

RAPPORT

Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland

Waterkracht Provincie Gelderland

Klant: Rijkswaterstaat GPO

Referentie: IEMR001D01

Versie: 01/Finale versie

Datum: 28 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:
Referentie: IEMR001D01
Versie: 01/Finale versie
Datum: 28 december 2016
Projectnaam:
Projectnummer: BE-3167-103-100
Auteur(s): Tom Van Den Noortgaete

Opgesteld door: _____

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	2
2	Energieopwekking uit waterkracht	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Theoretische methodes voor energiewinning	4
2.2.1	Energiewinning uit verval	4
2.2.2	Energie uit stroming	4
2.3	Energiewinning bij kunstwerken of andere infrastructuur	6
2.3.1	Inleiding	6
2.3.2	Waterkracht langs kribkoppen	6
2.3.3	Waterkracht langs een kade	11
2.3.4	Waterkracht onder een brug	14
2.3.5	Waterkracht bij een stuw	15
2.3.6	Waterkracht bij een sluis	15
3	Uitwerking business case	18
3.1	Inleiding	18
3.2	Gebruikte financiële parameters	19
3.2.1	Kosten	19
3.2.2	Opbrengsten	19
3.2.3	Waarderingsparameters	19
3.3	Verwachte energieopbrengsten	20
3.3.1	Theoretische energieopbrengst	20
3.3.2	Ontwerpvermogen	21
3.3.3	Energieprijzen	21
3.3.4	Verwachte energieopbrengst in EUR	23
3.4	Haalbaarheid investeringskosten	23
3.5	Beoordeling initiële haalbaarheid waterkracht ter hoogte van een kribkop	23
4	Nautische belangen	25
4.1	Context	25
4.2	Hoofdrivieren	25
4.2.1	Kribben	25
4.2.2	Bodem	25
4.2.3	Bruggen	26
4.2.4	Sluizen en stuwen	26
4.3	Overige rivieren en watergangen	26

1 Inleiding

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.

Rijkswaterstaat heeft eveneens interesse getoond in het onderzoek en wenst een antwoord te hebben op volgende onderzoeksvragen:

- een kwalitatieve beschrijving te ontvangen van de mogelijkheden voor waterkracht in of nabij een kribkop, langs een kade, onder een brug, ponton, sluis en/of stuw.
- aan de hand van een quick-scan inzicht te verkrijgen in de rentabiliteit van een waterkrachtcentrale met de Orion Watermill techniek ter hoogte van een krib.
- een kwalitatieve omschrijving van welke mogelijkheden er zijn om nautische belangen niet te hinderen ter hoogte van een waterkrachtcentrale.

Voorliggend document heeft als doel om een antwoord te bieden op de drie onderzoeksvragen.

2 Energieopwekking uit waterkracht

2.1 Inleiding

Energiewinning uit rivieren door middel van waterkracht kan op twee principiële verschillende wijzen gebeuren. De energie kan namelijk gecapteerd worden uit een lokaal verval (bij bijvoorbeeld een kunstwerk) in een rivier. Hierbij wordt de potentiële energie in het water aangewend. 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 aangewend.

Voor beide principes bestaan een aantal (commerciële) technieken die dergelijke energiewinning mogelijk maken. Gezien de omvang en grootte van vermogens die in de regio Provincie Gelderland exploiteerbaar zijn, richt dit rapport zich enkel op kleinschalige waterkracht. Kleinschalige waterkracht wordt gedefinieerd volgens de definities van UNIDO¹. Een overzicht van deze indeling volgens geïnstalleerd vermogen in kW (lees kilowatt = 1000 Watt) wordt gegeven in onderstaande tabel 2.1.

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

Tabel 2-1 Classificatie voor waterkracht volgens UNIDO.

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 t.g.v. de beperkte strijklengte in de meest voorkomende windrichting voor de ontwikkeling van golven in het studiegebied waardoor de haalbaarheid eerder twijfelachtig is. Deze manier wordt daarom niet verder behandeld.

In de volgende paragrafen wordt de energiewinningswijzen toegelicht. Deze dienen als een basis voor het volgende hoofdstuk.

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 Nederlandse rivieren voorkomen zijn laag (< 10m). Bovendien zijn de te installeren vermogens eerder 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 doorgevoerde debiet Q door en het (netto)verval H_n over de centrale:

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

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 (juister is de benaming motorrendement η_m aangezien strikt niet alle machines turbines zijn), generatorrendement, overbrengingsrendement (niet alle machines vereisen overbrengingssystemen), enz. Het motorrendement is eigen aan de specifieke machine en geeft de verhouding weer van het aangeboden vermogen van de waterstroom tot het door de motor opgewekte asvermogen.

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

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

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

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

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

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):

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

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 achttvoud van het aangeboden vermogen. Voor een optimale inzet van WCT's dient

de oppervlakte A , beschreven door de rotorbladen, bij een gegeven snelheid en randvoorwaarden (bijvoorbeeld diepte rivier) zo groot mogelijk te zijn.

Uiteraard kan niet het volledig aangeboden vermogen worden omgezet in elektrische of andere vormen van energie. De hoeveelheid vermogen dat effectief op de as van de turbine wordt overgedragen wordt uitgedrukt door de vermogenscoëfficiënt C_p . De theoretische, absolute bovengrens van C_p bedraagt 59,3% en wordt de Betz-limiet genoemd. In praktijk dienen echter de bijkomende verliezen nog in rekening gebracht worden (o.a. generatorrendement, eventueel overbrengingsrendement...). Het totaal aan verliezen, inclusief de C_p factor, wordt in rekening gebracht door de factor η . De formule (2) wordt dus geschreven als:

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

Merk op dat een dergelijke formule uiteraard ook opgaat voor windturbines. In vergelijking met windturbines zijn de vrije stromingssnelheid in rivieren of bij getijdenstromingen weliswaar relatief laag. Water heeft echter ± 850 keer de densiteit van lucht. Zodoende kunnen stromingsturbines economisch rendabel zijn vanaf snelheden van ongeveer 1,5 – 2 m/s. Dergelijke situaties komen in de Nederlandse rivieren voor. Dat is meestal het geval bij bochten of vernauwingen waar het water door gedwongen wordt (zoals openingen in estuaria, nauwe doorgangen, (spui)sluizen).

2.3 Energiewinning bij kunstwerken of andere infrastructuur

2.3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven van de energieopbrengstmogelijkheden bij volgende kunst- en infrastructuurwerken: kribkoppen, langs een kade, onder een brug, ponton, sluis en/of stuw.

Hierbij wordt eveneens aangegeven welke groep technieken hiervoor gehanteerd kan worden en wat een praktische integratie zou zijn.

