

Bachelor-eindopdracht

Potentie van de IJssel in Overijssel - Energie uit stromend water

Onderzoek naar geschikte locaties voor het opwekken van energie uit de stroming in rivier de IJssel in Overijssel

Dieuwert Blomjous

s1505505

14-7-2017

Opdrachtperiode: 17 april t/m 14 juli

UNIVERSITEIT TWENTE.



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu



COLOFON

AUTEUR

Dieuwert Blomjous

BSc-student Civiele Techniek | Universiteit Twente

M 06 53181092 | e-mail d.e.c.blomjous@student.utwente.nl

EXTERNE BEGELEIDING

Ir. Marja Hamilton-Huisman (dagelijkse begeleider)

Projectleider Self Supporting Rivier Systeem 2021

Rijkswaterstaat Oost Nederland | Bezoek adres: Eusebiusbuitensingel 66, 6828 HZ Arnhem

Postadres: Postbus 25 | 6200 MA Maastricht

M 06 53 33 17 15 | e-mail marja.hamilton@rws.nl

Dipl. Ing. Astrid Pap MBA (opdrachtgever)

Beleidsontwikkelaar Programma Nieuwe Energie & projectleider Bio-energie

Team Nieuwe Energie | Provincie Overijssel | Postbus 10078

8000 GB Zwolle | T 038 499 76 53 | e-mail a.pap-schwieger@overijssel.nl

BEGELEIDING UNIVERSITEIT TWENTE

Dr. ir. Rob Hagmeijer

Associate Professor

University of Twente | Faculty of Engineering Technology | Engineering Fluid Dynamics

PO Box 217 | 7500 AE Enschede | Kamer Horstring N238

T +31 53 489 5605 (direct) +31 53 489 2717 (secretary) | e-mail r.hagmeijer@utwente.nl

Dr. ir. Pieter Roos

Associate Professor

University of Twente | Faculty of Engineering Technology | Water Engineering and Management PO Box 217

7500 AE Enschede | Kamer Horst W215

T +31 53 489 5608 | fax +31 53 489 5377 | e-mail p.c.roos@utwente.nl

Ir. Koen R.G. Reef

PhD candidate

University of Twente | Faculty of Engineering Technology | Water Engineering and Management PO Box 217

7500 AE Enschede | Kamer Horst W211

T +31 53 489 5325 | fax +31 53 489 5377 | e-mail k.r.g.reef@utwente.nl

VOORWOORD

Dit document dat u voor u heeft liggen is 'Potentie van de IJssel in Overijssel - Energie uit stromend water'. Het is een onderzoek naar de mogelijkheid om energie op te wekken uit de stroming van het water in de IJssel in Overijssel. Dit rapport is onderdeel van de afrondende fase van de bachelor; de bachelor-eindopdracht. Van april tot juli ben ik bezig geweest met deze opdracht.

Deze opdracht is tot stand gekomen door de vraag van Provincie Overijssel naar een onderzoek naar 'blauwe energie' in de IJssel aan Universiteit Twente. Een gedeelte van deze vraag zal beantwoord worden in dit rapport. Gedurende de periode dat ik aan de slag ben geweest aan de opdracht ben ik begeleid door Rijkswaterstaat en heb ik gewerkt in het kantoor van Rijkswaterstaat in Arnhem.

Marja Hamilton-Huisman was mijn begeleider bij Rijkswaterstaat. Bij haar kon ik terecht voor mijn vragen en voor advies. Ook mijn begeleiders vanuit Universiteit Twente, Pieter Roos, Koen Reef en Rob Hagmeijer, hielpen mij met name door de uitgebreide feedbacksessies. Bij Rijkswaterstaat waren ook nog veel collega's die me hielpen bij het tot stand komen van het onderzoek. In het bijzonder Arjan Sieben en Daniël van Putten die me hielpen met de beantwoording van vragen en het verkrijgen van data. Ook Michel Heereveld van Royal HaskoningDHV en Menno Broers en Ruud Caljouw wil ik bedanken voor het tijd vrij maken om mijn vragen te beantwoorden. Tot slot wil ik familie en vrienden bedanken voor de motiverende woorden en feedback.

Dieuwert Blomjous

Arnhem, 14 juli 2017

SAMENVATTING

Sinds het klimaatakkoord van Parijs is het voor de overheid, provincies en gemeenten steeds belangrijker om gebruik te maken van duurzame energiebronnen. In november 2016 is de motie van de heer Kerkhof aangenomen met de vraag of door Universiteit Twente onderzocht kan worden of in rivier de IJssel in Overijssel potentie heeft voor het opwekken van energie uit water.

Het doel van deze studie is om naar aanleiding van de motie van Kerkhof (2016) onderzoek te doen naar de potentie van energie uit waterkracht in de IJssel in Overijssel. Daarvoor is de volgende vraag opgesteld: *Wat is de potentie voor het opwekken van energie uit de stroming van rivier de IJssel in Overijssel?* Gezamenlijk geven het potentieel aanbod van de omgeving, het technisch, economisch en ecologisch potentieel antwoord op de vraag wat het potentieel van het studiegebied is.

In de IJssel in Overijssel is onderzocht bij bruggen en kribben of het mogelijk is om energie op te wekken uit de stroming van het water. Er is onderzocht welke mogelijke technieken bestaan en welke eigenschappen deze technieken hebben. Met behulp van een Multi Criteria Analyse zijn de locaties geselecteerd en gewaardeerd. Vervolgens is voor twee locaties verder onderzoek gedaan naar de technische, economische en ecologische haalbaarheid. Voor de technische haalbaarheid is de stroomsnelheid onderzocht, voor de economische haalbaarheid is de energieopbrengst per jaar bepaald en voor de ecologische haalbaarheid zijn de effecten van een machine op de ecologie onderzocht. Tot slot zijn de resultaten voor de twee locaties gecombineerd met de kansrijke locaties, dit heeft geleid tot een potentiekaart voor Provincie Overijssel. Daarin worden inschattingen gegeven per locatie over hoeveel energie opgewekt zou kunnen worden in een jaar.

De kriblocaties bleken in het onderzoek kansrijker dan bruglocaties omdat scheepvaart minder hinder ondervindt wanneer op deze locatie een machine wordt geplaatst. Er wordt verwacht dat de kansrijke kriblocaties tussen de 1 en 2,8 MWh per jaar aan energie opbrengen. Deze energieopbrengst is minder dan wat een gemiddeld huishouden in Overijssel verbruikt (3,1 MWh). De 41 kansrijke locaties in de IJssel in Overijssel brengen gezamenlijk ongeveer 63,1 MWh per jaar op. Deze studie is puur theoretisch uitgevoerd omdat momenteel er nog weinig bekend is over hoe machines presteren op een kriblocatie. De belangrijkste aanbeveling is daarom ook om verder onderzoek te doen naar het opwekken van energie op kriblocaties in de praktijk.

1	Inleiding.....	6
2	Onderzoeksmethode.....	10
3	Literatuuronderzoek.....	13
4	Fase I Specificatie: Mogelijke locaties	23
5	Fase II Evaluatie: Kansrijke locaties	26
6	Fase III Uitweiding: Twee locaties	31
7	Fase IV: Potentiekaart Overijssel.....	42
8	Discussie	44
9	Conclusie en aanbevelingen	46
10	Bibliografie	48
11	Bijlage I Literatuur	51
12	Bijlage II Evaluatie.....	58
13	Bijlage III Uitweiding.....	60
14	Bijlage IV: Potentiekaarten.....	86

1 INLEIDING

Duurzame energie staat hoog op de politieke agenda sinds het Akkoord van Parijs. Ondanks de urgentie om de klimaatopwarming te beperken, wordt in Nederland minder dan zes procent van de totale energieconsumptie opgewekt door duurzame energie. De meest gebruikte vormen van duurzame energie zijn biomassa, wind, geothermische en zonne-energie. (CBS, 2016) Provincie Overijssel heeft zich ten doel gesteld in 2023 twintig procent 'Nieuwe Energie' te gebruiken (Provincie Overijssel, 2017). Onder Nieuwe Energie wordt energie verstaan dat niet afkomstig is van fossiele brandstoffen.

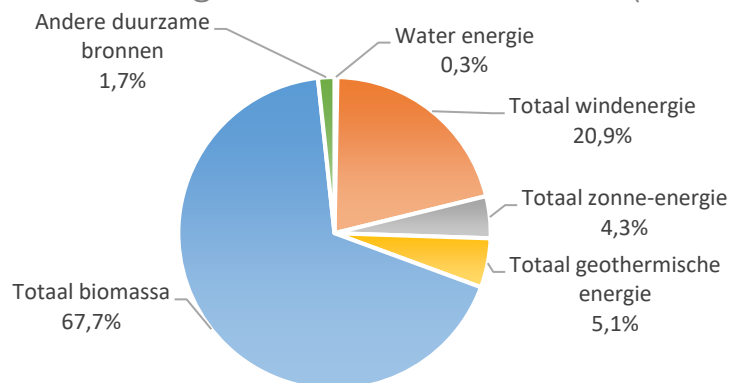
Het opwekken van energie uit water is niet een voor de hand liggende methode in Nederland, slechts 0,3 procent van opgewekte duurzame energie is namelijk afkomstig uit water (355 TJ) (CBS, 2016), zie Figuur 1. In november 2016 diende Fred Kerkhof een motie in bij Gedeputeerde Staten van Overijssel over water als bron van duurzame energie (Kerkhof, 2016). Kerkhof stelt dat de rivier continu stroomt in tegenstelling tot de aanwezigheid van zon en wind. Hij verzocht te onderzoeken of energie uit de IJssel, een snelstromende rivier, potentie heeft in Overijssel. Deze motie is aangenomen.

De paragrafen in dit hoofdstuk bevatten de probleemomschrijving, leeswijzer, doel en onderzoeksvragen en methodologie.

1.1 PROBLEEMOMSCHRIJVING

De opdracht is voor Universiteit Twente om de mogelijkheden te onderzoeken voor het opwekken van energie uit water in rivier de IJssel in Provincie Overijssel. In Gelderland is eerder een studie uitgevoerd naar de potentie van energie uit waterkracht (Noortgaete, 2016a). Dit onderzoek van Royal HaskoningDHV maakt deel uit van het Gelders Energieakkoord. De studie concludeert dat er mogelijkheden zijn om energie op te wekken uit water. Deze studie vormt het uitgangspunt voor dit rapport, het hierbij horende onderzoek wordt begeleid door Rijkswaterstaat.

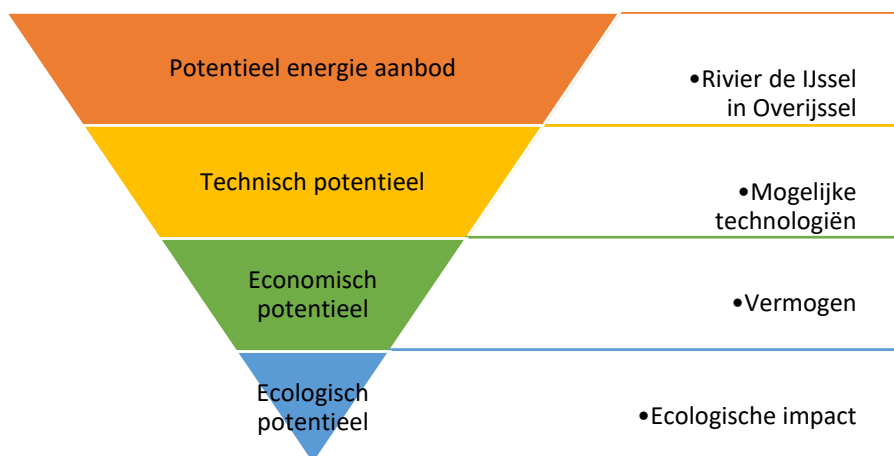
Duurzame energiebronnen in Nederland (2015)



Figuur 1 Bronnen duurzame energie Nederland in 2015 (CBS, 2016)

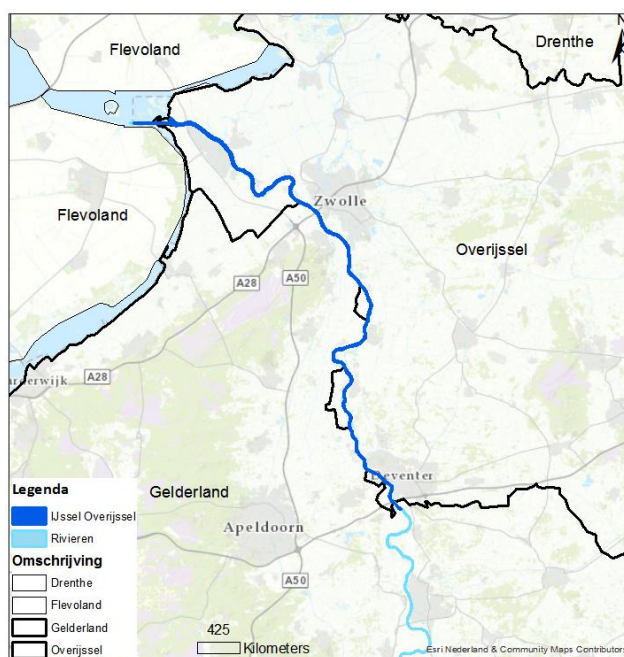
Om de potentie van energie uit water te bepalen, is alleen het rendement doorrekenen van een waterkrachtcentrale niet voldoende, zie Figuur 2 (Lako, 2012). Het bepalen van de potentie van Overijssel start met het onderzoeken van de potentie van het onderzoeksgebied, zie Figuur 3. Dat houdt in dat onderzocht wordt welke gebieden potentie bieden (potentieel aanbod). Wanneer technieken zijn gekozen (technisch potentieel) voor locaties is het mogelijk het economisch potentieel te bepalen, in dit onderzoek wordt het economisch potentieel uitgedrukt in energie per jaar en vergeleken met de energieconsumptie van huishoudens.

Waterkrachtcentrales kunnen een grote impact uitoefenen op de omgeving, (Jong, 2009). Omwille van deze reden is het belangrijk de ecologische consequenties van de machines te onderzoeken. Met inachtneming van aanbod, technisch, economisch en ecologisch potentieel is het mogelijk het potentieel te bepalen voor het onderzoeksgebied.



Figuur 2 Definities en relaties van potentie duurzame energie

Het onderzoeksgebied is rivier de IJssel binnen de provinciegrenzen van Overijssel, zie Figuur 3. Dit rapport doet een aanbeveling over de potentie van energie uit de stroming van water in de IJssel voor Provincie Overijssel. Dit resultaat zal gebaseerd zijn op het technisch, economisch en ecologisch potentieel.



Figuur 3 Onderzoeksgebied: De IJssel (donkerblauw) in Overijssel

1.2 LEESWIJZER

Het doel van het onderzoek, de onderzoeksvragen en de methodologie worden toegelicht in de opeenvolgende paragrafen. De aanpak van het onderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 2. Na de methode volgt het literatuuronderzoek in hoofdstuk 3. De kern van het verslag wordt beschreven in de hoofdstukken 4, 5, 6 en 7 respectievelijk Fase I Specificatie, II Evaluatie, III Uitweiding en IV Potentiekaart. Na de kern van het verslag is er een discussie van de resultaten in hoofdstuk 8. De conclusie die antwoord geeft op de onderzoeksvragen wordt beschreven in hoofdstuk 9. Tevens worden in dit hoofdstuk aanbevelingen gedaan.

1.3 DOEL EN ONDERZOEKSVRAGEN

Het doel van deze studie is om op basis van de vragen in de motie van Kerkhof (2016) onderzoek te doen naar de potentie van energie uit waterkracht in de IJssel in Overijssel. Bij de bepaling van het potentieel wordt rekening gehouden met het technisch, economisch en ecologisch potentieel, zie Figuur 2. Dit doel leidt tot de hoofdvraag en deelvragen.

Hoofdvraag:

Wat is de potentie voor het opwekken van energie uit de stroming van rivier de IJssel in Overijssel?

De vier deelvragen zijn gebaseerd op Figuur 2 en beantwoorden gezamenlijk de hoofdvraag.

1. Wat is de geschiktheid van locaties in de IJssel voor het opwekken van stromingsenergie?



De potentie voor de rivier de IJssel in Overijssel is de som van de potentie van verschillende locaties. Voordat deze potentie wordt bepaald, worden eerst de mogelijke technieken en de omgevingseigenschappen in kaart gebracht.

- Welke criteria bepalen de geschiktheid van een locatie?
- Wat is de impact het criterium op de geschiktheid van een locatie?
- Welke mogelijke technieken bestaan voor het opwekken van energie uit water?
- Wat zijn de eigenschappen van het studiegebied?

2. Wat is de technische haalbaarheid voor twee locaties?



Wanneer de potentie van de mogelijke locaties bekend is, worden twee locaties verder uitgediept. Bij deze locaties worden de technische effecten onderzocht.

- Welke technische methoden zijn geschikt voor de gekozen locaties?
- Wat zijn de afmetingen van de gekozen technologie en de beschikbare ruimte op de locatie voor het plaatsen van een machine?

3. Wat is de economische haalbaarheid voor dezelfde twee locaties?



Deze deelvraag is ook een uitweiding van dezelfde locaties als bij deelvraag 2. Nu wordt het economisch potentieel bepaald voor de locaties.

- Wat is de duurlijn van het vermogen voor een jaar?
- Wat is de potentie van de locatie in vergelijking met de jaarlijkse energieconsumptie van Overijssel (in MWh)?

4. Wat is de ecologische haalbaarheid voor dezelfde twee locaties?



Deze deelvraag is ook een uitweiding van dezelfde locaties als bij deelvraag 2 en 3. Nu worden de ecologische effecten onderzocht.

- Wat is het ecologisch effect van de machine?
- Hoe kan op het ecologisch effect worden ingespeeld?

1.4 METHODOLOGIE

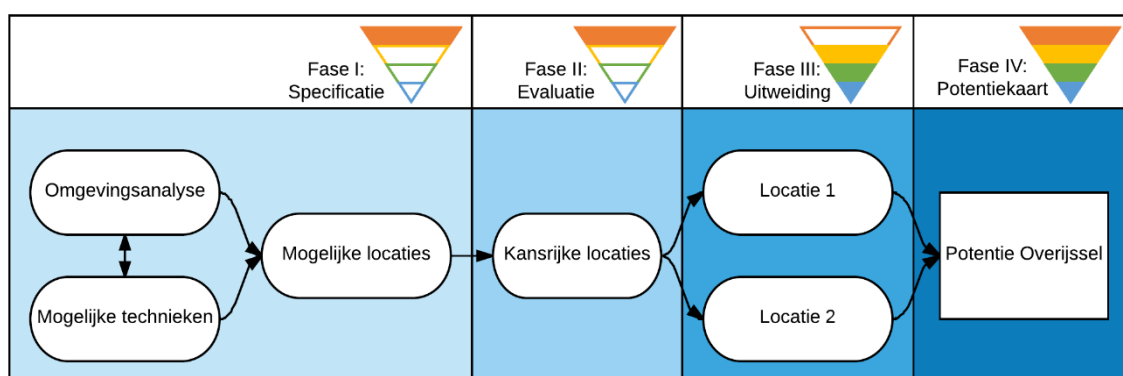
De locaties worden gezocht met behulp van data in het programma ArcGis (software dat gebruikt wordt voor het visualiseren en analyseren van geografische data). De data is afkomstig van Rijkswaterstaat (RWS) en een WAQUA-model van RWS. Een Multi Criteria Analyse (MCA) zal worden gebruikt om locaties te selecteren en waarderen. Vervolgens worden twee locaties verder uitgewerkt in het technisch, economisch en ecologisch potentieel. Voor het technisch potentieel worden een SOBEK-model en data van RWS gebruikt om de stroomsnelheden in een jaar te bepalen. Kaarten in ArcGIS worden gebruikt om de maximale afmetingen te bepalen van de installatie. Met behulp van deze gegevens wordt het economisch potentieel bepaald door de stroomsnelheden om te rekenen naar het jaarlijks vermogen. De ecologische potentie wordt bepaald door een literatuuronderzoek.

2 ONDERZOEKSMETHODE

Dit hoofdstuk beschrijft de methode die gebruikt wordt in dit rapport om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Figuur 4 geeft een overzicht van de fasen die het onderzoek doorloopt. De aanpak is gebaseerd op Figuur 2.

2.1 AANPAK

Dit rapport is opgedeeld in drie fasen, die leiden tot beantwoording van de onderzoeksvraag. Deze fasen zijn in Figuur 4 geschematiseerd. Eerst wordt een korte beschrijving gegeven over de inhoud van de fasen, vervolgens worden ze gedetailleerd toegelicht om de aanpak van elke fase te beschrijven. Tevens vormt literatuuronderzoek de basis voor de resultaten van dit rapport.



Figuur 4 Overzicht aanpak Overijssel

In Fase I Specificatie wordt onderzoek gedaan naar de eigenschappen van het studiegebied (omgevingsanalyse) en naar de mogelijke technieken voor het opwekken van energie uit water. Op basis van dit onderzoek worden locaties aangewezen in het studiegebied waar een mogelijkheid zou kunnen zijn om energie op te wekken.

In Fase I vond de selectie plaats van mogelijk locaties. Vervolgens worden in Fase II Evaluatie met behulp van een MCA de locaties gewaardeerd. Op deze wijze kunnen de meest kansrijke locaties worden gefilterd.

In Fase III Uitweiding worden twee kansrijke locaties verder uitgewerkt, hierbij wordt ingegaan op het technisch, economisch en ecologisch potentieel. Deze fase heeft als resultaat inschattingen voor de jaarlijkse energie opbrengst voor de uitgewerkte locaties. Aan de hand van deze resultaten wordt de energieopbrengst voor de andere kansrijke locaties bepaald.

Fase IV: Potentiekaart geeft als resultaat de potentie weer voor het opwekken van energie uit de IJssel van Provincie Overijssel.

2.2 FASE I: SPECIFICATIE

De omgevingsanalyse beschrijft de eigenschappen van het studiegebied die invloed hebben op het potentieel aanbod van de omgeving. De informatie voor de omgevingsanalyse wordt gebaseerd op het literatuuronderzoek en de data van Rijkswaterstaat. De technieken uit het onderzoek 'Waterkracht in provincie Gelderland' (Noortgaete, 2016a) vormen het uitgangspunt. De specificaties die vereist zijn voor de mogelijke technieken zijn mede van belang voor de selectie van mogelijke locaties. Door de vereiste specificaties is niet elke techniek overal toepasbaar.

Op basis van de omgevingsanalyse en mogelijke technieken worden eisen (restricties) opgesteld, waardoor de mogelijke locaties gefilterd kunnen worden. De mogelijke locaties worden gefilterd met behulp van het

programma ArcGis. Deze fase resulteert in een overzicht van alle mogelijke locaties die onderzocht kunnen worden in fase II.

2.3 FASE II:EVALUATIE

Op basis van de methoden van (Sharifi, 2007) en (Malczewski, 1999) zijn ruimtelijke MCA's uitgevoerd. De mogelijke locaties vormen de alternatieven die onderzocht worden in de MCA. Deze alternatieven zijn '*value-focussed*' onderzocht, dat houdt in dat de locaties zijn gevonden op basis van de eisen (Zucca et. al., 2007). Deze locaties krijgen in Fase II een waarde toegekend, waardoor ze nu '*alternative-focussed*' geanalyseerd worden.

De criteria en eisen worden opgesteld op basis van de eigenschappen van de mogelijke locaties. Criteria zijn maatstaven, er wordt een beoordeling gegeven. De eisen sluiten locaties wel of niet uit. De alternatieven zijn gebieden (geografische data) op de kaart in het programma ArcGis. Het programma berekent voor de alternatieven de ruimtelijke uitkomsten voor de criteria. Dat betekent dat de uitkomst voor een criterium varieert binnen het alternatief. Figuur 5 geeft een overzicht van de alternatieven en resultaten van Fase I en II.

Fase	Alternatieven	Eisen en/of criteria	Resultaat
I	-	Eisen	Mogelijke locaties
II	Mogelijke locaties	Eisen en criteria	Kansrijke locaties

Figuur 5 Onderscheid in fasen

Voor de opgestelde criteria zijn indicatoren aangewezen, een voorbeeld van een indicator is afstand (m). De uitkomsten voor de indicatoren worden met elkaar vergeleken. Om de vergelijking zo objectief mogelijk te maken zijn minimale en maximale uitkomsten gebaseerd op histogrammen. De uitzonderlijke waarden kunnen op deze wijze gefilterd worden. Een dergelijke waarde heeft daardoor geen invloed op de andere uitkomsten.

Om het mogelijk te maken de criteria te vergelijken worden scores toegekend aan de uitkomsten. Deze waarden zijn op een schaal van 0 (minst geschikt) tot 1 (meest geschikt). De gekozen minimum uitkomst krijgt de waarde 0, de gekozen maximum uitkomst krijgt de waarde 1. De tussenin gelegen uitkomsten worden op een gestandaardiseerde wijze waarden toegekend. Deze standaardisering is op basis van het verband tussen het criterium en de potentie van een locatie.

De volgende stap is een gewogen somming. Aan de criteria worden gewichten toegekend, deze gewichten bepalen in hoeverre het criterium invloed uitoefent op de geschiktheid van een locatie. De som van de gewichten moet in het totaal 1 (of 100%) zijn, op deze wijze wordt de geschiktheid ook uitgedrukt op een schaal van 0 tot 1. Het resultaat van deze fase is een verzameling van kansrijke locaties. Samen met Fase I geeft dit het antwoord op deelvraag 1: "Wat is de geschiktheid van locaties in de IJssel voor het opwekken van stromingsenergie?".

2.4 FASE III: UITWEIDING

In deze fase wordt ingezoomd op twee locaties. Deze locaties worden zo gekozen dat ze representatief zijn voor de kansrijke locaties. Op deze wijze kan de potentie voor provincie Overijssel bepaald worden. Per locatie wordt het technische, economische en ecologische haalbaarheid bepaald.

2.4.1 TECHNISCHE HAALBAARHEID

De afmetingen van de machine worden bepaald door de beschikbare ruimte (breedte en hoogte) te bepalen in ArcGIS. Op deze wijze kunnen diverse technieken worden uitgekozen en worden afgestreept die in de specificatie zijn uitgezocht.

Het doel is om uit te zoeken hoeveel uren per jaar een bepaalde stroomsnelheid wordt behaald. Om dit doel te bereiken wordt het aantal dagen bepaald dat de stroomsnelheid wordt behaald. Er is echter alleen data

beschikbaar over het aantal dagen dat een debiet bij Lobith wordt onderschreden. Ook is er data van een SOBEK-model met stroomsnelheden en waterstanden per debiet bij Lobith. Het WAQUA model geeft stroomsnelheden op de locatie.

Eerst worden de stroomsnelheden op de locatie per debiet bij Lobith bepaald. Het WAQUA-model geeft de snelheden op locatie van twee debieten bij Lobith (2000 en 4000 m³/s). Het SOBEK-model geeft de breedtegemiddelde stroomsnelheden. De stroomsnelheden op locatie worden bepaald door de stroomsnelheden te inter- en extrapoleren aan de hand van de resultaten van het SOBEK-model.

Vervolgens worden de onderschrijdingstijden van de debieten bepaald waarvoor de stroomsnelheden bekend zijn. Deze onderschrijdingstijden kunnen zodoende gekoppeld worden aan de stroomsnelheden. Op deze manier kan worden bekeken of de stroomsnelheden voldoen aan de technische vereisten.

Het hoofdstuk technische haalbaarheid geeft een antwoord op de deelvraag: *“Wat is de technische haalbaarheid voor twee locaties?”*.

2.4.2 ECONOMISCHE HAALBAARHEID

Door de opgestelde duurlijn om te zetten naar het aantal uren dat de machine werkzaam is worden het aantal draaiuren bepaald. Met deze draaiuren, stroomsnelheden en de eigenschappen van de machine is het mogelijk het jaarlijks op te brengen energie te bepalen. Deze methode wordt gebaseerd op de haalbaarheidsstudie in Bronckhorst (Noortgaete, 2016b). Voor de verschillende typen machines worden de energieopbrengsten bepaald. Een gevoeligheidsanalyse zal weergeven hoe gevoelig het resultaat is voor de gemaakte keuzes. De energieopbrengst wordt voor één locatie berekend voor variërende stroomsnelheden en afmetingen van de machines. De grafiek geeft inzicht in de invloed van de parameters op het eindresultaat.

Het hoofdstuk economische haalbaarheid geeft antwoord op de deelvraag: *“Wat is de economische haalbaarheid voor dezelfde twee locaties?”*

2.4.3 ECOLOGISCHE HAALBAARHEID

Het ecologisch potentieel wordt uitgewerkt door middel van een literatuuronderzoek. In dit onderzoek wordt gekeken naar de effecten van de machines op de vispopulatie en op andere diersoorten om zodoende inzicht te verschaffen van de invloed die de machines hebben op de fauna in de rivier. Daarnaast zal worden gekeken naar wat bekend is over de effecten van een machine op de rivierbodem bij de locatie.

Het hoofdstuk economische haalbaarheid geeft antwoord op de deelvraag: *“Wat is de ecologische haalbaarheid voor dezelfde twee locaties?”*

2.5 FASE IV: POTENTIEKAART

Het technisch, economisch en ecologisch potentieel voor de twee locaties wordt gebruikt om een inschatting te maken voor het potentieel voor de kansrijke locaties in het studiegebied. De locaties zijn in klassen verdeeld, met behulp van deze klassenverdeling wordt een uitspraak gedaan over de energieopbrengst per kansrijke locatie. De energieopbrengst per locatie en de som van de opbrengsten wordt vergeleken met de energieconsumptie van een gemiddeld huishouden in Overijssel. De kansrijke locaties worden weergegeven in een kaart, daarbij wordt per locatie de verwachte energieopbrengst aangegeven.

De potentiekaart geeft het antwoord op de hoofdvraag: *“Wat is de potentie voor het opwekken van energie uit de stroming van rivier de IJssel in Overijssel?”*

3 LITERATUURONDERZOEK

Het literatuuronderzoek beschrijft de theorie die benodigd is bij het onderzoek naar potentiële locaties.

3.1 OPWEKKINGSMETHODEN

De studie 'Waterkracht provincie Gelderland' (Noortgaete, Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland, 2016a) beschrijft vijf methoden voor het opwekken van energie uit water: 1) kinetische energie, 2) potentiële energie, 3) golfslagenergie, 4) osmose en 5) thermische energie. Het onderzoek in Gelderland richt zich op locaties met potentie voor potentiële en kinetische energie vanwege de eigenschappen van de omgeving.

1) KINETISCHE ENERGIE

De kinetische energie in het water is de energie die het water bevat door de massa en snelheid. Deze energie kan worden omgezet naar elektrische energie met behulp van een machine die gaat draaien of trillen door de invloed van de massa en snelheid van het water (Noortgaete, 2016a). De machines worden verder toegelicht in paragraaf 3.2.2. Paragraaf 3.3 geeft de formule voor het vermogen en geeft meer informatie over kinetische energie in het water.

2) POTENTIËLE ENERGIE

De potentiële energie in het water kan worden omgezet naar elektrische energie bij een locatie met verval, zoals een stuw of een dam. De energie kan worden opgewekt, omdat bij een hoogteverschil het water 'valt' door invloed van de gravitatieversnelling. Naarmate de massa en het hoogteverschil toenemen, wordt de potentiële energie in het water groter. Grote potentie hebben landen als IJsland en Bhutaan (Hoes, Meijer, van der Ent, & van de Giesen, 2017). In rivier de IJssel zijn echter geen stuwen of sluizen. Het opwekken van potentiële energie is daardoor uitgesloten binnen dit onderzoek.

$$E_{pot} = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.1)$$

E_{pot} = potentiële energie (J/m³)
 ρ = dichtheid (kg/m³)
 g = gravitatieversnelling (9,82 m/s²)
 Δh = hoogteverschil (m)

3) GOLFSLAGENERGIE

Golfslagenergie kan ook worden omgezet naar elektrische energie. Deze energie zit bijvoorbeeld in het water bij de golven die ontstaan bij getijden. Deze methode wordt echter uitgesloten voor Overijssel omdat zelfs met de huidige technologieën het lastig is energie op te wekken uit golven in de Noordzee (Sørensen & Fernández Chozas, 2010).

4) ENERGIE UIT OSMOSE

Het water bevat ook energie door osmose. Elektrische energie kan worden opgewekt door het verschil in druk dat ontstaat bij een locatie waar zoet en zout water gescheiden wordt van elkaar door een membraan. Deze energie wordt veelal opgewekt bij de kustlijn (Jong, 2009). De IJssel is een zoetwater rivier die uitmondt op een zoetwater meer, het Ketelmeer. Osmose is daardoor uitgesloten in dit onderzoek.

5) THERMISCHE ENERGIE

Thermische energie bevat het water door verschillen in temperatuur. Deze verschillen in temperatuur ontstaan bijvoorbeeld bij grote diepten. (IF Technology, 2016) heeft een potentiëkaart gemaakt voor Rijkswateren en kunstwerken voor het opwekken van energie uit warmte- en koude. Deze kaart heeft geen potentiële locaties direct in de IJssel, daarom wordt ook deze methode uitgesloten voor het opwekken van energie.

3.2 STUDIE: ONDERZOEK POTENTIE ENERGIE UIT WATERKRACHT PROVINCIE GELDERLAND

Het rapport 'Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland' (Noortgaete, 2016a) onderzoekt de potentie van locaties, analyseert toepasbare technologieën voor het opwekken van energie en doet haalbaarheidsstudies voor enkele locaties. Het overzicht van de aanpak van de studie in Gelderland staat in Figuur 6.



