aangewezen om daarvan de business case nader te onderzoeken. Deze locaties zijn achtereenvolgens:

- Stuw Driel
- Stuw Grave
- Stuw de Pol

Daarnaast zijn ook enkele locaties onderzocht waar waterkracht op basis van kinetische energie mogelijk kan zijn. Deze haalbaarheidsstudies in terug te vinden in separate rapportages.

De initiële haalbaarheid van waterkracht op een van deze locaties wordt bepaald door *Reverse Financial Engineering*: op basis van financiële doelstellingen (IRR, terugverdiendtijd) is bepaald wat de investering mag zijn gegeven een zekere energieopbrengst. Gebruikmakend van kentallen is vervolgens vast te stellen of de kosten van realisatie binnen deze bandbreedte vallen waarmee de ontwikkeling verondersteld wordt haalbaar te zijn.

Achtereenvolgens worden de volgende onderdelen beschreven:

- Uitgangspunten voor beoordeling haalbaarheid
- Verwachte energieopbrengsten
- Haalbare investeringskosten
- Beoordeling initiële haalbaarheid

Deze notitie geeft slechts de initiële haalbaarheid weer op basis van zorgvuldig gekozen uitgangspunten maar blijft een vereenvoudigde weergave zoals overeengekomen in de opdrachtoomschrijving. Uiteindelijk is het aan potentiële projectontwikkelaars om de uitdaging aan te gaan om te zien of het mogelijk is met hun eigen criteria voor gewenste financiële performance een business case te maken voor het nemen van investeringsbeslissingen.

De volgende uitgangspunten worden voor de analyse gebruikt:

- In het beoordelen van de initiële haalbaarheid is geen rekening gehouden met belastingen, kosten van financiering en eventuele subsidies.
- De kosten van waterkrachtcentrales worden bepaald op basis van kengetallen uit referentieprojecten. Deze zijn voor de vermogenscategorie tussen 20 en 50 kW orde EUR 8.000 ex BTW. Voor vermogens rond 2 MW wordt EUR 4.000 tot 5.000 ex BTW aangehouden.
- Voor de financiële doelstelling wordt vooralsnog aangehouden dat de IRR 10 tot 12 procent zal moeten zijn. Dit is een behoudende financiële doelstelling.
- Indien de kosten per centrale redelijk overeenstemmen met de berekende *Total Cost of Ownership* (TCO) bandbreedte vanuit de opbrengsten dan wordt een project als haalbaar beoordeeld.



- Een en ander is onderhavig aan verdere discussie rond de financiële doelstellingen. Derhalve hebben wij in eerste instantie voor conservatieve uitgangspunten gekozen.

5.2 Gebruikte financiële parameters

5.2.1 Kosten

Investeringskosten (CAPEX)

De investeringskosten of CAPEX (Capital Expenditures) staan voor de kosten voor ontwikkeling of levering van niet-verbruikbare onderdelen van een product of systeem. In deze studie betreffen deze kosten alle investeringen gerelateerd aan de bouw van de waterkrachtcentrale. Dit houdt bijvoorbeeld in: aankoop componenten van de aandrijflijn zoals turbine(s) generator(en), civiele constructie, aansluitingen, enz. In tegenstelling tot hoofdstuk 3 worden hier alle investeringskosten beschouwd.

Operationele kosten (OPEX)

De operationele kosten of OPEX (Operating Expenditures) zijn de terugkerende kosten voor een product, systeem of onderneming. In het geval van een waterkrachtcentrale gaat dit om onderhoud van de centrale, opvolging, personeelskosten, enz. Vaak wordt een onderscheid gemaakt tussen vaste en variabele operationele kosten ofwel de voorziene en onvoorziene kosten. Deze opsplitsing wordt hier ook gehanteerd.

5.2.2 Opbrengsten

De energieopbrengsten zijn afgeleid van het aantal draaiuren en te leveren vermogen. De geproduceerde elektriciteit kan echter op verschillende wijzen opgenomen worden:

- De elektriciteit kan deels aan het net geleverd worden. Hierbij is het Feed In Tariff gangbaar.
- De opgewekte elektriciteit kan gebruikt worden voor het voeden van lokale energiegebruikers.
- Steunmaatregelen. De SDE regeling kan van toepassing zijn. Het SDE tarief bedraagt gemiddeld 125 €/MWh. Met dit tarief kan gerekend worden in de kosten-/ baten analyse.

5.2.3 Waarderingsparameters

Om inzichtelijk te maken wat de rendabiliteit van de business cases zijn, worden twee waarderingsparameters gehanteerd, nl. de Total Cost of Ownership (TCO) en de Interne Opbrengst Voet (IRR).

Total Cost of Ownership (TCO)

De TCO is een manier om het volledig inzichtelijk maken van alle kosten gerelateerd aan de aanschaf en gebruik gedurende de levenscyclus van een waterkrachtcentrale. De TCO houdt dus minimaal de CAPEX en OPEX in.



Interne opbrengst voet (IRR)

Interne opbrengst voet of IRR (Internal Rate of Return). IRR is per definitie een getal, meestal uitgedrukt als percentage, dat het netto rendement van de investeringen in een project weergeeft. Een project is aantrekkelijk als de IRR hoog is. Het is de opbrengstvoet (ook disconteringsvoet genoemd) waarbij de netto contante waarde van het geheel van kosten en baten nul is. Discontovoet (percentage waarmee de relevante inkomsten en uitgaven geactualiseerd kunnen worden): minimale rendementseis.

Risico-vrije discontovoet (vaak gelijk aan interest bank)

Ondernemingsrisico

Financieringskost

5.3 Conclusies financiële haalbaarheid locaties

Op basis van deze locatie-inventarisatie zijn drie locaties aangewezen om daarvan de business case nader te onderzoeken (stuw Driel, stuw Grave en stuw de Pol).

De initiële haalbaarheid van waterkracht op een van deze locaties is bepaald door Reverse Financial Engineering: op basis van financiële doelstellingen (IRR, terugverdiëntijd) is bepaald wat de investering mag zijn gegeven een zekere energieopbrengst.

Voor de detailberekeningen verwijzen we de lezer naar de bijlagen. Volgende vermogens, i.e. 1.800 kW, 5.950 kW en 18 kW zijn respectievelijk uitbouwbaar bij de locatie Driel, Grave en de Pol.

Een waterkrachtcentrale van 1.800 kW bij Driel levert op jaarbasis theoretisch 4.739 MWh aan energie (ca 1247 gezinnen). De inkomsten (na aftrek van operationele kosten) die daar bij horen liggen afhankelijk van de transactieprizen tussen EUR 568.680 / jaar en EUR 758.240 / jaar. Om een redelijke IRR van 10 tot 12 procent te behalen mogen de investeringskosten tussen EUR 3.028.947 en EUR 3.905.762 liggen.