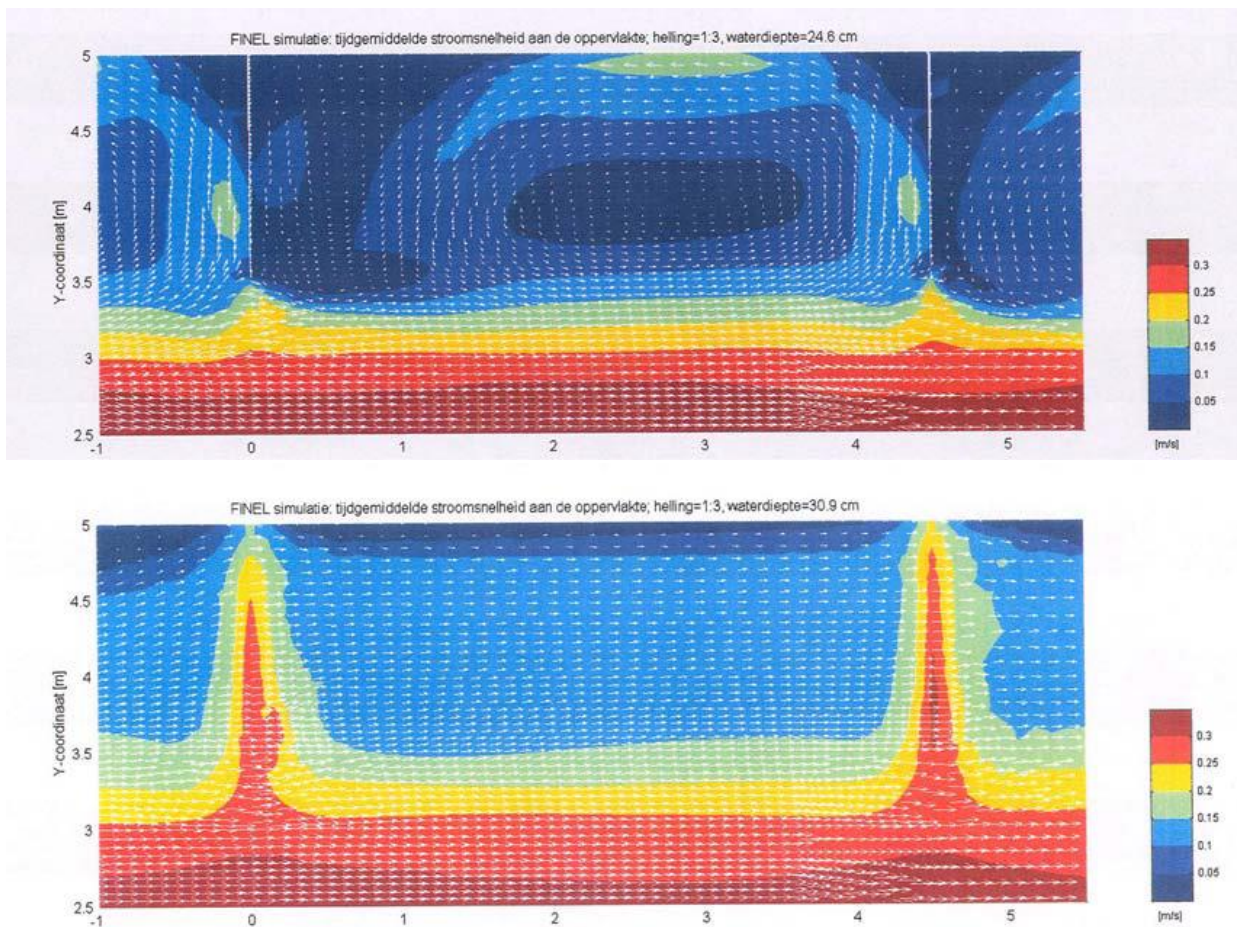
Omwille van het onderzoek naar de financiële haalbaarheid van een waterkrachtcentrale met de Oryon technologie nabij een kribkop (zie hoofdstuk 3), vangt deze paragraaf aan met de beschrijving van de mogelijkheden bij kribkoppen.

2.3.2 Waterkracht langs kribkoppen

Kribben hebben tot doel het in stand houden van bevaarbaarheid (vaardiepte) in de hoofdgeul van de rivier. Doordat ze vooral bij lage afvoeren het natte profiel beperken neemt de stroomsnelheid toe en kan het transport van sediment in stand gehouden worden zodat de bodem op het gewenste peil blijft. In de Provincie Gelderland zijn de Bovenrijn en Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel interessant vanwege de relatief hoge gemiddelde stroomsnelheden. De Benedenrijn is gestuwd waardoor gemiddelde stroomsnelheden lager zijn.

Stroombeeld en hoofdfuncties van kribben

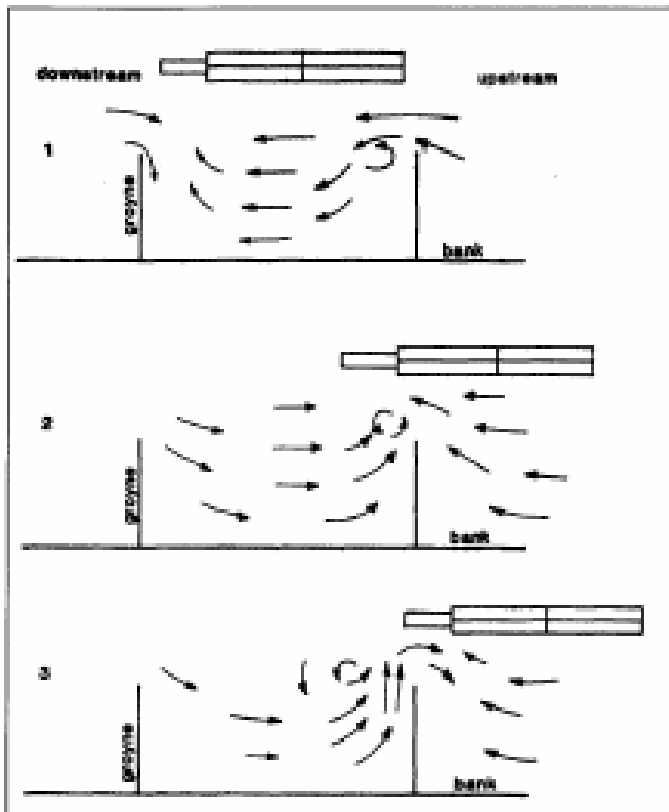
Onderstaande figuur geeft het stroombeeld weer rond kribben, waarbij grofweg onderscheid gemaakt kan worden naar de stroming in de hoofdgeul, de stroming in het kribvak en de stroming rond de kribkop. De snelheden in deze deelgebieden zijn proportioneel in verhouding tot de stroming in de hoofdgeul. Voor wat betreft de morfologische effectiviteit van de kribben (het feit dat de kribben in staat zijn een zekere bodemligging te waarborgen) is het zo dat wanneer een opening in de krib gemaakt zou worden het natte profiel toeneemt waardoor de stroomsnelheid en de sedimenttransportcapaciteit af nemen met als gevolg dat de bodem door sedimentatie hoger komt te liggen. Daar vooral op de Waal de vaardiepte kritiek is zal hiermee rekening gehouden moeten worden bij het inrichten van een krib voor energiewinning. Mogelijk is de situatie ten aanzien van kritieke vaardiepte verslechterd ten gevolge van de kribverlaging die is gerealiseerd ter bevordering van hoogwaterafvoer.



Figuur 2-1 Stroombeeld bij kribben. Boven: niet overstroomde situatie. Onder: overstroomde situatie.

Om energie op te kunnen wekken wordt hier gekeken naar de mogelijkheid om gebruik te maken van de stroomversnelling rond de kribkop. Ten opzichte van de stroomsnelheid in de hoofdgeul worden orde-grootte snelheden van 1,5 tot 2,5 m/s verwacht. Een dergelijke orde-grootte snelheid zal gedurende een groot deel van het jaar optreden (referentievoorbeeld Lobith). Bij het overstroomd raken van kribben treed mogelijk een afname in stroomsnelheid rond de kop op omdat de mate van verdringing minder zal zijn. De kruin van onverlaagde kribben overstroomt bij een afvoer van ongeveer 2.200 m³/s bij Lobith. Deze waterstand wordt 270 dagen per jaar overschreden: de kribben staan dan 95 dagen per jaar volledig onder water. Verlaagde kribben overstroomt bij 1.500 m³/s bij Lobith: deze waterstand wordt gedurende 270 dagen per jaar overschreden. In de verlaagde situatie steken ze dus 100 dagen per jaar boven water uit. In principe is dit gunstig voor het opwekken van waterkracht omdat het aantal dagen onderstroming toeneemt terwijl relatief hoog in de waterkolom gebleven wordt. De hoogte die beschikbaar is voor het inbouwen van een turbine in de kribkop neemt echter af. Het is hierbij de vraag of dit praktisch past. Het plaatsen van een turbine in het kriblijf wordt door verlaging eveneens praktisch moeilijker uitvoerbaar.

Niet beschouwd is het effect van scheepsgeïnduceerde waterbeweging en turbulentie. In het algemeen varen schepen zeker op de Waal vlak onder de normaallijn (lees: kribben) en wordt dus bij de hogere waterstanden zelfs over de kribkop en/of het kraagstuk gevaren. Bij langere schepen (orde-grootte lengte kribvak) kan tijdens het passeren van een schip de stroming van richting veranderen of wordt de stroming tijdelijk versterkt. De stroming rond kribben / in kribvakken tijdens passage van een schip is weergegeven in onderstaande figuur. Gezien de scheepvaartintensiteit zal een omkering van stroomrichting veelvuldig voorkomen.



Figuur 2-2 Stroombeeld bij passage scheper².

Los van de scheepvaart is de turbulentie rond het kribvak hoog wat mogelijk gevolgen heeft voor de efficiency van de turbines. Verder dient rekening gehouden te worden met grote waterstandsverschillen tussen zomer en winter, een aandachtspunt voor verticale positionering van de turbines en daarmee het aantal te behalen vollasturen.