Figuur 6 Aanpak Gelderland

3.2.1 MOGELIJKHEDEN OPWEKKEN ENERGIE

De studie start met een beschrijving van de mogelijkheden voor het opwekken van energie uit het water. De studie gaat in op de mogelijkheden voor het opwekken van elektrische energie door de kinetische en potentiële energie in het water. De andere methoden die worden beschreven in paragraaf 3.1 vallen om soortgelijke redenen af in de studie van Gelderland. Daarnaast worden omgevingseigenschappen beschreven die de kaders vormen voor het techniekenoverzicht. Voor kinetische energie zijn de kaders:

- Watersnelheid: groter dan 1 m/s voor jaarlijks minimaal 3000 draaiuren
- Turbine diameter: kleiner dan 5 m

3.2.2 TECHNIEKEN

De studie beschrijft de mogelijke technieken voor het studiegebied in Gelderland. In Gelderland zijn er locaties waar potentiële energie (stuwlocaties) en kinetische energie (vrije stromingslocaties) opgewekt kan worden. Technieken die geschikt zijn voor de mogelijke locaties zijn beschreven en samengevat in een technologiematrix, zie Figuur 7. De volgende paragrafen gaan in op de karakteristieken die zijn samengevat in de matrix.

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	W2E	Verticale asturbine	10	-	-	>1	2	-	++	8	1 centrale

Figuur 7 Technologiemarket Gelderland (Noortgaete, 2016a)

ALGEMENE KARAKTERISTIEKEN

In paragraaf 3.1 is beschreven dat in Overijssel alleen onderzoek wordt gedaan naar locaties waar het mogelijk is vermogen op te wekken met kinetische energie. De bestaande technieken voor het opwekken van energie uit de stroming van water, maken gebruik van verschillende methoden. De technieken voor kinetische energie in het overzicht zijn in te delen in drie categorieën: verticale asturbine, horizontale asturbine en oscillator.

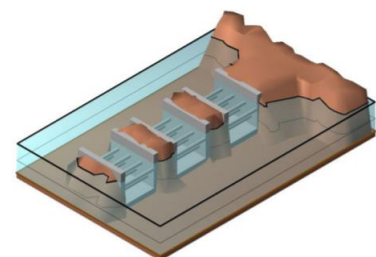
1) Verticale asturbine



2) Horizontale asturbine



3) Oscillator



Figuur 8 Energie opwekkingsmethoden

1) Een machine met een verticale as werkt vaak volgens het principe van Darrieus. De bladen van de machine, de rotorbladen, draaien om een verticale as door de snelheid en massa van het water. De machines zijn richtingsongevoelig, maar vanwege de ronddraaiende beweging is er altijd weerstand aanwezig. De rotorbladen draaien met de stroomrichting mee, maar de terugdraaiende beweging is tegen de stroomrichting in. De machines kunnen geplaatst worden op de bodem, vastgemaakt worden aan een kunstwerk of geplaatst worden in een drijvende constructie.

2) Machines met een horizontale as hebben een werking zoals de bekende windmolens. De rotorbladen van de machine draaien door de snelheid en massa van de waterstroming loodrecht op het oppervlak. De machines kunnen op de bodem worden geplaatst met behulp van een verticale paal of worden vastgemaakt aan een kunstwerk.

3) De oscillator wekt energie op uit trillingen. Achter de horizontale cilinders ontstaan wervelingen door stroming van het water. De horizontale cilinders gaan trillen in de verticale richting en door deze trillingen kan de machine energie opwekken.

TECHNISCHE KARAKTERISTIEKEN

De technische karakteristieken weergeven de randvoorwaarden voor de technieken wanneer deze ingezet kunnen worden. Afmetingen en minimale vereiste snelheid spelen een rol in de locatiekeuze en locatie geschiktheid. De minimale snelheid voor de technieken is 1 m/s.

FINANCIELE KARAKTERISTIEKEN

De CAPEX geeft de investeringskosten weer in €/kW, deze kosten zijn alleen voor de mechanische elementen. De operationele kosten (OPEX) van de techniek zijn locatieafhankelijk en zijn dus niet meegenomen in de CAPEX.

INSTITUTIONELE KARAKTERISTIEKEN

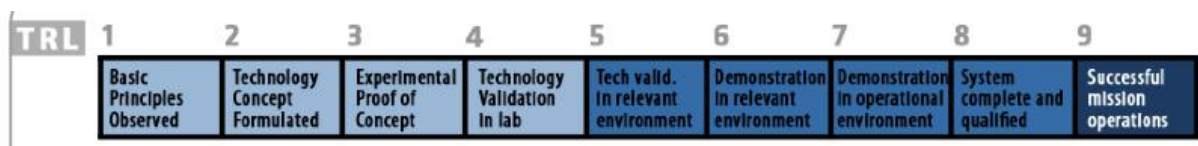
Visvriendelijkheid, TRL en Referentie zijn de drie categorieën die vallen onder de institutionele karakteristieken. Visvriendelijkheid is per techniek kwalitatief aangeduid met ++, + en -.

Aanvullende informatie:

Over het algemeen speelt vismigratie een belangrijke rol bij stuwen en sluizen omdat deze kunstwerken een barrière vormen voor de vissen. Het rapport beschrijft daarom ook combinatiemogelijkheden van het plaatsen van een machine met een oplossing voor vismigratie. De technieken bij kinetische energie scoren een + of een ++, omdat deze technieken ten opzichte van technieken bij vervallocaties lagere rotatiesnelheden hebben. Vissen hebben daardoor de mogelijkheid de rotorbladen of cilinders te ontwijken. De visvriendelijkheid van een machine wordt bepaald door een groep vissen door de machine te leiden en te bepalen hoeveel vissen deze tocht niet overleven (Vriese, 2015).

Referentie beschrijft de aantallen projecten die gebruik maken van de techniek. De technieken voor kinetische energie hebben enkele projecten gehad. Ze zijn dus minder ver door ontwikkeld dan de commerciële projecten voor potentiële energie.

De *Technology Readiness Level* (TRL) geeft aan in hoeverre de techniek is doorontwikkeld. Level 9 betekent dat de techniek succesvol is ontwikkeld en in gebruik is. Level 1 is in de startfase, de basisprincipes worden in deze fase onderzocht. Een korte omschrijving van de verschillende niveaus van technologierijpheid staat in Figuur 9.



Figuur 9 Technology Readiness Level (TRL)

Aanvullende informatie:

De huidige technieken voor het opwekken van elektriciteit uit kinetische energie zijn in ontwikkeling. Een aantal machines hebben de demonstratiefase achter de rug en hebben enkele projecten in het water geïnstalleerd. De machines die energie opwekken in de vrije stroming in de zee en getijden zijn over het algemeen al verder ontwikkeld dan machines in de rivier (Broers, 2017).

3.2.3 TECHNISCHE INOVATIES

Technische innovaties en slimme combinaties is een beschrijving van nieuwe technieken en het combineren van technieken om de financiële haalbaarheid van een investering te vergroten. Deze slimme combinaties zijn bijvoorbeeld bij stuwen en sluizen om energie van andere duurzame energiebronnen op te slaan door met deze energie water omhoog te pompen. Wanneer de energie benodigd is (bijvoorbeeld wanneer 's avonds de zon niet meer schijnt) kan deze weer opgewekt worden door de waterkrachtcentrale.

Bij kribben zijn er innovatieve projecten waarbij op de plaats van een gedeelte van een kribkop een installatie wordt geplaatst. Dit project kan bijvoorbeeld worden toegepast in combinatie met een project van kribverlagingen. Daarnaast is het een hypothese dat een installatie de stroming rondom de kribben vermindert, waardoor kribvlammen (diepten en ondiepten benedenstrooms een krib, veroorzaakt door de onstuimige stroming) kunnen worden voorkomen, zie paragraaf 3.4.1 voor meer informatie.

3.2.4 POTENTIEKAART

De locaties zijn aangewezen door Provincie Gelderland en de waterschappen Rijn & IJssel, Vallei & Veluwe en Rivierenland. Stuwlocaties zijn geselecteerd door stuwen te analyseren op frequenties van de afvoer met de beschikbare data. Locaties bij kribben, langsdammen of bruggen zijn niet in de potentiekaart opgenomen. Voor de locaties is bepaald hoeveel vermogen een machine kan hebben. Voor vervallocaties is de schaal van kleiner dan 20kW tot groter dan 100kW en voor stromingslocaties kleiner dan 20 kW.

3.2.5 FINANCIËLE HAALBAARHEID EN BUSINESSCASES

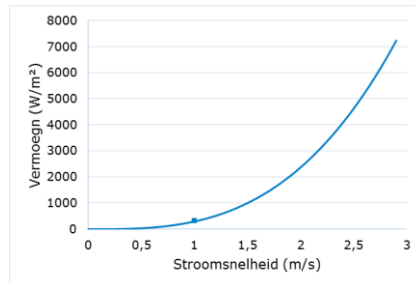
Het rapport sluit af met een analyse van de financiële haalbaarheid en de businesscases bij stuwlocaties. Hieruit blijkt dat investeringen in waterkracht niet eenvoudig op de markt gebracht zullen worden. Dit is te wijten aan de hoge investeringskosten ten opzichte van de opbrengsten. Volgens de studie hoeft dit geen probleem te zijn wanneer partijen samenwerkingsverbanden aan gaan en samenwerken met partijen als overheden of lokale energiemaatschappijen die minder rendementen hoeven te halen.

3.3 KINETISCHE ENERGIE

Deze paragraaf gaat in op het theoretisch vermogen dat opgewekt kan worden in de rivier en rivierprofielen.

3.3.1 THEORETISCH VERMOGEN

Kinetische energie in de stroming van water wordt door een machine omgezet naar elektrische energie door de massa en snelheid van het water (Jong, 2009). Volgens hetzelfde principe wordt energie uit de windkracht gegenereerd.



Figuur 10 Invloed van stroomsnelheid in water op het op te wekken vermogen (met rendement 0,593)

De stroomsnelheid speelt een grote rol in het opwekken van vermogen. De snelheid staat in verhouding met het vermogen tot de derde macht, zie Figuur 10 en formule 3.2. (Noortgaete, 2016a) en (Jong, 2009) beschrijven de snelheid van 1 m/s als een indicator voor een rendabele snelheid en toetsen locaties als mogelijk geschikt wanneer de snelheid gedurende een langere tijd groter is dan 1 m/s.

Formule vermogen bij kinetische energie:

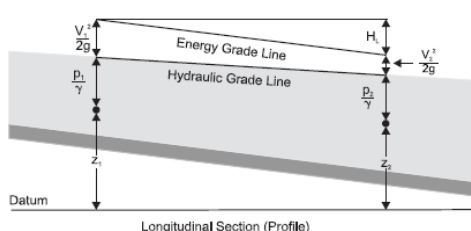
$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

- P vermogen (W)
 η rendement (-)
 ρ dichtheid (kg/m³)
 A frontaal oppervlak (m²)
 v stroomsnelheid

Energie kan in de energiebalans van Bernoulli niet verdwijnen. Wel kan energie worden onttrokken of worden toegevoegd, deze onttrekking en toevoeging wordt uitgedrukt in een energiehoogte, zie formule 3.3 en Figuur 11. De sommatie van de energie van 1) druk, 2) verhoging, 3) snelheid en toegevoegde of onttrokken energie moet gelijk zijn voor en na de machine, (Haestad Methods, 2002). Onder invloed van een energie onttrekking (H_L) bij gelijke druk en hoogte neemt de snelheid af aan de rechterzijde van het =teken, afhankelijk van de omgevingsfactoren.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_G = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_L \quad (3.3)$$

- p = druk (N/m²)
 γ = relatieve dichtheid van vloeistof (N/m³)
 v = snelheid van vloeistof (m/s)
 g = gravitatieversnelling (m/s²)
 z = plaatshoogte (m)
 H_G = Hoogte energie toevoer (m)
 H_L = Hoogte energieverlies (m)



Figuur 11 Energie principe (Haestad Methods, 2002)

- $\frac{p}{\gamma}$: druk (1)
 z : verhoging of verval (2)
 $\frac{v^2}{2g}$: snelheid (3)

3.3.2 STROOMSNELHEID

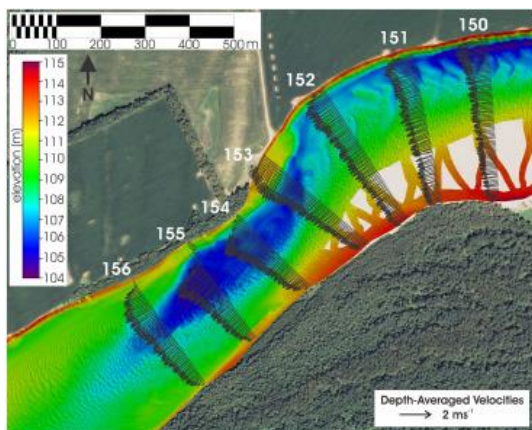
De stroomsnelheid in de rivier is afhankelijk van het debiet dat door de rivier stroomt. Formule 3.3 beschrijft de relatie tussen de stroomsnelheid en het debiet. Locaties met een kleiner frontaaloppervlak, hebben grotere stroomsnelheden. In de vernauwingen van de rivier zijn de gemiddelde snelheden groter (Konsoer & et.al., 2016).

Formule stroomsnelheid:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \cdot h}$$

- (3.3) Q voor het debiet (m^3/s),
 A het frontaal oppervlak (m^2)
 $\bar{v}$ gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
 b de breedte van de rivier (m)
 h de waterhoogte (m)

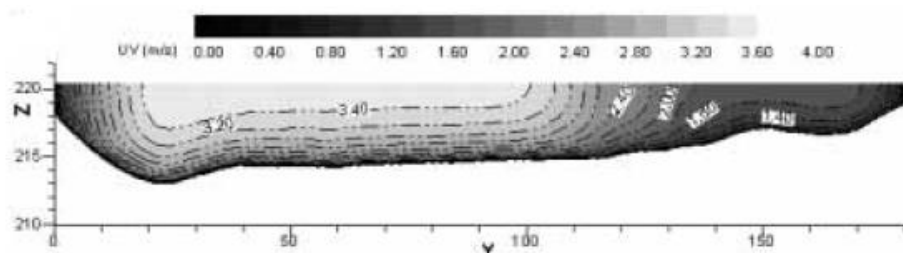
In een meander wordt de buitenbocht uitgediept en verwijd door grotere stroomsnelheden. De grootste snelheden in een meander liggen niet in de as van de rivier, maar de as van de grootste snelheid ligt in de richting van de buitenbocht, zie Figuur 13 (stippellijnen). Niet alleen varieert de stroomsnelheid in de breedte van de rivier, maar ook in de diepte van de rivier. Door de wrijving van de stroming van het water met de bodem is de stroomsnelheid bij de bodem lager dan aan het vrije oppervlak (Ribberink & Hulscher, 2012). Figuur 14 geeft de stroomsnelheden in een dwarsprofiel weer van een rivier. In bijlage 10.1 staat een 3D-model van Figuur 14. Te zien is dat stroomsnelheden bij de bodem lager zijn dan bij het vrije oppervlak.



Figuur 12 Dieptegemiddelde stroomsnelheid en diepten bij meander in Wabash River (Konsoer & et.al., 2016)



Figuur 13 As van rivier (centerline) en as van maximale snelheidsprofielen in een meander in de Wabash River (Konsoer & et.al., 2016)

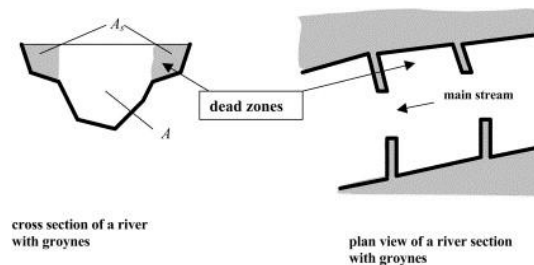


Figuur 14 Lokale stroomsnelheden in dwarsdoorsnede (T. Stoesser, 2003)

De IJssel is een riviertak van de Rijn. Bij het debiet bij Lobith, een Nederlandse plaats bovenstrooms in de Rijn, worden indicaties gegeven voor de verwachte waterstand en stroomsnelheid op locaties in de IJssel. Zie Bijlage 10.1 voor een schematische tekening van de vertakking van de Rijn.

3.4 KRIBBEN EN WATERKRACHT

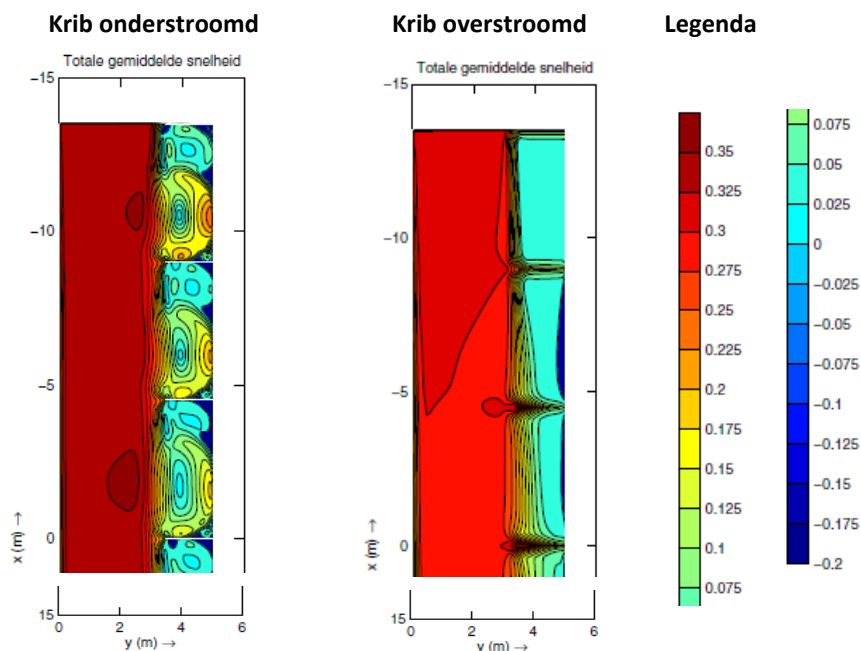
Kribben zijn hoofden of dammen die geplaatst zijn in rivieren om de afvoer van met name de ijsvorming in de rivier te verbeteren. Kribben zorgen ervoor dat de vaargeul op diepte gehouden kan worden. Onder invloed van kribben neemt bij lage afvoeren de snelheid in de vaargeul toe. De kribvakken (gebied tussen kribben) zorgen voor extra berging van het water en voorkomen verleggingen van de rivier. Deze combinatie is gunstig voor hoge afvoeren en voor scheepvaart bij lage afvoeren. (Flokstra, 2002)



Figuur 15 Overzichtstekening van kribben (*groynes*) en kribvakken (*dead zones*) (van Mazijk, 2002)

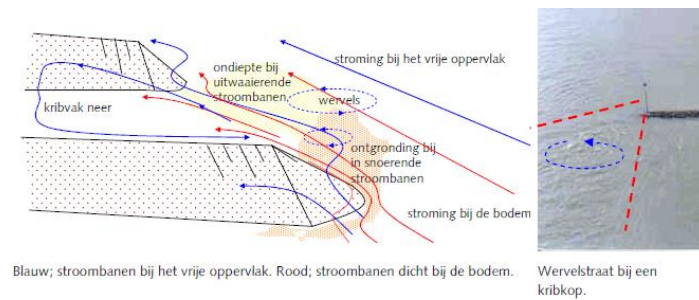
3.4.1 SNELHEIDSPROFIEL

De stroomsnelheid in het vaarwater (gebied in de rivier waar de mogelijkheid is te varen, in dit geval tussen de denkbeeldige lijnen de kribkoppen verbinden) is groter dan de stroomsnelheid in de kribvakken. Het snelheidsprofiel verschilt wanneer de kribben onderstroomd en overstroomd zijn, zie Figuur 16. Bij onderstroomde kribben is het profiel wisselvalliger en is het verschil in de gemiddelde stroomsnelheid in het vaarwater en het kribvak groter dan bij de overstroomde situatie (van Schijndel, 2002).



Figuur 16 Stromingsprofielen kribvakken (afbeelding samengesteld uit (van Schijndel, 2002) zie bijlage 10.1 voor volledige afbeelding)

Bij kribkoppen met een relatief steil talud stroomt het water rondom een kribkop weer terug het volgende kribvak (stroomafwaarts) in, (Sieben, 2009). De waterstroom versnelt ter hoogte van en na de kribkop, halverwege het kribvak vertraagt de stroming. Ook vinden er wervelingen plaats vanaf de kribkop stroomafwaarts de hoofdgeul in, daarnaast verliest de stroming snelheid in het kribvak waardoor aanzanding ontstaat. Onder andere als gevolg van deze drie elementen ontstaan er diepten direct na de kribkop en ondiepten halverwege het kribvak, zie Figuur 17.



Figuur 17 Stroombeeld bij kribben in de rivier (Sieben, 2009)

Deze ondiepten leiden tot problemen bij het behouden van voldoende diepte voor scheepvaart in de vaargeul. Dit probleem zal beperkt kunnen worden als de stroming van het water minder zou slingeren rondom de kribkoppen en het gebied tussen de snelle vrije stroming en de langzaam stromende water in het kribvak te verkleinen. Oplossingen als damwandschermen en kribvak bodemverhogingen worden hiervoor onderzocht. (Sieben, 2009). Voor waterkracht geldt dus dat stroomsnelheden rondom kribkoppen hoger zijn dan in de kribvakken, maar dat rekening moet worden gehouden met de aanzanding.

3.4.2 HAALBAARHEIDSTUDIE: BRONCKHORST

Een quick-scan voor een kriblocatie in gemeente Bronckhorst is gedaan door Royal HaskoningDHV (Noortgaete, 2016b). Het potentieel van de locatie is bepaald door de snelheden en het aantal draaiuren te bepalen van een machine. Bij een debiet van 2000 m³/s en 4000 m³/s zijn de stroomsnelheden bekeken die output zijn van een WAQUA-model van Rijkswaterstaat. Daarnaast is een meetcampagne uitgevoerd om de snelheden bij de kribkop te meten. Metingen op de diepten van 150 en 250 cm onder de waterspiegel waren minder gunstig dan metingen bij 70 cm onder de waterspiegel. Gedurende de metingen (debiet 1900 m³/s bij Lobith) was de snelheid echter niet groter dan 1 m/s (zoals vereist is voor de technieken in paragraaf 3.2.2). Met behulp van extrapolaties zijn de stroomsnelheden bij een debiet groter dan 2500 m³/s geschat op groter dan 1 m/s.

Voor een Oryon Watermill-machine is vervolgens een case uitgewerkt om te bepalen hoeveel vermogen er jaarlijks opgewekt kan worden. De afmetingen van de machine zijn in samenspraak met Deepwater Energy bepaald. In combinatie met het aantal uren dat de stroomsnelheid behaald wordt, het frontaal oppervlak van de machine en de vermogensdichtheid (vermogen per m² oppervlak) is de totale jaarlijkse verwachte energieopbrengst bepaald. De gebruikte stroomsnelheden zijn in een best-case scenario. De totale energieopbrengst van deze machine zal 25,8 MWh zijn. Eventueel zijn er opties om stroomsnelheden te vergroten door slimme oplossingen.

Vervolgens zijn de investeringskosten en de opbrengsten met elkaar vergeleken. De conclusie is dat zonder een investeringssteun het project niet financieel haalbaar is.

3.5 ECOLOGIE EN WATERKRACHT

Deze paragraaf beschrijft het ecologisch effect van de machines die energie opwekken uit waterkracht. Er wordt ingegaan op de flora en fauna.

3.5.1 VISSSEN

Vismigratie speelt een grote rol bij de vergunningverleningen voor machines die energie opwekken uit water. Kaderrichtlijn Water is opgesteld om afspraken te maken over hoe de huidige waterkwaliteit wordt verbeterd. (Beleidsregel watervergunningverlening waterkrachtcentrales in rijkswateren, 2015) is opgesteld om de vissterfte door toedoen van waterkrachtcentrales te beperken. Voor de grote rivieren is gesteld dat de vismortaliteit nihil moet zijn; 0,1 procent van de vispopulatie mag sterven door toedoen van de machine. Een uitzondering op deze regel geldt voor de Rijn en de Maas, hier mag de cumulatieve vissterfte maximaal 10 procent zijn. Wanneer deze hoeveelheid wordt overschreden, mogen nieuwe machines enkel een nihil vissterfte hebben. De IJssel valt onder de grote rivieren en heeft dus de regel dat de vissterfte nihil moet zijn.

In de Rijn en Maas wordt echter deze afspraak overschreden, daar moeten machines dus maximaal 0,1 procent vissterfte als gevolg hebben. Nieuwe projecten voor het opwekken van energie bij vervalloccaties hebben in de Rijn en Maas hebben wel vergunningen ontvangen, maar meerdere malen zijn deze vergunningen vernietigd. De reden voor deze vernietiging was dat in de *worst case scenario* niet met zekerheid kan worden bevestigd dat aan de regel wordt voldaan (Rechtbank Midden-Nederland, 2017).

3.5.2 RIVIERBODEM

Door machines te plaatsen op de krib is er de verwachting dat het stromingsbeeld rustiger wordt, dan beschreven is in paragraaf 3.4.1. De effecten van deze machines op de stroming en de bodem van de rivier zijn echter nog niet onderzocht. Er zijn wel plannen om onderzoek naar deze effecten te starten bij bijvoorbeeld testlocaties (Broers, 2017).

4 FASE I SPECIFICATIE: MOGELIJKE LOCATIES

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van fase I: de bepaling van mogelijke locaties. In deze paragraaf wordt een omgevingsanalyse gedaan en worden technieken uitgezocht. Vervolgens wordt na de specificatie van eisen en de eerste stap van de MCA uitgevoerd en kunnen mogelijke locaties bepaald worden.

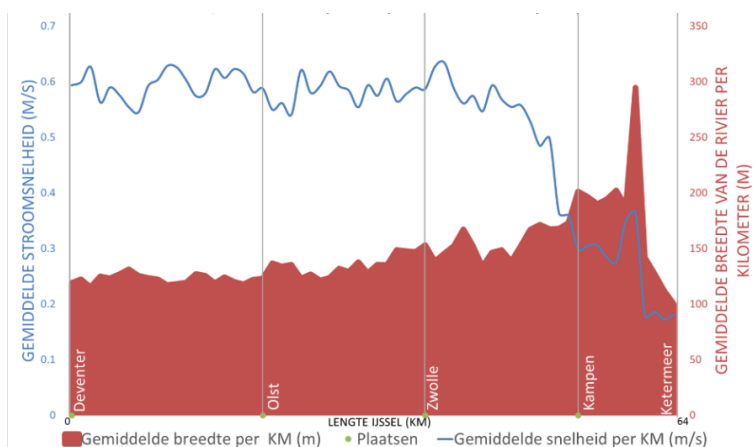
4.1 OMGEVINGSANALYSE

De rivier de IJssel in Overijssel bevat geen stuwen in tegenstelling tot de Rijn en Maas. Binnen het onderzoeksgebied zijn verder geen vervallocaties aanwezig. Deze studie richt zich daarom enkel op kinetische energie, zie paragraaf 3.1. Deze paragraaf gaat in op de stroomsnelheid (voor vermogen) en scheepvaart (bestaande infrastructuur).

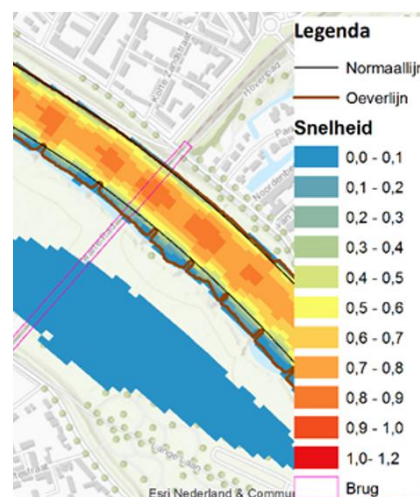
4.1.1 THEORETISCH VERMOGEN

Het model WAQUA geeft de dieptegemiddelde stroomsnelheden in de IJssel. Dit resultaat wordt bepaald op basis van het debiet bij Lobith zie bijlage 11.1. Het debiet dat Nederland binnenstroomt bepaalt de waterstanden en stroomsnelheden benedenstrooms. Per kilometer rivier is de gemiddelde stroomsnelheid en gemiddelde breedte bepaald met behulp van ArcGIS-kaarten en het resultaat van WAQUA, zie Figuur 18.

Uit paragraaf 3.3.1 blijkt dat de stroomsnelheid een kubische verhouding heeft met het theoretisch vermogen, dit maakt de stroomsnelheid tot een belangrijke factor in de locatiekeuze. De IJssel in Overijssel is bovenstrooms smaller en heeft grotere stroomsnelheden, zie Figuur 18. Benedenstrooms wordt de rivier steeds breder en krijgt de rivier vertakkingen. De stroomsnelheden zijn daarom benedenstrooms Zwolle kleiner. Aannemelijk is dat kansrijke locaties tussen Deventer en Zwolle worden gevonden. Bij vernauwingen zijn de snelheden groter. Mogelijke locaties moeten daarom gezocht worden bij vernauwingen, omdat verwacht wordt dat daar het meeste vermogen opgewekt kan worden.



Figuur 18 Gemiddelde stroomsnelheid over de breedte en de gemiddelde breedte per kilometer IJssel in Overijssel (Combinatie van resultaat WAQUA-model met debiet 2000 m³/s bij Lobith en GIS-kaarten van RWS)



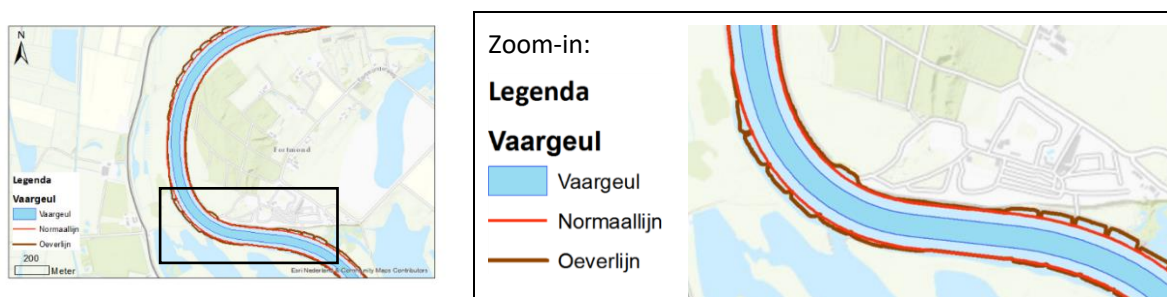
Figuur 19 Dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s) bij IJsselspoorbrug Deventer bij debiet van 2000 m³/s bij Lobith (WAQUA model)

Figuur 19 bevestigt dat locaties bij vernauwingen grotere stroomsnelheden hebben. De waterstroom versnelt bij kribkoppen, de snelheid neemt vervolgens af in de kribvakken (gebied in de rivier tussen de kribben). Hetzelfde geldt voor de bruglocatie, bij het kunstwerk (een constructie/bouwwerk in de Civiele Techniek) zijn de stroomsnelheden groter dan in het gebied eromheen.

4.1.2 BESTAANDE INFRASTRUCTUUR

In rivier de IJssel zijn vergunningen verleend voor vrachtschepen, omwille van deze reden is de gebruiksfunctie van rivier de IJssel scheepvaart. Kribben en baggerschepen zorgen ervoor dat de vaargeul op diepte blijft. De vaargeul is gedefinieerd door een vastgestelde breedte en Overeengekomen Laagste Waterstand (OLR). Om te voorkomen dat het opwekken van kinetische energie de huidige gebruiksfunctie in de weg staat, is het niet mogelijk barrières, zoals machines, te plaatsen in de vaargeul.

Het water in het gebied tussen de vaargeul en de normaallijn (denkbeeldige lijn die kribkoppen verbindt) wordt het vaarwater genoemd, zie Figuur 20. Pleziervaart maakt gebruik van dit gebied om vrachtschepen te ontwijken. Daarnaast maken vrachtschepen gebruik van dit gebied bij het passeren van een ander vrachtschip of bij het maken van een (scherpe) bocht. De meander bij Fortmond is een voorbeeld van een bocht waarbij schepen gebruikmaken van meer ruimte dan enkel de vaargeul, zie Figuur 20.



Figuur 20 Normaallijn, vaargeul en oeverlijn bij Fortmond

4.2 MOGELIJKE TECHNIEKEN

Deze paragraaf beschrijft de methoden voor het opwekken van kinetische energie en geeft een overzicht van de mogelijke technieken.

4.2.1 OVERZICHT TECHNIEKEN

De mogelijke technieken voor het opwekken van kinetische energie in de rivier staan opgesomd in Figuur 21. De eigenschappen van de technieken worden beschreven in het onderzoek 'Waterkracht in provincie Gelderland' (Noortgaete, 2016a). Deze informatie is aangevuld met (Schottel Hydro, 2017), (EQA, 2017). De technieken vereisen een minimale snelheid die groter is dan 1 m/s als opstartsnelheid (Noortgaete, Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland, 2016a) en (Jong, 2009). Per machine is ook aangegeven op welke locaties de techniek geplaatst kan worden. Onderscheid wordt gemaakt tussen krib, vrije stroming of kunstwerk locaties. In bijlage 10.2 zijn afbeeldingen geplaatst van de technieken en in paragraaf 3.2.2 zijn de methoden toegelicht.