Uitgaande van kentallen kost een 1.800 kW centrale ongeveer EUR 7,2 miljoen. Om een doel-IRR van 12 procent te halen mogen de kosten niet meer bedragen dan EUR 3,0 tot 3,5 miljoen. Voor een doel-IRR van 10 procent mogen de kosten niet meer bedragen dan EUR 3,3 tot 3,9 miljoen. Dit geeft een aanzienlijk investeringstekort van EUR 3,3 tot 4,2 miljoen. Dit heeft alles te maken met de beperking in de aanwezige resource (de stuw is bijna 100 dagen gestreken). Een veel lagere IRR biedt in die zin weinig soelaas.

Een aanbeveling om de investering aantrekkelijker te maken is om bijvoorbeeld de investeringskosten te reduceren door de uitvoering bijvoorbeeld te combineren met onderhoud en uitbreidingswerkzaamheden van de bestaande stuw. Hierbij kan door slim gebruik te maken van de aanwezige civiele infrastructuur als draagconstructie flink bespaard worden in bouwkosten. Dit lijkt een haalbare kans, mits tijdig en zorgvuldig geïntegreerd.

Er kan ook geopteerd worden voor een niet-commerciële doelstelling en de waterkrachtcentrale voor eigen energievoorziening te gebruiken en zodoende de opslagen op het elektriciteitsstarief van het net te reduceren.

Een waterkrachtcentrale te Grave van 5,95 MW (energieopbrengst 25,34 GWh/jaar of te wel 7.240 gezinnen) zou ongeveer een investering van EUR 23.800.000 ex BTW benodigd zijn. De terugverdiëntijd is hierbij 7,2 jaar. Voor de beeldvorming: indien genoeg genomen zou worden met een IRR van 5,5 procent dan mogen de kosten bij een gemiddelde energieprijis EUR 22 tot 26 miljoen bedragen afhankelijk van de energieprijisontwikkeling. De IRR is dan gelijk aan de disconteringsvoet.



Om de investering interessant te laten zijn moeten de investeringskosten gereduceerd worden, zoals uit bovenstaande blijkt is het kiezen van een lagere doel-IRR weinig effectief. Dit kan door bijvoorbeeld gebruik te maken van de bestaande constructie of de uitvoering te combineren met onderhoud en renovatie of uitbreiding van de stuw. In zo een geval kan mogelijk een aanzienlijke besparing gerealiseerd worden op de benodigde civiele werken in de orde van 10 miljoen waarmee een acceptabele IRR gehaald kan worden, hangende nadere detaillering. Private partijen zullen een hogere IRR willen hanteren, zeker indien ze ook het wegvallen van eventuele subsidieregelingen moeten dragen. Publieke partijen of partijen zonder winstoogmerk zouden een lagere IRR kunnen kiezen. In dat geval zou minder subsidie nodig zijn, maar moet het risico van wegvallen van subsidie wel ergens ingecalculereerd worden. Verder geldt hetzelfde mogelijkheid als bij sluis Driel dat door energie zelfstandig op te wekken voor lokaal gebruik de belasting op energie tarieven deels kan worden omzeild.

Een waterkrachtcentrale van 18 kW bij Stuw de Pol levert op jaarbasis theoretisch 75 MWh aan energie (ca 20 gezinnen). De inkomsten (na aftrek van operationele kosten) die daar bij horen liggen afhankelijk van de transactieprizen tussen EUR 7.200 / jaar en EUR 12.000 / jaar. Om een redelijke IRR van 10 tot 12 procent te behalen mogen de investeringskosten tussen EUR 38.311 en EUR 61.813 liggen.

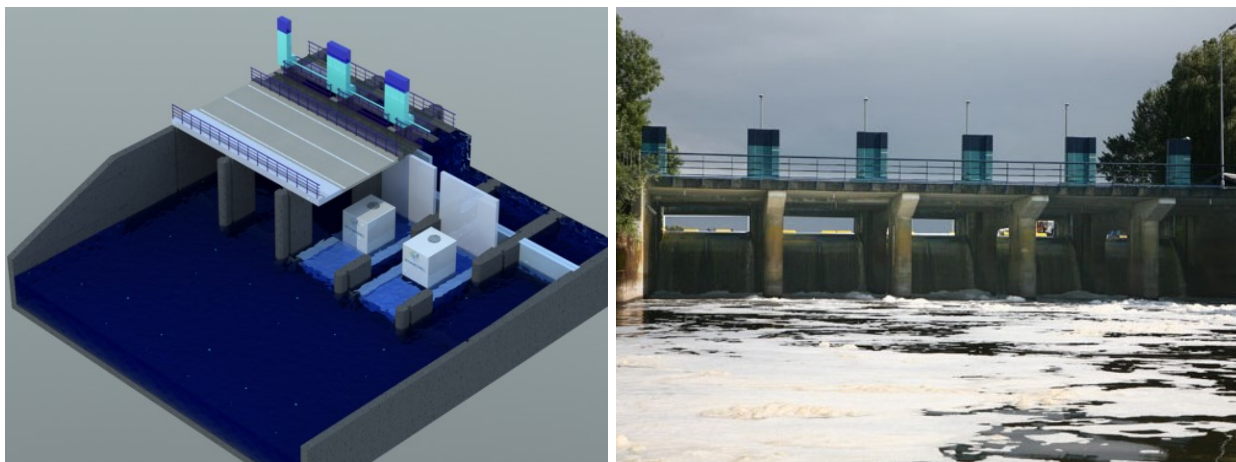
Uitgaande van kentallen kost een 18 kW centrale ongeveer EUR 144.000 ex BTW. Om een doel-IRR van 12 procent te halen mogen de kosten niet meer bedragen dan EUR 49.000 tot 56.000 ex BTW. Voor een doel-IRR van 10 procent mogen de kosten niet meer bedragen dan EUR 53.000 tot 62.000 ex BTW. Dit project is derhalve geenszins haalbaar.

In de regio Gelderland is bewust gekozen om twee uitersten (hoog en laag vermogen) te onderzoeken. De stuw te Driel zou een haalbare kaart kunnen zijn indien het strijken van de stuw (100 dagen per jaar) zou opgegeven worden. Een extra energieproductie van 50% zou hierdoor te realiseren zijn wat het aantal gezinnen die voorzien kunnen worden van groene stroom doet opklimmen tot ongeveer 2.100 gezinnen / jaar. Natuurlijk heeft het strijken van de stuw weldegelijk ook zijn nut.

6 Bespreking actuele business cases in Provincie Gelderland

6.1 Case Doesburg

Het Arnhemse bedrijf Deepwater Energy gaat een waterkrachtcentrale bouwen bij de Doesburgse stuw in de Oude IJssel. De gebruikte technologie is de Oryon Watermill, deze technologie is in hoofdstuk 3 beschreven. Onderstaande figuur toont het ontwerp van de waterkrachtcentrale.



Figuur 6-1 Stuw te Doesburg. Links: Schematische weergave van het ontwerp van de Oryon Watermills in de stuw te Doesburg. Rechts: werkelijke foto van de stuw te Doesburg. (Bron: Deepwater energy.)

De stuw te Doesburg bestaat uit 5 gelijke doorlaten. De doorlaten zijn elk 5 m breed en 10 m lang. Deze doorlaten zijn nodig om de hoogwaterafvoer van de Oude IJssel ten alle tijde te garanderen.