Voor wat betreft bodemligging dient verder rekening gehouden te worden met grote verschillen in bodemligging in de hoofdgeul, bijvoorbeeld door het ademen van kribvlammen (erosie aan de benedenstroomse zijde van de kribkop) en zandduinen die zich in stroomafwaartse richting bewegen. Eerstgenoemde erosiekuil is doorgaans 30 tot 50 procent van de kribhoogte diep. Zandduinen hebben een hoogte tot 1,5 m. De bodemhoogte in een kribvak varieert met orde 2 m op de Bovenrijn en Waal: tijdens het hoogwaterseizoen is de stroming richting de uiterwaard gericht en wordt sediment in het kribvak afgezet (hoge ligging) en onder invloed van scheepvaart erodeert het gesedimenteerde materiaal tijdens het laagwater seizoen. Op de IJssel en het Pannerdensch Kanaal is dit naar verwachting minder het geval maar mogelijk zijn de stroomsnelheden langs de kribkop ook lager.

Beheer en onderhoudskosten van kribben zijn relatief laag. Dat komt omdat indien van rationeel beheer wordt uitgegaan, de functie pas bij verregaande degradatie van de krib verloren gaat en er dus in principe niet bij het verdwijnen van enkele stenen uit de bestorting al onderhoud gepleegd hoeft te worden. Wel is er doorgaans een tekort aan onderhoudsbudget waardoor beheer kritiek wordt.

² Royal HaskoningDHV, Struikma River Engineering, Bureau Strooming, Radboud Universiteit Nijmegen (2006), "Eilandkrib en Louvrekrib", inzendingen Prijsvraag Kribben van de Toekomst, RWS/CUR. De Eilandkrib is het winnende ontwerp met eervolle vermelding voor de Louvrekrib.

Overige functies kribben

Naast het op peil houden van de bodemligging (zie hiervoor) is het van belang rekening te houden met de extra functies van rivierkribben:

- Bieden van (nautische) vaarwegkwaliteit en zichtbaarheid
- Voorkomen van ijsaangroei (afvoeren van water)
- Landschappelijke kwaliteit
- Ecologie

ad1) De vaarwegkwaliteit komt vooral tot uitdrukking in het duidelijk (visueel) afbakenen van de vaarweg. Ten gevolge van kribverlaging zijn de kribben gemiddeld met één meter verlaagd waardoor ze vaker overstromen. Naast een visuele verslechtering bij gelijke (lagere) waterstanden neemt vervolgens ook de kans op aanvaring toe. Waar in de oorspronkelijke situatie kribben op de Waal gemiddeld één's per jaar werden aangevaren zal de kans hierop mogelijk zijn toegenomen door de verlaging. In een ieder geval is er een zeker risico dat op, nabij of in de kribben aangebrachte turbines door schepen geraakt worden. Mede vanwege ook een potentiële impact op bevaarbaarheid indien de kribgeometrie aangepast wordt moet ook rekening gehouden worden met de scheepvaartsector als belangrijke stakeholder.

ad 2) De geometrie kribben en het feit dat ze een gelijkmatig stroombeeld faciliteren maakt dat er weinig kans is op aangroei van ijs. Dit is nodig om voldoende afvoercapaciteit te realiseren bij hoge afvoeren. In het geval ijsaangroei zou leiden tot een ijssdam of ijsdek dan zou dit uiteindelijk kunnen leiden tot opstuwung en toename van (hoog)waterstanden. Hoewel de kans van voorkomen de laatste decennia flink is afgenomen is dit nog steeds een van de functies van kribben.

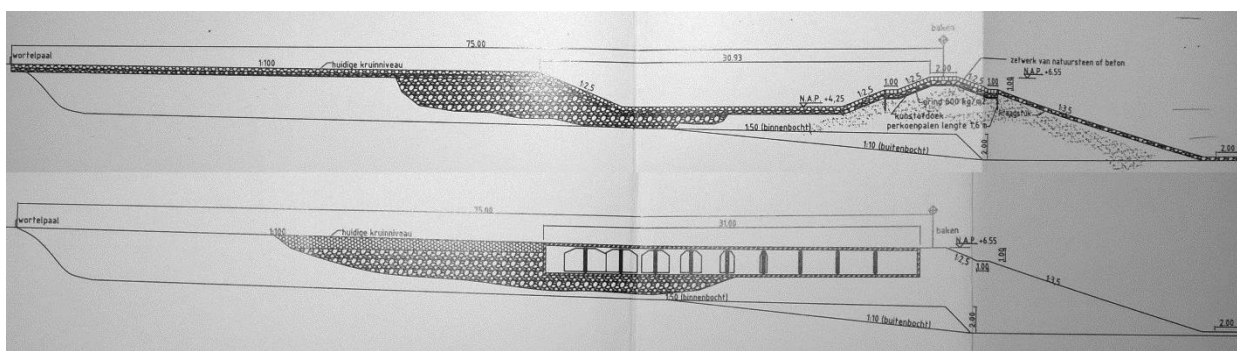
ad 3) Kribben worden gezien als integraal onderdeel van (de natuur van) het rivierenlandschap beleefd. Met deze overduidelijke landschappelijke waardering door recreanten op het water en in de uiterwaard zal rekening gehouden moeten worden. Veiligheid speelt hierbij ook een rol: vissers die gebruik maken van de kribben om te vissen moeten de kribben op een veilige manier kunnen benaderen en beklimmen. Evenzeer wordt tijdens warme dagen veel gezwommen in kribvakken, vanaf de stranden en tussen de kribben. Ook hier dient de nodige aandacht voor veiligheid te worden gegarandeerd, ondanks dat de rivierbeheerder (Rijkswaterstaat) niet aansprakelijk is voor deze veiligheid.

ad 4) Kribben zijn een belangrijke paaiplaats voor vissen. Overigens moet er ook rekening mee gehouden worden dat uiterwaarden vaak ook belangrijke natuurgebieden zijn wat het realiseren van een aansluiting naar het elektriciteitsnetwerk mogelijk bemoedigt, afgezien van de hoeveelheid.

Energieopwekking uit stroming rond de krib

Gegeven de functionele context van de kribben is het plaatsen van een turbine in de kribkop of in het kriblijf het meest voor de hand liggend. Een voorbeeld is gegeven in de onderstaande figuren. In het geval van het plaatsen van een turbine in het kriblijf zoals ooit voorgesteld als toevoeging op de Louvrekrib is deze relatief beschermd tegen aanvaringen. Het gevolg is dan wel dat de turbines bij lagere stroomsnelheden moeten kunnen werken en dat vermoedelijk extra aandacht gevraagd is voor veiligheid.

Het plaatsen van turbines in de kribkop maakt dat ze eerder aangevaren worden maar dat mogelijk een groter aantal vollasturen gehaald kan worden met tevens hogere stroomsnelheden (scheepsgeïnduceerde waterbeweging niet in acht nemende). De vraag is of dit nog mogelijk bij a) de verlaagde kribben of b) bij de niet-verlaagde kribben op de IJssel en Bovenrijn.



Figuur 2-3 Kribben van de toekomst / gebaseerd op een representatieve (niet-verlaagde) krib op de Waal. Boven: Eilandkrib. Onder: Louvrekrib.

Kosten en beheer & onderhoud

Nederland telt een 3.600 tal kribben op de rivieren. Belangrijk is te onderkennen dat deze een grote investeringswaarde vertegenwoordigen. Het realiseren van nieuwe kribben is een kostbare zaak en zou al snel EUR 150.000 per stuk kosten (excl BTW). Aanpassingen aan kribben zullen navenant kostbaar zijn, waarbij tevens rekening gehouden moet worden met veilige en vlotte doorgang van scheepvaart tijdens de uitvoering.

2.3.3 Waterkracht langs een kade

Over het algemeen zal de energie-inhoud van de golven in het studiegebied veel lager zijn in vergelijking met golven op grote meren, zeeën of oceanen. Op dergelijke omvangrijke gebieden zijn intussen demonstratieprojecten actueel. Een gekende, commerciële methode is bijvoorbeeld een systemen die gebruikmaakt van attenuators. Deze machines zijn lange drijvende constructies opgebouwd uit meerdere segmenten die ten opzichte van elkaar kunnen bewegen (Pelamis).



Figuur 2-4 Golfconversie systemen. Links: voorbeeld van de Pelamis. Rechts: voorbeeld van Wavegen system.

Een andere techniek is om de op- en neergaande golfbeweging om te zetten in een heen en weergaande luchtverplaatsing. Deze luchtbeweging drijft vervolgens een turbine die de mechanische energie converteert naar elektrische energie. Voor deze toepassingen wordt steeds een turbine van Wells ingezet aangezien deze machine steeds, onafhankelijk van de windrichting, dezelfde richting draait.

Voor rivieren of voor kleinere wateroppervlakten is de haalbaarheid van bovenstaande technieken zeer twijfelachtig t.g.v. het plaatselijke golfkarakter. De golven bevatten immers te weinig energie t.g.v. van de beperkte amplitudes. In het kader hiervan dient zelfs de vraag gesteld te worden of, mits gebruik te maken van alternatieve methodes, een kleinschalige golfenergiecentrale überhaupt haalbaar kan zijn.

