

Een eerste haalbaarheidsstudie naar grootschalige implementatie van waterkrachtcentrales in de toekomstige Maas-stuwen

Een casestudie naar de vervangingsopgave van de stuw bij Grave

MSc Thesis of J.T. (Jeroen) van Bergen

26 September, 2023



MSc Thesis

Een eerste haalbaarheidsstudie naar grootschalige implementatie van
waterkrachtcentrales in de toekomstige Maas-stuwen

Auteur:	J.T. (Jeroen) van Bergen
Studentnummer	4366638
Datum	26 september 2023

Universiteit	Technische Universiteit Delft
Faculteit	Civiele Techniek en Geowetenschappen
Studie	Civiele Techniek; Master richting: Hydraulic Engineering

Commissie:	Dr. ing. M.Z. Voorendt	Voorzitter, Hydraulic Structures and Flood Risk, TU Delft
	Ir. J.R. Moll	Begeleider, Hydraulic Structures and Flood Risk, TU Delft
	Dr. ir. G.A. van Nederveen	Begeleider, Integral Design and Management, TU Delft
	Ir. M. van Heereveld	Begeleider vanuit Royal HaskoningDHV

Voorwoord

Deze thesis is de laatste stap naar het behalen van mijn master 'Hydraulic Engineering', oftewel waterbouwkunde, aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek van deze thesis werd uitgevoerd tijdens mijn stage bij Royal HaskoningDHV.

Een van mijn voornaamste drijfveren om waterbouwkunde te gaan studeren, was mijn wens om bij te dragen aan de bescherming van de mensheid tegen de gevolgen van klimaatverandering. Toen ik op zoek was naar een onderwerp voor mijn scriptie, vond ik een project dat naadloos aansloot bij deze ambitie. Het bijzondere aan dit onderwerp was dat het niet alleen gericht was op het beschermen van mensen door het ontwerpen van een kunstwerk, maar dat dit kunstwerk tegelijkertijd diende als een mitigerende maatregel om klimaatverandering tegen te gaan.

Dit rapport is met name gericht aan specialisten die geïnteresseerd zijn in waterkrachtenergie en de toekomstige stuwen in de Maas.

Allereerst wil ik mijn dank uitspreken aan Michel van Heereveld voor het bieden van de mogelijkheid om deze stage te doen en voor zijn hulp bij het onderzoek. Mijn dank gaat ook uit naar Peter van der Kreeke voor zijn waardevolle bijdrage. Daarnaast wil ik mijn universitaire docenten bedanken: Sander van Nederveen, Roelof Moll en Mark Voorendt. Hun inzichten en begeleiding waren essentieel voor de voortgang van mijn onderzoek en de totstandkoming van dit rapport. In het bijzonder wil ik Mark Voorendt bedanken. Mark heeft me buitengewoon goed geholpen bij het structureren van mijn onderzoek en het opstellen van dit rapport. Zijn hulp en enthousiasme hebben mij gemotiveerd en geïnspireerd gehouden. Ik ben ervan overtuigd dat de kennis en vaardigheden die ik dankzij hem heb opgedaan, van grote waarde zullen zijn in mijn verdere carrière.

Naast mijn directe begeleiders wil ik ook Max Schropp (Rijkswaterstaat), Marloes Baaijens (Rijkswaterstaat), Simone Hellebrand (Rijkswaterstaat) en andere collega's van Rijkswaterstaat bedanken die bij hebben gedragen mijn onderzoek. In het bijzonder wil ik Max Schropp bedanken voor het delen van zijn uitgebreide kennis over de Maas en de toekomstige Maas-stuwen.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor hun voortdurende interesse in mijn scriptie en hun onvoorwaardelijke steun gedurende dit hele proces.

Jeroen Thomas van Bergen

Leiden, 26 september 2023

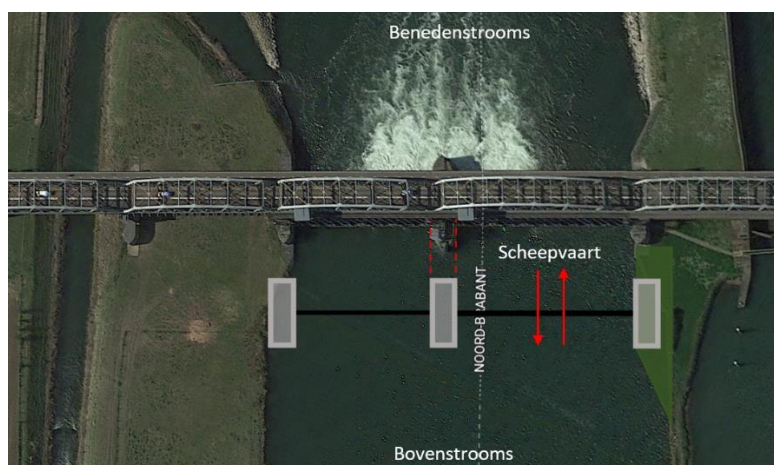
Summary

Due to the increasing need for expanding sustainable energy production in the Netherlands, it is essential to explore potential sustainable energy sources further. Replacement projects for weirs along the river Meuse are scheduled within the next 10 years, making this an excellent opportunity to investigate the possibilities of harnessing hydropower in future weirs. This research contributes to this exploration. A comprehensive assessment is required to evaluate the potential of hydropower and determine a follow-up plan.