In een normale waterafvoer situatie zijn 1 tot 2 doorlaten open. Het ontwerp van de waterkrachtcentrale bestaat daarom – zoals de figuur aangeeft – uit twee Oryon Watermills, elk gepositioneerd bij een doorlaat. Beide Watermills worden modulair ingebouwd en kunnen hierdoor verwijderd worden tijdens periodes van hoogwater afvoer of onderhoud. Het verwijderen gebeurt via een kraanmechanisme. De beheerder van de waterloop informeert de beheerder van de waterkrachtcentrale 3 dagen op alvorens hoogwater (volgens voorspellingen) optreedt.

Dat betekent ook dat – omwille van het modulaire concept – de Watermills tijdens de constructiefase drijvend aangevoerd worden.

Per doorlaat is de Watermill ontworpen op $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$, goed voor 250 kW. Het totale opgestelde vermogen zal hierdoor 500 kW bedragen. Het totale rendement van de machine bedraagt +/- 40%. Volgens Deepwater Energy levert dat een jaarlijkse energieproductie op van 1.750 MWh of te wel een equivalent van 460 gezinnen.

De totale investering wordt geraamd op 1,3 miljoen euro exclusief de ontwikkelingskosten van de technologie op zichzelf. De operationele kosten worden geschat op 4% van de CAPEX. Hiermee komt de TCO volgens Deepwater Energy op 10 – 13 €/ct/kWh. De IRR bedraagt 5 – 8% (op 25 jaar).

De haalbaarheid zal mogelijk nog beïnvloed worden door het postcode roos principe waarbij particulieren kunnen participeren in het initiatief.

De financiering voor het type waterkrachtcentrale zoals in Doesburg van 500 kW is ongeveer als volgt opgebouwd (voorbeeld):

	aandeel in de financiering	bedrag	looptijd lening (jaren)	jaarlijkse leningslasten ³
burgers	27%	€ 730.000	25	€ --
gemeente ⁴	0%	€ --	--	€ --
netbeheerder ⁵	0%	€ --	--	€ --
Provinciale lening	0%	€ --	--	€ --
subsidie (coöperatie)	3%	€ 100.000	--	€ --
giften / vrienden van	0%	€ --	--	€ --
vergoeding voor vispassage ⁶	0%	€ --	--	€ --
Lening	70%	€ 1.920.000	12	€ 38.400 (gem.)
totaal	100%	€ 2.750.000		€ 38.400 (gem.)

Tabel 6-1 Voorbeeld van een financieringsmodel voor een waterkrachtcentrale van 500 kW. (Bron: Provincie Gelderland.)

6.2 Case Berkel en Twentekanaal van Lochemenergie

De energie coöperatie LochemEnergie heeft recent een studie afgerond naar de technische mogelijkheden en businesscase voor een waterkrachtinstallatie bij de stuw in Lochem en nabij de sluis bij Eefde op de stuw van het afleidingskanaal van de Berkel.



Figuur 6-2 Situatie van het sluiscomplex en afleidingskanaal van de Berkel

De situatie te Eefde is nader onderzocht. Het rapport is beschikbaar op internet¹¹. Daarbij is ook gekeken naar de mogelijkheden om voor een waterkrachtcentrale gebruik te maken van twee waterstromen: de Berkel en Twentekanaal. Dit rapport verkent kansen met de volgende uitgangspunten:

- Optimaal stroom leveren gezien het debiet, valhoogte en stroomsnelheid van een of tweewaterstromen;
- Water kan opsparen binnen de peilmarges van wat het Waterschap toelaat;
- Extra water kan oppompen uit de IJssel in het Twentekanaal met de nieuwe elektrische pompen van Rijkswaterstaat op tijden van een overschot aan duurzame energie in de regio;
- Water opslaat in het Twentekanaal binnen de toelaatbare peilmarges van RWS;
- Het turbineren concentreert tijdens de piekbelasting van het netwerk (avonduren).

De hoofdconclusie is dat er goede mogelijkheden zijn op rendabele wijze waterkracht op te wekken op het afleidingskanaal op de Berkel te Eefde. Als RWS toestemming geeft om wateroverschotten naar het afleidingskanaal te brengen kan een grotere centrale worden geplaatst en is de businesscase positiever. Het opsparen van water op het Twentekanaal voor het concentreren van de opwek tijdens piekbelastingsuren is gunstig voor de rentabiliteit van de installatie aan de ene kant en voor het verbeteren van de mismatch tussen vraag en aanbod van duurzame stroom aan de andere kant. Het aantal uren met energie tekorten daalt sterk door inzet van de beoogde waterkrachtinstallatie. Hiermee worden investeringen in aanpassing of verzwaring van het elektriciteitsnetwerk gedeeltelijk voorkomen. Het netwerk kan de toekomstige stijging van het elektriciteitsgebruik niet aan bij beoogde elektrificatie van de warmtebehoefte in de huishoudens en elektrische/hybride auto's voor de deur. Ook is dan minder energieopslag nabij nodig, maar er zijn nog steeds enkele hoge pieken van elektriciteitsgebruik geconstateerd.

¹¹ <https://www.lochemenergie.net/producten/water-als-bron-voor-stroom>.



Als business-case zijn er twee varianten: 1 voor stroom alleen uit de Berkel en de andere indien ook een buis wordt aangelegd om water uit Twentekanaal te benutten.

Als alleen water uit de Berkel wordt gebruikt is de investering relatief laag, maar de opbrengsten zijn navenant van een installatie van 120 kW. De totale investeringskosten bedragen € 346.000. Bij een spreiding van de stroomprijs tussen de 12 en 15 €cent (excl. BTW) kan per jaar tussen de € 47.580 en € 59.405 inkomsten verwacht worden. Als daar de kosten van worden afgetrokken blijft een batig saldo over van tussen de € 208 en € 12.035 per jaar zonder gebruik te maken van (innovatie/participatie) subsidies. De terugverdientijd van de investering is langer dan de beoogde 15 jaar. Bij de verkoop van de opgewekte waterkracht voor € 0,15/kWh (excl. BTW) is de terugverdientijd 19 jaar en dat loopt op tot boven de 30 jaar als de verkoopprijs zakt naar € 0,12/kWh (excl. BTW). In alle gevallen is uitgegaan van het vermijden van de energiebelasting door toepassing van de postcodeeroosregeling met leden van LochemEnergie rond de sluis.

Indien de twee waterstromen worden samengevoegd ontstaat de kans om een installatie te realiseren van 350 kW. De investeringskosten en opbrengsten zijn van en andere orde dan de 120 kW installatie. De totale investering is berekend op € 1.082.000 inclusief aansluiting op het netwerk, de verbindingspijp van 65 meter tussen Twentekanaal en Berkel en onvoorziene kosten. Voor de verbindingspijp is rekening gehouden met grondwerk, betonbakken voor de afsluiters, damwandschermen en software voor de bediening, maar blijft een globale schatting. De jaarlijkse kosten van afschrijving, beheer (2%) en onderhoud is € 116.000. De opbrengsten uit de verkoop van waterkracht ligt tussen de € 140.675 en € 175.640 bij een stijging van de elektriciteitsprijs van 12 naar 15 €cent /kWh excl. BTW. Daarmee wordt een batig saldo gecreëerd van tussen de € 24.660 tot € 59.625 per jaar. De terugverdientijd ligt tussen de 23 en 13 jaar bij een stijgende stroomprijs tot 15 €cent/kWh excl. BTW.