Het idee kan daarom gezocht worden in een combinatie met een tweede functie: golfdemping. Golfdemping kan immers zeer wenselijk zijn in bijvoorbeeld de kanalen. Het Nederlands waternetwerk bestaat uit een aantal kanalen om scheepvaarttransport te bevorderen. Het Noordzeekanaal, het Amsterdam-Rijnkanaal, het Wilhelmina- en Julianakanaal en de Nieuwe Waterweg zijn hiervan de bekendste.

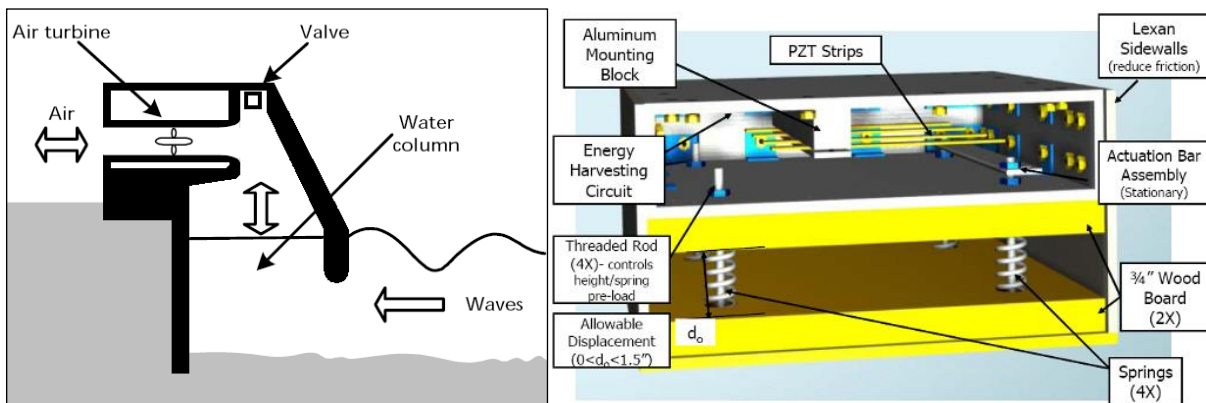
De kanalen zijn immers niet natuurlijk van aard waardoor de opbouw uit stijve materialen bestaat en een gladde en scherpe geometrie heeft. Het gevolg van dit kenmerk is dat verstoringen in het water, zoals windgolven of golven veroorzaakt door voorbijgaande schepen, tegen de oevers sterk gereflecteerd kan worden en nauwelijks geabsorbeerd wordt. Bij laden en lossen van afgemeerde schepen kunnen deze lange golven ongecontroleerde, hinderlijke scheepsbewegingen veroorzaken. Bestuurders kunnen dan moeite hebben hun boot op koers te houden en worden verrast als hun afgemeerde boot onverwachte verplaatsingen maakt. Door gedeeltelijke golfdemping wordt die hinder verminderd.

Wanneer de oevers uitgerust worden met energie-absorberend materiaal wordt de reflectie verminderd en de hinder verminderd. Wanneer echter het absorberende materiaal vervangen wordt door bijvoorbeeld “impact-absorberende” luchtdrukcompartimenten of compartimenten gevuld met water, kan de golfenergie omgezet worden in een lucht of waterstroom die een turbine aandrijft.

De uitdaging bestaat er dan in om verstoringen van het wateroppervlak ter hoogte van de kanaalwanden of dijken uit te dempen door middel van energie-opwekking uit deze energiestroom. Het concept dient hierbij met een zo hoog mogelijk rendement ontworpen worden in combinatie met een eenvoudige inpasbaarheid en een zo laag mogelijke kost per energie-eenheid.

Commerciële methodes zijn momenteel niet voorhanden om dergelijke kleinschalige golfenergie te winnen. Het concept energiedemping in combinatie met energiewinning wordt wel onderzocht. Enkele ideeën:

- Drijvende structuren: een drijvende structuur met elementen die bewegen ten opzichte van elkaar als gevolg van de golfwerking (bijv. een drijvende boei die via een verticale stang verbonden is met een energie-omzettingssysteem) kunnen ontwikkeld worden voor liggende toepassingen. Tijdens verstoring (golven) zal dan een verticale stang op en neer bewegen t.g.v. de drijver. Deze translatiebeweging kan bijvoorbeeld via het magneet/spoel principe omgezet worden in elektrische energie. Een dergelijke manier van elektrische energieproductie bij zeer discrete en onregelmatige bewegingen wordt vandaag al toegepast in een gsm voor het opladen van de batterij.
- Luchtdrukssystemen: nabij oevers slaan de golven tegen de wand. Ter hoogte van de wand zou de breuksteen vervangen kunnen worden door een luchtcompartiment waarin water of lucht wordt samengedrukt door de werking van de golven. Door een kleine uitstroomopening stroomt de samengeperste lucht naar buiten. Op zijn weg drijft de lucht een propeller of kleine turbine aan die met een dynamo is verbonden.



Figuur 2-5 Links: Schematische voorstelling van een luchtdrukstelsel. Rechts: visualisatie van een piëzo-elektrische tegel.

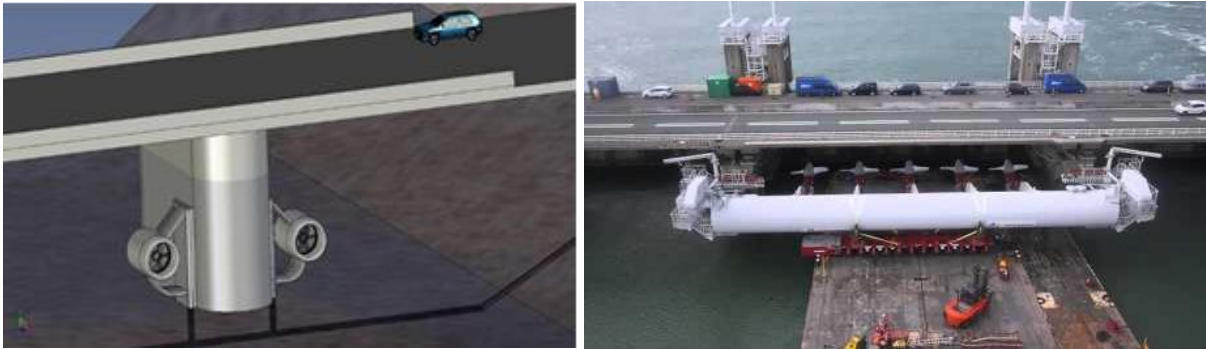
- Piëzo-elektrische energie: een andere mogelijke manier is het gebruik van piëzo-elektrische materialen tegen de damwand die fungeren als demper en als energieconvector. Het piëzo-elektrisch effect is het verschijnsel dat kristallen van bepaalde materialen onder invloed van druk (bijvoorbeeld trek of buiging) een elektrische spanning produceren. Deze wet geldt ook andersom: de materialen vervormen als er een elektrische spanning op wordt aangelegd. De techniek wordt vandaag reeds toegepast voor elektrische energieopwekking. Een voorbeeld zijn piëzo-elektrische tegels (zie figuur 2.5) die in voetpaden of in dansvloeren van dancings

verwerkt worden. Het idee hierbij is dat de 'stapenergie' van mensen gecapteerd en omgezet wordt naar elektrische energie om bijvoorbeeld verlichting te voorzien. Een dergelijke tegel wordt gevisualiseerd in figuur.

Deze techniek kan geëxtrapoleerd worden naar golfenergie. Piëzo-elektrische materialen zouden hierbij langs de kanaal- of damwand geplaatst kunnen worden onder een bepaalde hoek in functie van de aankomende golven. Het slaan van de golf tegen een dergelijk element zorgt voor een vervorming van het element en dus de opwekking van een spanningsverschil aan de klemmen. Het piëzo-elektrisch materiaal zal op zichzelf een weerstand bieden tegen de vervorming en dus fungeren als een demper voor de aankomende golf.

2.3.4 Waterkracht onder een brug

Ter hoogte van bruggen over een waterloop kan theoretisch eenvoudig aan energiewinning gedaan worden. Het idee is dat de stromingsenergie van de waterloop benut en vervolgens omgezet wordt in elektrische energie. Dit is mogelijk via stromingsturbinen die dus de kinetische energie van het water benutten voor conversie. Om de gedachten te vestigen worden in onderstaande twee visualisaties getoond van dergelijke types turbines.