Achtergrond			Technisch					Ecologisch	Economisch
	Machine	Bedrijf	Methode	Locatie	Vermogen (kW)	Diameter (m)	Rendement (-)	Vis-vriendelijk	TRL
1	Tocado T1	Tocado Tidal Power	Horizontaal	Aan een kunstwerk	35 - 50	2,5- 4,5	0,30– 0,35	+	8 / 9
2	EnCurrent turbine	New Energy Cooperation	Verticaal	Drijvend of kunstwerk	5 - 125	1,5 – 5	0,25 - 0,30	+	9
3	Oryon Watermill	Deepwater Energy	Verticaal	In kribkop of drijvend	5 - 3000	0,5 – 10	0,25 – 0,30	+	8
4	SIT	Schottel	Horizontaal	Drijvend of kunstwerk	1-70	3-5	0,3- 0,35		
5	Vivace	Vortex Hydro Energy	Oscillator	Bodem, krib	1 - 100			++	8

6	Dragonfly	W2E	Verticaal	Drijvend en kunstwerk	10	2	0,3	++	8
7	EQA-river	EQA Projects	Horizontaal	Drijvend, krib					

Figuur 21 Mogelijke technieken

De technieken in rij 1 tot en met 4 en 6 zijn op dit moment de technieken waarvan de meeste eigenschappen bekend zijn. Deze technieken hebben zowel in Nederland als in het buitenland testlocaties gehad.

4.3 EISEN

Uit de omgevingsanalyse blijkt dat er locaties gezocht moeten worden bij vernauwingen, kribben en bruggen. Zeker vanwege een beperktere aanwezigheid van vrije ruimte bij een vernauwing, is het belangrijk om rekening te houden met voldoende ruimte voor de scheepvaart. Locaties in de vaargeul zijn uitgesloten en locaties in het vaarwater zijn niet wenselijk. De omgevingsanalyse en beschikbare technieken leiden tot het overzicht van eisen in Figuur 22.

Eis	
Rivier	Locaties moeten gelegen zijn binnen de grenzen van de rivier de IJssel in de provincie Overijssel.
Scheepvaart	Locaties moeten gelegen zijn buiten de vaargeul van de rivier
Stroomsnelheid	De locatie moet een vernauwende werking hebben op de rivier zoals beschreven in paragraaf 4.1
Techniek	Voor de locatie moet een techniek beschikbaar zijn, zoals beschreven in paragraaf 4.2

Figuur 22 Eisen [fase I]

4.4 MOGELIJKE LOCATIES

Op basis van de eisen zijn gebieden in de rivier gemarkeerd als mogelijk dan wel ongeschikt. De mogelijke locaties worden in hoofdstuk 5 geëvalueerd om locaties aan te merken als kansrijke locaties. In Figuur 24 staat een kaart waarop de mogelijke locaties worden weergegeven.

Mogelijk	Ongeschikt
Krib (113x)	Vaargeul
Brug (9x)	Nevengeul
	Vrije stroming in kribvakken

Figuur 23 Mogelijke locaties



Figuur 24 Voorbeeld bij de Wilhemina-brug (Deventer) van mogelijke locaties

5 FASE II EVALUATIE: KANSRIJKE LOCATIES

Dit hoofdstuk beschrijft de evaluatie van de criteria en eisen van stap 2. Eerst worden de gegevens die benodigd zijn voor de evaluatie gepresenteerd. Vervolgens worden de waarderingen per locatie gegeven en worden de kansrijke locaties bekend gemaakt.

5.1 DOELEN, CRITERIA EN EISEN

Deze paragraaf beschrijft welke eisen en criteria van belang zijn voor het vinden van kansrijke locaties.

5.1.1 EISEN

De enige eis in deze fase is gebaseerd op het resultaat van Fase I, de alternatieven moeten binnen de grenzen vallen van de mogelijke locaties, zie paragraaf 4.4.

Eis	Indicator/factor	Data
Een alternatief moet gelegen zijn binnen de grenzen van een mogelijke locatie.	Mogelijke locatie	Hoofdstuk 4

Figuur 25 Eisen (fase II)

5.1.2 CRITERIA

De twee criteria hebben de categorieën 1) technisch en 2) sociaaleconomisch. Het technisch criterium gaat in op de technische mogelijkheid het opwekken van energie en het criterium sociaaleconomisch gaat in op het huidige gebruik van de rivier. Het doel van de criteria is om op een objectievere wijze locaties te kiezen, de criteria ranken de mogelijke locaties op basis van twee indicatoren. Voordat de criteria exact worden omschreven worden eerst het theoretisch vermogen en de afstand tot de vaargeul onderzocht.

THEORETISCH VERMOGEN

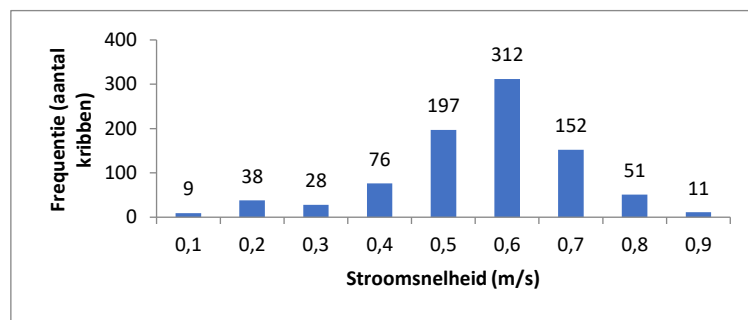
Het theoretisch vermogen wordt uitgedrukt in W/m^2 omdat vooraf niet bekend is welke machine met welke afmetingen op de mogelijke locatie wordt geplaatst. Voor het theoretisch vermogen wordt gerekend met de wet van Betz (0,593) als rendement. Dit is theoretisch het maximale rendement dat behaald kan worden in de vrije stroming.

De potentie van een locatie is ook afhankelijk van het aantal draaiuren. In deze fase is ervoor gekozen te rekenen met stroomsnelheden bij het debiet van $2000 m^3/s$. Dit debiet wordt 200 dagen in het jaar overschreden (dus $365-200=165$ dagen overschreden). De berekende vermogens worden beschouwd als het jaarlijks mediaan. Een voorbeeld van de kaart met berekende theoretisch vermogen staat in Figuur 26.



Figuur 26 Voorbeeldkaarten van rivier de IJssel en theoretisch vermogen (W/m^2)

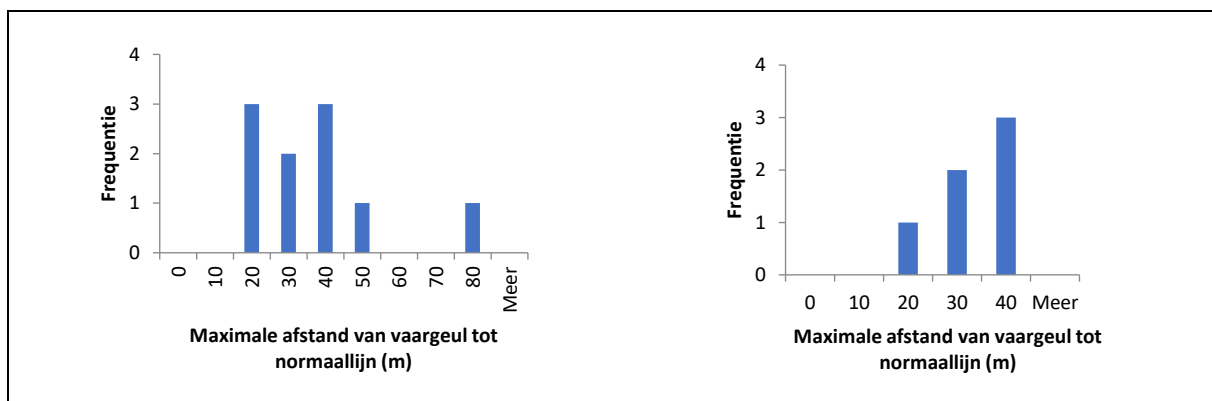
De vermogens worden berekend met formule 3.2. De stroomsnelheid heeft geen lineair verband met het vermogen, daarom wordt bij de MCA niet gerekend met de stroomsnelheid op locatie, maar met het vermogen op locatie. In bijlage 12.1 staat een alternatieve wijze van waarden geven aan de locaties, die dezelfde uitkomsten geeft als de huidige methode. Er is gekozen voor het rekenen met waardes voor vermogens in plaats van stroomsnelheden, omdat het op te brengen vermogen maatgevender is dan stroomsnelheid voor dit onderzoek. In Figuur 27 is te zien dat de maximale waarde geen uitzonderlijke waarde is in vergelijking met de andere snelheden op kriblocaties. Als maximum waarde in de MCA is de snelheid 0,88 m/s en dus het vermogen van 201 W/m² gekozen.



Figuur 27 Histogram stroomsnelheden op de kriblocaties in de IJssel benedenstrooms Deventer

AFSTAND TOT VAARGEUL

Bij alle bruggen in het studiegebied is de afstand tussen de vaargeul en de normaallijn gemeten in de ArcGIS kaarten. De frequenties van afstanden staan in Figuur 28. De bruggen met extreme waarden staan in Kampen, een plaats die in de omgevingsanalyse 4.1 omschreven wordt als minder kansrijk. Wanneer deze extremen worden gefilterd is de maximum afstand 40 meter, zie Figuur 28 en bijlage 12.2. De bruggen bij Kampen worden nog wel mee genomen in het onderzoek, maar zijn niet bepalend in het geven van waardes bij de MCA.



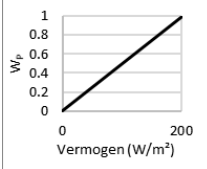
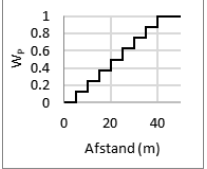
Figuur 28 Histogrammen van afstand bij bruggen (links: inclusief, rechts exclusief excessen)

5.1.3 GEWICHTEN

Beide criteria hebben een aandeel in de bepaling van geschiktheid van locaties. De gewichten geven aan welk criterium een grotere impact heeft op de geschiktheid. Bij deze analyse wordt er geen onderscheid gemaakt in gewicht. Een locatie die scheepvaart hindert en een hoge stroomsnelheid heeft is niet de meest geschikte locatie. Hetzelfde geldt voor een locatie met een lage stroomsnelheid die de scheepvaart niet hindert. De meest geschikte locatie zal zowel de scheepvaart niet moeten hinderen als een hoge stroomsnelheid moeten hebben, waarbij beide indicatoren een even grote rol spelen in geschiktheid. Beide criteria krijgen daarom het gewicht 0,5 ($\frac{1}{2}$).

OVERZICHT CRITERIA

Zowel de huidige functie van de rivier als de hoeveelheid op te wekken energie hebben een belangrijk aandeel in de afweging van geschiktheid van locaties. De formule die gehanteerd wordt voor de mogelijke locaties is formule 5.1.

Gw.		Criterium	Indicator	Data	Standaardisering
0,5	1) Technisch	Het opwekken van energie op een kansrijke locatie			
	Kwantitatief:	De locatie moet zoveel mogelijk energie opbrengen ten opzichte van de andere mogelijke locaties.	P_x : Vermogen (W/m ²)	Output WAQUA-model RWS	 $W_p = \frac{P_x}{P_{max}}$ Met: $P_{max} = 201 \text{ W/m}^2$
0,5	2) Sociaal Economisch	Beperken van invloed op bestaande infrastructuur			
	Kwantitatief:	De locatie moet de scheepvaart zo min mogelijk hinderen	d_x : afstand tot vaargeul (m) (gemeten per 5 meter afstand tot de vaargeul)	RWS basisbestand	 $W_d = \frac{d_x}{d_{max}}$ Met: $d_{max} = 40 \text{ m}$
	Kwalitatief:	De locatie moet de scheepvaart zo min mogelijk hinderen	Locatie gelegen buiten normaallijn (oeverzijde)	RWS basisbestand	$\text{Waarde} \frac{d_x}{d_{max}} = 1 \quad (d_x = 40)$

Figuur 29 Standaardisatie criteria

De waarde geschiktheid wordt uitgedrukt in een schaal van 0 (minst geschikt) tot 1 (meest geschikt). De gewichten voor beide criteria zijn gelijk en tellen daarom beiden voor $\frac{1}{2}$ mee. De maximale waarde voor een criterium is 1 en de minimale 0, dat betekent dat de waarde voor een locatie ook als maximale waarde 1 kan behalen en minimaal 0.

$$\begin{aligned}
 \text{Waarde}_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{P_x}{P_{max}} + \frac{d_x}{d_{max}} \right) \\
 &= \frac{1}{2} (W_p + W_d)
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

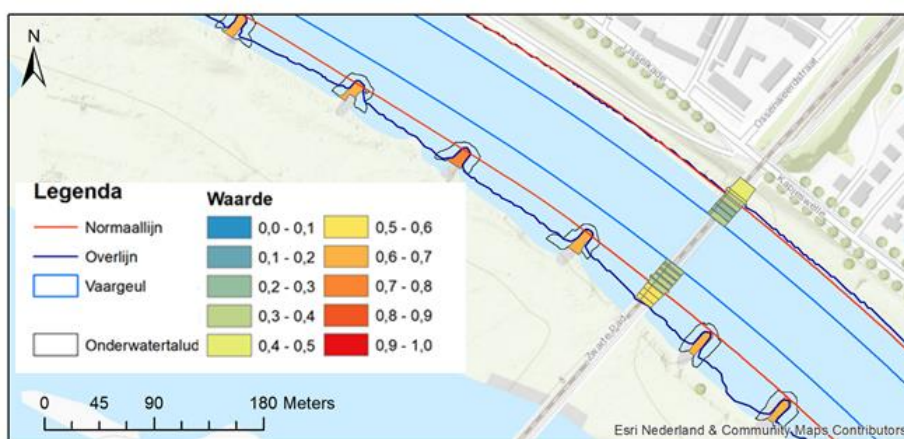
- x = locatie
- P_x = maximaal gemeten vermogen op x
- P_{max} = maximaal gemeten vermogen studiegebied (201 W/m²)
- d_x = afstand van x tot vaargeul
- d_{max} = maximaal gemeten afstand van vaargeul tot oever (40 m)
- W_p = waarde voor criterium vermogen
- W_d = waarde voor criterium afstand

5.2 MCA

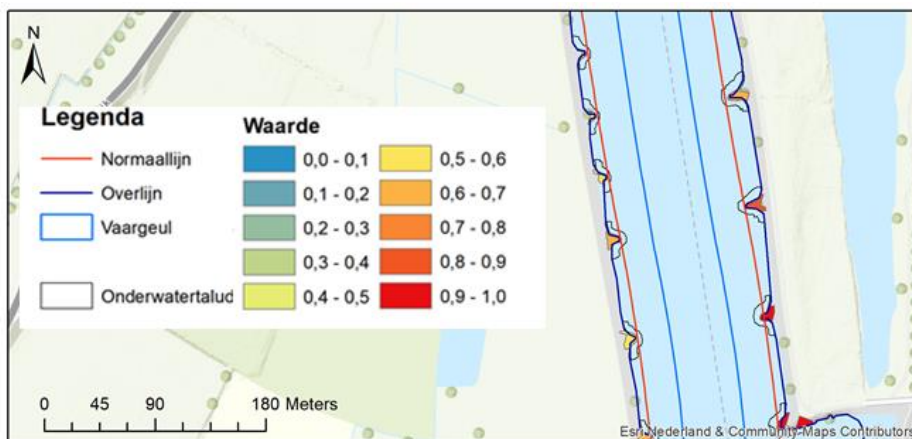
Voor kriblocaties, gedefinieerd als kribkop met het onderwatertalud, zijn de maximumsnelheden bepaald. Er is gekozen voor het hanteren van de maximumsnelheid omdat het model van WAQUA een rooster heeft met vlakken van ongeveer 100m². Dit model geeft als output de gemiddelde snelheid die is gemeten in het vlak over de gehele waterdiepte. De verwachting is dat een machine kleiner is dan een roostervlak. De roostervlakken beschrijven niet een gehele kribkop, maar diverse vlakken van het rooster raken de krib. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar in 13.1.1. De afmetingen van een machine zullen een kleiner oppervlak gebruiken dan de roostervlakken beschrijven. Er wordt daarom aangenomen dat de hoogste snelheid die gemeten wordt op een kriblocatie voldoende oppervlak heeft voor het plaatsen van een machine.

5.2.1 KAARTEN MCA

Figuur 30 en Figuur 31 laten de uitkomsten zien van de MCA bij de locaties in respectievelijk de gemeenten Deventer en Olst-Wijhe.



Figuur 30 Geschiktheidskaart in de buurt van Deventer



Figuur 31 Geschiktheidskaart bij Wijhe

5.2.2 OVERZICHT MCA

Het resultaat is opgesplitst in twee overzichten: bruggen (Figuur 32) en kribben (Figuur 33). Het blijkt dat kriblocaties gunstiger zijn voor het plaatsen van een machine dan bruglocaties. De afstand van de locatie tot aan de vaargeul blijkt de bepalende factor te zijn.

Brugnaam	Gemeente	W_d	W_p	$Waarde_x$
1 Verkeersbrug Rijksweg A1	Deventer	1	0,37	0,69
2 Molenbrug (verkeersbrug)	Kampen	1	0,17	0,58
3 Katerveer 1 (verkeersbrug)	Zwolle	1	0,39	0,7
4 Katerveer 2 (verkeersbrug Rijksweg A28)	Zwolle	1	0,38	0,69
5 Wilhelminabrug/Verkeersbrug N334	Deventer	0,63	1	0,81
6 Eilandbrug (verkeersbrug)	Kampen	1	0,1	0,55
7 Spoorbrug Deventer	Deventer	1	0,04	0,52
8 Stadsbrug Kampen (verkeersbrug)	Kampen	1	0,09	0,55
9 Spoorbrug Hanzelijn	Zwolle	1	0,36	0,68

Figuur 32 Uitkomst MCA bruggen

Bij de kriblocaties zijn alle locaties benedenstrooms Deventer onderzocht. De grens tussen Overijssel Gelderland loopt op sommige locaties midden in rivier de IJssel. De locaties binnen Overijssel hebben lichtblauwe rijen.

#	Plek	Gemeente	Kilometerraai	W_p	$Waarde_x$
1	O	Olst-Wijhe	965	1	1
2	K&O	Voorst	949	0,98	0,99
3	K&O	Voorst	949	0,98	0,99
4	K&O	Deventer	942	0,92	0,96
6	K&O	Olst-Wijhe	965	0,92	0,96
7	O	Voorst	949	0,91	0,95
8	O	Voorst	947	0,88	0,94
9	O	Zwolle	971	0,87	0,93
10	O	Voorst	950	0,87	0,93
11	K&O	Heerde	962	0,79	0,9
12	O	Olst-Wijhe	956	0,79	0,89
13	K&O	Olst-Wijhe	954	0,79	0,89
14	O	Deventer	943	0,77	0,88
15	O	Olst-Wijhe	956	0,75	0,88
17	K&O	Olst-Wijhe	965	0,75	0,87
18	O	Voorst	950	0,72	0,86
19	K&O	Deventer	943	0,71	0,85
21	K&O	Voorst	947	0,69	0,84
24	K&O	Deventer	943	0,67	0,84
26	O	Deventer	943	0,65	0,82
31	O	Deventer	943	0,63	0,82

Figuur 33 Uitkomst MCA kribben (De letter 'O' onder Plek betekent dat de maximale snelheid is gevonden op het onderwatertalud van de krib. De letter 'K' betekent dat de maximale snelheid is gevonden op de kribkop)

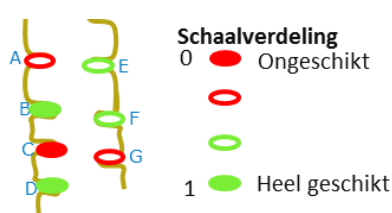
In Figuur 33 is de kolom W_d niet weergegeven, omdat per definitie kriblocaties buiten de normaallijn liggen. Er geldt dus voor alle kriblocaties: $W_d = 1$.

6 FASE III UITWEIDING: TWEE LOCATIES

Deze fase beschrijft de uitweiding van twee locaties op basis van het technisch, economisch en ecologisch potentieel. Eerst wordt de klasseindeling van kriblocaties weergegeven, voordat de twee locaties in Olst en Wijhe worden omschreven.

6.1 KRIBBENINDELING

De kriblocaties worden eerst in groepen verdeeld. Kriblocaties worden in dezelfde groep geplaatst als aan dezelfde zijde aan de oever of direct naast elkaar liggen of met een locatie ertussen. Daarna worden de groepen in twee klassen verdeeld op basis van de geschiktheid. Aan de hand van Figuur 34 wordt deze methode uitgelegd. Volgens deze methode vormen krib B & D één groep en E & F één groep, waarbij de groep van B & D in een hogere klasse zal worden ingedeeld dan de groep van krib E & F. Uit beide klassen wordt een locatie verder uitgeweid in deze fase.



Figuur 34 Voorbeeld groepenindeling kribben

Klasse 1 heeft kriblocaties met grotere snelheden en zijn gelegen in de buurt van een haven (uitgezonderd locatie 9 Zwolle). Klasse 2 heeft locaties binnen de top 20, maar de snelheden die behaald worden op de locaties zijn lager dan klasse 1.

In de eerste kolom worden de namen weergegeven van de locaties. Deze locaties worden uitgewerkt in de paragrafen 6.3 tot en met 6.4, zie Figuur 38 en Figuur 40. De laatste kolom 'Naam kribgroep' geeft namen weer van de kribgroepen. De eerste letter staat voor de gemeente, het cijfer geeft aan bij welke groep deze locatie hoort. Deventer heeft bijvoorbeeld twee kribgroepen.

#	Technisch		Locatie			Indeling	
	Snelheid (m/s)	Maximum (W/m ²)	Plek	Gemeente	Kilometerraai	Klasse	Naam kribgroep
1	0,88	201	O	Olst-Wijhe	965	1	Locatie 1 (1A)
4	0,85	184	K&O	Deventer	942	1	D1
6	0,85	182	K&O	Olst-Wijhe	965	1	Locatie 1 (1B)
9	0,84	174	O	Zwolle	971	1	Z1
11	0,81	158	K&O	Heerde	962	2	H1
12	0,81	158	O	Olst-Wijhe	956	2	Locatie 2 (2A)
13	0,80	154	K&O	Olst-Wijhe	954	2	O1
14	0,80	151	O	Deventer	943	2	D2
15	0,80	150	O	Olst-Wijhe	956	2	Locatie 2 (2B)
17	0,79	144	K&O	Olst-Wijhe	965	1	Locatie 1 (1C)
19	0,77	138	K&O	Deventer	943	2	D2
24	0,76	130	K&O	Deventer	943	2	D2
26	0,75	127	O	Deventer	943	2	D2
31	0,74	121	O	Deventer	943	2	D2

Figuur 35 Kriblocaties en klassen

Indeling kribben in kribgroepen	
Klasse 1	Klasse 2
Locatie 1: Wijhe	Locatie 2: Olst
Deventer-1 (D1)	Heerde-1 (H1)
Zwolle-1 (Z1)	Olst-Wijhe-1 (O1)
	Deventer-2 (D2)

Figuur 36 Klasse-indeling kribben

Uit beide klassen worden twee locaties verder uitgewerkt. Gekozen is voor de locaties met de grootste potentie en een kribgroepsgrootte groter dan 1. Locatie 1 en 2 zijn op deze wijze gekozen als de verder uit te diepen locaties.

6.2 LOCATIE EIGENSCHAPPEN

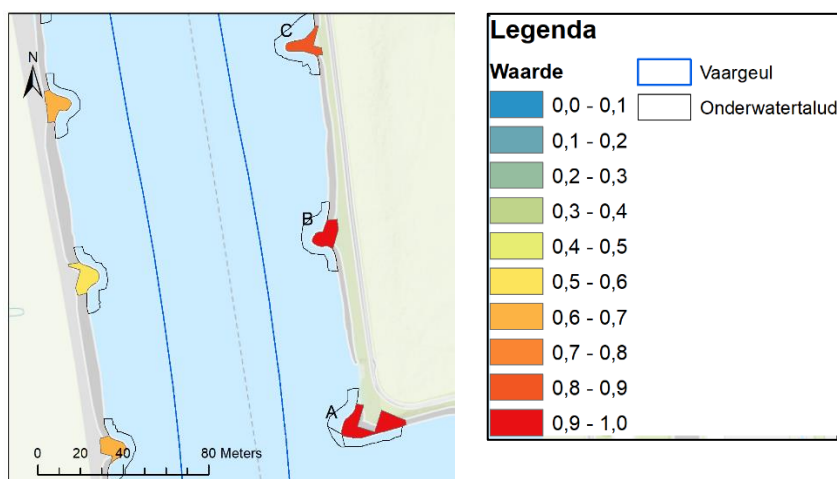
De locaties die worden uitgewerkt liggen allebei in gemeente Olst-Wijhe. Deze paragraaf geeft afbeeldingen weer van de locaties en de uitkomsten van de MCA voor deze locaties.

6.2.1 LOCATIE 1: WIJHE

Bij gemeente Olst-Wijhe is de grootste snelheid geschat bij locatie 1A, zie Figuur 37 en Figuur 38. Meer informatie staat in bijlage hoofdstuk 13.1.1.

#	Technisch		Locatie		Afmetingen		
	Snelheid (m/s)	Maximum (W/m ²)	Plek	Kilometerraai	Hoogte (m +NAP)	Hoogte (m)	Breedte (m)
1 (1A)	0,88	201	O	965,175	2,6	2,5	
6 (1B)	0,85	182	K&O	965,265	2,3		
17 (1C)	0,79	144	K&O	965,345	2,0		

Figuur 37 Resultaat MCA locatie 1



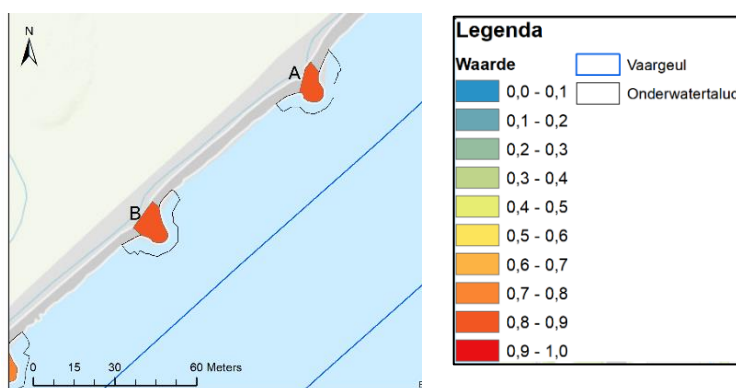
Figuur 38: Kaart met uitslag MCA locatie 1, bij kmraai 965

6.2.2 LOCATIE 2: OLST

De tweede locatie is minder geschikt ten opzichte van locatie 1, de gegevens van de locatie staan in Figuur 39 en Figuur 40. Meer informatie staat in bijlage hoofdstuk 13.1.1.

#	Technisch		Locatie		Afmetingen		
	Snelheid (m/s)	Maximum (W/m ²)	Plek	Kilometerraai	Hoogte (m +NAP)	Hoogte (m)	Breedte (m)
12 (2A)	0,81	158	O	956,72	3,6	2,5	
15 (2B)	0,80	150	O	956,64	3,1		

Figuur 39 Resultaat MCA locatie 2



Figuur 40 Kaart met uitslag MCA locatie 2 bij kmraai 956

6.3 TECHNISCH POTENTIEEL

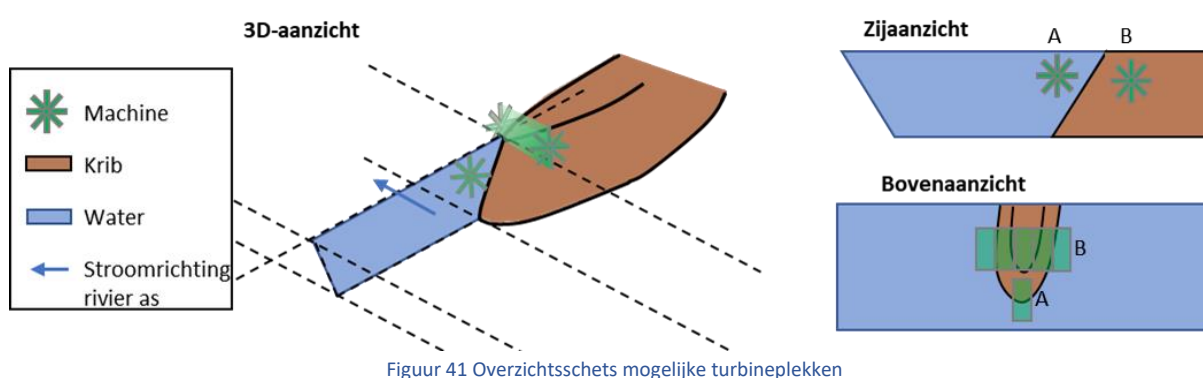
Dit hoofdstuk beschrijft het technisch potentieel door de technieken en watersnelheden te bepalen.

6.3.1 TECHNIEKEN

Deze paragraaf beschrijft de gekozen locatie op de krib en gekozen techniek.

LOCATIE OP DE KRIB

De meest geschikte locatie van de machine op de krib is afhankelijk van meerdere factoren. Deze factoren zijn de plekken met de hoogste stroomsnelheid, de stroomrichting van het water en tot slot de wijze waarop de machine geplaatst wordt op de krib. De machines kunnen worden vastgemaakt aan een drijvende constructie of aan de krib, zie paragraaf 4.2. De locaties kunnen waar een machine kan worden geplaatst zijn rondom de kribkop op het onderwatertalud, of in de kribkop, zie Figuur 41 (A en B). Wanneer de machine geplaatst wordt in de kribkop zal eerst een gedeelte van de kribkop verwijderd moeten worden.



Figuur 41 Overzichtsschets mogelijke turbineplekken

De locatie in het verlengde van de krib op het onderwatertalud (locatie A in Figuur 41) heeft bij de kriblocaties de grootste stroomsnelheid, zie bijvoorbeeld Figuur 73 in paragraaf 13.1.1 van de bijlage. Bij de output van WAQUA moet echter wel in acht worden genomen dat het oppervlak van het grid 100 m² is en een dieptegemiddelde snelheid weergeeft. Het is dus mogelijk dat er zich binnen dit vlak afwijkende snelheden kunnen bevinden. Vanwege de wrijving met de bodem (paragraaf 3.3.2) wordt verwacht dat de stroomsnelheid aan het wateroppervlak groter is dan bij de bodem. De stroomrichting op deze locaties is gelijk aan de stroomrichting van de rivier, zie paragraaf 3.4.1 en de bijlage (paragraaf 13.1.1). Het nadeel van de aangewezen locatie is dat de machine voor scheepvaart visueel gemaakt moet worden. Wanneer de locatie van de machine meer richting de oever is (locatie B in Figuur 41), dan steekt de machine visueel niet uit bij de kribben. Hiermee zou aanvaringsgevaar voorkomen kunnen worden.

Vanwege de lage snelheden wordt gerekend met de locatie met de hoogste potentie, locatie A in Figuur 41. De machine komt loodrecht op de stroomrichting te staan.

GEKOZEN TECHNIEKEN

De verschillende installaties staan omschreven in paragraaf 4.2.1. De machines waar voldoende informatie over bekend is en geschikt zijn voor de locaties staan in Figuur 42. Op basis van de locatie eigenschappen (paragraaf 6.2) is de diameter van de machine bepaald. De machine van Schottel is niet meegenomen omdat de minimale van de diameter 3 meter is, terwijl de maximale afmeting van de locatie 2,5 meter is.

	Machine	Diameter (m)	Rendement	Horizontale of verticale as
1	Tocado T1	2,5- 4,5	0,30– 0,35	Horizontale as
2	EnCurrent turbine	1,5 – 5	0,25 - 0,30	Verticale as
3	Oryon Watermill	0,5 – 10	0,25 – 0,30	Verticale as
4	W2E	2-5	0,30	Verticale as

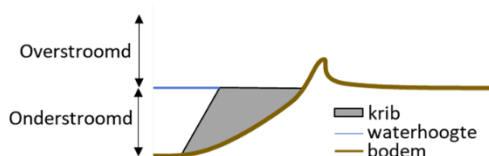
Figuur 42 Technieken op locatie

6.3.2 VERANDERING STROOMSNELHEID IN EEN JAAR OP LOCATIE

Deze paragraaf geeft de stroomsnelheid op de kriblocatie gedurende het jaar. Voordat dit resultaat wordt beschreven, wordt eerst de waterstand en stroomsnelheid per debiet bij Lobith gegeven. Van de debieten bij Lobith is bekend hoeveel dagen in het jaar het debiet gemiddeld wordt overschreden.