Aan de investeringskant zijn er verschillende mogelijkheden. De gemeente Lochem kan bijdragen met een kredietverlening uit het revolving fund voor duurzaamheid, eventueel met een laag rentepercentage. De provincie zou de participatiesubsidie open kunnen stellen voor waterkracht installaties voor en door burgers, zoals dat bestaat voor zon-PV installaties door energie coöperaties. Ook zou wellicht nog aanspraak kunnen worden gemaakt op innovatie subsidies als de installatie technisch innovatief is, smart grid innovatie wordt bereikt of vernieuwende samenwerkingsarrangementen zijn ontstaan (zachte innovatie).

Het volgende investeringsmodel is uitgewerkt voor een waterkrachtcentrale van 120 kW totdat RWS toestemming kan geven wateroverschotten uit het Twentekanaal te benutten, maar een vergelijkbaar model is te maken voor een grotere waterkrachtcentrale, zie onderstaande tabel.

	aandeel in de financiering	bedrag	looptijd lening (jaren)	jaarlijkse leningslasten ¹²
burgers	35%	€ 121.100	15	€ 11.665
gemeente ¹³	7%	€ 25.000	10	€ 3.240
netbeheerder ¹⁴	6%	€ 20.000	20	€ 1.605
provinciale lening	20%	€ 70.000	20	€ 5.615
innovatiesubsidie	25%	€ 90.000	0	€ 0
giften/vrienden van	1%	€ 5.000	0	€ 0
vergoeding voor vispassage ¹⁵	4%	€ 15.000	0	€ 0
eventueel: participatiesubsidie van de provincie	20%	(€ 70.000)	5	€ 0
totaal	100%	€ 346.100		€ 22.125
burgers leggen gemiddeld € 1.070 per huishouden in.				

Tabel 6-2 voorbeeld van een financieringsmodel voor een waterkrachtcentrale van 120 kW. (Bron: Provincie Gelderland.)

Het advies aan de lokale energie coöperatie is om te investeren in de grotere installatie mede op basis van onder andere de hogere interne rentevoet. Voor de 120 kW installatie ligt deze tussen de 7 tot 10% (bij stijgende verkoopprijs van de opgewekte elektriciteit). De interne rentevoet kan stijgen bij het verwerven van subsidies, giften en leningen met een laag rentepercentage in de richting van 12 tot 16%. De interne rentevoet over een periode van 20 jaar van een waterkracht installatie van 350 kW is beter dan van een 120 kW installatie. Zonder subsidie stijgt de interne rentevoet van 10% tot 12% (12 – 15 €cent/kWh excl. BTW). Als subsidies worden verkregen zou de interne rentevoet kunnen stijgen tussen de 19% en 23%.

Als onderdeel van de verkenning zijn ook gevoeligheidsanalyses gemaakt. Er zijn bijvoorbeeld berekeningen gemaakt waarin de beheerskosten werden gevarieerd van de standaard 3% (v.d. investeringskosten) naar 5%. Het resultaat is dat de terugverdientijd van de installatie ongunstig wordt beïnvloed. Maar andersom geldt: als gerekend wordt met een lagere effectieve rente voor externe investeerders van 3% i.p.v. met de berekende 5% wordt de terugverdientijd 2-3 jaar korter. Lagere rentes op geleend kapitaal kunnen bijvoorbeeld verkregen worden door: ledenkapitaal, crowd-funding, meer giften en subsidies.

De waarde van de energieopslag in het water van het Twentekanaal kan als volgt worden gedefinieerd:

- de waarde van de vermindering van de mismatch tussen vraag en aanbod van duurzame energie (op elk moment van de dag) door op momenten van piekbelasting extra elektriciteit te kunnen opwekken zodat er minder maatschappelijke kosten moeten worden gemaakt voor het verzwaring van het elektriciteitsnetwerk;

¹² rentevergoeding 5%

¹³ revolving fund

¹⁴ smart grid bijdrage

¹⁵ in overleg met het waterschap WRIJ



- het extra rendement dat de energie coöperatie kan halen door het turbineren te verschuiven naar momenten dat de elektriciteitsprijs in de markt het hoogst is;
- besparing in de kosten van de huishoudens door het turbineren te verschuiven naar momenten dat de elektriciteitsprijs in de markt het hoogst is.

In het rapport zijn verschillende scenario's doorgerekend voor het effect op huishoudniveau.

In het geval van een 120 kW waterkracht centrale kan op jaarbasis €26 per jaar per huishouden bespaard worden op de elektriciteitsrekening als de virtuele variaties in de uur-prijzen op de energiemarkt zijn doorberekend. Virtueel omdat de energiewet het nu niet mogelijk maakt om per uur energie in te komen op de markt. Dit voordeel stijgt tot € 67 per jaar in het energie-stijgende scenario en een waterkrachtcentrale van 350 kWh.

De voordelen van de mogelijkheid om in de toekomst aan energieopslag te doen in de wateren die samenkomen bij het sluiscomplex te Eefde kan in principe aan honderden huishoudens van de gemeente Lochem ten goede komen, dus ook aan een (grotere groep) bewoners dan alleen die van Eefde. Ook kan het financieel voordeel tegemoet komen aan de energie coöperatie, die daarmee weer nieuwe duurzaamheidsinvesteringen kan doen. De extra inkomsten voor de 120 kW kan onder de genoemde uitgangspunten jaarlijks 500 x 26 € bedragen en 500 x 67 € voor een 350 kW installatie er vanuit gaande dat daarvoor de waterstuwing-marge in het Twentekanaal kan worden gebruikt.