Figuur 2-6 Links: een visualisatie van de Smartturbine aan een brugpeiler. Rechts: foto van de 5 Tocardo turbines ter hoogte van de Oosterschelde kering.

De figuur toont dat turbines zoals de Smartturbine aan een brugpeiler in de stroming gehangen kunnen worden waarbij een vermogen opgewekt wordt. Een tweede mogelijkheid is bijvoorbeeld om een turbine via een eenvoudig verankeringsmechanisme of ter hoogte van de fundering van de brugpeilers te bevestigen en te plaatsen in de waterloop. Het is duidelijk dat op die manier met een beperkte inspanning m.b.t. civiele constructies aan energiewinning gedaan kan worden zonder hierbij complexe inlaat- en uitlaat middelen te voorzien of zonder een verval te creëren. Dit heeft het voordeel dat civiele kosten hierdoor sterk gereduceerd worden. Toch dient, om de exploitatie van dergelijke projecten rendabel te maken, de vrije stromingssnelheid ter hoogte van het kunstwerk relatief hoog (> 1 m/s) te zijn gedurende een belangrijk deel van de tijd (hoge $\Delta T/24u$).

Het snelheidsgebied voor dergelijke machines waarbij een optimaal rendement en dus een optimaal vermogen geproduceerd kan worden, bedraagt tussen de 2 m/s en 4 m/s. Bij deze snelheden kunnen deze turbines met een diameter van slechts 2 m een vermogen opwekken van 10 tot 60 kW per eenheid.

Het belangrijkste probleem bij is de passage van scheepvaart. Een dergelijke turbine komt letterlijk in het vaarwater te liggen van de scheepvaart. Het is immers zo dat de stromingskarakteristieken (stromingssnelheid, diepte) van een rivier optimaal zijn daar waar de scheepvaart eveneens passeert. Het plaatsen van turbines in deze doorgangen is daarom vaak uitgesloten.

Een tweede nadeel is dat de stromingskarakteristieken in de regio van de peiler niet meer optimaal zijn. Er vindt opstuwung plaats voor de peiler waardoor de stromingssnelheid afneemt en lichte turbulentie ontstaat ter hoogte van de inlaat van de turbine. Het voordeel van de Smartturbine (zie figuur) is dat de omhulling (convergerende/divergerende tunnel) deze nadelige invloed deels tegengaat.

Het is eveneens belangrijk om nog te duiden op de eventuele schade die kan optreden van zwevend of drijvend puin. De turbines zouden op een eenvoudige manier afgeschermd moeten worden om nadelige invloeden te vermijden. Het plaatsen van bijvoorbeeld een vuilrooster net voor de inlaat van de turbine biedt een oplossing maar zorgt echter wel voor een belangrijke weerstand.

Bemerk ook het effect van zomer- en winterbekken. Hierdoor wordt de turbine gedwongen meer in het midden van de stroming gehangen te worden en komt dus weer in conflict met de scheepvaart. Bij plaatsing tegen de oever zou de turbine in de zomer immers droog kunnen komen te staan. Ten slotte dient nog rekening gehouden te worden met recreatiedoeleinden. Er moet gewaakt worden over menselijke activiteiten rond de turbines. Een drijvende boei zou als waarschuwingmiddel kunnen dienen.

2.3.5 Waterkracht bij een stuw

Het winnen van waterkracht ter hoogte van een stuw is vanuit een financiële business case bekeken vaak het meest interessante alternatief. Het verval is immers meteen beschikbaar en het de waterafvoer is vrij continu (uiteraard met fluctuaties in functie van de regenval).

Een waterkrachtcentrale kan naast de stuw (in den droge) gebouwd worden of geïntegreerd (in den natte) worden in de waterloop of stuw zelf.

Volgens de studie³ uitgevoerd door Deltares, Royal Haskoning en HKV in 2009 is er cumulatief een potentie van minimaal 30 MW aan waterkracht te ontwikkelen in de Maas en Nederrijn. Indien eveneens de locaties in rivieren beheerd door de Waterschappen beschouwd worden, kan dat enkele MW extra zijn.

De energieopbrengst van dergelijke centrales is hoog. De vollasturen zijn vaak 3.000 tot 4.000 uren.

2.3.6 Waterkracht bij een sluis

Ter hoogte van een sluiscentrale kan in feite op twee locaties energie gewonnen worden:

1. Benutten van het verval tussen de kolk en het boven- of benedenpeil.
2. Benutten van het verval over de sluis, namelijk het verschil tussen boven- en benedenpeil.

In sommige gevallen zijn ter hoogte van sluizen pompcentrales aanwezig om gedurende droge periodes kanalen van voldoende peil (of diepgang) te voorzien. Dat is bijvoorbeeld het geval bij sluis IV (Wilhelminakanaal) en sluis Panheel (Kanaal Wesssem-Nederweert).

Een alternatief is dus om deze centrales dubbelwerkend uit te laten voeren. Dat kan een mogelijke quick-win zijn aangezien lokale infrastructuur reeds beschikbaar is. Aan de andere kant is het bij pompcentrales vaak niet wenselijk om extra debiet via een waterkrachtcentrale 'verloren te laten gaan'. Een optimalisatie d.m.v. bufferen en dal- en piektarieven kan een uitweg zijn.

Benutten van het verval over een sluishoofd

In dit geval is het verval en debiet niet constant. Beide parameters worden immers ingegeven door de schuttingen die voor de scheepvaart plaatsvinden. Het op te wekken vermogen bij een sluiscentrale is hier dus niet afhankelijk van de condities bovenstrooms maar van het verval over de sluishoofden. Bovendien zijn ook het aantal draaiuren gelimiteerd en dus afhankelijk van het aantal schutting die per tijdseenheid gebeuren.

Zowel het ontwerpvermogen als de energieopbrengst is hierdoor relatief beperkt. In functie van het verval is het ontwerpvermogen enkele (tiental) kW. De energieopbrengst is enkel van toepassing tijdens het schutten, waardoor dit enkele minuten per uur bedraagt.

³ *Potentie duurzame energie bij kunstwerken. WINN Energie uit water. Deltares, Royal Haskoning en HKV.*

De energiewinning door het verval over een sluishoofd kan op enkele manieren gebeuren. De keuze van turbine is hoofdzakelijk afhankelijk van de inpassingsmogelijkheden en beschikbare ruimte:

- Turbines zouden bijvoorbeeld kunnen geplaatst worden in het vulsysteem van de sluis met kleine vervallen. De kolk tussen de sluisen communiceert immers met het bovenwaterbekken en benedenwaterbekken via waterkanalen. De energie van het verplaatsende water zou op die manier benut kunnen worden. De vraag is of deze methode rendabel kan zijn gezien het aangeboden vermogen per turbine eerder laag is en vooral slechts op discrete tijdstippen aangeboden wordt.
- Bij sluisen met grote vervallen worden doorgaans omloopriolen in combinatie met een woelkelder toegepast voor de energievernietiging. Een dergelijk type vulsysteem is veel omvangrijker dan het voorgaande en biedt daarom ook meer mogelijkheden voor de integratie van een waterkrachtcentrale.
- Een derde mogelijkheid is het plaatsen van een turbine in de deuren van de sluis. In een van de sluisen van het Noordzeekanaal⁴ is destijds een proef gedaan met een schroef in de sluisdeur. Het doel was echter niet het opwekken van groene netenergie maar het produceren van voldoende energie voor de aandrijving van sluisdeuren. Deze resultaten vielen echter tegen: de deuren vielen stil en moesten op andere manieren gesloten worden. Het nadeel van dit systeem is echter dat de ontwerpmogelijkheden beperkt zijn. Het gewicht van deur en turbine mag niet te hoog worden. Bovendien is sowieso een bestaande, brede deur een vereiste. Nog een belangrijk nadeel is dat afval meegevoerd kan worden tijdens het nivelleren. De turbine wordt hieraan blootgesteld.

Benutten van het verval over een sluis

Deze wijze van energiewinning is gelijkaardig als de energiewinning ter hoogte van stuw. Dat is natuurlijk enkel het geval indien er een spuidebiet beschikbaar is. Het belangrijkste verschil is dat het verval enkel benut kan worden indien de afstand tussen de 2 sluishoofden overbrugd kan worden:

- Ofwel kan hiervoor lokale infrastructuur aangewend worden zoals bijvoorbeeld spuiholten. In dat geval kan het riool aangewend worden als eventuele toevoerleiding voor de waterkrachtcentrale.
- Er kan een sifon of een (open of gesloten) geul voorzien worden die het 'bovenbekken' via een waterkrachtcentrale met het 'benedenbekken' verbindt. Dat is vaak kostenverhogend door de extra infrastructuur.