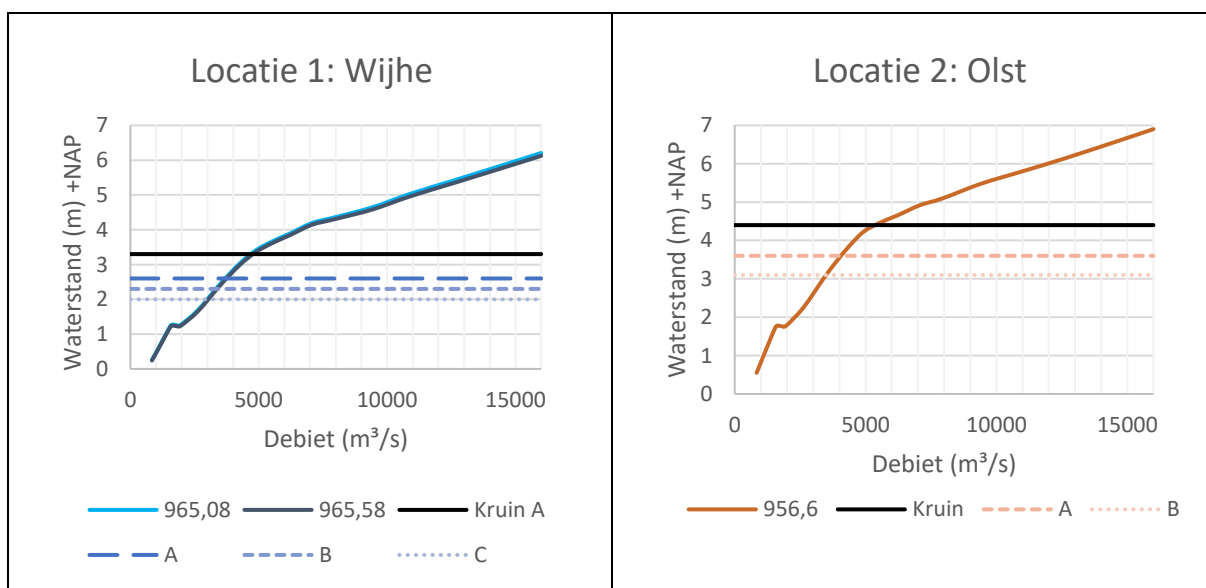
WATERSTAND

In paragraaf 6.2 is aangegeven op welke kilometerraai de locaties geplaatst zijn. Voor de twee locaties is de waterstand per debiet bij Lobith gegeven door een SOBEK-model van RWS. Uit paragraaf 3.4.1 bleek dat het verschil tussen de stroomsnelheid in het vaarwater en de kribvakken kleiner wordt wanneer de krib overstroomd raakt. Het verschil tussen een onderstroomde en overstroomde krib is afgebeeld in Figuur 43.



Figuur 43 Dwarsdoorsnede rivier: Verschil tussen onderstroomde en overstroomde krib

De duurlijn van de stroomsnelheid op de kriblocatie wordt in twee perioden opgedeeld: (1) wanneer de krib onderstroomd is en (2) wanneer de krib overstroomd is. De hoogte van de krib ten opzichte van NAP weergeeft de grensovergang van de perioden. In de grafiek is af te lezen bij welk debiet deze periodeovergang plaats vindt.



Figuur 44 Waterstanden op locatie bij debiet Lobith (kruin: kruin van zomerbed bij de locatie)

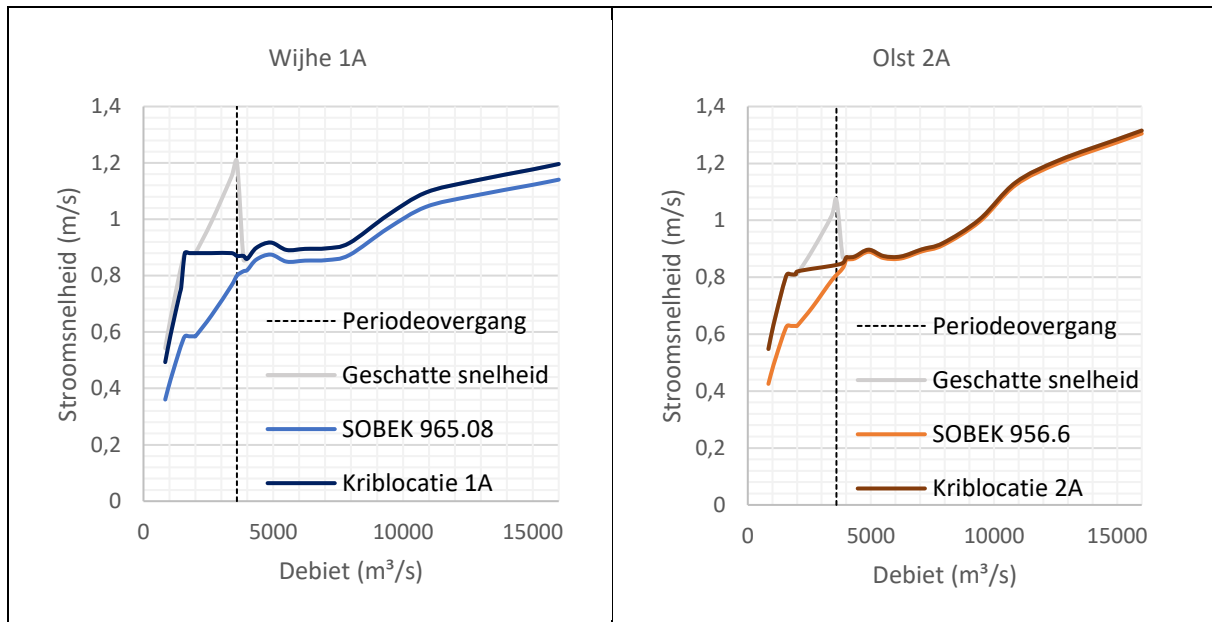
STROOMSNELHEID

De output van het WAQUA-model bij het debiet van 2000 m³/s en 4000 m³/s wordt gebruikt om te combineren met de stroomsnelheden van het SOBEK-model. Figuur 45 geeft het resultaat van het WAQUA-model.

		WAQUA 2000	WAQUA 4000		
	Locatie:	Snelheid (m/s)	Snelheid (m/s)	Debiet (m³/s) bij periodeovergang	Afgerond (m³/s)
Wijhe:	1A	0,88	0,86	3625	3600
	1B	0,85	0,75	3397	3400
	1C	0,79	0,73	2006	2000
Olst:	2A	0,81	0,87	4103	4100
	2B	0,8	0,79	3397	3400

Figuur 45 Stroomsnelheden en periodeovergangen van locaties

De stroomsnelheden bij WAQUA zijn bepaald in 2D, de snelheden geven de dieptegemiddelde snelheid weer. De snelheden van SOBEK zijn 1D en geven de gemiddelde snelheid in de breedte van de rivier weer. De snelheden op de locatie verschillen van het gemiddelde van de rivier. Wanneer de krib overstroomd is, wordt aangenomen dat de toename van de snelheid gelijk is aan de toename van de snelheid in het SOBEK-model. De krib heeft dan niet meer een vernauwende werking op de waterstroming.

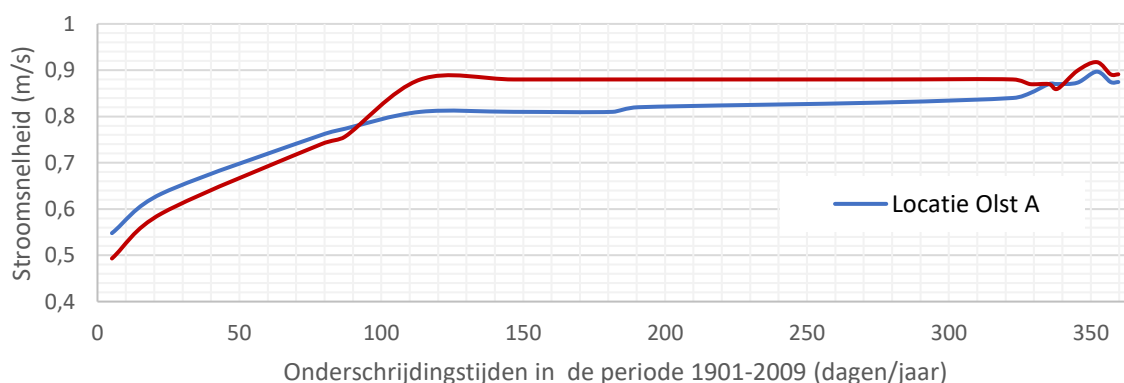


Figuur 46 Stroomsnelheden van kriblocatie en SOBEK-model

De snelheid op de locatie wordt op de verticale as 'verschoven' naar de juiste snelheid. Wanneer de grafiek volledig wordt geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd naar de stroomsnelheden in SOBEK, zal de grijze lijn 'Geschatte snelheid' ontstaan. Er zijn echter geen metingen die deze extreme piek kunnen bevestigen. Er is daarom ervoor gekozen deze piek te verwijderen. Het resultaat van de snelheid is weergegeven als de lijn 'Kriblocatie 1A' en 'Kriblocatie 2A' in Figuur 46.

6.3.3 ONDERSCHRIJDINGSTIJDEN STROOMSNELHEID

Voor debieten bij Lobith is bekend hoeveel dagen in het jaar gemiddeld het debiet wordt onderschreden. De frequentie voor een debiet is gegeven in het aantal dagen in het jaar dat het debiet bij Lobith lager is dan het aangegeven debiet. Zie Bijlage 13.1.2 voor de onderschrijdingfrequenties bij Lobith. Met behulp van interpoleren zijn de onderschrijdingstijden voor de debieten in Bijlage 13.1.2 gekoppeld aan Figuur 46. Zie Figuur 79 in Bijlage 13.1.2 voor de berekening. Met behulp van deze grafiek is het mogelijk een inschatting te maken met hoeveel tijd een bepaalde snelheid wordt gehaald, zie Figuur 47.



Figuur 47 Onderschrijdingfrequenties voor stroomsnelheid

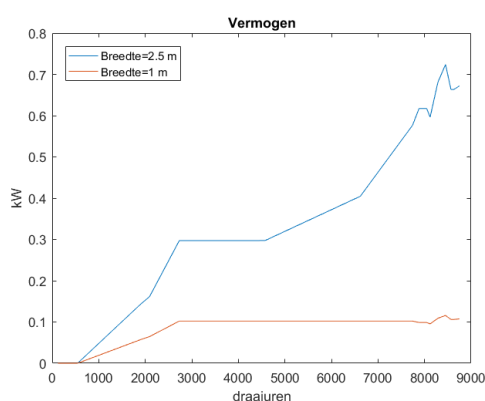
6.4 ECONOMISCH POTENTIEEL

Deze paragraaf geeft als uitkomst voor verschillende technieken het vermogen dat opgewekt kan worden op de locaties.

6.4.1 VERWACHTE ENERGIEOPBRENGST

Literatuur (Jong, 2009) en (Noortgaete, 2016a) gebruikt als minimale stroomsnelheid 1 m/s. Er wordt aangenomen dat de minimale snelheid van 1 m/s die gegeven is in onderzoeken een richtlijn is voor een rendabele snelheid. Dat betekent dus dat deze snelheid niet de startsnelheid is die benodigd is voor machines om te draaien. Als startsnelheid wordt gerekend met 0,6 m/s, deze snelheid is gebaseerd op de gegevens van (Pro Tide, 2016).

De machine werkt optimaal wanneer hij volledig onder water staat. De afmeting van de machine moet dus zo worden gekozen dat het optimaal gebruikt maakt van het aantal draaiuren. Op locatie 1A is voor twee verschillende diameters het vermogen geanalyseerd, zie Figuur 48. Voor een breedte en hoogte van 1,0 meter is de jaarlijkse energieopbrengst 0,7 MWh en voor de breedte en hoogte van 2,5 meter is de opbrengst 2,8 MWh, zie 13.1.5 voor berekeningen. Ondanks dat het aantal draaiuren voor een grotere machine kleiner is, is de opbrengst van de machine vele malen (factor 4) groter. De machine krijgt daarom de afmetingen die maximaal mogelijk zijn op locatie.



Figuur 48 Vermogen (kW) voor het aantal draaiuren van de machine

Een machine met een verticale as heeft een rechthoekig oppervlak en de machines met een horizontale as hebben een cirkelvormig oppervlak. De machines met een verticale as zijn op deze locatie in het voordeel, omdat de kribhoogte de beperkende factor is. De machines met een verticale as kunnen een groter oppervlak in gebruik nemen.

In het rapport is gerekend met een machine met een horizontale as die altijd werkzaam is, ongeacht de machine niet volledig onder water staat. Voor een dergelijke machine met twee rotorbladen (zie Bijlage 11.2.1) is dit echter niet realistisch. In Bijlage 13.1.7, Figuur 91 en Figuur 92, is daarom berekend wat de energieopbrengst zou zijn wanneer de machine alleen in deze situatie werkzaam is. Een machine met een diameter van 1 meter zou leiden tot een hogere opbrengst dan een machine met een diameter van 2,5 meter. De minimale afmeting voor de machine met horizontale as is 2,5 meter, een kleinere machine kan dus niet worden gebruikt. Dit resultaat geeft aan dat de machines met de verticale as beter aansluiten bij de situatie op de kriblocaties. Het eindresultaat zal daarom alleen de opbrengst van machines met een verticale as bevatten.

Voor de rendementen is telkens het maximale rendement gekozen uit het techniekenoverzicht, paragraaf 6.3.1. De waarden waar mee gerekend wordt voor machine zijn indicatief, de rendementen en afmetingen die zijn gebruikt in de berekeningen zijn enkel indicaties van de machine en zijn niet daadwerkelijk getest op de gekozen locatie.

De jaarlijkse energieopbrengst (MWh) is berekend met de Riemannsom. Het resultaat staat in Figuur 49 en de berekeningen en formules zijn terug te vinden in de bijlage. In Overijssel werd in 2015 gemiddeld 3130 kWh aan elektriciteit verbruikt per woning (CBS, 2017). Dat houdt in dat locatie 1A iets minder energie voorziet dan voor één huishouden en Locatie 2A voor iets meer dan de helft van één huishouden. Locatie 1C heeft een lagere waarde omdat de krib lager is dan de andere twee kribben. Daarnaast is er geen machine met horizontale as die aan de afmetingen voldoet.

	Horizontale as	Verticale as	Hoogte
Rendement	0,35	0,30	
Locatie 1A: Wijhe (MWh)	2,5	2,8	2,5
Locatie 1C: Wijhe (MWh)		1,4	2
Locatie 2A: Olst (MWh)	1,5	1,8	2,5

Figuur 49 Overzicht jaarlijkse energieopbrengst

6.4.2 OPTIMALISATIE STUDIE

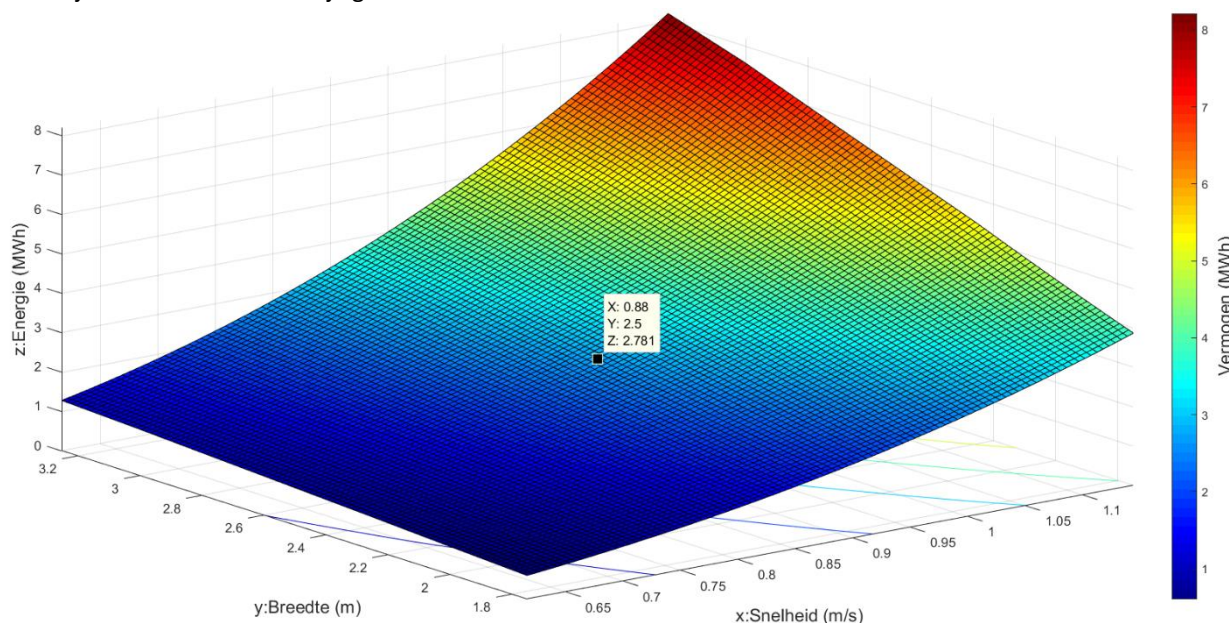
Er zijn studies gaande naar optimalisatie van stroomsnelheden. Een extra constructie rondom de machine (bijvoorbeeld in een trechtervorm) zou de stroomsnelheid lokaal kunnen verbeteren. Figuur 96 geeft de verwachtingen van de energieopbrengst, wanneer deze studies succesvol verlopen. Er zijn echter nog geen resultaten bekend van deze studies, dus wordt niet met de waardes gerekend die in Figuur 50 worden weergegeven.

Toename snelheid (%)	Toename energieopbrengst (%)	Energieopbrengst (MWh)
+ 0%	+ 0%	2,8
+ 10%	+ 32%	3,7
+ 20%	+ 71%	4,8
+ 30%	+ 118%	6,1

Figuur 50 Verwachtingen bij verhoging van stroomsnelheid

6.4.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE

Om te controleren hoe sterk afhankelijk het resultaat van de gemaakte keuzes is, wordt een gevoeligheidsanalyse gedaan. Voor zowel de snelheid als de gekozen afmetingen van de machine is de verandering in energieopbrengst onderzocht, zie Figuur 51. De analyses voor de andere locaties en met de werkelijke waarden staan in Bijlage 13.1.7.



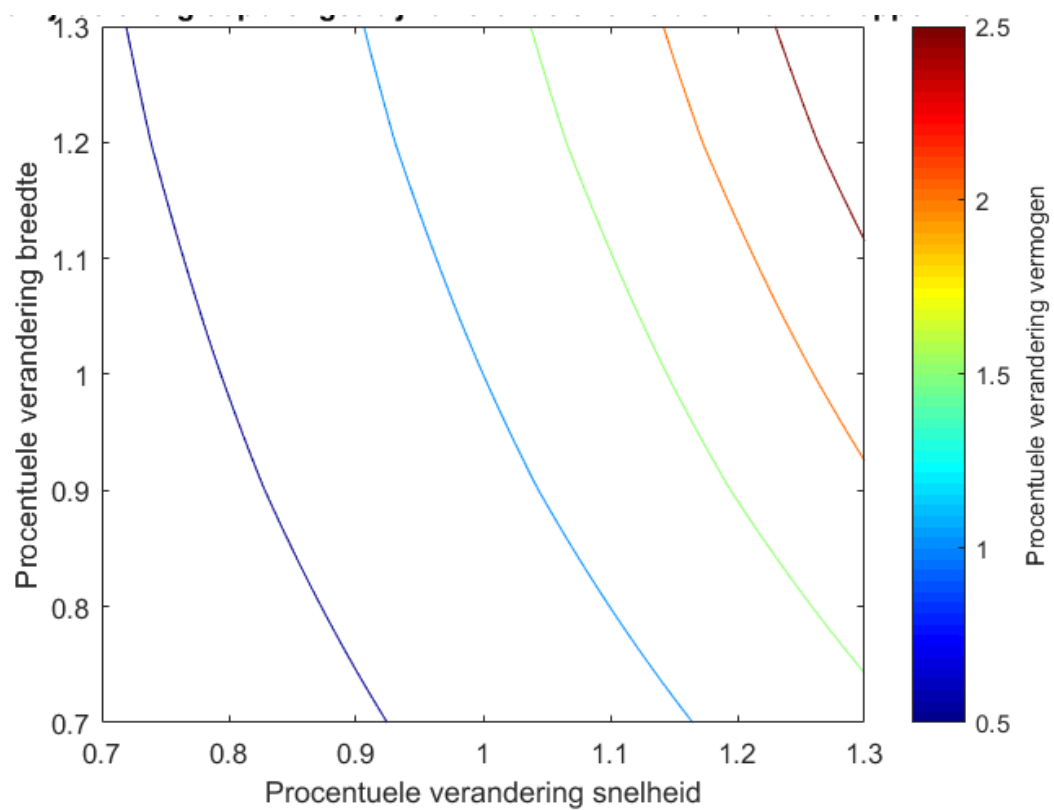
Figuur 51 De jaarlijkse energieopbrengst bij een variërende snelheid en frontaal oppervlak op locatie 1A (Wijhe), het gemarkeerde punt is de uitgangssituatie: het resultaat van paragraaf 6.4.1

Voor beide parameters geldt dat de energieopbrengst sterk afhankelijk is van de gemaakte keuzes. De energieopbrengst neemt sterker toe bij een snelheidstoename dan bij een toename van het frontaal oppervlak. Formule 3.2 is hiervoor de verklaring. De kleurzones laten zien welke combinatie van stroomsnelheid en frontaal oppervlak leiden tot een gelijke energieopbrengst. Figuur 52 geeft een isoplot weer (de contouren van de gekleurde zones).

Uit deze afbeelding valt af te leiden dat voor dezelfde energieopbrengst, bij een kleine procentuele stijging van de stroomsnelheid een sterke stijging benodigd is voor het frontaal oppervlak. Naarmate de stroomsnelheid stijgt, neemt de energieopbrengst sterker toe. De afstand wordt namelijk kleiner tussen de contourlijnen naarmate de stroomsnelheid stijgt.

Wanneer geen opstartsnelheid gehanteerd zou worden, verandert de energieopbrengst bij locatie 1A nauwelijks, zie Bijlage 13.1.5. De energieopbrengst zou dan 2,78 MWh zijn in plaats van 2,75 MWh. De minimale opstartsnelheid heeft dus weinig invloed op de totale energieopbrengst van een locatie.

Daarnaast is ook voor de horizontale as onderzocht wat de energieopbrengst is wanneer de machine alleen werkzaam is als hij volledig onder water staat. De machine heeft dan niet het voordeel meer van grote afmetingen zoals beschreven is in paragraaf 6.4.1. Kleinere afmetingen zijn dan meer in het voordeel vanwege een groter aantal draaiuren, zie ook Bijlage 13.1.7.



Figuur 52 Isoplot van Figuur 50, de energieopbrengst bij variërende stroomsnelheid en frontaal oppervlak

6.5 ECOLOGISCH POTENTIEEL

Deze paragraaf beschrijft het ecologisch potentieel van de waterturbines.

6.5.1 DIERSOORTEN

Het literatuuronderzoek in paragraaf 3.5 beschreef uitsluitend de invloed van waterkrachtcentrales op vissoorten. De machines die energie opwekken uit de stroming van het water zijn in ontwikkeling. De effecten van de machines zijn daarom nog niet helemaal in beeld. De vissterfte is door de beleidsregel (Beleidsregel watervergunningverlening waterkrachtcentrales in rijkswateren, 2015) een belangrijke ecologische factor. In paragraaf 3.5 is beschreven dat bij vervallocaties vergunningen zijn vernietigd, omdat de techniek bij *the worst case scenario* niet voldeed.

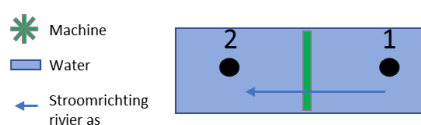
Technieken bij vervallocaties maken meer omwentelingen per minuut dan bij stromingslocaties (Jong, 2009) en gebruiken een groot gedeelte van het debiet dat door de rivier stroomt. Enkele technieken in paragraaf 3.2.2 zijn niet visvriendelijk bij vervallocaties, de technieken bij stromingslocaties zijn wel visvriendelijk. Voor de technieken die gebruikt zijn voor het economisch potentieel geldt dus dat ze visvriendelijk zijn. Daarnaast stroomt alleen een gedeelte van het debiet door een machine in de vrije stroming, voor vissen is er dus meer ruimte de machine te ontwijken.

Er zijn echter geen testen die de vissterfte in praktijk hebben getest bij waterturbines bij kribben. Daarnaast is ook niet het effect van de machines bekend op andere diersoorten, planten en bijvoorbeeld de waterkwaliteit.

6.5.2 RIVIERBODEM

Paragraaf 3.5 beschrijft dat er plannen zijn om de invloed van machines bij kribben op de rivierbodem te onderzoeken. De verwachting is dat door de machine een rustiger stromingsbeeld rondom de krib ontstaat, hierdoor kunnen diepten en ondiepten worden voorkomen. Er is echter nog geen onderzoek dat deze verwachting heeft bevestigd.

Paragraaf 3.4.1 beschrijft het stromingsbeeld rondom de krib en in de kribvakken. Wanneer de formule 3.2 in paragraaf 3.3.1 wordt ingevuld voor een locatie voor en na de machine blijft formule 14.6 over. Er is namelijk geen hoogteverschil tussen beide punten en de druk is bij beiden gelijk omdat het aan het vrije wateroppervlak is gelegen.



Figuur 53 Voorbeeld stroming bij machine

Vanwege het energieverlies door de machine (en overige wrijving), is de snelheid na de machine kleiner dan voor de machine. De verwachting is dat het stromingsbeeld na de machine rustiger verloopt. De energie in het water die de wrijving met de bodem veroorzaakt wordt uit het water gehaald door de machine. Uit paragraaf 3.4.1 blijkt dat dit benodigd is om de diepten en ondiepten na een krib te voorkomen. De stroming rondom een krib is echter veel minder eenvoudig dan in bijvoorbeeld een pijpleiding. Daarnaast is het niet mogelijk de formule te gebruiken voor de situatie direct na een object. Het daadwerkelijke effect zou dus in de praktijk getest moeten worden en / of gesimuleerd moeten worden in een 3D-model.

Door het onderzoeken van het ecologisch potentieel zijn er geen locaties afgefallen en zijn er geen aanpassingen gedaan aan het resultaat bij economisch potentieel.

7 FASE IV: POTENTIEKAART OVERIJSSSEL

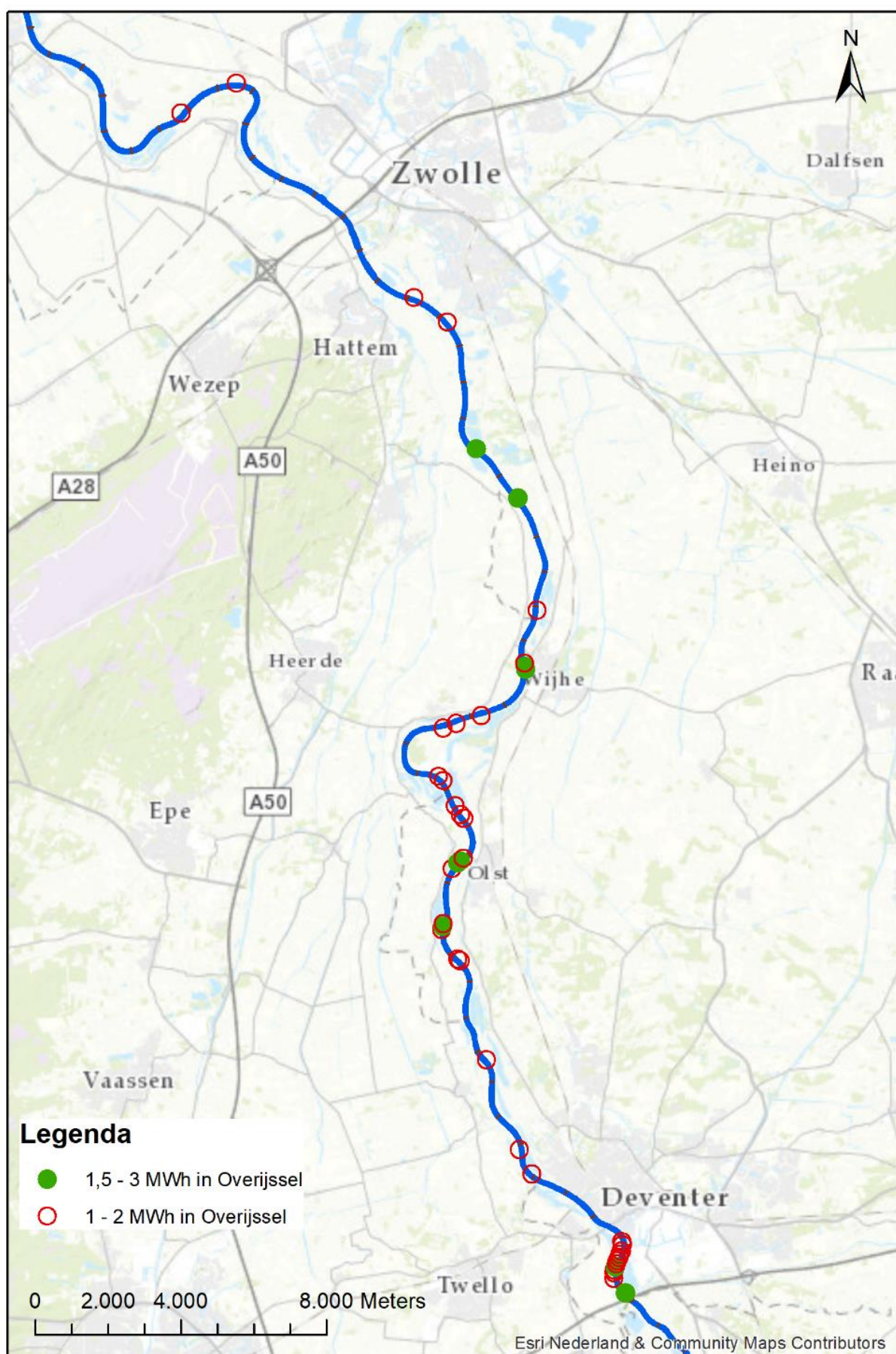
Gezamenlijk bepalen het potentieel aanbod, technisch, economisch en ecologisch potentieel het potentieel van de IJssel in provincie Overijssel. Op de kaart in Figuur 55 zijn in het totaal 41 kriblocaties weergegeven. De locaties zijn opgedeeld in twee categorieën: Categorie 1: 1,5-3 MWh en Categorie 2: 1 -2 MWh. Deze energieopbrengsten zijn geschat bij de afmetingen van een machine tussen de 2,0 meter en 2,5 meter, zie Figuur 54. In Bijlage 14 staan meer afbeeldingen (zoom-ins) van de potentiekaart.

Maximale hoogte machine:	2 meter	2,5 meter
Categorie 1: 1,5-3 MWh	1,5 – 2,1 MWh	2,0 – 2,8 MWh
Categorie 2: 1 -2 MWh	1,1 – 1,5 MWh	1,5 – 2,0 MWh

Figuur 54 Energieopbrengst categorieën

Een gemiddeld huishouden in Provincie Overijssel verbruikt in het jaar 2015 ongeveer 3130 kWh aan elektrische energie per jaar (CBS, 2017). De kriblocaties afzonderlijk kunnen gemiddeld voldoende energie opleveren voor de helft van een huishouden. De kriblocatie met de hoogste energieopbrengst (2,8 MWh) brengt iets minder dan een huishouden verbruikt op.

De 41 kriblocaties die in de provincie Overijssel liggen brengen gezamenlijk ongeveer 63,1 MWh op aan jaarlijkse energie. Dat betekent wanneer alle kriblocaties worden gerealiseerd en deze locaties presteren zoals in dit rapport is berekend, dat de locaties gezamenlijk een hoeveelheid energie kunnen opwekken dat ongeveer door 20 huishoudens in een jaar wordt verbruikt. In hoofdstuk 8 wordt dit resultaat vergeleken met de studie in Gelderland.



Figuur 55 Potentiekkaart jaarlijkse energieopbrengst IJssel Overijssel

Dit hoofdstuk reflecteert op de keuzes, data en resultaten van het onderzoek. De onzekerheden van het onderzoek worden hier beschreven. Deze onzekerheden zijn belangrijk in acht te nemen bij de interpretatie van de resultaten.

STROOMSNELHEID

Een belangrijke factor in het onderzoek is de stroomsnelheid. Zoals uit de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 6.4.2 blijkt, is het resultaat sterk afhankelijk van de stroomsnelheid. Locaties zijn uitgekozen en doorgerekend op basis van stroomsnelheden uit een WAQUA- en een SOBEK-model. Het WAQUA-model heeft als uitkomst dieptegemiddelde snelheden en heeft een grid met een nauwkeurigheid van ongeveer 100 m². Dit model is niet gebouwd met als doel locaties te bepalen voor waterturbines. Het model is echter wel gebruikt omdat dit model het meest nauwkeurige en locatie specifieke resultaat heeft ten opzichte van de andere beschikbare data. Het SOBEK-model is minder locatie specifiek, maar geeft wel het verloop van de waterstanden weer in de breedte van de rivier. Daarnaast is het model verouderd, de samenstelling en hoogte van de bodem is veranderlijk. Dus bij de interpretatie van de uitkomst van dit model moet wel een slag om de arm worden gehouden.

Zoals beschreven in het literatuuronderzoek is de stroomsnelheid veranderlijk en onstuimig rondom een kribkop. Het gedrag van de stroming van het water bij de gekozen kriblocaties is niet in beeld gebracht door het verrichten van metingen op locatie of door simulaties. De gekozen stroomrichting en snelheid zijn gebaseerd op theorie en het WAQUA-model. De stroomrichting en snelheid kunnen beiden dus gezien worden als indicaties.