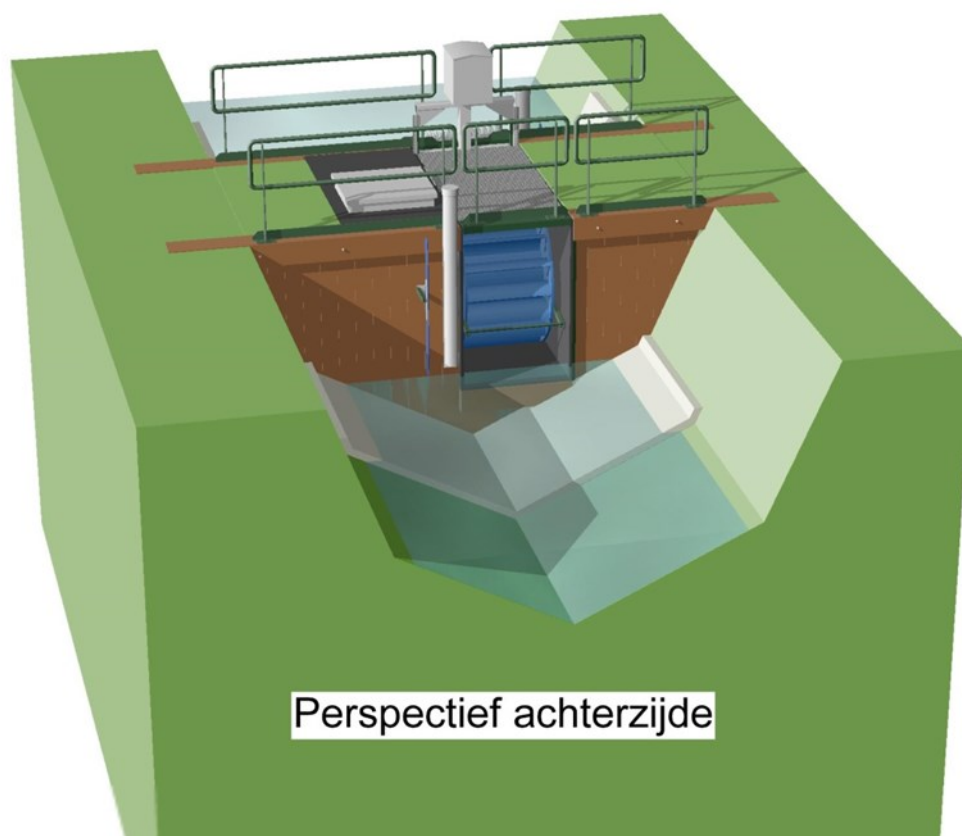


6.3 Onderzoeksproject smartstuw Ommeren

Een pilot- project wat recent is uitgevoerd onder regie van het waterschap rivierenland (WSRL) samen met EQA-projects is het concept Smartstuw. Dit project heeft niet als hoofddoel om zo veel mogelijk energierendement te halen en te exploiteren. Dit is een innovatie die toekomstkansen heeft omdat waterschappen veel kleinere stuwen (laag debiet en verval) hebben zoals in Ommeren. Er wordt in deze fase daarom met name onderzoeksgeld geïnvesteerd om te kijken of dergelijke concepten in de toekomst haalbaar zijn.

Het principe van de Smartstuw is energie opwekken met een eenvoudig waterrad, geïntegreerd in de stuw. De eenvoud van het ontwerp maakt dat de stuw qua kosten ook perspectief biedt voor energie-opwekking bij laag verval. Bij de pilot-stuw is het verval slechts 30 cm. Het vermogen is gemiddeld 0,5 kW. Equivalent aan 1 huishouden. Het doel van WSRL is de smart-stuw te optimaliseren en concurrerend te maken met de traditionele stuw die wel op het net moet worden aangesloten. Dat betekent inderdaad dat de ambitie bij Ommeren is om de stuw zelfvoorzienend/ energieneutraal te maken (alternatief voor een windmolentje en zonnepaneel of een aansluiting op het net). De informatie over de opbrengst die deze locatie gaat leveren zorgt ervoor dat inzicht in de potentie van mogelijke energielevering bij volgende stuwen beter in kaart kan worden gebracht. Het waterschap kan daarmee ook andere stuwen in beeld brengen (met meer debiet) waar er energie geleverd kan gaan worden aan bijvoorbeeld een buurtschapje.

De eenvoud van de stuwaanpassing zit hem vooral in materiaalgebruik zoals hergebruik van plastic en inpassing in de stuw. De EQA-stuw is tevens een smart-stuw. Als er neerslag valt kan de stuw vooraf buffer creëren, en de relatie leggen tussen lozingsdebiet, grondwaterstand en bodemvocht. Er komt dus meer inzicht in ondergrondse en bovengrondse waterstromen, bodem-absorptie in relatie met de hoeveelheid neerslag. Maar ook lozen wanneer nodig en vasthouden wanneer nodig wordt mogelijk. De pilot sluit aan bij het samenwerkingsproject 'Slim malen', waar WSRL één van de grote partners in is. En het is een bescheiden bijdrage aan de doelstelling WSRL Energieneutraal 2030.



Figuur 6-3 concept van de Smartstuw. (Bron: Provincie Gelderland.)

De geschatte kosten voor een in serie geproduceerde stuw kent 3 componenten:

- Stuwrenovatie; vervangen van bestaande stuw. Financiering uit stuwrenovatie budget (waterschap). Geschatte kosten 45.000 euro
- Stuw automatisering; telemetrie, aumamotor, schakelkast etc, 35.000 euro
- Energielevering, via de waterkrachtinstallatie van EQA, afhankelijk van debiet en grootte. Variërend voor eigen verbruik tot levering voor externen. Inschatting gemiddeld 50.000 euro.

Totaal: 130.000 euro, Incl. BTW. Voor de eerste stuw komt daar 70.000 euro aan ontwikkelkosten bij.

6.4 Pilotproject Waterstroom Park Lingezegen

Waterbergingsgebieden worden hooguit een beperkt aantal dagen per jaar gebruikt om hoogwaterpieken te bergen of een watervoorraad aan te leggen voor het overbruggen van extreem droge perioden.

Als gevolg van een toenemend aandeel duurzame energie (vooral uit zon en wind) zal het aanbod aan energie op het elektriciteitsnet steeds sterker gaan fluctueren. Geregeld krijgt elektriciteit een negatieve prijs om afname ervan te bevorderen. Anderzijds is er ook sprake van dagelijkse pieken in verbruik van elektriciteit in de ochtend en vroeg in de avond. De vraag is of een watersysteem zoals een waterberging kan fungeren als energiebuffer, met behoud van de inzetbaarheid voor de wateropgaven.

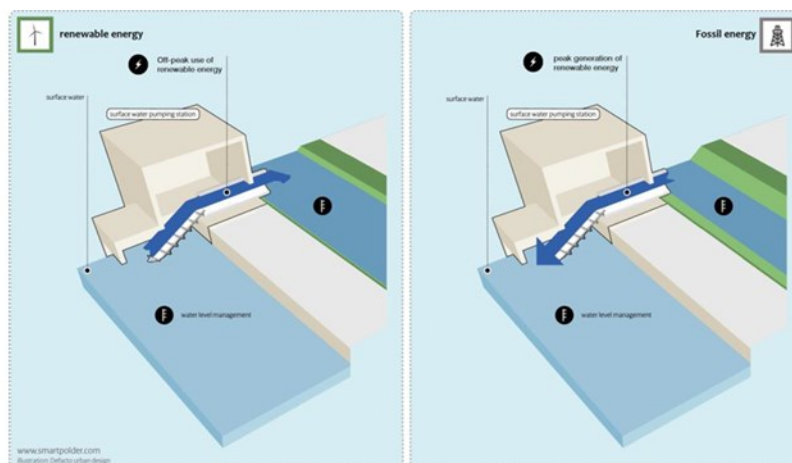
Tijdens de afronding van het project RichWaterWorld (Alterra Wageningen UR) is het idee ontstaan om het daarin ontwikkelde concept over anticiperend waterbeheer te combineren met het Smart Polder concept (IF Technology), en er is geïnventariseerd of er perspectieven zijn voor het concept van beheer van de waterberging als een gecombineerde water- en energiebuffer.