Het opwekbare vermogen wordt hierbij gelijkaardige wijze bepaald als bij stuwcomplexen, namelijk op basis van het beschikbare verval en spuidebiet.

Enkele concrete voorbeelden die destijds voor Rijkswaterstaat uitgezocht zijn, kunnen in onderstaande tabel teruggevonden worden.

⁴Lammeren, van, S.A., *Sluiscentrales in Nederland: Een studie naar de haalbaarheid van waterkracht uit schutsluisen en spuisluisen*. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen, Afdeling Waterbouwkunde, 2003.

	Visonvriendelijke machines	Tussen-variant	Visvriendelijke machines	Type machine
Schutsluizen met spui- of afvoerfunctie				
Boscherveld			0,3 MW	Middenslagrad of Bovenslagrad
Bom	2 MW			Cross flow turbine
	of	1,8 MW met 0,2 MW		Cross flow turbine met Archimedes
	of		2 MW	In serie staande Archimedes
Maasbracht	2 MW			Cross flow turbine
	of	1,8 MW met 0,2 MW		Cross flow turbine met Archimedes
	of		2 MW	In serie staande Archimedes
Heel			1,2 MW	Archimedes
Panheel			0,4 MW	Archimedes
Tiel			0,5 MW	Archimedes
Wijk bij Duurstede			1,5 MW	Archimedes
Weurt			0,1 MW	Davis Turbine, SmartTurbine of HydroRing
St. Andries			0,1 MW	Davis Turbine, SmartTurbine of HydroRing
TOTAAL	4 MW			
	of	3,6 MW met 0,4 MW		
	of		4 MW	
			4,1 MW	

Tabel 2-2 Overzicht⁵ van de potentie bij sluizen met spui- of afvoerfunctie.

⁵ Potentie duurzame energie bij kunstwerken. WINN Energie uit water. Deltares, Royal Haskoning en HKV.

3 Uitwerking business case

3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt onderzocht of een waterkrachtcentrale ter hoogte van een krib(kop) een haalbare kaart is. De initiële haalbaarheid is vervolgens bepaald door *Reverse Financial Engineering*: op basis van financiële doelstellingen (IRR, terugverdientijd) 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 opdrachtschrijving. 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.

Volgende uitgangspunten worden gehanteerd voor de beoordeling van de haalbaarheid.

- 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 kentallen. Deze zijn voor de vermogenscategorie tot 50 kW orde EUR 8.000 ex BTW. Voor vermogens rond 2 MW wordt EUR 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.

3.2 Gebruikte financiële parameters

3.2.1 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.

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.

3.2.2 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 zal 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.

3.2.3 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.

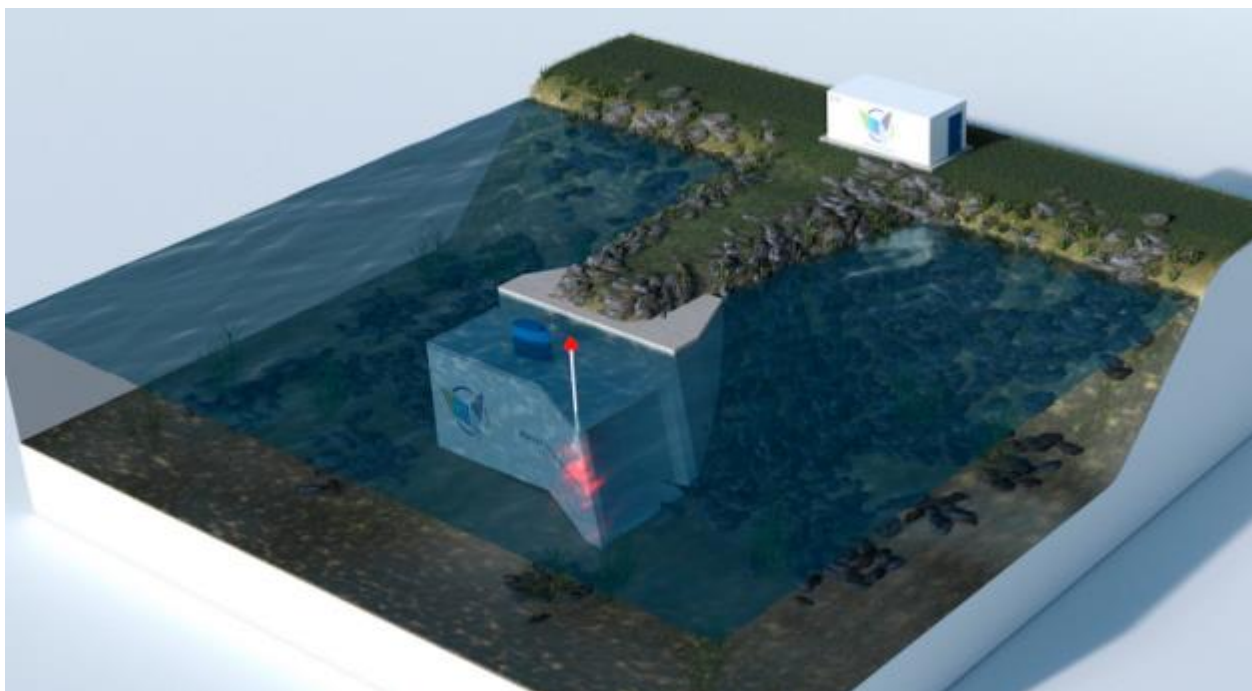
Interne opbrengst voet (IRR)

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

3.3 Verwachte energieopbrengsten

3.3.1 Theoretische energieopbrengst

Zoals eerder in dit rapport aangegeven is het maken van een exacte inschatting van de hoeveelheid winbare energie ter hoogte van een krib complex vanwege onzekerheden in het stroombeeld. In overleg met DWE is besloten uit te gaan van het installeren van drie tot vier turbines direct achter de kribkop met de bovenzijde van de turbines op de bestaande kruinhoogte en een hoogte van de turbines (incl ondersteunende civiele infrastructuur) van twee meter maximaal).



Figuur 3-1 Integratie van de Oryon Watermill ter hoogte van een krib. (Bron: Oryon Watermill.)

De waterstand ter hoogte van de kruin wordt 270 dagen per jaar overschreden. Een waterstand 2 m boven de kruin wordt orde 60 dagen per jaar overschreden. Bij nog hogere waterstanden zal de stroming afnemen en niet meer door de opening gaan. Dan zouden dus orde 210 dagen per jaar 'verdronken turbines' zijn met een maximale waterstand van 2 m daarboven. In die periode kan er dan energie opgewekt worden (zeg voor het gemak dus 200 dagen per jaar). Daar moet dan nog vanaf het effect dat de stroming varieert door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging.

Scheepsgeïnduceerde waterbeweging, althans de impact ervan op de hoeveelheid winbare energie is op voor hand lastig te schatten. Er komen op de Waal zo'n orde 160.000 schepen per jaar voorbij ofwel als indien het verdeeld zou worden over 16 uur en 6 dagen: orde 30 schepen per uur. Daarvan zal een deel dicht onder de kribben langsvaren en merkbaar invloed hebben. Aangenomen wordt dat dit in de helft van de gevallen zo is (want twee richtingen). Dan zijn er 15 'merkbare' passages per uur. Als die allemaal even lang doen over een passage van 1 minuut dan verlies is de stroming dus orde 15 minuten van een uur beïnvloed door de passage en potentieel sub-optimaal voor energieopwekking. Uitgaande van 200 dagen draaiuren dan heb je dus effectief 150 dagen per jaar de mogelijkheid om energie op te wekken. Dit is een (bewust) conservatieve aanname.

Goed aangestroomde kribben hebben naar verwachting rond de kribkop wel een stroomsnelheid van orde 1,5 m/s gemiddeld. Het is de vraag wat de impact is van het maken van een opening achter de kribkop. In principe neemt de stroomsnelheid dan wat af, maar dat is niet zo maar even te zeggen hoeveel dat zou zijn. De meeste zekerheid wordt verkregen door metingen.