De onderschrijdingstijden van de debieten en daarbij horende waterstanden zijn inschattingen voor de huidige situatie. De toekomstige situatie kan worden beïnvloed door maatregelen die worden genomen in de bovenstroomse gebied en door klimaatverandering. Deze invloed is niet mee genomen in de indicatie van stroomsnelheden.

Wanneer schepen vlak langs een krib varen wordt de richting en snelheid van de waterstroming beïnvloed (afhankelijk van de massa, snelheid, afstand tot de krib van het vaartuig). De invloed van de scheepvaart is echter niet meegenomen in de indicaties van de stroming.

Bruglocaties zijn afgefallen in het onderzoek vanwege de hinderlijkheid voor scheepvaart. De Wilhemina-brug zou echter nog nader onderzocht kunnen worden. Bij kribben nam het vernauwende effect af bij grotere debieten bij Lobith, het is dus niet bekend wat de stroomsnelheid bij een bruglocatie is bij grotere afvoeren.

Met behulp van deze modellen is de stroomsnelheid en het verloop van de stroomsnelheid in een jaar wel grof in te schatten. Maar exactere modellen en metingen zijn vereist om zekerheid te hebben over de jaarlijkse opbrengst. De uitkomst van onderschrijdingstijden moet nu geïnterpreteerd worden als indicatief.

FRONTAAL OPPERVLAK

De maximale afmetingen van de machine zijn gebaseerd op de kribhoogte. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de afmetingen van de machine een grote invloed uitoefenen op de energieopbrengst. Het is daarom belangrijk dat de waterstanden en afmetingen goed overeenkomen met de werkelijke waarde. De data is afkomstig van hoogtekaarten in het programma ArcGIS uit de database van Rijkswaterstaat. De waterstanden en afmetingen van de krib zijn dus niet in de werkelijke situatie gemeten. Wel is de data gevalideerd door uit dezelfde dataset de hoogte van de zomerdijk te bepalen. De verwachting is dat de waterstand vanaf die hoogte minder sterk toeneemt. Uit de grafieken in Figuur 44 blijkt de kruinhoogte van de zomerdijk overeen te komen met het punt waar de waterstand minder snel toe neemt. Op deze wijze wordt aangenomen dat de

hoogtekaarten corresponderen met de waterstanden. Metingen in de werkelijkheid zouden van toegevoegde waarde zijn om de gekozen afmetingen te valideren.

TECHNIEKEN

Ook de gekozen technieken zijn bepalend voor de jaarlijkse energie opbrengst. Op dit moment zijn de technieken nog in ontwikkeling. De behaalde rendementen zijn getest bij enkele projecten. Deze projecten zijn vaak nog niet projecten op kriblocaties. De gebruikte rendementen en afmetingen zijn dus indicatief. De werking van de machine is niet getest of gemodelleerd op de locatie. De gekozen afmetingen en rendementen kunnen dus afwijken van de daadwerkelijke afmetingen.

RESULTAAT

De geschiktheid van de locaties die bepaald is in de MCA zijn relatief. Dus de uitkomst geeft aan welke alternatief geschikter is dan een ander alternatief binnen de studie. Het geeft niet een geschiktheid aan ten opzichte van andere energiebronnen. De potentiekaart selecteert de locaties die meer potentie hebben dan andere locaties en geeft indicaties van de jaarlijkse opbrengst.

De totale opbrengst is sterk afhankelijk van het gekozen formaat van de machine. Een MCA zou meer van waarde zijn als er meer data bekend is over de maximale afmetingen van de kriblocaties in het studiegebied. Als extra criterium van de MCA zou dan de maximale hoogte van de krib meegenomen kunnen worden.

Studie Gelderland

De potentie van provincie Gelderland wordt van grotere waarde geschat dan in deze studie de potentie van Overijssel. De potentiekaart van Gelderland geeft niet alleen de potentie van de IJssel, maar ook van andere rivieren en wateren die door de Gelderland stromen. In bijvoorbeeld rivier de Nederrijn zijn stuwlocaties aanwezig. Bij deze locaties wordt in verhouding met stromingslocaties vele malen meer energie opgewekt, bij de vervallocatie Driel wordt bijvoorbeeld de jaarlijkse energieopbrengst op 4739 MWh geschat en bij de stromingslocatie in Bronckhorst 25,8MWh. De studie van de IJssel in Overijssel bevat geen stuwlocaties, dus daarmee valt het grote verschil met de studie in Gelderland te verklaren.

De haalbaarheidsstudie Bronckhorst die wordt beschreven in de literatuurstudie (paragraaf 3.4.2) heeft een grotere jaarlijkse energieopbrengst voor een kriblocatie. Het grootste verschil tussen deze studie en in Bronckhorst is het frontaal oppervlak van de machine. De afmetingen van het apparaat in Bronckhorst zijn 5 bij 5 meter, de energieopbrengst van de machine wordt dan dus vier maal zo hoog geschat dan in Overijssel. Daarnaast is bij de studie in Overijssel geschat dat een groot gedeelte van de tijd de machine niet volledig onder water staat, zie Figuur 95. Dit leidt ook tot een lager verwachte energieopbrengst van de locatie. Tot slot worden de stroomsnelheden bij de IJssel in Overijssel lager ingeschat dan in de IJssel bij Bronckhorst. Bronckhorst ligt bovenstrooms in de IJssel, het verschil in stroomsnelheid is verklaard in de omgevingsanalyse (paragraaf 4.1).

9 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Dit onderzoek heeft toegewerkt naar de beantwoording van de hoofdvraag:

Hoofdvraag:

Wat is de potentie voor het opwekken van energie uit de stroming van rivier de IJssel in Overijssel?

Voordat deze hoofdvraag beantwoord kan worden is gekeken naar de potenties in: aanbod, techniek, economie en ecologie. Gezamenlijk bepalen deze potenties de potentie van rivier de IJssel in Overijssel. Per hoofdstuk wordt ook een aanbeveling gedaan over wat nader onderzocht kan worden. Deze aanbevelingen zijn tot stand gekomen door de discussie en conclusie. Ze worden aangegeven met het symbool: '→'.

POTENTIEEL AANBOD

Rivier de IJssel heeft relatief een grote stroomsnelheid. Om energie uit deze stroming op te wekken bestaan er turbines die gaan draaien of trillen door de stroming van het water. De potentie van de omgeving wordt bepaald in gelijke mate door de stroomsnelheid op de locatie en door de scheepvaart. Het was opvallend dat de rivier bovenstrooms Deventer (in Gelderland) grotere snelheden heeft dan benedenstrooms Deventer. Daarnaast hebben locaties bij vernauwingen, zoals bruggen en kribben hogere stroomsnelheden. Naarmate de locatie een hogere stroomsnelheid heeft en zo min mogelijk scheepvaart hindert neemt de potentie van de locatie toe. Locaties bij kribben en bruggen zijn onderzocht in een Multi Criteria Analyse. Kriblocaties zijn als meest kansrijk ingeschat vanwege de relatief hoge snelheden in een gebied dat zo min mogelijk scheepvaart hindert.

- Gedetailleerdere modellen of metingen gebruiken voor de locaties
- Krib- en bruglocaties onderzoeken bovenstrooms Deventer (Gelderland)

TECHNISCH POTENTIEEL

Voor vier technieken is voldoende informatie bekend om ze door te rekenen voor de energieopbrengst. De hoogte van in krib is maximaal 2,5 meter, dus een machine kan geen grotere hoogte hebben dan 2,5 meter. Een machine met de grootst mogelijk afmetingen die niet bij iedere waterstand op vol vermogen draait, zal meer energie opwekken dan een kleinere machine. Er wordt verwacht dat de locatie in het verlengde van de krib de beste locatie is op de krib om de machine te plaatsen. Met behulp van onderschrijdingstijden van debieten bij Lobith en daarbij horende waterstand en stroomsnelheid in de IJssel op de locatie, is het mogelijk een indicatie te geven van de frequenties van stroomsnelheden op locatie. De vernauwende werking van kribben neemt af bij hogere afvoeren. Het voordeel van deze locaties neemt daarom af bij grotere stroomsnelheden. Geen enkele locatie in de verdieping krijgt in een jaar zonder extremen afvoeren snelheden boven de 1 m/s.

- Nader onderzoek doen bij Wilheminabrug bij hoge afvoeren
- Wanneer op de krib een machine geplaatst wordt, moet gezocht naar de maximaal mogelijke afmetingen.
- Een machine zal een optimale werking hebben wanneer het geplaatst wordt in het verlengde van de krib
- Om de stroomsnelheden op locatie beter te schatten moeten simulaties en metingen gedaan worden.
- Scenario's onderzoeken van de toekomstige situatie door bijvoorbeeld klimaatverandering te simuleren
- Onderzoeken of de stroomsnelheid van schepen de stroomsnelheid bij de krib een positieve of negatieve impuls kan geven
- Kribhoogten onderzoeken voor een extra criterium



ECONOMISCH POTENTIEEL

Voor de locaties is voor machines met een horizontale en verticale as een inschatting gemaakt hoeveel energie de locaties mogelijk opleveren. Het blijkt dat op de gekozen locaties de verticale as-machines in het voordeel zijn. De machines leveren tussen de 1MWh en 2,8 MWh per jaar op voor de verschillende onderzochte locaties. Een locatie kan dus jaarlijks minder energie opleveren dan verbruikt wordt voor een gemiddelde woning in Overijssel.

→ Een database aanmaken met de kribhoogten en dit gebruiken als extra criterium in de MCA



ECOLOGISCH POTENTIEEL

De ecologische effecten van machines zijn op dit moment nog niet voldoende in beeld. Dit is te wijten aan de ontwikkelingsfase waarin de huidige technieken zich nu bevinden. De verwachting is dat de problemen met vissterfte in mindere mate tot nauwelijks aanwezig zijn bij machines in de vrije stroming in vergelijking met de stuwlocaties. Daarnaast blijkt uit het literatuuronderzoek dat verwacht wordt dat de machines een positieve bijdrage leveren aan de vervorming van de rivierbodem.

→ Nader onderzoek doen naar de ecologische effecten in de praktijk



POTENTIE OVERIJSSSEL

In een overzichtskaart zijn de locaties aangegeven waarvan verwacht wordt dat ze een soortgelijke energieopbrengst zullen opleveren als in de uitweiding. De verwachte energie opbrengst heeft geen groot aandeel van de energieconsumptie door inwoners. In het totaal zou er ongeveer 63,1 MWh (ongeveer 20 huishoudens) aan energie kunnen worden opgewekt in een jaar. De onderzochte locaties waarvan verwacht wordt dat ze de meest gunstige uitkomst hebben voor het studiegebied brengen afzonderlijk van elkaar minder elektriciteit op dan door één huishouden wordt verbruikt. In de kaart worden daarom geen kriblocaties aangegeven die minder goede verwachtingen hebben dan in de uitweiding.

Het opwekken van energie bij kriblocaties in rivier de IJssel in Overijssel zal geen groot aandeel hebben in de energievoorziening voor provincie Overijssel. Daarom wordt geadviseerd om nader onderzoek te doen naar andere locaties.

→ Stuwlocaties onderzoeken in de kanalen in Overijssel

10 BIBLIOGRAFIE

Haestad Methods. (2002). *Basic Hydraulic Principles*.

Beleidsregel watervergunningverlening waterkrachtcentrales in rijkswateren. (2015, januari 1). Opgehaald van Overheid.nl: <http://wetten.overheid.nl/BWBR0035841/2015-01-01>

Broers, M. (2017, juni 20).

CBS. (2016, December 21). *Hernieuwbare energie; verbruik naar energiebron, techniek en toepassing*. Opgehaald van Statline: <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=83109NED&D1=0-1&D2=0-2,5,11,18-22,28-30,35&D3=a&D4=24-25&HD=160527-1037&HDR=T,G2&STB=G1,G3>

CBS. (2017, juni 29). *Energieverbruik particuliere woningen; woningtype en regio's*. Opgehaald van Centraal Bureau voor Statistiek, Statline: <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=81528NED>

Dörrbecker, M. (2017, juli 11). *Karte der Aufteilung der Abflüsse im Rhein-Maas-Delta 2000-2011*. Opgehaald van Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Chumwa#/media/File:Map_of_the_annual_average_discharge_of_Rhine_and_Maas_2000-2011_\(DE\).png](https://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Chumwa#/media/File:Map_of_the_annual_average_discharge_of_Rhine_and_Maas_2000-2011_(DE).png)

EQA. (2017, Juni 21). *EQA-river*. Opgehaald van EQA Projects : <http://eqaprojects.com/eqa-river>

EQA projects. (2017, juli 9). *EQA river*. Opgehaald van EQA projects: <http://eqaprojects.com/eqa-river>

Flokstra, C. & S. Van Schijndel (2002). *Innovatieve kribben met palenrijen: flankerende berekeningen met Delft3D in combinatie met HLES*. Q3101.

GMB slibverwerking. (2017, juli 9). *Energie uit waterkracht*. Opgehaald van Bouwen met Energie: https://www.gmb.eu/images1/gmb/data/pdf/Energie_uit_waterkracht.pdf

Hoes, O., Meijer, L., van der Ent, R., & van de Giesen, N. (2017, februari 8). *Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential*. Opgehaald van PLoS ONE 12(2): e0171844: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171844>

IF Technology. (2016). *Landelijke verkenning warmte en koude uit Rijkswateren en kunstwerken*.

Jong, R. d. (2009). *Potentie duurzame energie bij kunstwerken*. Opgehaald van Deltares: <http://edepot.wur.nl/145523>

Kerkhof, F. (2016, November 9). *Alternatieve Energie [Motie Vreemd]*. Opgehaald van Provincie Overijssel: <http://www.overijssel.nl/bestuur/provinciale-staten/moties-amendementen/moties-amendementen/>

Konsoer, K., Rhoads B.L., Best, J.L., Langendoen, E.J., Abad, J.D., Parsons, D.R. & Garcia M.H. (2016, December 27). Three-dimensional flow structure and bed morphology in large elongate meander loops with different outer bank roughness characteristics. *Water Resources Research*, pp. 9621–9641.

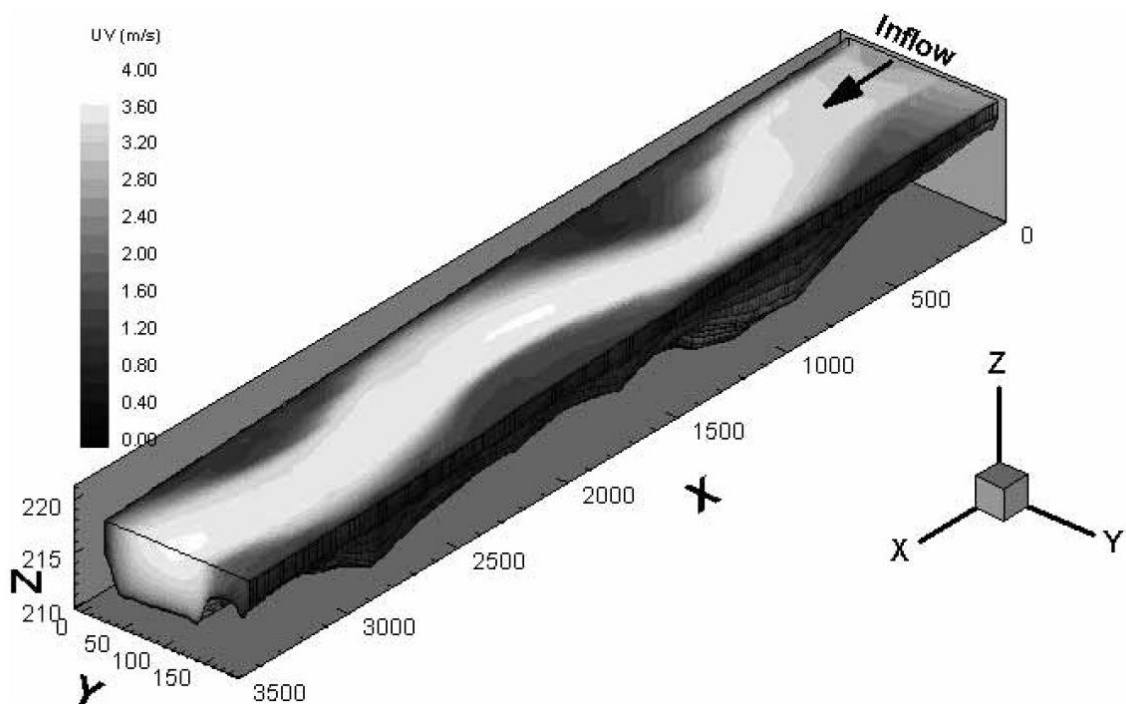
Lako, P. (2012). *Energie uit water*. Opgehaald van ECN: <ftp://130.112.2.101/pub/www/library/report/2012/l12003.pdf>

Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*.

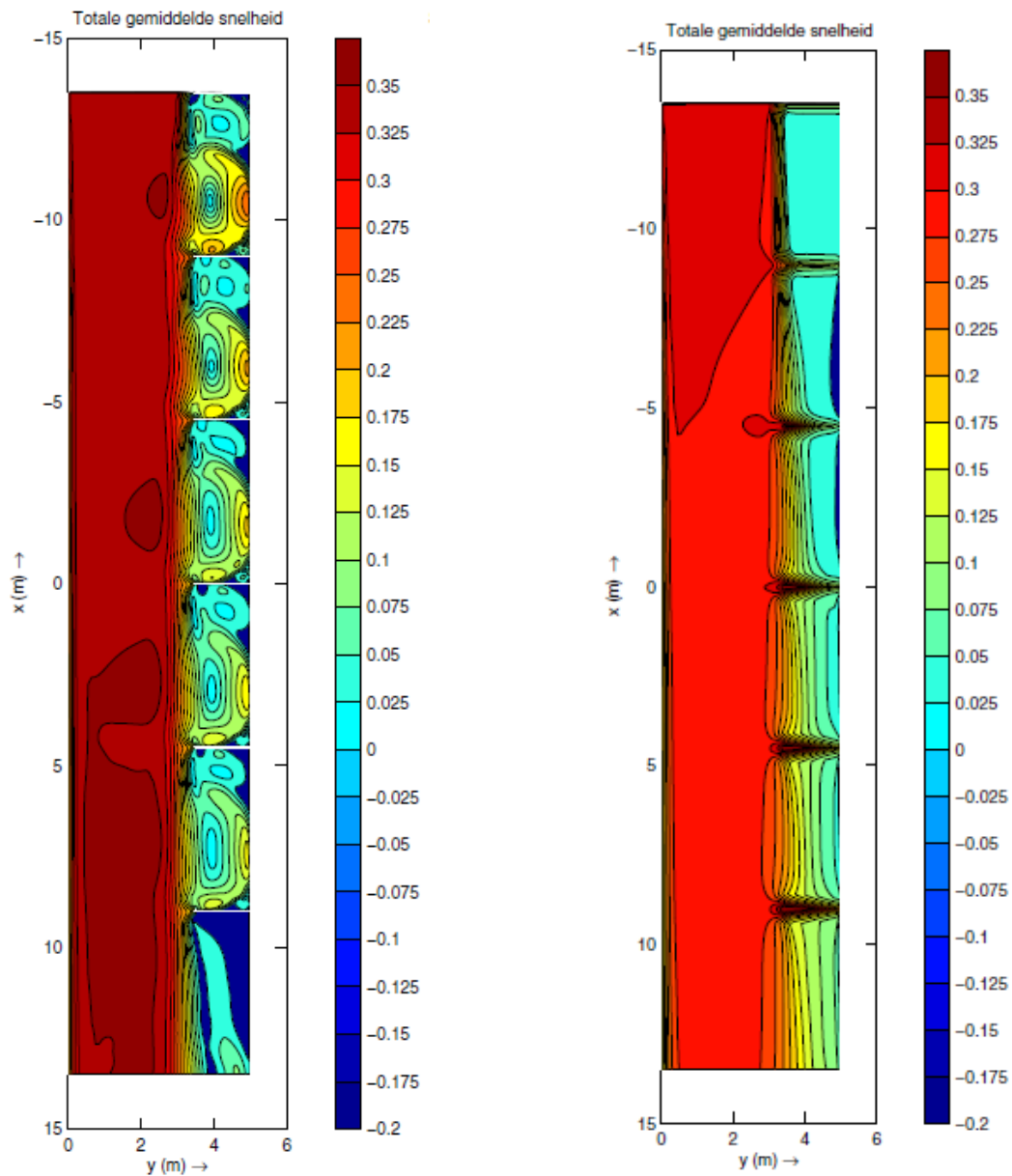
New Energy Corporation. (2017, juli 9). *Mounting Configurations*. Opgehaald van New Energy Corporation: <http://www.newenergycorp.ca/mounting-configurations.html>

- Noortgaete, T. V. (2016a). *Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland*. Royal HaskoningDHV.
- Noortgaete, T. V. (2016b). *Aanvullende werkzaamheden: Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland*. Royal HaskoningDHV.
- Oryon Watermill. (2017, juli 9). *Rivieren*. Opgehaald van Oryon Watermill: <http://www.oryonwatermill.com/everywhere/rivieren/>
- Pro Tide. (2016). *Assessing tidal turbine performance and the relationship between the turbine output power and turbulence in a tidal estuary (1)*. Asian Wave and Tidal Energy Conference series.
- Provincie Overijssel. (2017, Februari 1). *6 Voorstel programma Nieuwe Energie Overijssel 2017 - 2023 - PS/2016/1064*. Opgehaald van Vergadering Provinciale Staten: <https://overijssel.stateninformatie.nl/vergadering/386705/Provinciale%20Staten%2025-01-2017>
- Rechtbank Midden-Nederland. (2017, april 25). *ECLI:NL:RBMNE:2017:2109*. Opgehaald van de Rechtspraak: <http://deeplink.rechtspraak.nl/uitspraak?id=ECLI:NL:RBMNE:2017:2109>
- Ribberink, J., & Hulscher, S. (2012). *Shallow Water flows*. Enschede: Universiteit Twente.
- RTE Adviesgroep. (2017, juli 8). *Technology Readiness Levels (TRL)*. Opgehaald van <http://www.rte.nl/en/node/281>
- Schottel Hydro. (2017, Juni 21). *Schottel Hydro*. Opgehaald van Schottel: https://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/SCHOTTEL_HYDRO/SCHOTTEL_HYDRO_Instream_Energy.pdf
- Sharifi, M. v. (2007). *Spatial Decision Support Systems: Theory and Practice*. ISPRS WG II/IV.
- Sieben, A. (2009). *Memo: Wanden in de Waal, onderzoek naar de invloed van kribkoppen op de lokale bodemligging*. Rijkswaterstaat.
- Sørensen, H., & Fernández Chozas, J. (2010). *The Potential for Wave Energy in the North Sea*. Opgehaald van International Conference on Ocean Energy.
- T. Stoesser, C. A. (2003, maart). Application of a 3D numerical model to a river with vegetated floodplains. *Journal of Hydroinformatics Mar 2003, 5 (2) 99-112*; , pp. 99-112.
- Tocardo Tidal Power. (2017, juli 7). *Rivers*. Opgehaald van Tocardo Tidal Power: <http://www.tocardo.com/solutions/rivers/>
- van Mazijk, A. (2002, July 30). Modelling the effects of groyne fields on the transport of dissolved matter within the Rhine Alarm-Model. *Journal of Hydrology Volume 264*, pp. 213-229. Opgehaald van J.
- van Schijndel, S. A. (2002). *Anticiperend onderzoek kribben: rekenen rondom kribben met HLES*. Deltares (WL).
- Vortex Hydro Energy. (2017, juli 9). *How it works*. Opgehaald van Vortex Hydro Energy: <http://www.vortexhydroenergy.com/Technology/Works.html>
- Vriese, F. (2015). *Evaluation of Fish Injury and Mortality Associated with scale models of the Pentair Fairbanks Nijhuis Modified Bulb turbine and the Water2Energy Cross flow turbine*. ATK&B.
- Water 2 Energy. (2017, juli 9). *Vertical Axis Water Turbine*. Opgehaald van Water 2 Energy: <http://www.water2energy.nl/Water2Energy/Turbine.html>

Zucca et. al., A. , Sharifi, A.M. & Fabbri, A.G.(2007, April 9). Application of spatial multi-criteria analysis to site selection for a local park: A case study in the Bergamo Province, Italy. *Elsevier Journal of Environmental Management* 88, pp. 752-769. Opgehaald van <http://www.csun.edu/~sd1229/690H/Application%20of%20spatial%20multi%20criteria%20analysis%20to%20site%20selection%20for%20a%20local%20park.pdf>



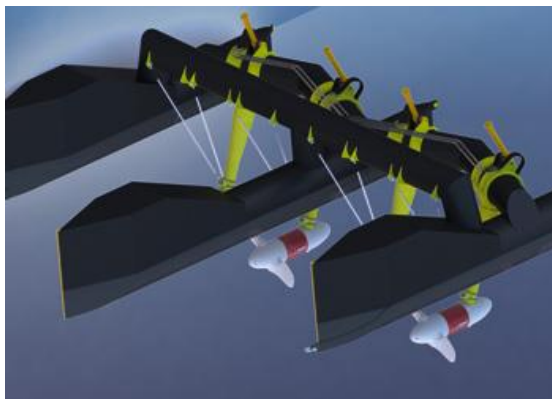
Figuur 57 3D-tekening van Figuur 14 (T. Stoesser, 2003)



Figuur 58 Verschil gemiddelde stroomsnelheid kribben (links onderstroomd, rechts overstroomd)

11.2.1 TOCARDO

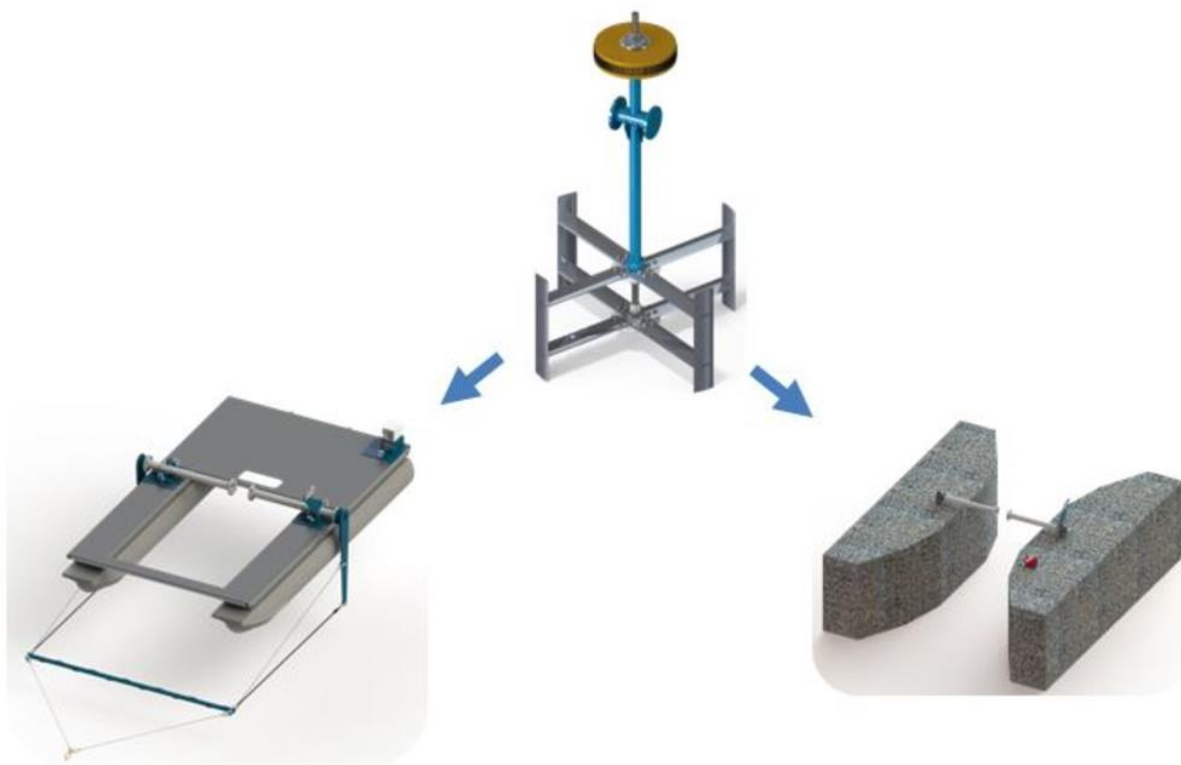
De machine van Tocado Tidal Power type 1 heeft twee rotorbladen. De machines kunnen worden vastgemaakt aan een kunstwerk door middel van een constructie. De turbines kunnen door middel van een hefboom uit het water worden getild. Ook is het mogelijk een drijvend platform te gebruiken.



Figuur 59 Tocado Type 1 op een drijvend platform (Tocado Tidal Power, 2017)

11.2.2 ENCURRENT

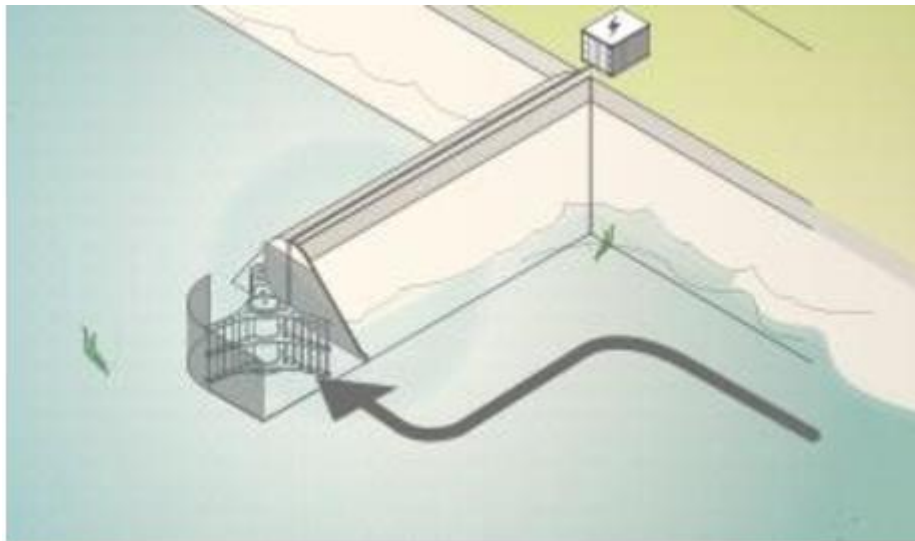
De verticale as turbine EnCurrent van New Energy Corporation kan geklemd worden op een locatie met een vernauwing of kan worden geplaatst op een drijvende constructie.



Figuur 60 Encurrent (New Energy Corporation, 2017)

11.2.3 ORYON

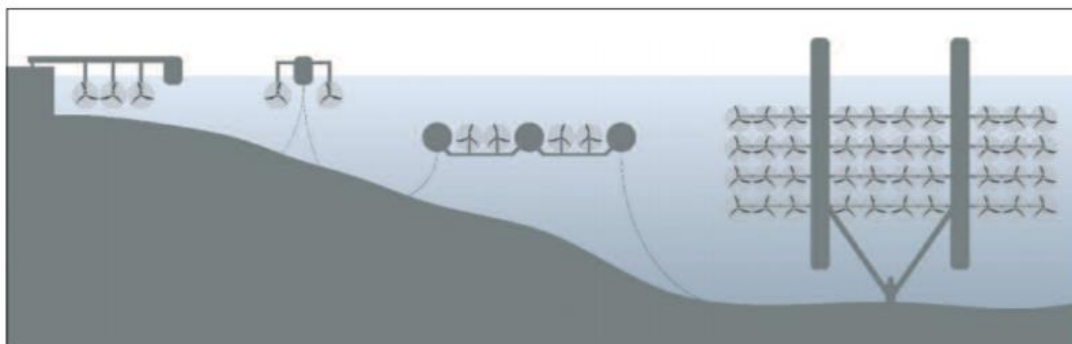
De vertical as turbine van Oryon Watermill is te plaatsen bij de kribkop.



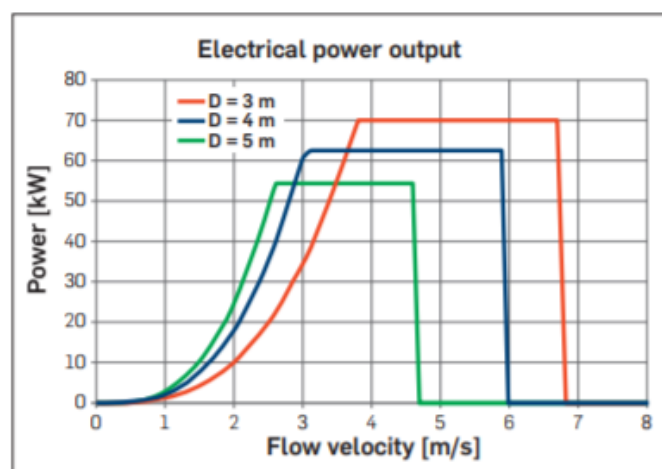
Figuur 61 Oryon Watermill bij de krib (Oryon Watermill, 2017)

11.2.4 SCHOTTEL

De turbines met horizontale as zijn van oorsprong schepsschroeven. Ze kunnen worden vastegemaakt aan een (drijvende) constructie. Het rendement is af te leiden van Figuur 63.