Het concept is gebaseerd op een waterbergingsgebied gecombineerd met de RONAMIC PaT pomp- en turbine-installatie die in twee richtingen kan werken. Uit een peilverschil wordt met de turbine bij een piekvraag energie opgewekt, en anderzijds wordt een overschot aan stroom gebruikt voor opmaling van water naar de waterberging, aangestuurd door een slim beslissings-afwegingsmodel.

Waterkracht Park Lingezegen

Impact waterkracht turbine/pomp

- **0,70 m³/s (2.520 m³/h) 1,2 mwk**
- **58 MWh elektriciteitsproductie**
- **0,6 TJ primair energie besparing**
- **terugverdientijd 7 jaar**
- **33 ton CO₂ reductie**
- **9 kg NO_x reductie**
- **Vergelijkbaar met 290 zonnepanelen**



Figuur 6-4 Concept Waterkracht Park Lingezegen. (Bron: Provincie Gelderland.)

In een serie gesprekken met belanghebbenden en presentaties bleek er veel interesse is voor het concept, maar dat men een praktijkexperiment noodzakelijk vindt. In Europees verband (Climate KiC) is gekeken naar het marktpotentieel.

Het doel van het project is om gedurende een veldexperiment van 2 jaar in de praktijk te testen of piekwaterberging, voorraadwaterberging en energiebuffering kan worden gecombineerd in het operationeel waterbeheer van de waterbergingslocatie in Park Lingezegen, als een kunstmatig getijdesysteem.

Het project levert een aantal resultaten op:

- kennis op over kansrijke locaties en marktpotentieel voor dit concept,
- inzicht in het energetisch rendement en financiële opbrengsten,
- praktische ervaring met het functioneren en effectiviteit van de waterberging,
- kennis over effecten op de natuur in en rond de waterberging in Park Lingezegen.



Figuur 6-5 Mogelijke plek voor van gecombineerde water- en energiebuffering in een waterbergingslocatie

Uitgegaan wordt van een doorlooptijd gedurende twee jaar. De kosten bestaan uit personele kosten door Alterra, IF Technology, Smeding Advies en Alliander/EXE, alsmede materiële kosten voor de inrichting, onderhoud en voorlichting. De kosten in het overzicht zijn excl. onvoorzien en BTW.

	Kosten (k€)
1 afwegingsmodel	20.5
2 Installatie turbine	75.0
3 Monitoring water	29.1
4 Monitoring energie	19.2
5 Test waterbeheer	9.8
6 Maken en test tool	59.3
7 Monitoring natuur	11.4
8 Extrapolatiekansen	19.4
9 Communicatie	73.4
10 Project management en rapportage	57.6
11 Onvoorzien 10%	pm
Totaal	<u>374.7</u>

De financiering van het project wordt gezocht bij:

- Unie van Waterschappen / STOWA uit Green Deal Energie
- DEI regeling (Demonstratie energie innovatie).
- Waterschappen
- Rijkswaterstaat uit Slim Water Management
- Alliander
- MIRT (Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport)
- Topsector Energie

6.5 Toekomstige initiatieven

De provincie Gelderland constateert dat er op dit moment al een behoorlijk aantal partijen bezig zijn met verkenningen of op plekken energie uit waterkracht kan worden opgewekt. Dit zijn naast lokale energiemaatschappijen ook juist de overheidspartijen die als hoofdtaak het waterbeheer hebben: Rijkswaterstaat en de waterschappen. Omdat energie opwekken in het watersysteem raakt aan de kerntaken van deze organisaties en er klimaat en energie(neutraal) doelstellingen zijn, ligt het voor de hand dat deze partijen ook steeds meer zelf de regie nemen in het opwekken van energie. En met regie wordt dan bedoeld steeds meer richting een leverancier van energie, initiatiefnemer en mede financier. Voordelen kunnen zijn dat deze organisaties vanuit een voorbeeldfunctie ook genoeg kunnen nemen met een lagere IRR. En voor de korte termijn worden er innovaties en initiatieven gestimuleerd, bijvoorbeeld door organisaties als STOWA maar ook binnen innovatieprogramma's van Rijkswaterstaat. In de toekomst kan mogelijk ook RVO een rol spelen om projecten of haalbaarheid onderzoeken te stimuleren.

In (of net aan de grens van) Gelderland zijn er een aantal projecten in de rivieren in de haalbaarheidsstudiefase. Enkele zijn in hoofdstuk 5 al beschreven, dit zijn in de IJssel: Zutphen, Deventer, Bronkhorst, Dieren, Doesburg (andere dan case 6.1), in de Waal: Nijmegen, Dodewaard, Grave/Heumen, project Overstroom¹⁶ en tenslotte zijn er initiatieven in voorbereiding door stichting Dirk de derde uit Culemborg¹⁷. Onder andere is de Prins Bernhardsluis bij Tiel hier in beeld waarbij het plan is om de opgewekte energie te leveren aan het autopark van bijvoorbeeld het waterschap of het leenauto-initiatief wat in voorbereiding is. Andere projecten van deze stichting zijn de Martinus Nijhoffbrug (nabij pijler) en een stuw bij Thedingsweerd. Bij project Overstroom staat op de website een overzicht van kengetallen van investeringen en opbrengsten met de vizeltechniek. Op deze locatie kan voor 1.800 huishoudens energie worden opgewekt door gebruik te maken van peilverschil tussen Waal en Maas. Hier is een slimme combinatie (meekoppeling) gezocht met:

- aftoppen van een Waalpiek naar de Maas;
- meer water in Maas is gunstig voor drinkwaterwinning en landbouw;
- positief voor de vismigratie in beide richtingen, tussen de rivieren (herstel ecosysteem);
- business case voorziet in combinatie in de geplande natuurontwikkeling.

Op dit moment is het project vergunbaar maar het is nog in studie of en hoe voorkomen kan worden dat het onttrekken van water uit de Waal de vaarenergie van scheepvaart beïnvloedt.

Recent heeft het waterschap Rijn en IJssel een aantal locaties beschikbaar gesteld aan inschrijvers die een plan van aanpak mogen indienen om energie op te wekken. Momenteel zijn er partijen bezig om een plan te maken. De locaties waar plannen in voorbereiding zijn betreffen: stuwen bij Haarlo, Rekken, de Pol en Voorst.

Opwekking in de stroming van de Gelderse rivieren bij kribben is in de opstartfase en heeft werktitel Krib Kracht. De beoogde deelnemers aan Krib Kracht zijn bedrijven, instellingen en ook particulieren die op duurzame wijze lokale waterkracht willen gebruiken om hun panden en processen te voorzien van elektriciteit. De deelnemers worden gezamenlijk eigenaar van de bedrijven die worden ingericht om de waterturbines te kunnen plaatsen. Dit kan middels een constructie waarbij de energierekening van de klant dient als basis voor een investering in de waterkrachtinstallatie (Postcoderoos-constructie) of door investering in het project waarbij SDE-subsidie wordt aangevraagd. Met name de voorloopkosten (energieberekening, vergunningaanvraag, etc.) worden als drempel ervaren door projectontwikkelaars. Met het idee van een Revolverend Fonds (werktitel: "1000 Energiekribben") worden deze voorloopkosten

¹⁶ www.overstroom.net

¹⁷ www.rivierenlandinverbinding.nl/projecten/waterkracht/



voorgesloten, waardoor initiatieven worden gestimuleerd en flexibel en snel op kansen kan worden ingespeeld. In ruil wordt bijvoorbeeld een kleine rente en/of deel participatie gevraagd. Er ligt hier een prima kans om het stimuleren van de economie te combineren met de transitie naar duurzame energie.