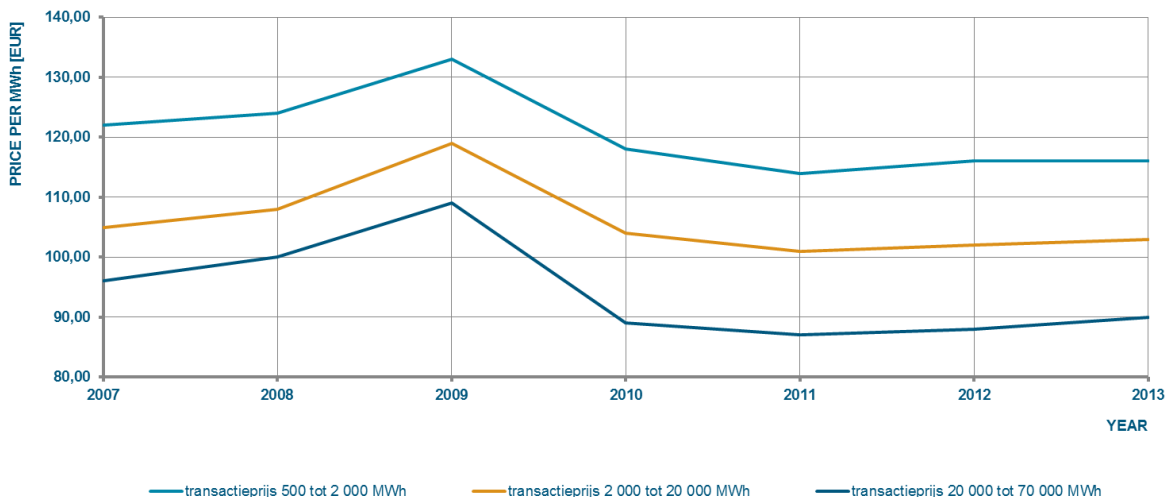
3.3.2 Ontwerpvermogen

Op grond van voorgaande schattingen van stroomsnelheden is door DWE een schatting gemaakt voor het ontwerpvermogen. Gedacht wordt aan 3 tot 4 turbines van in totaal 120 kW tot 150 kW geïnstalleerd vermogen. DWE verwacht wordt dat vervolgens 600.000 kWh tot 750.000 kWh per jaar kan worden opgewekt.

3.3.3 Energieprijzen

Om de energieopbrengsten te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van de gegevens van CBS⁶. Relevant zijn de transactiepreizen voor niet-huishoudens en een geleverd vermogen tussen 500 MWh en 2.000 MWh per jaar. Voor deze range op basis van de periode 2007 – 2013 een gemiddelde transactieprijs van EUR 120 per MWh, inclusief BTW en belastingen. De minimale transactieprijs betrof EUR 114 per MWh. De maximale transactieprijs was EUR 133 per MWh.

De lagere energieprijs wordt voor de levensduur van de waterkrachtcentrales niet representatief verondersteld. Om die reden wordt de gemiddelde waarde aangehouden als een laag ontwikkelscenario (A) en wordt de opgetreden maximum transactieprijs als gemiddeld ontwikkelscenario aangehouden (B). Voor het hoge ontwikkelingscenario (C) wordt uitgegaan van 20 procent stijging van de transactieprijs uit scenario B (EUR 160 per MWh).



Figuur 3-2 Overzicht transactiepreizen 2007 – 2013.

De relevante scenario's voor energieopbrengsten zijn daarmee A (laag), B (gemiddeld) en C (hoog). Dit geeft een bandbreedte van te verwachten energieopbrengsten. Daarnaast wordt om een beeld van de

⁶ CBS 2015, Statline, "electriciteitsprijs (niet-huishoudens) inclusief BTW en belastingen"

robustheid van de investering te verkrijgen gekeken naar de gevolgen voor de investering bij 20 procent lagere energieopbrengsten en een lagere doel-IRR van 10 procent.

Tabel 4.1 **Overzicht gebruikte scenario's om de initiële haalbaarheid te beoordelen**

A (laag)	B (gemiddeld)	C (hoog)
EUR 120 / MWh	EUR 133 / MWh	EUR 160 / MWh

Tabel 3-1 Overzicht gebruikte scenario's om de initiële haalbaarheid te beoordelen.

3.3.4 Verwachte energieopbrengst in EUR

Onderstaande tabel vat de resultaten van energieopbrengsten samen voor de verschillende capaciteiten van waterkrachtcentrales per scenario van energieprijzontwikkeling.

geïnstalleerd vermogen [kW]	energieproductie [MWh/jaar]	energieopbrengst per scenario [EUR]		
		A (laag)	B (gemiddeld)	C (hoog)
150	750	90.000	99.750	120.000

Tabel 3-2 Overzicht energieopbrengsten per centrale per jaar per scenario. (Alle bedragen in EUR.)

3.4 Haalbaarheid investeringskosten

Uitgaande van een IRR van 10 en 12 procent is voor de verschillende scenario's uitgerekend wat in dat geval de TCO mag zijn. OPEX is hierbij vooralsnog steeds als een vast percentage van 8 procent van de CAPEX meegenomen. Financierings- en ontwikkelingskosten, belastingen en eventuele subsidies zijn niet meegenomen.

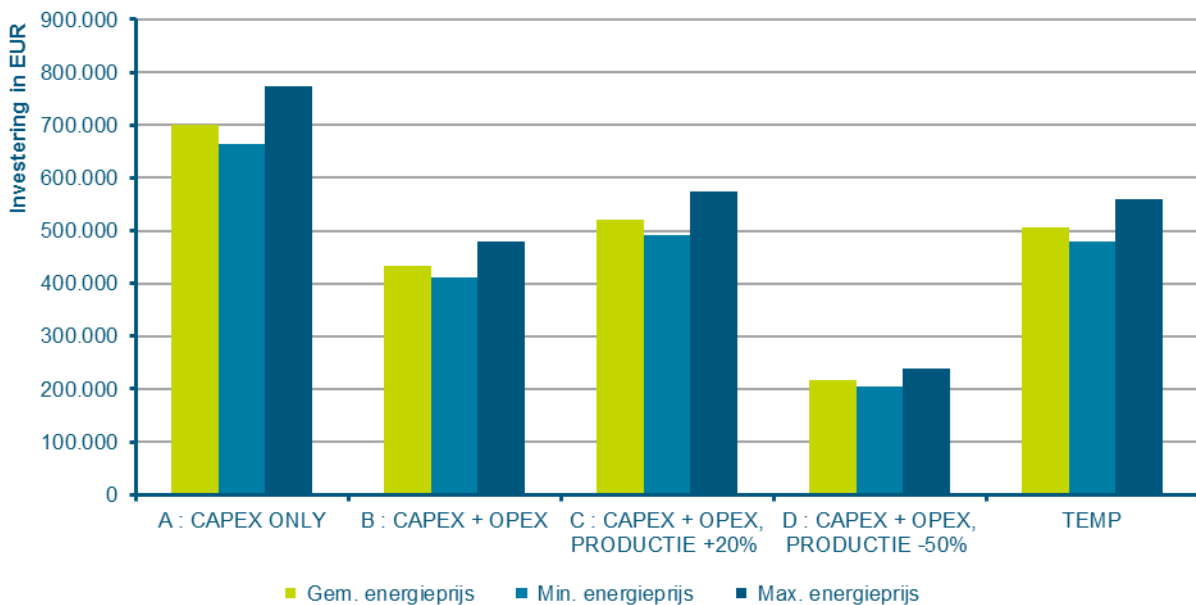
Tabel 4.1 Overzicht TCO per centrale per jaar per scenario behorend bij een doel-IRR van 12 procent, een doel-IRR van 12 procent en het geval van 20 procent minder energieopbrengsten en een IRR van 10 procent
Alle bedragen in EUR

geïnstalleerd vermogen [kW]	energie productie [MWh/jaar]		TCO per scenario [EUR]		
			A (laag)	B (gemiddeld)	C (hoog)
5.950	750	TCO bij doel -IRR van 12 %	409.415	432.558	477.709
		TCO bij doel-IRR van 10 %	446.824	472.022	521.296
		energie opbrengsten per jaar	90.000	99.750	120.000
	375	TCO bij doel-IRR en -50 % prod	204.728	216.270	238.835
		energie opbrengsten per jaar	72.000	79.800	96.000

Tabel 3-3 Overzicht TCO per centrale per jaar per scenario behorend bij een doel-IRR van 12 procent, een doel-IRR van 12 procent en het geval van 20 procent minder energieopbrengsten en een IRR van 10 procent. (Alle bedragen in EUR.)

3.5 Beoordeling initiële haalbaarheid waterkracht ter hoogte van een kribkop

Een waterkrachtcentrale van 150 kW in een krib levert op jaarbasis theoretisch 750 MWh aan energie. De inkomsten (na aftrek van operationele kosten) die daar bij horen liggen afhankelijk van de transactiepreizen tussen EUR 72.000 / jaar (A) en EUR 120.000 / jaar (C). Om een redelijke IRR van 10 tot 12 procent te behalen mogen de investeringskosten tussen EUR 204.728 (A) en EUR 521.296 (C) liggen. De in deze paragraaf genoemde waarden zijn steeds terug te vinden in tabel 5.3.