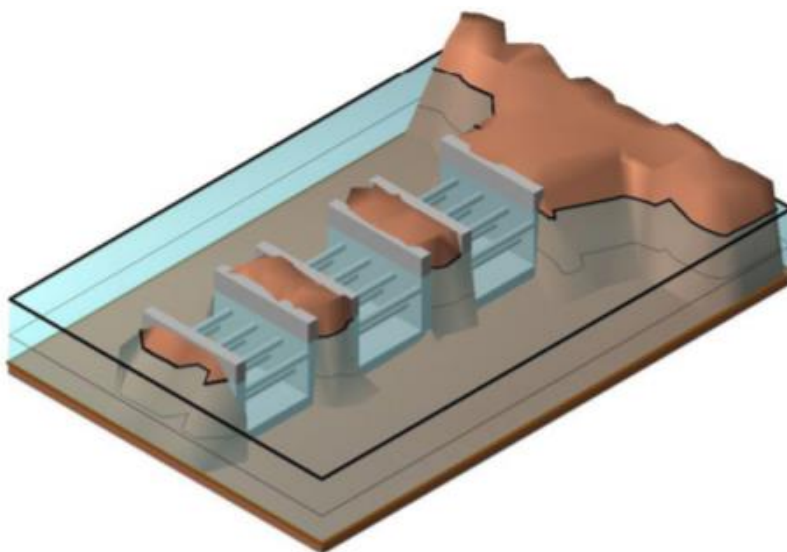
Figuur 62 Turbines van Schottel (Schottel Hydro, 2017)



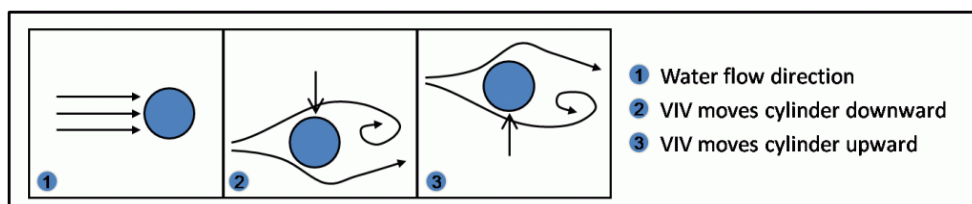
Figuur 63 Elektrisch vermogen machines bij stroomsnelheid (Schottel Hydro, 2017)

11.2.5 VIVACE

Door de stroming van het water gaan de horizontale buizen van de oscillator trillen. Deze trilling wekken elektrische energie op. De machines zouden onder andere geplaatst kunnen worden in de krib.



Figuur 64 Vivace in de krib (GMB slibverwerking, 2017)



Figuur 65 Werking van Vivace (Vortex Hydro Energy, 2017)

11.2.6 WATER2ENERGY

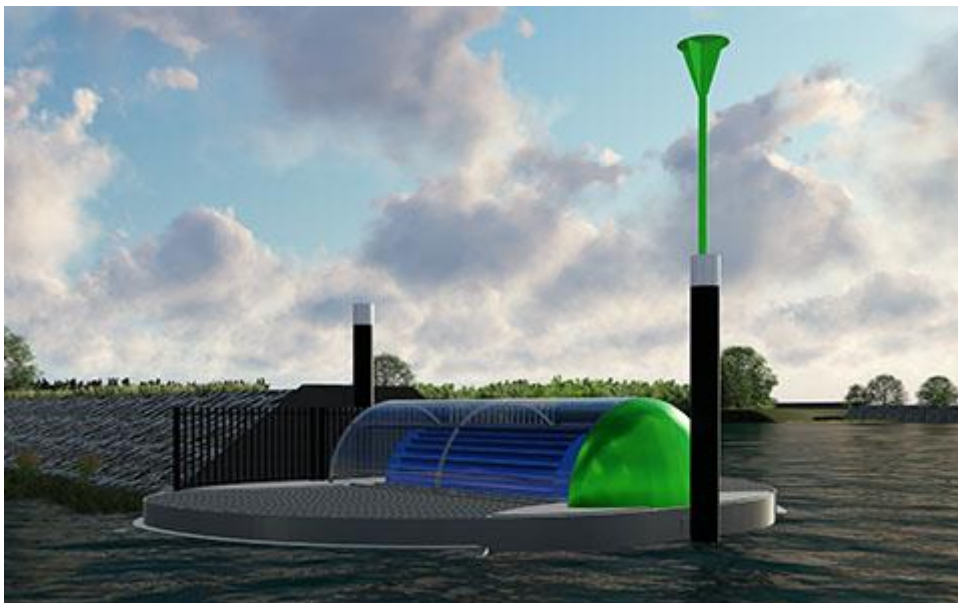
De website van Water2Energy vermeldt dat de rendementen van de machine kunnen oplopen tot 0,45 (Water 2 Energy, 2017). Echter bij stroomsnelheden tussen de 0,8 en 1,1 m/s is dit rendement 0,3 (Pro Tide, 2016).



Figuur 66 Water2Energy turbine

11.2.7 EQA

De afgebeelde machine is een drijvende constructie bij de kribkop. De helft van de machine drijft boven water zodat bij de terugkerende bladen minder weerstand wordt ondervonden dan in het water.



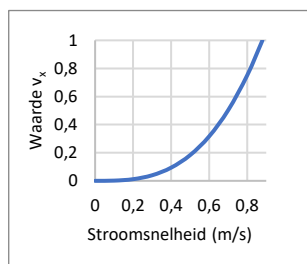
Figuur 67 EQA-river bij een krib (EQA projects, 2017)

12 BIJLAGE II EVALUATIE

12.1 CRITERIA EN EISEN

Deze paragraaf beschrijft het theoretisch op te wekken vermogen in de IJssel.

Waardering stroomsnelheid

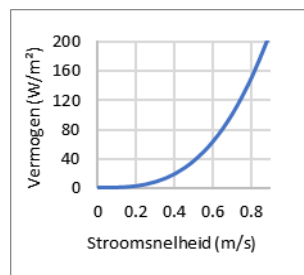


$$v_x = \frac{1}{v_{max}^3} \cdot v$$

$$v_{max} = 0,88$$

$$\text{Dus: } V_x = \frac{1}{0,88^3} \cdot v$$

Vermogen afhankelijk van stroomsnelheid



$$P_x = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$\eta = 0,593$$

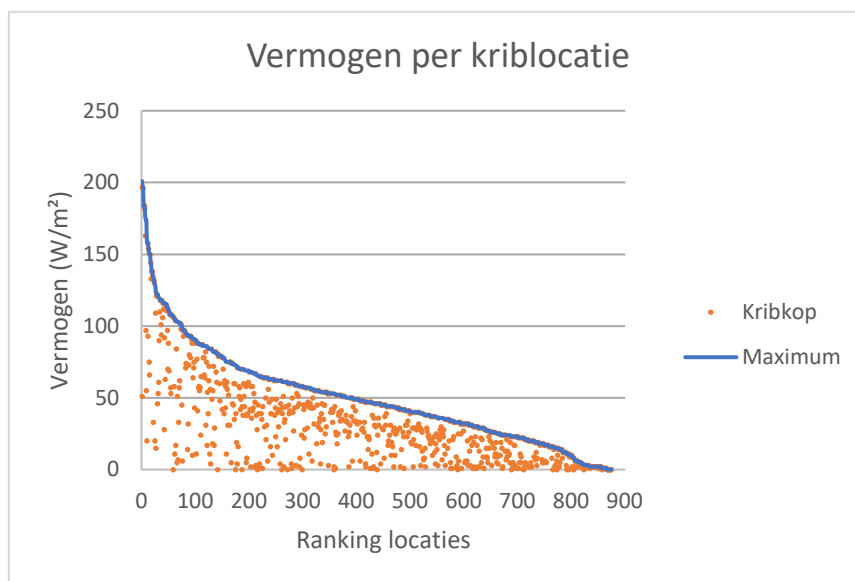
$$\rho = 1000$$

$$A = 1$$

$$\text{Dus: } P_x = \frac{1}{2} \cdot 0,593 \cdot 1000 \cdot v^3$$

12.2 BRUGGEN

	Brugnaam	Gemeente	Maximale afstand van vaargeul tot normaallijn (m)
1	Verkeersbrug Rijksweg A1	Deventer	30
2	Molenbrug (verkeersbrug)	Kampen	50
3	Katerveer 1 (verkeersbrug)	Zwolle	40
4	Katerveer 2 (verkeersbrug Rijksweg A28)	Zwolle	40
5	Wilhelminabrug/Verkeersbrug N334	Deventer	20
6	Eilandbrug (verkeersbrug)	Kampen	20
7	Spoorbrug Deventer	Deventer	25
8	Stadsbrug Kampen (verkeersbrug)	Kampen	20 Linker over en 80 Rechter oever
9	Spoorbrug Hanzelijn	Zwolle	40



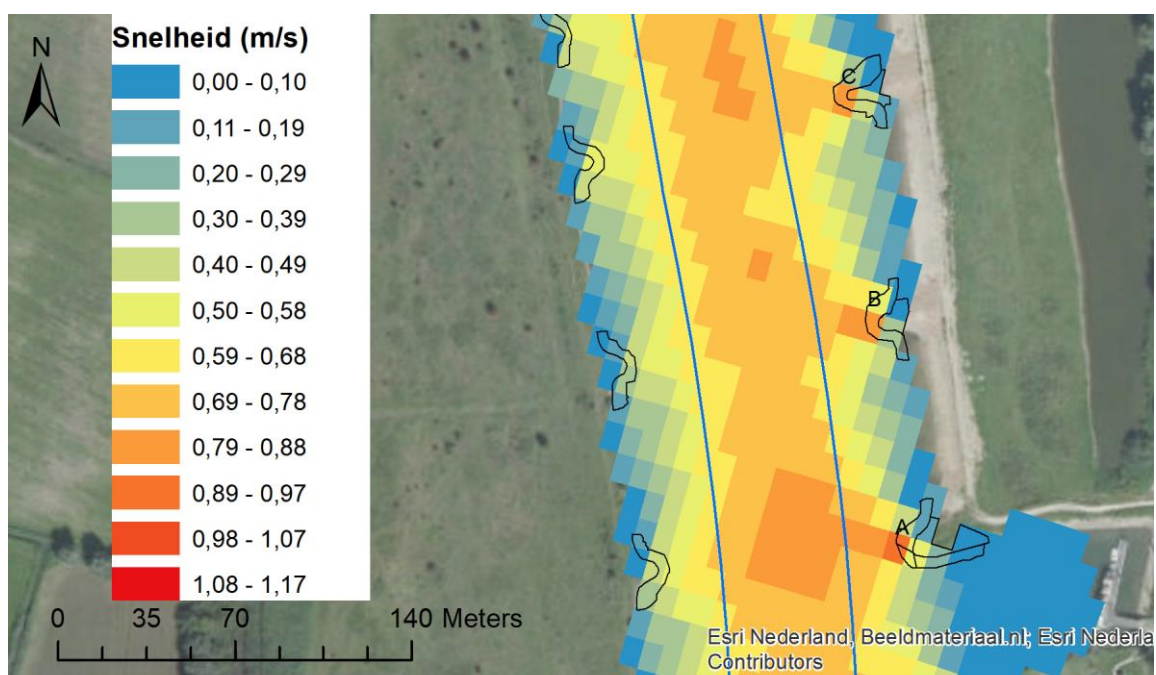
Figuur 68 Vermogen per kriblocatie

13.1.1 LOCATIEAFBEELDINGEN

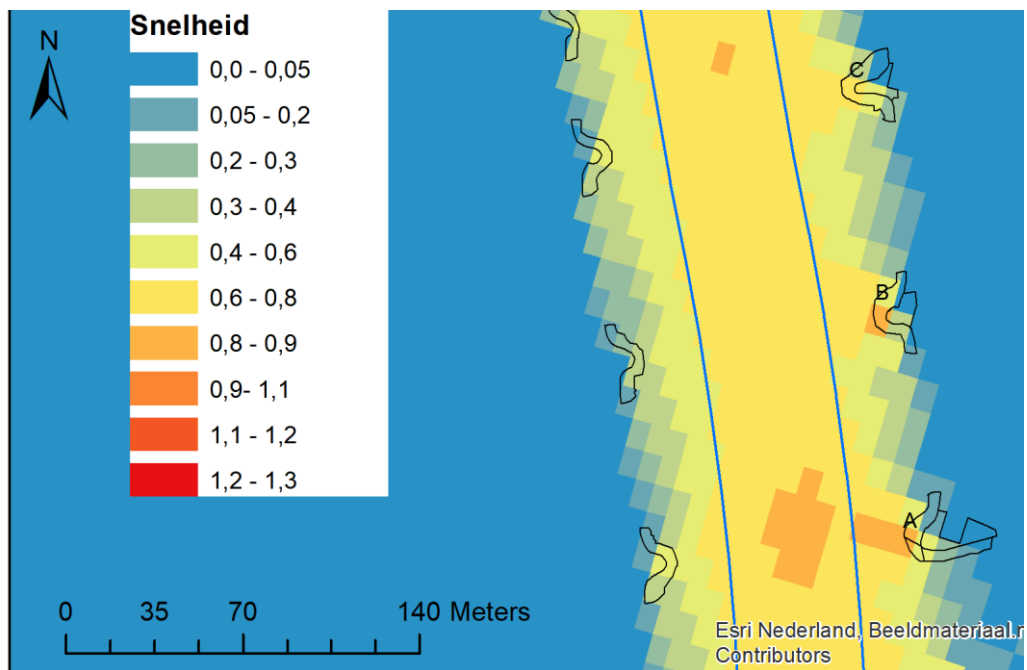
LOCATIE 1



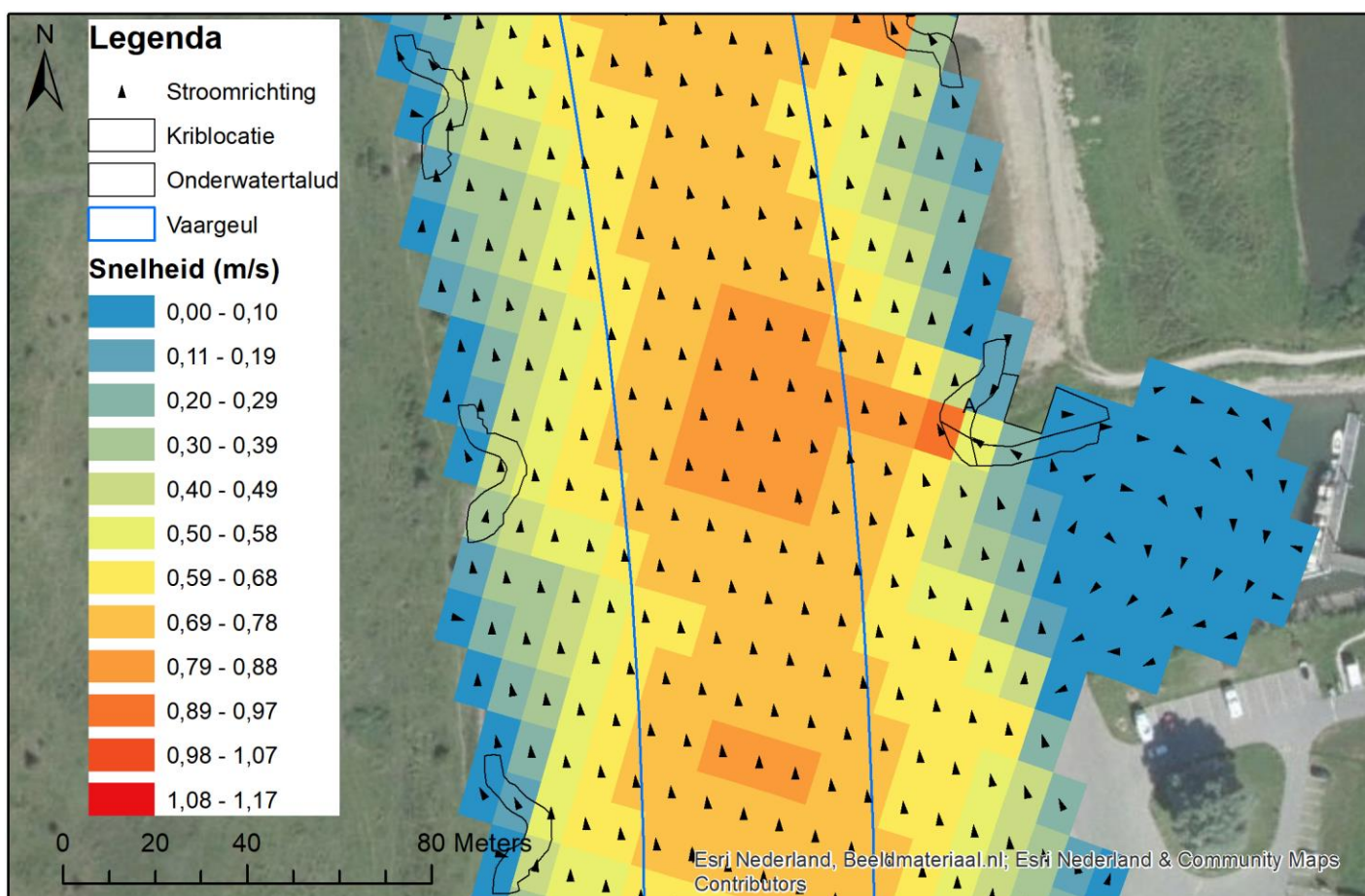
Figuur 69 Luchtfoto locatie 1



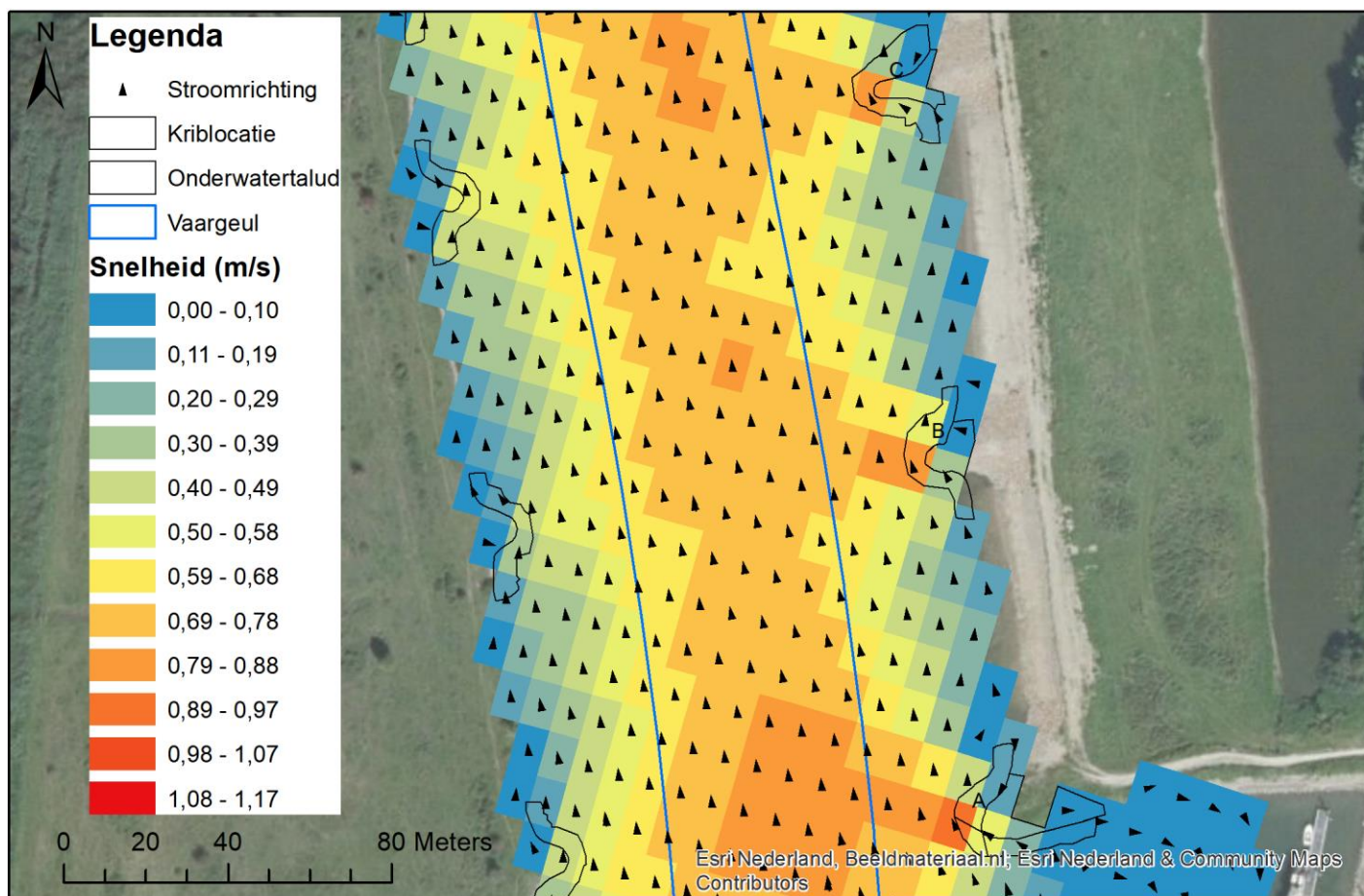
Figuur 70 Output WAQUA bij afvoer Lobith 2000 m³/s



Figuur 71 Output WAQUA bij afvoer Lobith 4000 m³/s



Figuur 72 Richting van de stroming bij afvoer Lobith 2000 m³/s locatie 1A

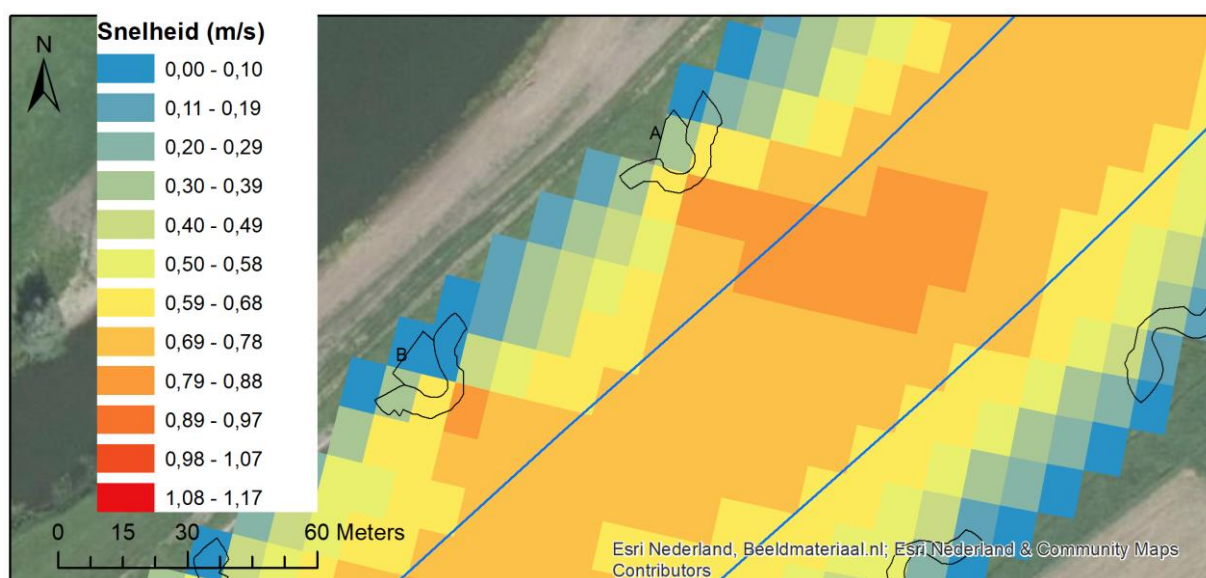


Figuur 73 Richting van de stroming bij afvoer Lobith 2000 m³/s locatie 1

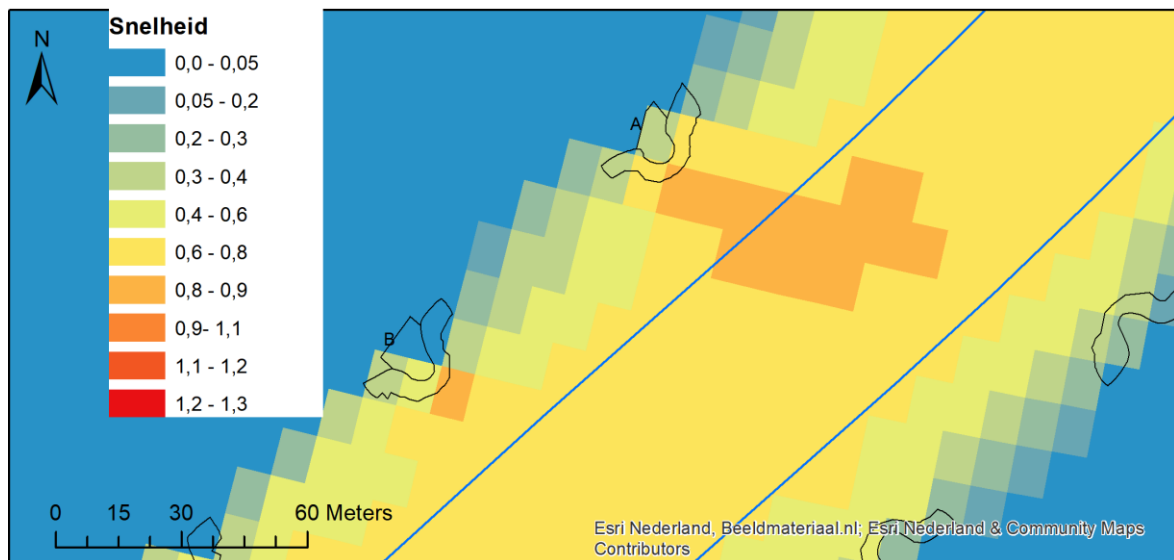
LOCATIE 2



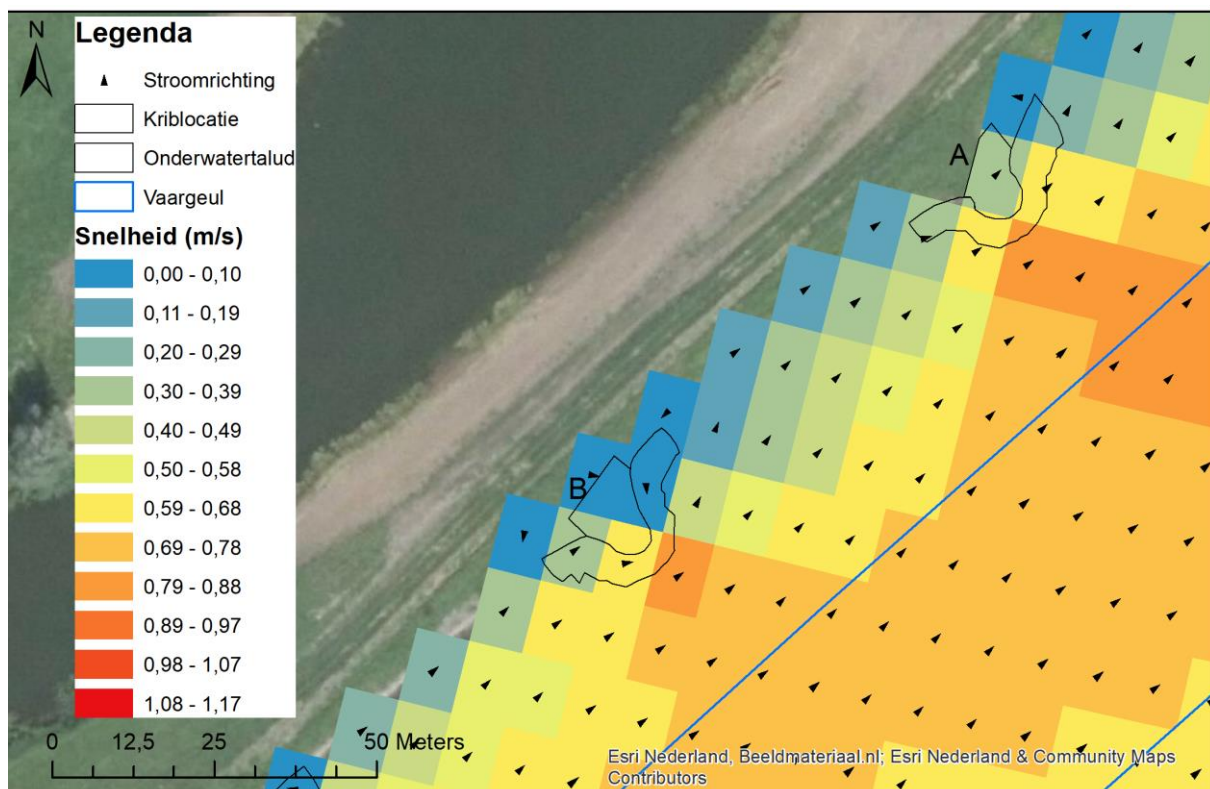
Figuur 74 Luchtfoto locatie 2



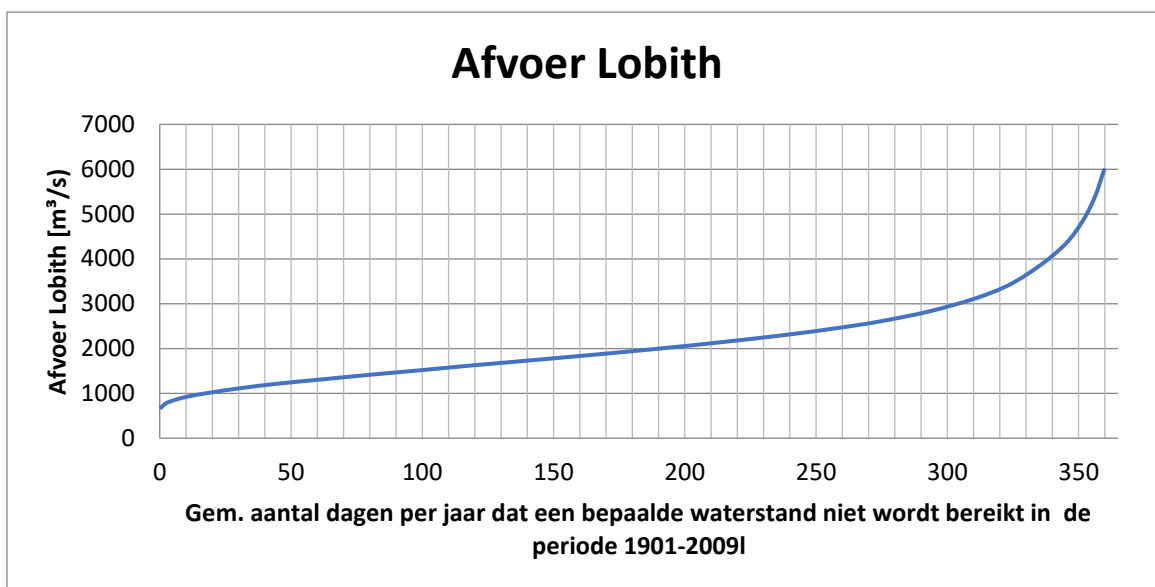
Figuur 75 Output WAQUA afvoer Lobith 2000 m³/s



Figuur 76 Output WAQUA afvoer Lobith 4000 m³/s



Figuur 77 Richting van de stroming bij afvoer Lobith 2000 m³/s

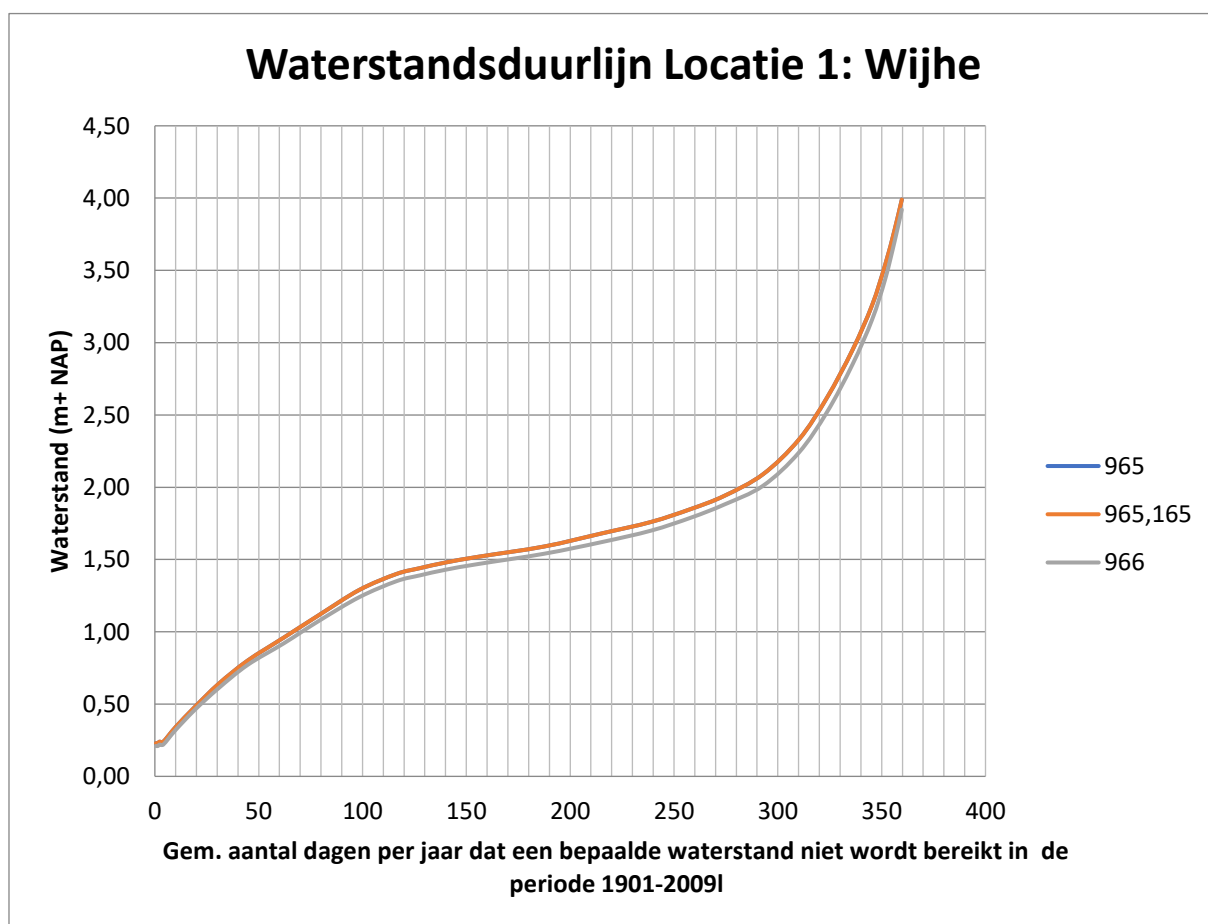


Afvoer (m³/s)	Gem. onderschr. 1901-2009 (dagen per jaar)	Herh. tijd v/d topafvoer (jaren)
679	0.49	
698	0.78	
735	1.49	
773	2.28	
821	4.07	
918	9.94	
1016	19.24	
1114	30.69	
1213	44.58	
1312	62.07	
1411	79.50	
1510	98.49	
1608	116.34	
1665	127.54	
1730	140.20	
1813	156.17	
1981	187.50	
2148	215.01	
2307	239.00	
2457	258.23	
2602	274.16	
2824	292.87	
3108	310.16	
3423	323.69	
3882	335.98	
4357	345.41	
4859	351.71	
5384	356.22	
5982	359.70	
6577		1.3
7263		2.1
8162		3.8
9215		7.6
10425		16.9
11796		46
13327		154