Ontwikkelen van deze bovenbeschreven cases levert (landelijke en internationale) kennis op die weer gebruikt kan worden om uit te rollen en bij te dragen aan lokaal opwekken van een duurzame bron van energie al dan niet gecombineerd met andere doelen zoals energieopslag en optimaliseren van waterbeheer.

Initiatieven worden ook juist lokaal met enthousiaste mensen opgepakt, een recent voorbeeld hiervan is de te bouwen centrale voor circa 190 huishoudens in de Dommel¹⁸ die grotendeels via crowd-funding is gefinancierd. Een mooi voorbeeld van circulaire economie. De subtafel waterkracht van het Gelders Energie akkoord kan lokale partijen helpen om nieuwe initiatieven van de grond te krijgen.

¹⁸ www.dommelstroomdelen.nl

7 Conclusies en aanbevelingen

Energiewinning uit rivieren en watergangen in de Provincie Gelderland door middel van waterkracht kan op twee verschillende wijzen gebeuren. De energie wordt gewonnen uit een lokaal verval ter plaatse van bijvoorbeeld een kunstwerk in een rivier of de energie wordt gehaald uit de rivierstroming (snelheid in het water).

Voor beide principes zijn er een aantal (commerciële) technieken die dergelijke energiewinning mogelijk maken. Gezien de omvang en grootte van vermogens die in de regio Provincie Gelderland economisch exploiteerbaar zijn, richt dit rapport zich enkel op kleinschalige waterkracht. Kleinschalige waterkracht wordt gedefinieerd als centrales met een vermogen lager dan 10 MW.

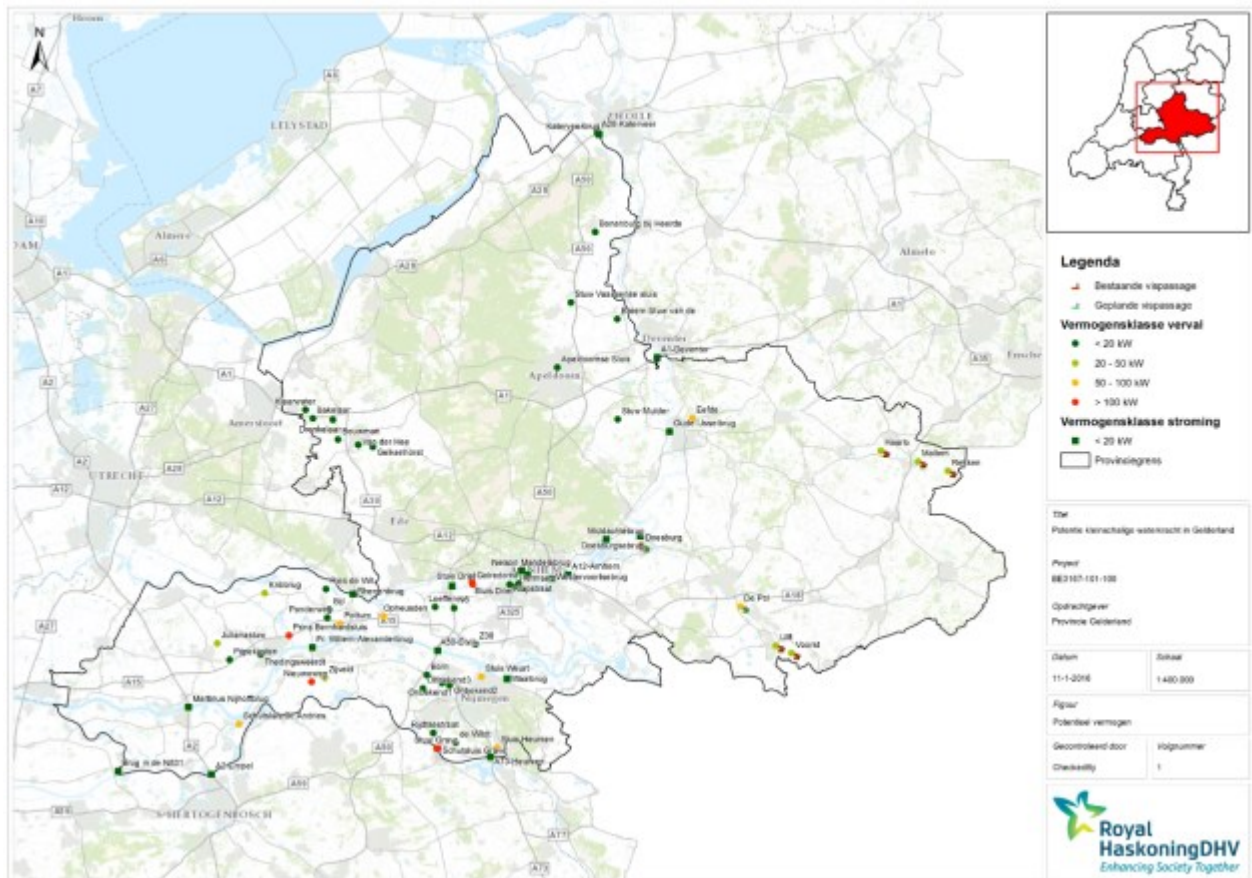
De keuze van een turbine en daarmee het type waterkrachtcentrale wordt ingegeven door locatie-specifieke omstandigheden (verval, debiet, snelheid, etc.). In feite bepaalt de regio Gelderland uiteindelijk welke waaier van technieken een ontwikkelaar, energiecoöperatie of overheid kan kiezen bij het ontwikkelen van een waterkrachtcentrale.

In functie van enkele weloverwogen keuzecriteria zoals regio-specifieke karakteristieken, locatie-eigenschappen, lokale infrastructuur en literatuurwerk (zoals de techniekinventaris Pro-Tide) zijn toepasbare technieken geselecteerd. De beschikbare technieken voor de Gelderlandse situatie dienen uiteraard ook getoetst te worden aan een aantal parameters die de 'rijpheid' en omstandigheid definiëren waar en hoe de techniek toegepast kan worden. Hiervoor zijn zowel technische (vermogen, etc.) als institutionele (visvriendelijkheid, etc.) en financiële toetsingsparameters belangrijk. Deze drie pijlers vormen immers de dimensies van een business case en zijn belangrijk om inzichtelijk te hebben om als (aantrekkelijke) investeringscasus naar potentiële ontwikkelaars aan te bieden.

Deze oefening resulteert in onderstaande 'technologiematrix' die een overzicht biedt voor beleidsmakers, ontwikkelaars met welke technieken voor een bepaalde locatie van toepassing kunnen zijn.