Figuur 3-3 Haalbare investeringskosten per scenario bij een doel-IRR = 12 procent

Indien de verwachte omstandigheden voor wat betreft het stroombeeld inderdaad juist blijken te zijn en 750 MWh aan energie kan worden gewonnen, mogen de investeringskosten tussen EUR 409.415 en EUR 477.709 liggen voor een IRR van 12 procent. Indien een lagere IRR geaccepteerd wordt van 10 procent dan mogen de investeringskosten tussen EUR 446.824 en EUR 521.296 liggen. Om impact van de onzekerheid in hoeveelheid winbare energie te kwantificeren is een grotere bandbreedte aan energieproductie naar beneden aangehouden dan bij de overige voorbeelden (50 procent vs 20 procent). De impact van de helft lagere energieopwekking resulteert bij een IRR doelstelling van 12 procent in maximale investeringskosten van EUR 207.728 tot EUR 238.835, afhankelijk van de energieprijzen.

Voor de investeringskosten moet tevens een koppeling naar het elektriciteitsnetwerk gerealiseerd worden en moet een opening gemaakt worden in een bestaande krib. Hierin moet vervolgens een betonnen draagconstructie worden aangebracht en moet vervolgens de constructie weer worden aangeheeld. Verwacht wordt dat voor de civiele werkzaamheden tenminste EUR 75.000 gerekend moet worden. Dit betekent dat in het meest ongunstige geval de turbines EUR 125.000 tot in het meest gunstige geval EUR 450.000 mogen kosten.

Aanbevolen wordt in een eerste stap eerst de hoeveelheid winbare energie te verifiëren door middel van expertise oordeel en metingen bij goed aangestroomde kribben. Op het traject Nijmegen – Tiel kan gedacht worden aan de kribben ter hoogte van Dodewaard. Kribben op de IJssel lijken voornamelijk minder geschikt vanwege de kortere lengte ten opzichte van de omvang van de turbines. Bovendien zal de relatieve impact op de vaarweg daar naar verwachting groter zijn.

4 Nautische belangen

4.1 Context

Bij overweging van waterkrachtcentrales op rivieren dient rekening gehouden te worden met het borgen van een veilige en vlotte afwikkeling van het scheepvaartverkeer. Daar er om bekende redenen weinig waterkrachtcentrales in Nederland zijn, is de relatie met scheepvaartverkeer niet eenduidig vastgelegd en moet op basis van praktische richtlijnen tot een raamwerk gekomen worden waarbinnen het belang van scheepvaart geborgd wordt en waterkracht geacommodeerd kan worden.

Gezien de verwachte kleinschaligheid van waterkracht in Nederland lijkt dit wel mogelijk. Aanvullend dient tenminste rekening gehouden te worden met de verschillen tussen recreatievaart en beroepsvaart en de verschillende locaties waar waterkracht een relevant aspect kan zijn. Verwezen wordt naar de Richtlijn Vaarwegen⁷, waar voorzieningen rond bruggen, sluizen en dergelijke zijn vermeld voor een veilige en vlotte verkeersafwikkeling waarbij onderscheid gemaakt wordt naar recreatievaart en beroepsvaart. Hier worden op hoofdlijnen aandachtspunten en bijzonderheden gegeven van gevallen waar aanvullend rekening mee gehouden moet worden bij overwegen van waterkrachttoepassingen.

4.2 Hoofdrivieren

Alle hoofdrivieren hebben een nautische functie. De Waal is de drukst bevaren rivier van Europa, maar ook op de Maas en andere Rijntakken is sprake van een groot nautisch belang. Voor wat betreft energieopwekking wordt vooral gekeken naar het op de bodem plaatsen van turbines, in kribben plaatsen van turbines en tot slot het aan bruggen koppelen van turbines. De Benedenrijn en Maas zijn gestuwd: waterkracht bij sluizen en stuwen in relatie tot waterkracht worden apart beschreven.

4.2.1 Kribben

Kribben hebben tot doel om de vaarweg op diepte te houden. Voor installatie van turbines bij kribben moet derhalve rekening gehouden worden met het feit dat een turbine geen gevolgen mag hebben voor de bodemligging. Vooral op de Waal is de vaardiepte kritiek en kan dit een beperkende factor hebben. Kribben worden met enige regelmaat aangevaren. Gegeven de constructie is daarbij schade aan krib en schip doorgaans beperkt. Vaste constructies of uit de krib stekende constructies kan resulteren in een ander schadebeeld met voor zowel het schip als de turbine / krib kostbaar herstel. Het lijkt derhalve wenselijk eventuele opwekking van energie achter de normaallijn te plaatsen, alhoewel dat voor de vermogens minder ideaal is. Lek slaande schepen zijn echter een risico voor veilige en vlotte verkeersafwikkeling.

Zolang de turbines binnen de geometrie van de kribben geplaatst worden lijkt het risico voor wat betreft aanvaren acceptabel. Opgemerkt zij dat recreatie van zwemmers, badgasten en vissers in kribvakken aandacht verdienen. Bij afvoeren boven 2.200 m³/s staan kribben doorgaans onder water en bestaat de mogelijkheid dat recreatievaart door het kribvak vaart. Om de functie van waterkracht te verenigen met de vaarwegfunctie is bijzondere aandacht nodig alsmede draagvlak van een veelheid aan stakeholders.

4.2.2 Bodem

Plaatsen van harde objecten op de bodem is niet wenselijk omdat ze daarbij in de vaarweg staan ten koste van vaardiepte. Hierdoor ontstaat het risico van aanvaring, zeker waar de bodemdiepte kritiek is. De objecten zijn niet te vermijden en onzichtbaar. Plaatsing op de bodem lijkt derhalve vanuit nautisch / verkeerskundig oogpunt niet mogelijk. Er lijken in eerste instantie geen plekken te zijn waar de vaardiepte

⁷ <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/vaarwegen.aspx>

dusdanig is dat dit risico niet zou bestaan. Naast aanvaring van de objecten is koppeling naar het elektriciteitsnetwerk en onderhoud een risico omdat het scheepvaartverkeer niet stilgelegd kan worden. Dit deel lijkt onverenigbaar met de vaarwegfunctie. Stakeholder Schuttevaer (behalve de rivierbeheerder zelf) zal hier weinig draagvlak voor hebben.

4.2.3 Bruggen

Koppelen van turbines aan bestaande bruggen is mogelijk, mits buiten het vaarwegprofiel. Gedacht kan worden aan pijlers die doorgaans door middel van betonning duidelijk zijn aangegeven en waar de kans op aanvaring klein is. Desalniettemin moet rekening gehouden worden met recreatievaart die ook buiten de betonning van de vaarweg kan varen en die daardoor mogelijk in aanvaring kunnen komen met de turbines. Dit lijkt verenigbaar met de vaarwegfunctie mits goed doordacht.

4.2.4 Sluizen en stuwen

Sluizen en stuwen zijn bijzondere constructies in vaarwegen. Voor veilige en vlotte verkeersafwikkeling zijn voorzieningen op en rond de constructies aangebracht. In het geval van waterkrachtcentrales zullen deze in de meeste gevallen achter de contouren van deze voorzieningen liggen waardoor waarschijnlijk kan worden volstaan met bescherming van in- en uitlaatwerken en het beperken van de uitstroomsnelheid (voorkomen hinderlijke dwarsstroom). Dit lijkt veelal oplosbaar voor zowel beroeps- als recreatievaart. Waterkracht bij sluizen en stuwen is daarmee verenigbaar met de vaarwegfunctie.

4.3 Overige rivieren en watergangen

Watergangen worden mogelijk gebruikt door kanovaarders en recreatievaart. Waar sprake is van bruggen, sluizen en stuwen geldt in principe hetzelfde als genoemd onder hoofdrijen hierboven en is energiewinning in principe verenigbaar met het gebruik als vaarweg. Met dien verstande dat het aandeel beroepsvaart doorgaans kleiner zal zijn en de recreatievaart juist meer. Recreatievaarders vertonen doorgaans minder professioneel vaargedrag wat extra aandacht vergt voor veiligheid. Ook is recreatievaart gevoeliger voor hinderlijke dwarsstroming wat meer aandacht vergt voor in- en uitlaatwerken. Veiligheidsvoorzieningen en aanpassingen hebben mogelijk een grotere impact op de op te wekken hoeveelheid energie.