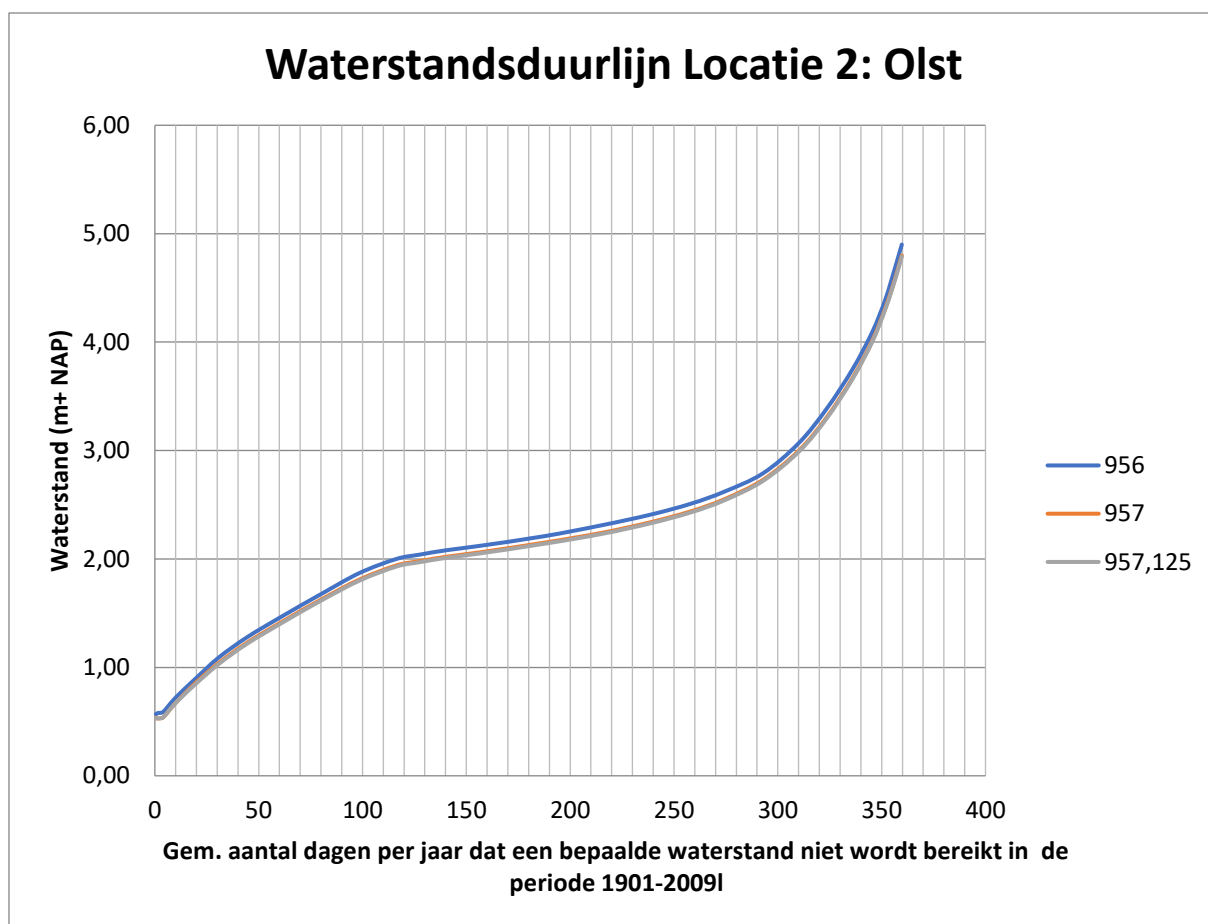
Figuur 78 Onderschrijdingstijden (Bron: RWS)

Debiet (m³/s)	Onderschrijdings-frequentie	Debiet (m³/s)	Onderschrijdings-frequentie	Debiet (m³/s)	Onderschrijdings-frequentie
679	0.49	1594	113.79	3397	322.57
698	0.78	1608	116.34	3423	323.69
735	1.49	1665	127.54	3600	328.43
773	2.28	1730	140.20	3854	335.23
821	4.07	1764	146.74	3882	335.98
838	5.10	1813	156.17	4000	338.32
918	9.94	1949	181.53	4100	340.31
1016	19.24	1981	187.50	4352	345.31
1046	22.75	2000	190.63	4357	345.41
1114	30.69	2148	215.01	4859	351.71
1213	44.58	2307	239.00	4908	352.13
1312	62.07	2457	258.23	5384	356.22
1407	78.80	2602	274.16	5514	356.98
1411	79.50	2622	275.85	5982	359.70
1451	87.17	2824	292.87		
1510	98.49	3108	310.16		

Figuur 79 Onderschrijdingsfrequenties debieten bij Lobith (geïnterpoleerde waarden blauw gemarkeerd)



Figuur 80 Duurlijnen waterstand locatie 1



Figuur 81 Duurlijnen waterstand locatie 2

13.1.3 STROOMSNELHEDEN

WIJHE 1A

Snelheid (m/s)				
Debiet (m³/s)	Frequentie	SOBEK 965.08	Geschatte snelheid	Kriblocatie 1A
838	5.10	0.36	0.54	0.49
1046	22.75	0.43	0.65	0.59
1407	78.80	0.54	0.81	0.74
1451	87.17	0.55	0.83	0.76
1594	113.79	0.58	0.88	0.80
1764	146.74	0.58	0.88	0.80
1949	181.53	0.58	0.88	0.80
2000	190.63	0.58	0.88	0.80
2622	275.85	0.66	0.99	0.80
3397	322.57	0.77	1.15	0.80
3600	328.43	0.80	1.20	0.80
3854	335.23	0.82	0.86	0.80
4000	338.32	0.82	0.86	0.80
4352	345.31	0.86	0.90	0.84
4908	352.13	0.87	0.92	0.85
5514	356.98	0.85	0.89	0.83
6220		0.85	0.90	0.83
7069		0.86	0.90	0.83
7932		0.87	0.92	0.85
9417		0.97	1.01	0.94
10875		1.04	1.09	1.02
12654		1.08	1.13	1.06
15000		1.12	1.18	1.09
16000		1.14	1.20	1.11

OLST 2A

Snelheid (m/s)				
Debiet (m³/s)	Frequentie	SOBEK 956.6	Geschatte snelheid	Kriblocatie 1A
838	5.10	0.43	0.55	0.55
1046	22.75	0.49	0.63	0.63
1407	78.80	0.59	0.76	0.76
1451	87.17	0.60	0.77	0.77
1594	113.79	0.63	0.81	0.81
1764	146.74	0.63	0.81	0.81
1949	181.53	0.63	0.81	0.81
2000	190.63	0.63	0.81	0.82
2622	275.85	0.69	0.89	0.83
3397	322.57	0.79	1.01	0.84
3854	335.23	0.83	1.07	0.85
4000	338.32	0.86	0.87	0.87
4100	340.31	0.86	0.87	0.87
4352	345.31	0.87	0.87	0.87
4908	352.13	0.89	0.90	0.90
5514	356.98	0.87	0.87	0.87
6220		0.87	0.87	0.87
7069		0.89	0.90	0.90
7932		0.91	0.92	0.92
9417		1.00	1.00	1.00
10875		1.12	1.13	1.13
12654		1.20	1.21	1.21
15000		1.27	1.28	1.28
16000		1.31	1.32	1.32

13.1.4 FORMULES DRAAIUREN

Het aantal draaiuren is bepaald met de Riemannsom. De waterstand in de machine is bepaald door het verschil in hoogte t.o.v. NAP te berekenen tussen de waterstand en de voet van de krib te bepalen.

	Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)
1	272,94	0,49	0,16
2	884,36	0,59	0,43
3	773,13	0,74	0,94
4	419,93	0,76	1
5	714,83	0,88	1,16
6	812,91	0,88	1,16
7	526,66	0,88	1,16
8	1131,76	0,88	1,16
9	1583,32	0,88	1,58
10	631	0,88	2,26
12	151,88	0,87	2,5
13	118,72	0,87	2,63
14	120,97	0,86	3
15	165,7	0,9	>3
16	139,99	0,92	>3
17	90,83	0,89	>3
18	96,28	0,89	>3
19	63,6	0,9	>3

Figuur 82 Locatie 1A: Aantal draaiuren, stroomsnelheid en waterstand

	Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)
1	272,94	0,55	0
2	884,36	0,63	0
3	773,13	0,76	0,41
4	419,93	0,77	0,48
5	714,83	0,81	0,67
6	812,91	0,81	0,67
7	526,66	0,81	0,67
8	1131,76	0,82	0,7
9	1583,32	0,83	1,15
10	712,62	0,84	1,91
12	188,99	0,85	2,32
13	60,93	0,87	2,44
14	83,86	0,87	2,53
15	141,88	0,87	2,73
16	139,99	0,9	3,12
17	90,83	0,87	3,35
18	96,28	0,87	3,55
19	63,6	0,87	3,82

Figuur 83 Locatie 1C: Aantal draaiuren, stroomsnelheid en waterstand

	Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)
1	272,94	0,49	0,14
2	884,36	0,59	0,41
3	773,13	0,73	0,91
4	419,93	0,75	0,97
5	714,83	0,79	1,13
6	812,91	0,79	1,13
7	526,66	0,79	1,13
8	1131,76	0,79	1,17
9	1583,32	0,77	1,55
10	712,62	0,75	2,22
12	188,99	0,74	2,58
13	120,97	0,73	2,8
14	165,7	0,76	2,95
15	139,99	0,8	3,27
16	154,43	0,78	3,51
17	96,28	0,77	3,75

Figuur 84 Locatie 2A: Aantal draaiuren, stroomsnelheid en waterstand

Formules	
$t_i = U_i - U_{i-1} \quad (13.1)$	Met: v_i Snelheid (m/s) U_i Cumulatief uren (uur) t_i Aantal uren (uur) P_{di} Vermogensdichtheid (W/m ²) P_i Vermogen (kW) E_i Energie kWh (MWh) A Frontaal oppervlak (m ²)
$P_{di} = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot v_i^3 \quad (13.2)$	
$E_i = \frac{1}{2} (t_i + t_{i+1}) \cdot P_i / 10^3 \quad (13.3)$	
$E = \sum_{i=1}^{\max(i)} E_i \quad (13.4)$	
Stroomsnelheid:	Stroomsnelheid > 0,6 m/s dan rekenen met stroomsnelheid Stroomsnelheid > 0,6 m/s dan Stroomsnelheid = 0
Frontaal oppervlak:	Waterstand < breedte dan A = breedte * waterstand Waterstand > breedte dan A = breedte * hoogte

Figuur 85 Formules voor berekenen energie opbrengst

13.1.5 ENERGIEOPBRENGST VERTICALE AS KLEINERE AFMETINGEN:

Met rendement: 0,3

Met frontaaloppervlak: 1 m²

Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m ²)	Energie (MWh)
272,94	0,49	0,16	0	0,16	0
884,36	0,59	0,43	0	0,43	0
773,13	0,74	0,94	0,74	0,94	0,04
419,93	0,76	1	0,76	1	0,03
714,83	0,88	1,16	0,88	1	0,07
812,91	0,88	1,16	0,88	1	0,08
526,66	0,88	1,16	0,88	1	0,05
1131,76	0,88	1,16	0,88	1	0,12
1583,32	0,88	1,58	0,88	1	0,16
631	0,88	2,26	0,88	1	0,06
151,88	0,87	2,5	0,87	1	0,02
118,72	0,87	2,63	0,87	1	0,01
120,97	0,86	3	0,86	1	0,01
165,7	0,9	3	0,9	1	0,02
139,99	0,92	3	0,92	1	0,02
90,83	0,89	3	0,89	1	0,01
96,28	0,89	3	0,89	1	0,01
63,6	0,9	3	0,9	1	0,01
Totaal:					0,7224

Figuur 86 Voorbeeld verticale as bij Locatie 1A, breedte = 1 meter

GEKOZEN AFMETINGEN

Met rendement: 0,3

Met breedte: 2,5 m

Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterhoogte (m)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m²)	Energie (MWh)
272,94	0,49	0,16	0	0,39	0
884,36	0,59	0,43	0	1,09	0
773,13	0,74	0,94	0,74	2,34	0,11
419,93	0,76	1	0,76	2,49	0,07
714,83	0,88	1,16	0,88	2,91	0,21
812,91	0,88	1,16	0,88	2,91	0,24
526,66	0,88	1,16	0,88	2,91	0,16
1131,76	0,88	1,16	0,88	2,91	0,34
1583,32	0,88	1,58	0,88	3,96	0,64
631	0,88	2,26	0,88	5,64	0,36
151,88	0,87	2,5	0,87	6,25	0,09
118,72	0,87	2,63	0,87	6,25	0,07
120,97	0,86	3	0,86	6,25	0,07
165,7	0,9	>3	0,9	6,25	0,11
139,99	0,92	>3	0,92	6,25	0,1
90,83	0,89	>3	0,89	6,25	0,06
96,28	0,89	>3	0,89	6,25	0,06
63,6	0,9	>3	0,9	6,25	0,04
Totaal:					2,75

Met rendement: 0,3

Met breedte: 2,5 m

Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m²)	Energie (MWh)
272,94	0,55	0	0	0	0
884,36	0,63	0	0,63	0	0
773,13	0,76	0,41	0,76	1,01	0,05
419,93	0,77	0,48	0,77	1,19	0,03
714,83	0,81	0,67	0,81	1,67	0,1
812,91	0,81	0,67	0,81	1,67	0,11
526,66	0,81	0,67	0,81	1,67	0,07
1131,76	0,82	0,7	0,82	1,76	0,16
1583,32	0,83	1,15	0,83	2,87	0,39
712,62	0,84	1,91	0,84	4,77	0,3
188,99	0,85	2,32	0,85	5,81	0,1
60,93	0,87	2,44	0,87	6,11	0,04
83,86	0,87	2,53	0,87	6,25	0,05
141,88	0,87	2,73	0,87	6,25	0,09
139,99	0,9	3,12	0,9	6,25	0,09
90,83	0,87	3,35	0,87	6,25	0,06
96,28	0,87	3,55	0,87	6,25	0,06
63,6	0,87	3,82	0,87	6,25	0,04
Totaal:					1.75

Figuur 87 Voorbeeld verticale as bij Locatie 2A

Met rendement: 0,3

Met breedte: 2 m

Aantal draaiuren	Stroomsnelheid (m/s)	Waterstand (m)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m ²)	Energie (MWh)
272,94	0,49	0,14	0	0,29	0
884,36	0,59	0,41	0	0,83	0
773,13	0,73	0,91	0,73	1,82	0,08
419,93	0,75	0,97	0,75	1,94	0,05
714,83	0,79	1,13	0,79	2,27	0,12
812,91	0,79	1,13	0,79	2,27	0,14
526,66	0,79	1,13	0,79	2,27	0,09
1131,76	0,79	1,17	0,79	2,33	0,2
1583,32	0,77	1,55	0,77	3,1	0,34
712,62	0,75	2,22	0,75	4	0,18
188,99	0,74	2,58	0,74	4	0,05
120,97	0,73	2,8	0,73	4	0,03
165,7	0,76	2,95	0,76	4	0,04
139,99	0,8	3,27	0,8	4	0,04
154,43	0,78	3,51	0,78	4	0,04
96,28	0,77	3,75	0,77	4	0,03
Totaal:					1,4MWh

Figuur 88 Voorbeeld verticale as bij Locatie 1C

13.1.6 HORIZONTALE AS

Met rendement: 0,35

Met diameter: 2,5 m

Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m ²)	Energie (MWh)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m ²)	Energie (MWh)
0	0,13	0	0	0	0
0	0,57	0	0	0	0
0,74	1,68	0,09	0,74	0	0
0,76	1,82	0,06	0,76	0	0
0,88	2,24	0,19	0,88	0	0
0,88	2,24	0,22	0,88	0	0
0,88	2,24	0,14	0,88	0	0
0,88	2,24	0,3	0,88	0	0
0,88	3,28	0,62	0,88	0	0
0,88	4,66	0,35	0,88	0	0
0,87	4,91	0,09	0,87	4,91	0,09
0,87	4,91	0,07	0,87	4,91	0,07
0,86	4,91	0,07	0,86	4,91	0,07
0,9	4,91	0,1	0,9	4,91	0,1
0,92	4,91	0,09	0,92	4,91	0,09
0,89	4,91	0,06	0,89	4,91	0,06
0,89	4,91	0,06	0,89	4,91	0,06
0,9	4,91	0,04	0,9	4,91	0,04
Totaal		1,5 MWh	Totaal		1,0 MWh

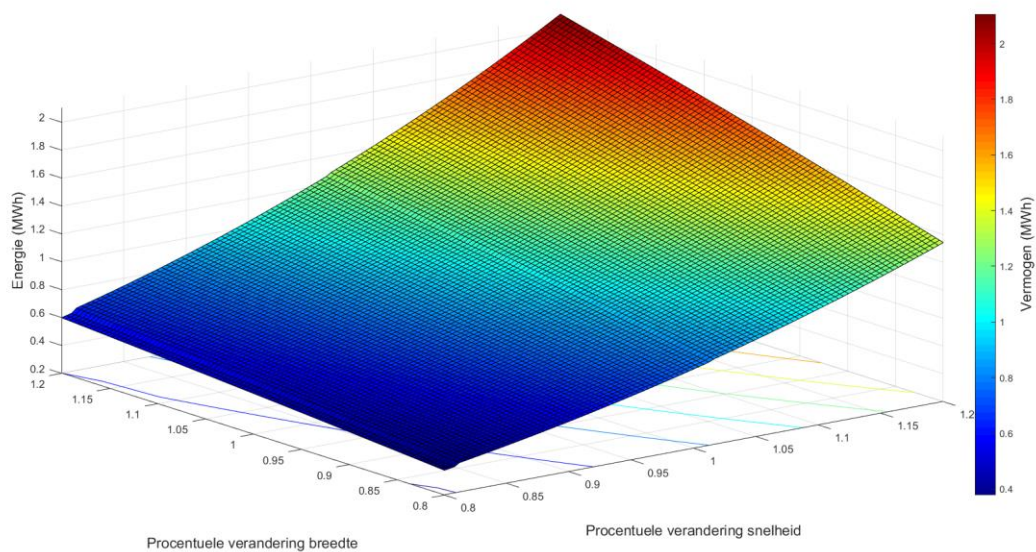
Figuur 89 Voorbeeld horizontale as bij Locatie 1A, links: altijd draaiend, rechts draaiend bij alleen volledig onder water

Met rendement: 0,35

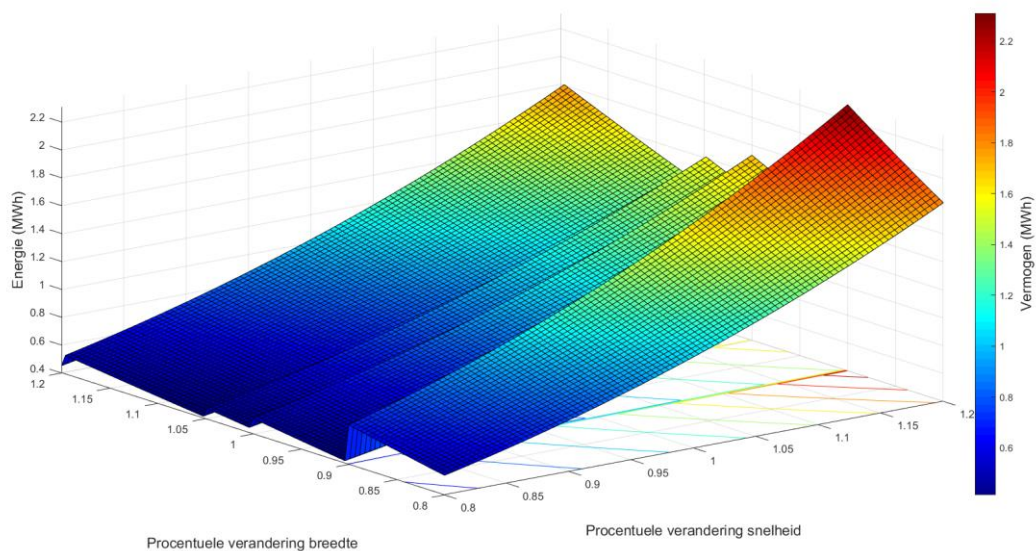
Met diameter: 2,5 m

Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m²)	Energie (MWh)	Gerekende stroomsnelheid (m/s)	Gerekend frontaal oppervlak (m²)	Energie (MWh)
0	0	0	0	0	0
0,63	0	0	0,63	0	0
0,76	0,52	0,03	0,76	0	0
0,77	0,65	0,02	0,77	0	0
0,81	1,06	0,07	0,81	0	0
0,81	1,06	0,08	0,81	0	0
0,81	1,06	0,05	0,81	0	0
0,82	1,14	0,12	0,82	0	0
0,83	2,2	0,35	0,83	0	0
0,84	4,02	0,3	0,84	0	0
0,85	4,76	0,1	0,85	0	0
0,87	4,88	0,03	0,87	0	0
0,87	4,91	0,05	0,87	4,91	0,05
0,87	4,91	0,08	0,87	4,91	0,08
0,9	4,91	0,09	0,9	4,91	0,09
0,87	4,91	0,05	0,87	4,91	0,05
0,87	4,91	0,06	0,87	4,91	0,06
0,87	4,91	0,04	0,87	4,91	0,04
Totaal:		1,5 MWh	Totaal		1,2 MWh

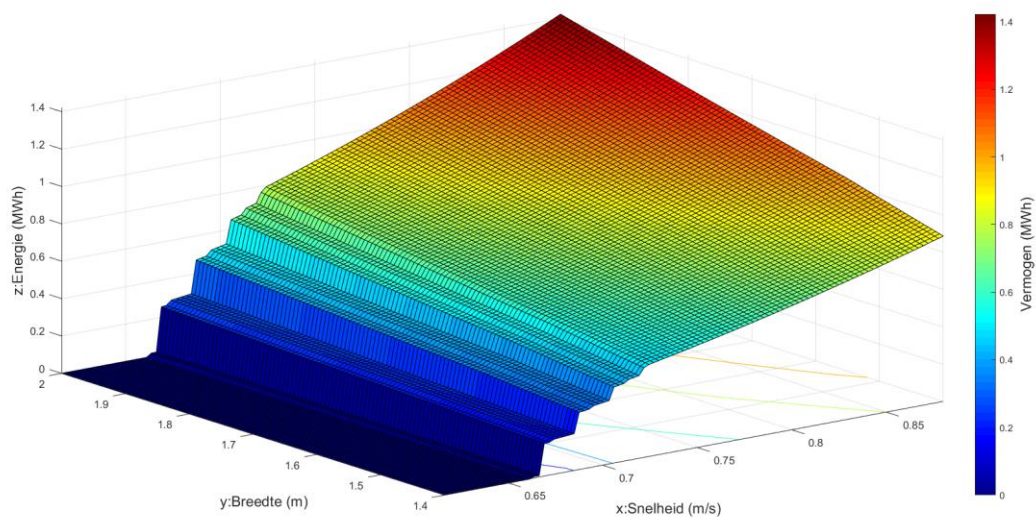
Figuur 90 Voorbeeld horizontale as bij Locatie 2A, links: altijd draaiend, rechts draaiend bij alleen volledig onder water



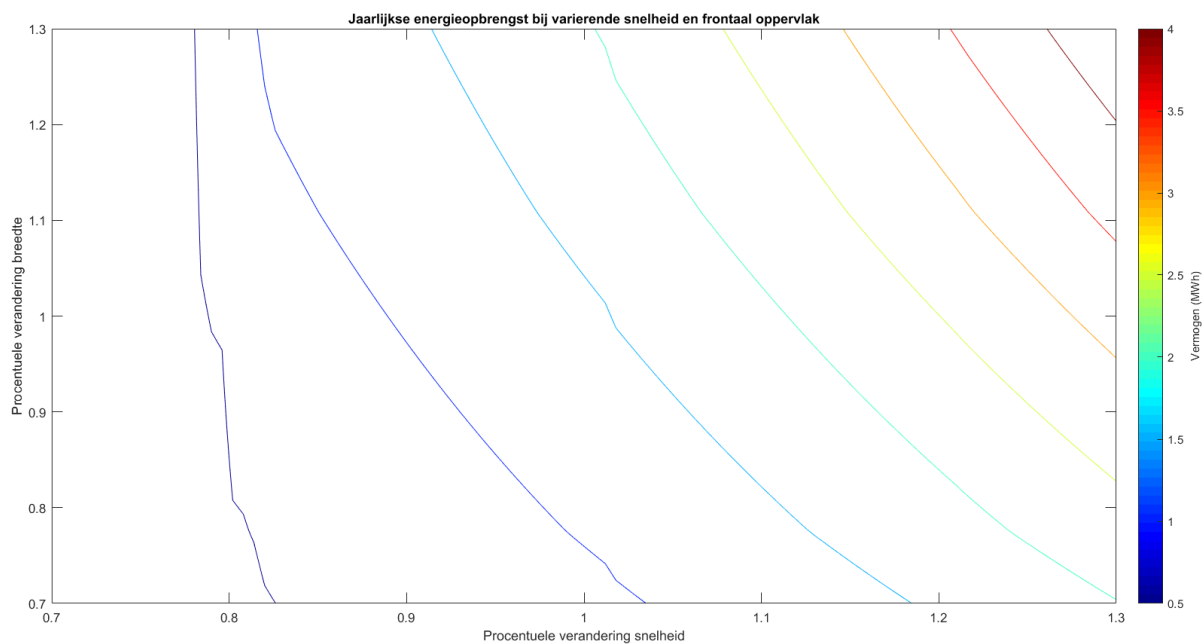
Figuur 91 Gevoeligheid bij horizontale as locatie 1A



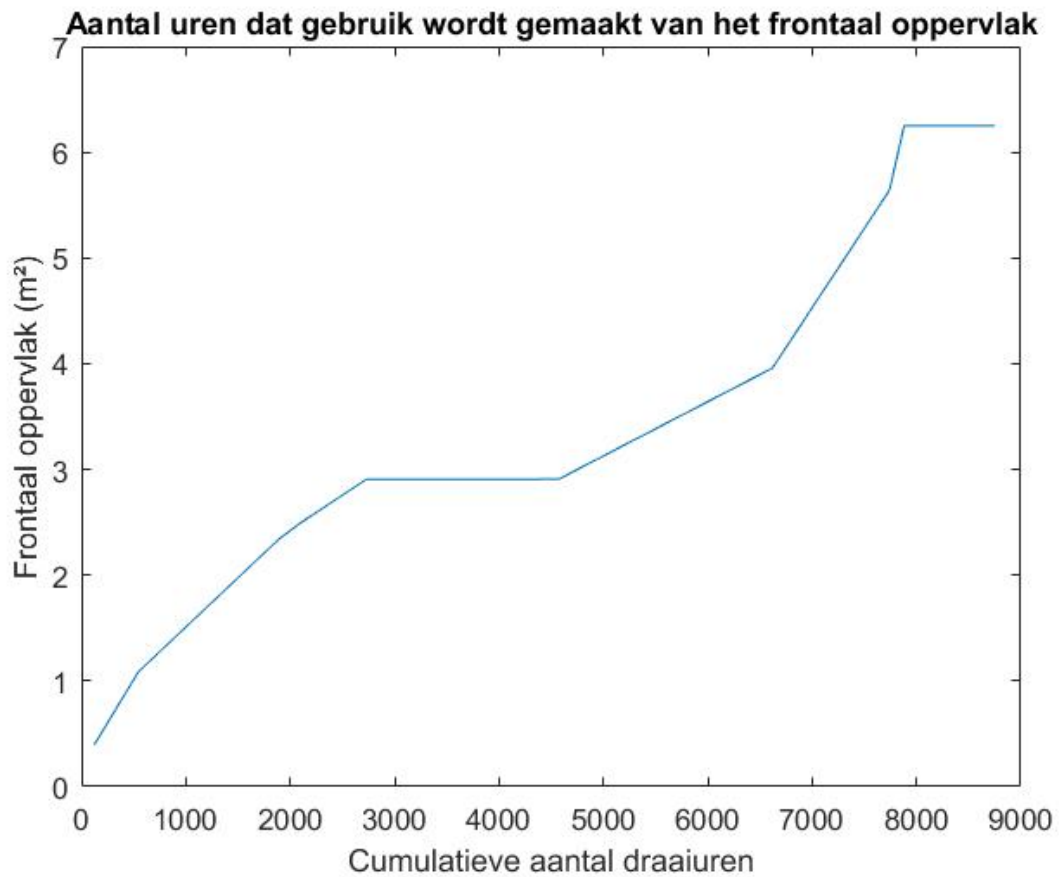
Figuur 92 Gevoeligheid bij horizontale as locatie 1A, die alleen werkt wanneer hij volledig onder water staat



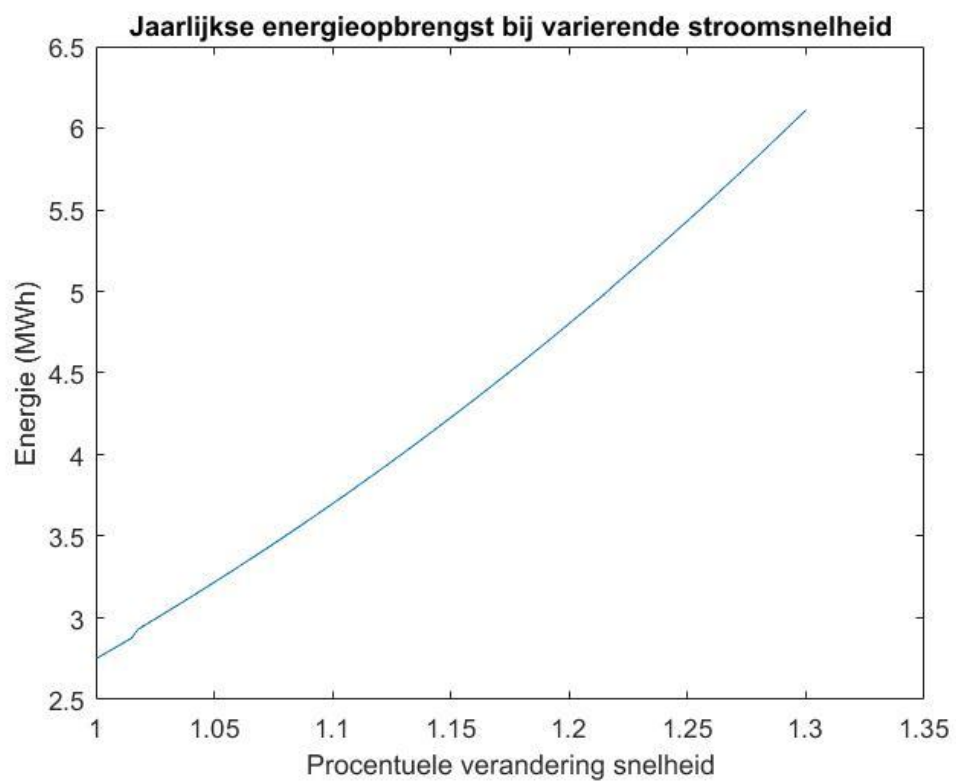
Figuur 93 Gevoeligheid bij verticale as bij 1C, met minimale stroomsnelheid 0,6 m/s