	Algemeen	Technische karakteristieken				Finiële krakt.	Institutionele karakteristieken				
		Vermogen (kW)	Verval (m)	Debiet (m ³ /s)	Snelheid (m/s)		Diameter (m)	CAPEX (€/kW)	Vis-vriendelijk	TRL	Referentie
	Type										
A. Technieken voor potentiële energie											
1	Bulb (Kaplan) turbine	Axiale turbine	50 - 5,000	2 - 15	1 - 100	-	-	750 - 2.500	--	9	Commercieel
2	Cross-flow turbine	Radiale impulsturbine	10 - 2,000	1 - 200	0,04 - 10	-	-	1.000 - 2.500	--	9	Commercieel
3	Vijzel	Axiale motor	1 - 500	0,5 - 10	0,01 - 10	-	-	1.000 - 2.500	++	9	Commercieel
4	Bovenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	3 - 10	0,1 - 2,5	-	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel
5	Middenslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	1,5 - 4	0,5 - 7	-	-	3.000 - 4.500	++	9	Commercieel
6	Onderslaand waterrad	Gravitair rad	1 - 100	0,5 - 2	0,5 - 20	-	-	4.000 - 5.500	++	9	Commercieel
7	VLH	Axiale turbine	100 - 500	1,5 - 4,5	10 - 27	-	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel
8	Gravitation Water Vortex Plant	Axiale turbine	0,4 - 40	0,7 - 2	0,02 - 20	-	-	1.500 - 2.500	+	9	Commercieel
9	Horizontale turbine	Axiale turbine	50 - ...	2 - ...	1 - 50	-	-	-	+	8	1 centrale (NL)
10	Lamella turbine	Gravitair rad	10 - 1,000	0,5 - 10	0,5 - 10	-	-	-	++	8 / 9	2 centrales (DE)
11	Kata Max Wheel	Gravitair rad	2,5 - 50	1,5 - 20	0,5 - 3	-	-	-	++	8 / 9	1 centrale (DE)
12	Das Bewegliche Wasserkraftwerk	Axiale turbine	50 - 1,000	2 - 5	> 5	-	-	-	+	8 / 9	2 centrales (DE)
13	Hydro Generator	Axiale turbine	10 - 200	2 - 10	1 - 10	-	-	-	++	8	2 centrales (PH)
14	Overa Wheel	Gravitair rad	10 - 100	2 - 3,5	1 - 5	-	-	-	++	8	1 centrale
B. Technieken voor kinetische energie											
15	Tocado	Horizontale asturbine	40 - 200	-	-	> 1	3 - 9	3.000 - 4.000	+	8 / 9	5 centrales (NL)
18	EnCurrent turbine	Horizontale asturbine	5 - 25	-	-	> 1	1,5 - 5	2.500 - 4.000	+	9	4 centrales
16	Oryon Watermill	Verticale asturbine	5 - 150	-	-	> 1	0,5 - 10	2.500 - 4.000	+	8	1 centrale (NL)
17	Kinetic Hydropower System	Horizontale asturbine	40	-	-	> 1	5	-	+	8	1 centrale (USA)
19	Wave Rotor	Verticale asturbine	30	-	-	> 1	5	-	+	8	1 centrale
20	Vivace	Oscillator	1 - 100	-	-	> 1	-	-	++	8	1 centrale
21	WZE	Verticale asturbine	10	-	-	> 1	2	-	++	8	1 centrale

Parallel aan de technologie-inventarisatie is in de Provincie onderzocht welke locaties potentieel kunnen zijn voor de ontwikkeling van waterkracht. Hiervoor zijn zowel de regionale als de Rijkswateren bestudeerd. Deze analyse levert een 'gepersonaliseerde' waterkracht potentiekaart voor de Provincie Gelderland met als doel om voor ontwikkelaars kansen inzichtelijk te maken. Onderstaande figuur toont het overzicht van de locaties. De grens om locaties met potentie op kaart aan te geven is gelegd op 15 kW omdat hieronder commercieel met de huidige technieken minder tot niet haalbare businesscases zijn.



Op basis van deze locatie-inventarisatie zijn drie locaties aangewezen om daarvan de business case nader te onderzoeken (stuw Driel, stuw Grave en stuw de Pol).

De initiële haalbaarheid van waterkracht op een van deze locaties is bepaald door Reverse Financial Engineering: op basis van financiële doelstellingen (IRR, terugverdientijd) is bepaald wat de investering mag zijn gegeven een zekere energieopbrengst.

Op basis van deze berekeningen is duidelijk dat investeringen in waterkracht niet gemakkelijk door de markt zullen worden opgepakt, Partijen die energie willen opwekken uit waterkracht zullen met de huidige stand der techniek genoeg moeten nemen met minder rendement op investering dan in de financiële wereld gangbaar is. Dit hoeft geen probleem te zijn als meerdere partijen samenwerken in deze projecten en er partijen zijn die minder of geen rendement hoeven of willen halen op investeringsgeld zoals overheden of lokale energiemaatschappijen.



Verder blijkt dat het belangrijk is om ook andere baten door te rekenen die vaak indirect worden gerealiseerd door een waterkrachtproject. Hierbij is er veelal een kans voor de combinatie met energieopslag en ook opsparen (d.m.v. sturen in peilen) en turbineren als de energie vraag het hoogste is.

Een andere aanbeveling om de investering aantrekkelijker te maken is om bijvoorbeeld de investeringskosten te reduceren door de uitvoering bijvoorbeeld te combineren met onderhoud en uitbreidingswerkzaamheden van de bestaande stuw, sluis of krib. Hierbij kan door slim gebruik te maken van de aanwezige civiele infrastructuur als draagconstructie flink bespaard worden in bouwkosten. Dit lijkt een haalbare kans, mits tijdig en zorgvuldig geïntegreerd.

Er kan ook geopteerd worden voor een niet-commerciële doelstelling en de waterkrachtcentrale voor eigen energievoorziening te gebruiken en zodoende de opslagen op het elektriciteitsstarief van het net te reduceren. Dit sluit aan bij beleidsdoelstellingen energie en klimaatneutraal die waterschappen en Rijkswaterstaat zich hebben opgelegd.

Uit de projecten op het gebied van waterkracht die momenteel in Gelderland in voorbereiding zijn dan wel al lopen, blijkt wel dat er in Gelderland potentie zit om daadwerkelijk meer energie uit water te gaan produceren.

Kansen liggen er en verschillende initiatieven worden op dit moment verder uitgewerkt, meestal door samenwerking tussen overheden en lokale initiatieven of energie coöperaties.

With its headquarters in Amersfoort, The Netherlands, Royal HaskoningDHV is an independent, international project management, engineering and consultancy service provider. Ranking globally in the top 10 of independently owned, nonlisted companies and top 40 overall, the Company's 6,500 staff provide services across the world from more than 100 offices in over 35 countries.

Our connections

Innovation is a collaborative process, which is why Royal HaskoningDHV works in association with clients, project partners, universities, government agencies, NGOs and many other organisations to develop and introduce new ways of living and working to enhance society together, now and in the future.

Memberships

Royal HaskoningDHV is a member of the recognised engineering and environmental bodies in those countries where it has a permanent office base.

All Royal HaskoningDHV consultants, architects and engineers are members of their individual branch organisations in their various countries.