The objective of this thesis is to conduct an initial feasibility study towards large-scale implementation of hydropower plants in the weirs along the river Meuse that have to be designed. It is important to note that this thesis represents an exploration and not a final assessment of the potential implementation of a hydropower plants in the future river Meuse weirs. The key criteria examined in this thesis regarding feasibility include hydraulic aspects, the impact on navigation, effects on fish migration and mortality, and economic viability. The latter is particularly crucial as Rijkswaterstaat has indicated that they do not intend to operate the hydropower plant themselves, implying the necessity of a profitable business case for an external party to make the hydropower plant feasible. To achieve the thesis's objective, an initial case study was conducted. This case study involved developing a design for the weir replacement at Grave. Towards the end of this research, the broader applicability of the developed design was explored to investigate large-scale implementation.

At the beginning of this thesis, there was no specific design for the future weir at Grave. Therefore, the first phase of this research focused on creating a future weir design for the Grave location. Subsequently, the optimal way to integrate a hydropower plant into this weir was explored. This research follows the basic engineering design cycle as applied in civil engineering, encompassing three main design cycles: site selection, designing the basic weir, and the integration of a hydropower plant into the basic weir. The requirements, evaluation criteria, and starting points were established in collaboration with Rijkswaterstaat to keep the research as relevant as possible.

The figure below shows the results of the first two design phases, including site selection and a realistic spatial-functional design for the weir without a hydropower plant.



After completing the design cycles for the weir without a hydropower plant, the investigation towards the implementation of a hydropower plant in this future weir design starts. First, the technology for the hydropower plant was selected, with the choice being the Archimedean screw turbine. Several designs of hydropower plants using this Archimedean screw turbine were created, initially exploring their direct

integration into the weir. However, it was found to be hydraulically unfeasible to place more than two of those turbines directly within the weir. Adding additional turbines without a design solution would lead to water stagnation, endangering water safety. This led to the development of design solutions to realize a hydropower plant with multiple turbines while ensuring hydraulic feasibility. This resulted in three potential implementation concepts: A.1 removable turbines, A.2 a hydropower plant in the floodplain, and A.3 integration of turbines into the pilers of the weir.

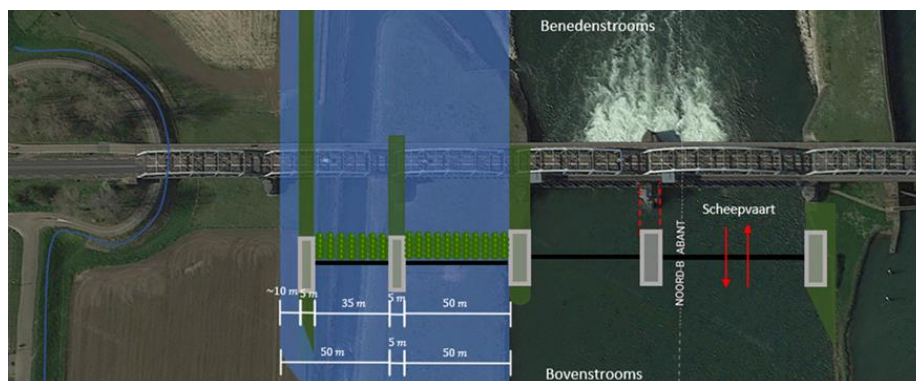
These concepts served as the starting point for further development. Within each design concept, variants were created, and optimal variants were eventually selected based on economic optimization. This was essential to meet the economic feasibility criterion. The majority of the variants had a viable business case, though this was subject to fluctuations in electricity prices and potential government subsidies for sustainable energy.

In addition to hydraulic, economic, and fish migration feasibility, also considered the impact on vessel navigation, the primary function of the weir, had to be assessed. By complying to the drawn design requirements, there is assumed that all variants of the design concepts were feasible concerning vessel navigation.

The optimal method for integrating a hydropower plant into the weir was determined by comparing the optimal variants of each design concept through careful analysis, including multicriteria analysis and the net present value of profits. Design concept A.2 (a hydropower plant in the floodplain) emerged as the best choice from the multicriteria analysis and appeared economically viable, depending on developments in electricity prices and the availability of subsidies.

This research underscores that the economic feasibility is subject to various factors, including electricity price trends and subsidies. A prerequisite for project success is the provision of a profitable business case for an external entity that will exploit the hydropower plant. To achieve the desired internal project return of 12% for this commercial entity, it has been determined that the chosen design requires a minimum electricity price, including subsidies, of 100 euros per MWh.