Figuur 94 Isoplot 1C, met minimale stroomsnelheid 0,6 m/s



Figuur 95 Aantal draaiuren voor frontaal oppervlak



Figuur 96 Verandering jaarlijkse energieopbrengst bij procentuele verandering stroomsnelheid

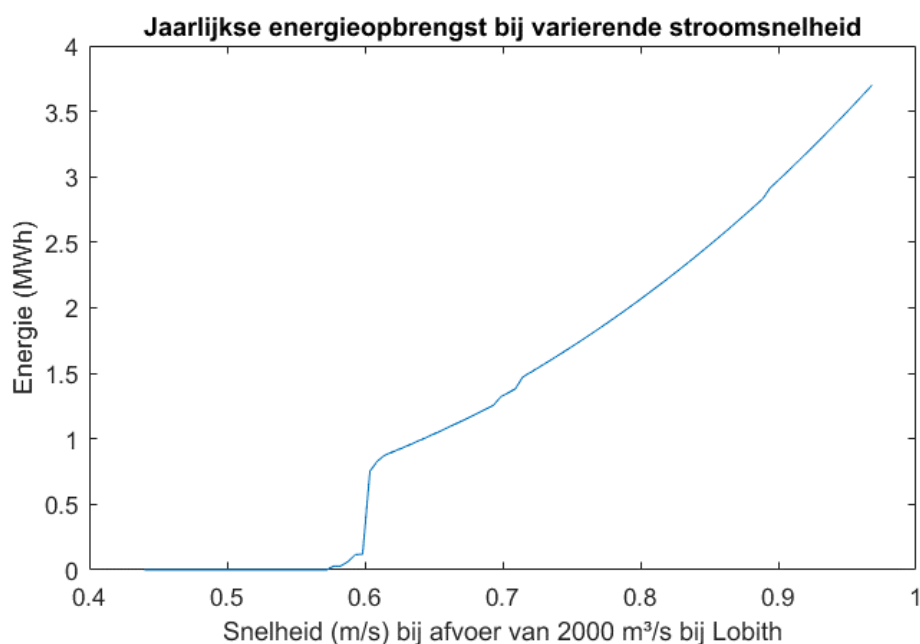
13.1.8 RIVIERBODEM

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} + H_L$$

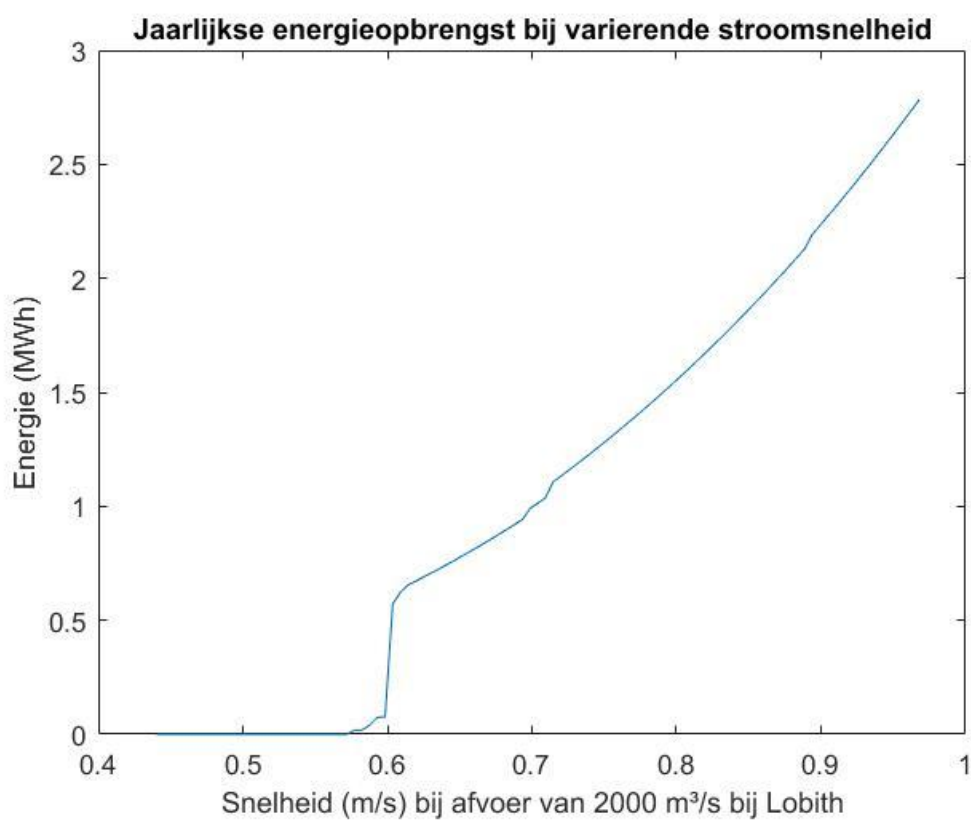
$$(13.6) \quad \begin{aligned} v &= \text{snelheid van vloeistof (m/s)} \\ g &= \text{gravitatiesnelheid (m/s}^2\text{)} \\ H_L &= \text{hoogte energieverlies(m)} \end{aligned}$$

13.2 POTENTIEKAART

Bij locatie 1A is de verwachte energieopbrengst berekend voor verschillende stroomsnelheden bij de afvoer van 2000 m³/s bij Lobith.



Figuur 97 Jaarlijkse energie opbrengst bij variërende snelheid met breedte 2.5 m



Figuur 98 Jaarlijkse energie opbrengst bij variërende snelheid met breedte 2.0 m

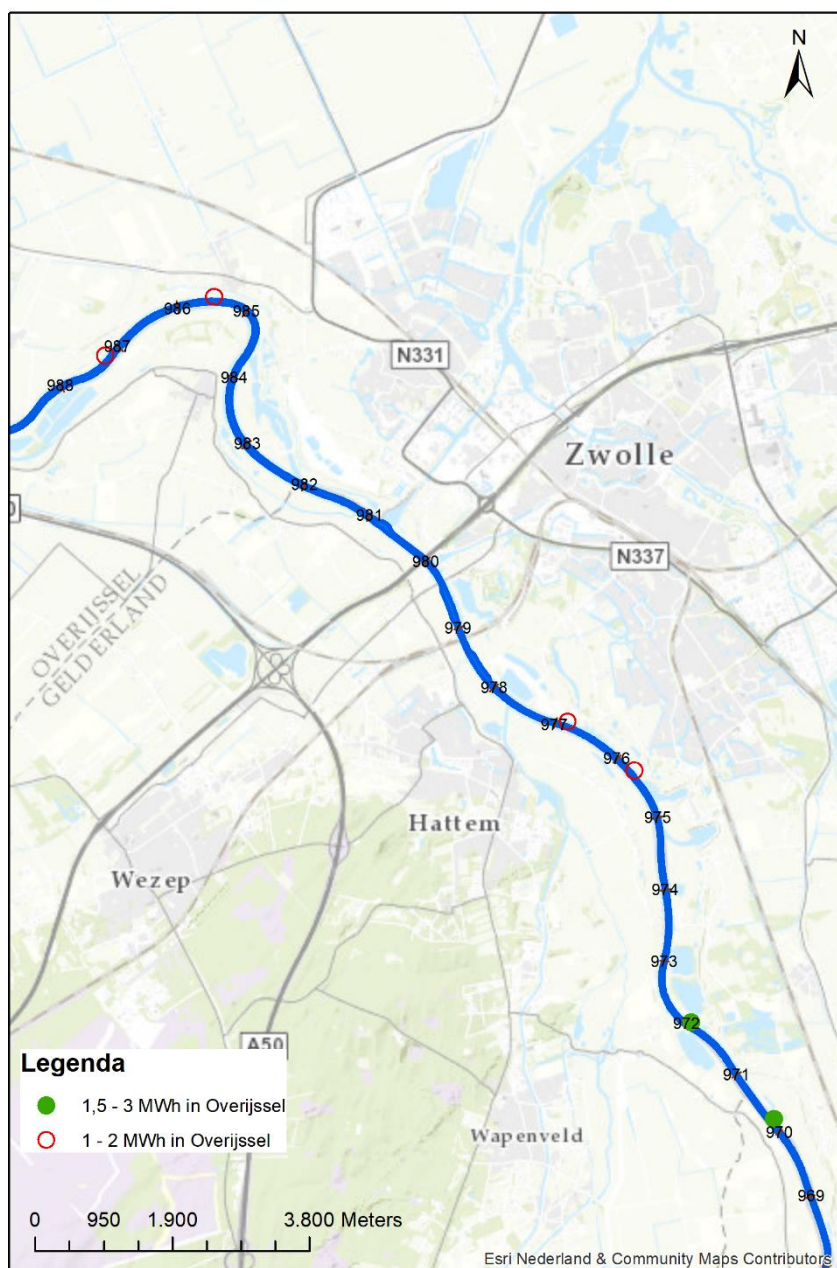
Gemeente	Locatie	Frontaal Opp: 2,5 m ²	Frontaal Opp: 2,0 m ²	Overijssel	Gelderland en Overijssel
Jaarlijkse energieopbrengst (MWh)					
Olst-Wijhe	1(1A)	2,8	2,1	2,5	2,5
Voorst	V1	2,7	2	0	2,4
Voorst	V1	2,6	2	0	2,3
Deventer	D1	2,5	1,9	2,2	2,2
Olst-Wijhe	1(1B)	2,5	1,9	2,2	2,2
Voorst	V1	2,4	1,8	0	2,1
Voorst	V2	2,4	1,8	0	2,1
Zwolle	Z1	2,4	1,8	2,1	2,1
Voorst	V1	2,1	1,6	0	1,9
Heerde	H1	2,1	1,6	0	1,9
Olst-Wijhe	2 (2A)	2	1,6	1,8	1,8
Olst-Wijhe	O1	2	1,6	1,8	1,8
Deventer	D2	2	1,5	1,8	1,8
Olst-Wijhe	2 (2B)	2	1,5	1,8	1,8
Olst-Wijhe		2,0	1,5	1,8	1,8
Olst-Wijhe	1 (1C)	1,9	1,4	1,7	1,7
Voorst	V1	1,9	1,4	0	1,6
Deventer	D2	1,9	1,3	1,6	1,6
Deventer		1,9	1,3	1,6	1,6
Voorst	V2	1,8	1,3	0	1,6
Voorst		1,8	1,3	0	1,6
Heerde		1,8	1,3	0	1,6
Deventer	D2	1,8	1,3	1,5	1,5
Deventer		1,8	1,3	1,5	1,5
Deventer	D2	1,8	1,3	1,5	1,5
Voorst		1,7	1,2	0	1,5
Olst-Wijhe		1,7	1,2	1,5	1,5
Heerde		1,7	1,2	0	1,5
Heerde		1,7	1,2	0	1,5
Deventer	D2	1,7	1,2	1,4	1,4
Zwolle		1,7	1,2	1,4	1,4
Voorst		1,7	1,2	0	1,4
Olst-Wijhe		1,7	1,2	1,4	1,4
Heerde		1,6	1,2	0	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,7	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Deventer		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Zwolle		1,6	1,2	1,4	1,4
Kampen		1,6	1,2	1,4	1,4
Deventer		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,2	1,4	1,4
Deventer		1,6	1,1	1,4	1,4
Deventer		1,6	1,1	1,4	1,4
Olst-Wijhe		1,6	1,1	1,4	1,4
Heerde		1,6	1,1	0	1,3
Olst-Wijhe		1,5	1,1	1,3	1,3
Deventer		1,5	1,1	1,3	1,3

Gemeente	Locatie	Frontaal Opp: 2,5 m ²	Frontaal Opp: 2,0 m ²	Overijssel	Gelderland en Overijssel
Jaarlijkse energieopbrengst (MWh)					
Deventer		1,5	1,1	1,3	1,3
Olst-Wijhe		1,5	1,1	1,3	1,3
Olst-Wijhe		1,5	1,1	1,3	1,3
Heerde		1,5	1,1	0	1,3
Heerde		1,5	1,1	0	1,3
Olst-Wijhe		1,5	1,1	1,3	1,3
Kampen		1,5	1,1	1,3	1,3
Totaal				63,1	95,4

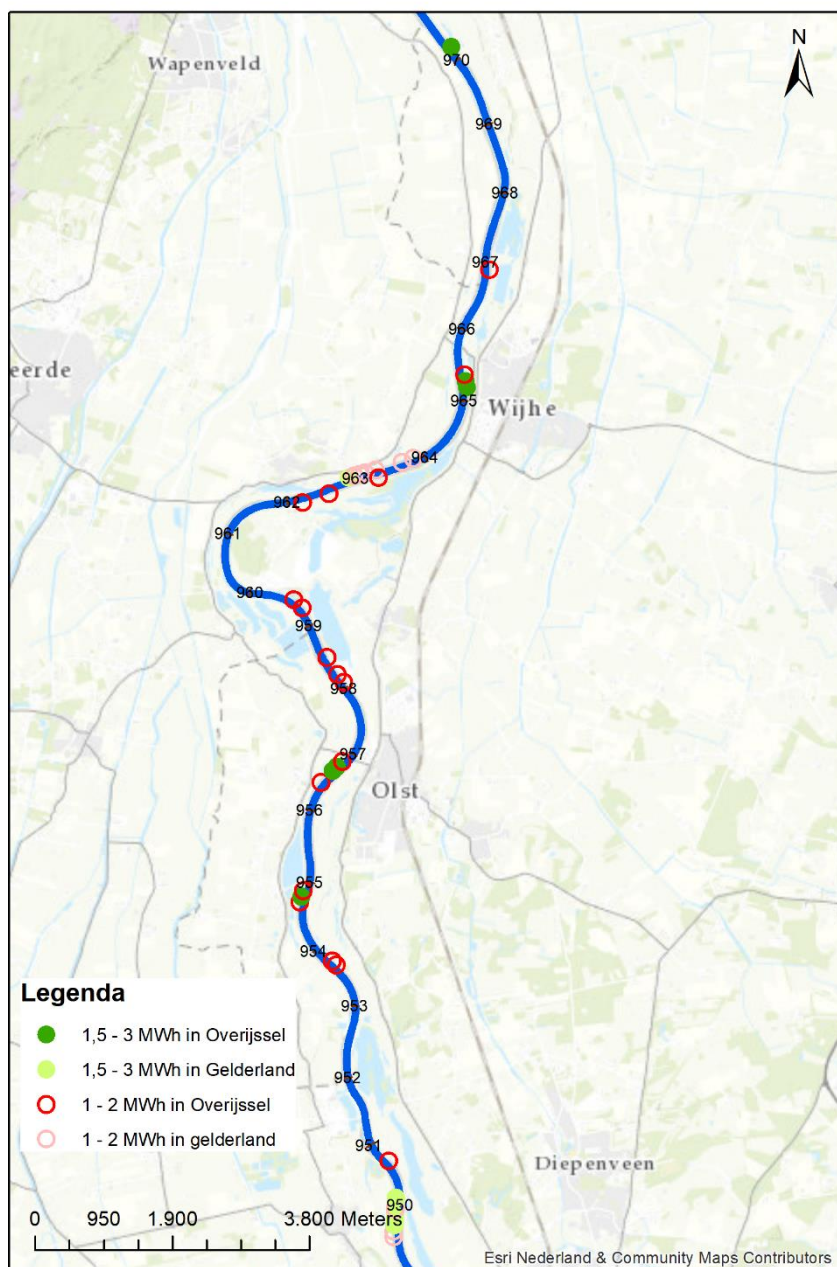
Figuur 99 Energiopbrengst per gemeente

14 BIJLAGE IV: POTENTIEKAARTEN

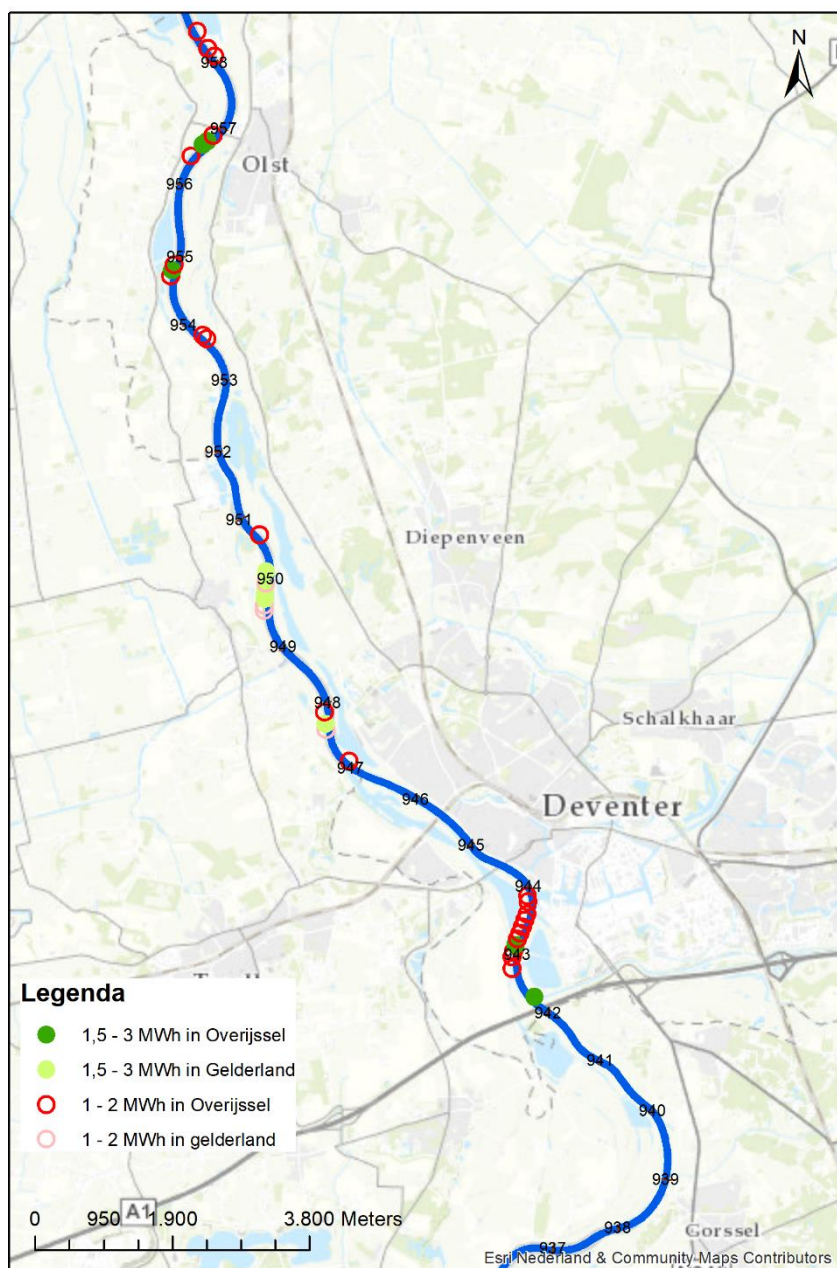
14.1 OVERZICHTEN ZWOLLE, OLSST-WIJHE EN DEVENTER



Figuur 100 Potentiekaart Zwolle (getallen zijn kmraai)

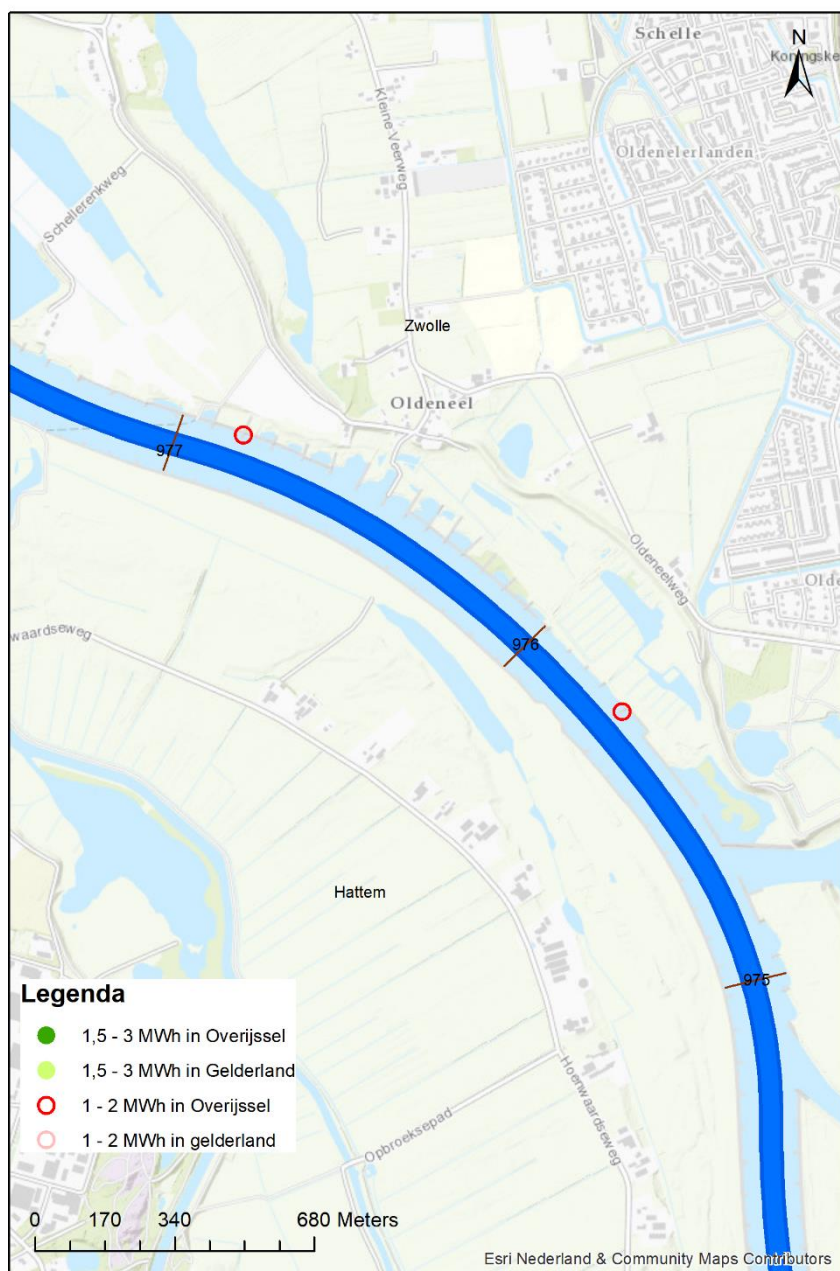


Figuur 101 Potentiekarta Olst-Wijhe (getallen zijn kmraai)

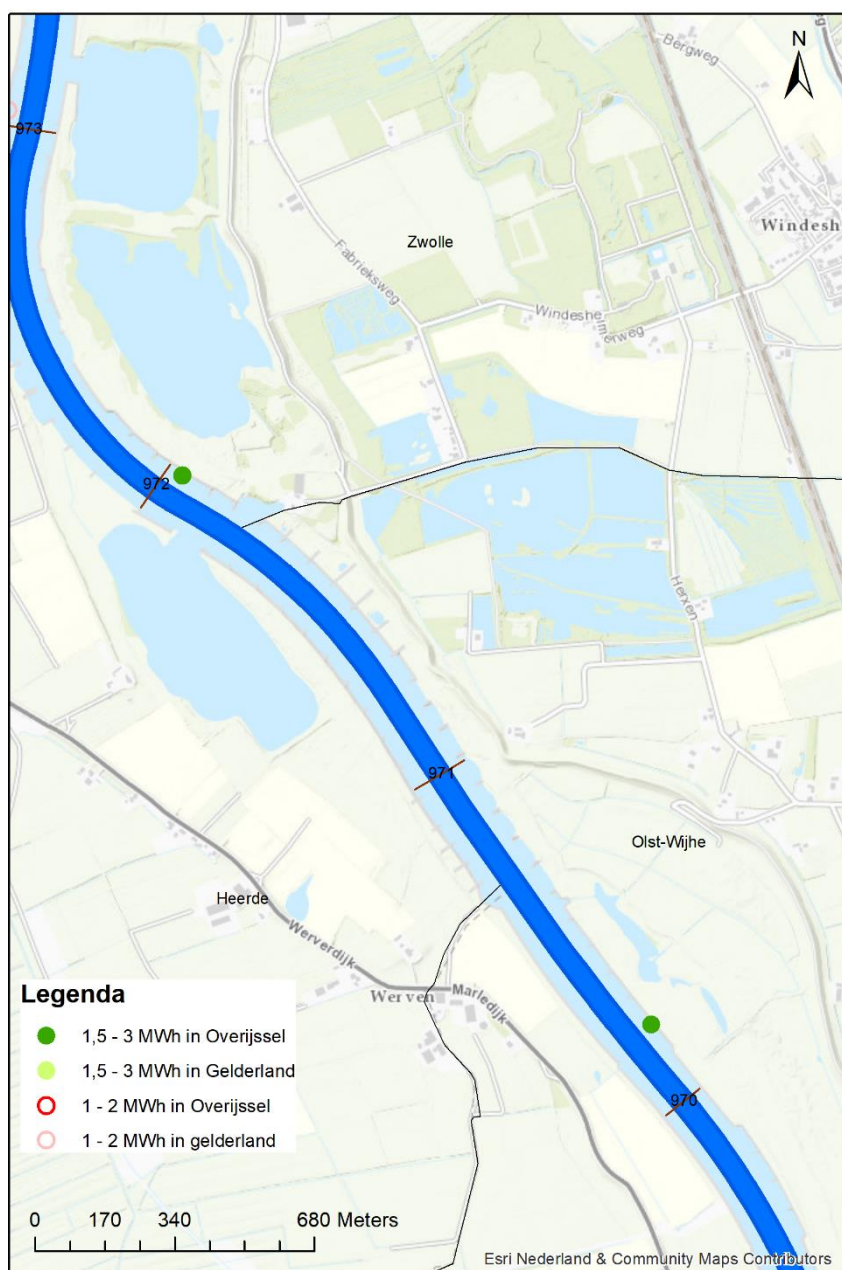


Figuur 102 Potentiekaart Zwolle (getallen zijn kmraai)

14.2 INGEZOOMDE AFBEELDINGEN



Figuur 103 Zoom Potentiekaart Zwolle Zuid (getallen geven kmraai weer)



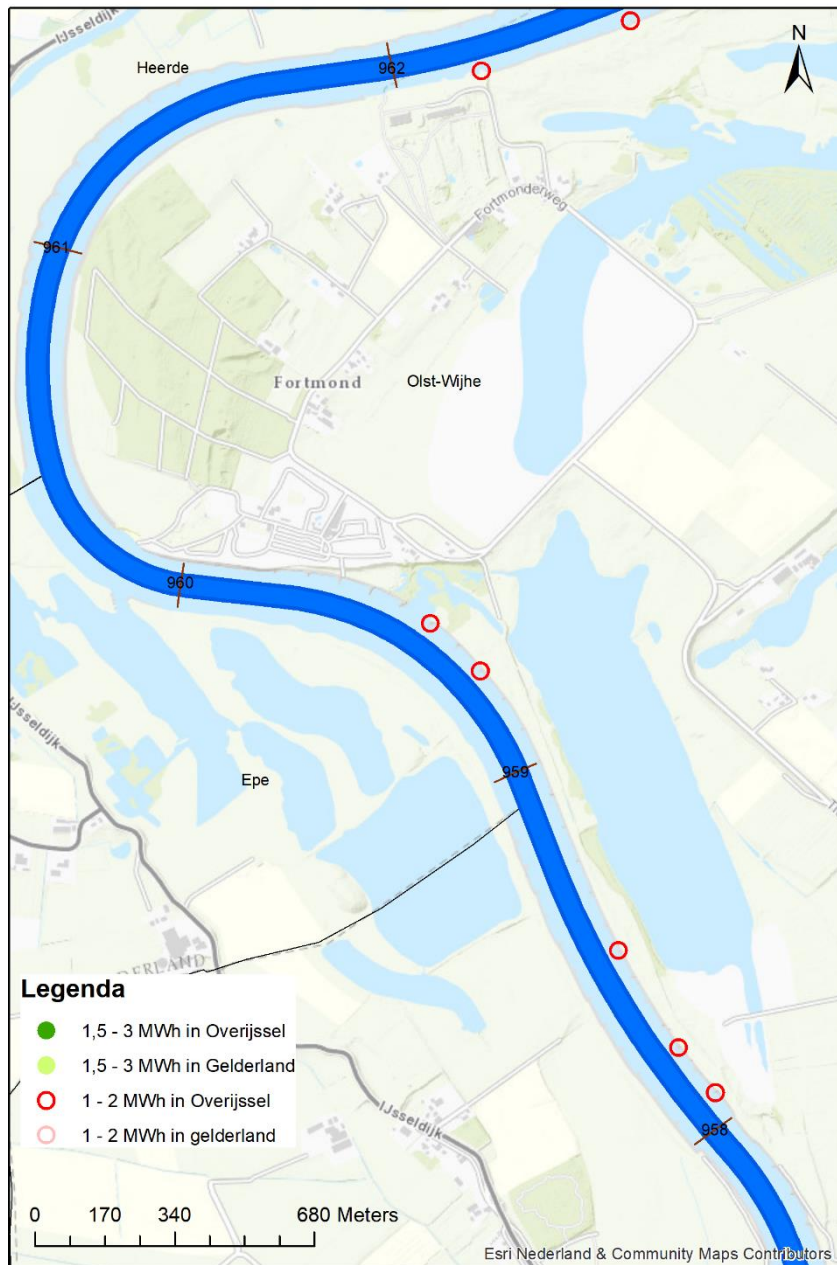
Figuur 104 Zoom Potentiekaart Zwolle -Wijhe (getallen geven kmraai weer)



Figuur 105 Zoom Potentiekaart Noord Wijhe (getallen geven kmraai weer)



Figuur 106 Zoom Potentiekaart Olst-Wijhe (getallen geven kmraai weer)



Figuur 107 Zoom Potentiekaart Fortmond (getallen geven kmraai weer)



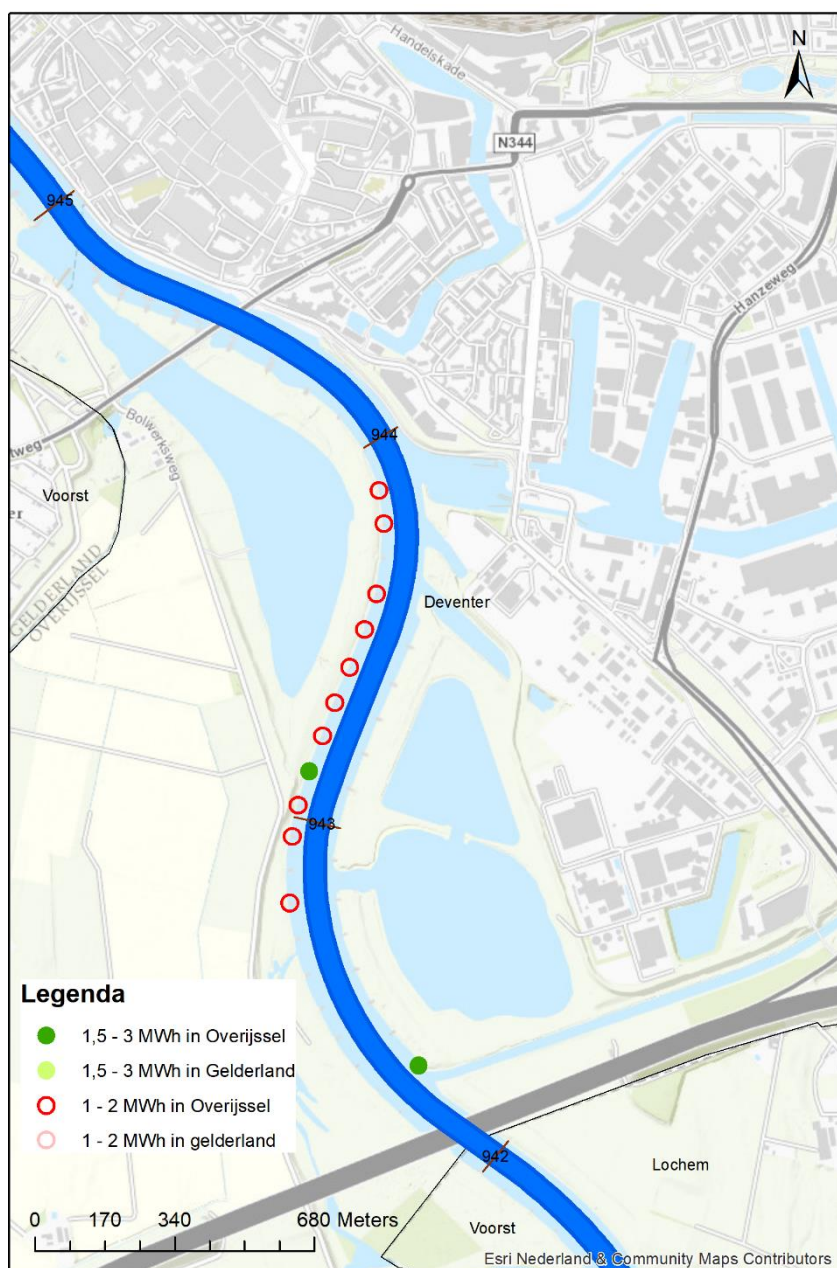
Figuur 108 Zoom Potentiekaart Olst (getallen geven kmraai weer)



Figuur 109 Zoom Potentiekaart Noorden Deventer (getallen geven kmraai weer)



Figuur 110 Zoom Potentiekaart Deventer/Voorst (getallen geven kmraai weer)



Figuur 111 Zoom Potentiekaart Deventer (getallen geven kmraai weer)