In summary, this initial feasibility study concludes that the implementation of a hydropower plant in the future weir at Grave appears possible within the specified requirements, preferences, assumptions, and evaluation criteria. The optimal design is presented in the figure below. However, it was discovered during the research that certain requirements and starting points of the future weir design had changed compared to the initially established basis of the design. This necessitates an additional iteration of the design cycles to incorporate these changes.



If a hydropower plant, as shown in the above figure, with 18 Archimedean screw turbines with an approximate power of 152 kW is being realized at Grave, it is estimated to provide electricity to approximately 8,000 households annually.

In the final phase of the research, the broader applicability of the design was explored for other weirs along the river Meuse. The conclusion is that the design concept appears to be widely applicable, except for the weir at Borgharen. It is recommended to consider the developed design concept for all weir replacement projects along the river Meuse. It is estimated that these weirs, collectively, have the potential to provide sustainable energy to approximately 32,000 households

However, the final conclusion emphasizes that, despite positive indications, further and more in-depth research is necessary due to the complexity and diversity of factors influencing feasibility. Recommendations for further research are presented in Chapter 9.2.

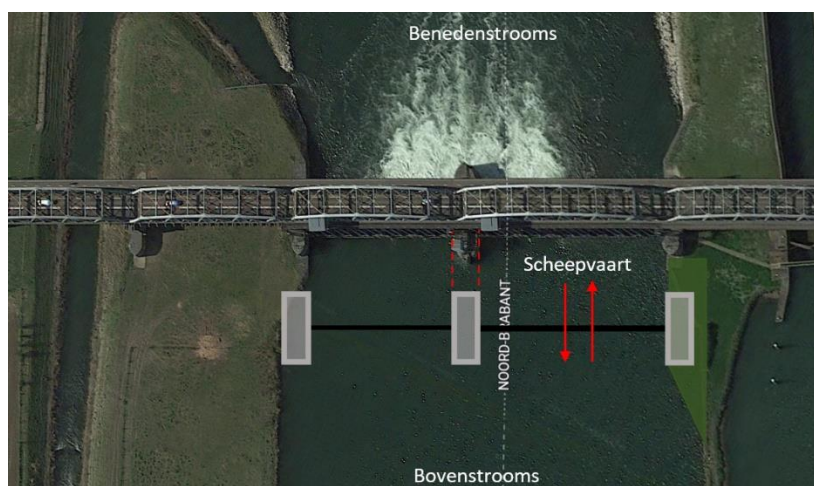
Samenvatting

Vanwege de toenemende behoefte aan uitbreiding van duurzame energieproductie in Nederland, is het essentieel om potentiële energiebronnen nader te onderzoeken. Binnen de komende 10 jaar staan vervangingsprojecten van stuwen in de Maas gepland, wat dit een uitstekend moment maakt om onderzoek te doen naar de mogelijkheden om in de toekomstige stuwen waterkrachtenergie te gaan opwekken. Dit onderzoek levert hier een bijdrage aan. Een grondige verkenning is nodig om de potentie van waterkrachtenergie te beoordelen en een vervolgtraject te bepalen.

Het doel van deze thesis is het uitvoeren van een eerste haalbaarheidsstudie naar grootschalige waterkrachtcentrale-implementatie in nieuw te ontwerpen stuwen in de Maas. Het is belangrijk op te merken dat deze thesis een verkenning betreft van de mogelijke implementatie van een waterkrachtcentrale in toekomstige Maas-stuwen. De belangrijkste criteria die in deze thesis worden onderzocht met betrekking tot de haalbaarheid omvatten de hydraulische aspecten, de impact op de scheepvaart, de effecten op vismigratie en vissterfte, en de economische haalbaarheid. De laatstgenoemde factor is van belang, aangezien Rijkswaterstaat heeft aangegeven de waterkrachtcentrale niet zelf te gaan willen exploiteren. Dit impliceert dat er een winstgevende businesscase voor een externe partij moet zijn om een waterkrachtcentrale haalbaar te maken. Om het doel van deze thesis te bereiken is in eerste instantie een casestudie uitgevoerd. In deze casestudie wordt een ontwerp ontwikkeld voor de stuwvervanging bij Grave. Vervolgens is aan het einde van dit onderzoek de bredere toepasbaarheid van het ontwikkelde ontwerp onderzocht om de grootschalige implementatie van te onderzoeken.

Aan de start van deze thesis was er nog geen specifiek ontwerp voor de toekomstige stuw bij Grave bekend. De eerste fase van dit onderzoek is daarom gericht op het creëren van een toekomstige stuwontwerp voor de stuw bij Grave, deze wordt aangeduid als de basisstuw. Vervolgens is onderzocht op welke manier een waterkrachtcentrale optimaal in deze stuw geïmplementeerd kan worden. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode. In totaal worden drie hoofd-ontwerplussen volgens deze methode doorlopen: de locatiekeuze, de basisstuw en de inpassing van een waterkrachtcentrale in de basisstuw. De eisen, evaluatiecriteria en uitgangspunten zijn opgesteld in afstemming met Rijkswaterstaat, om het onderzoek zo relevant als mogelijk is te houden voor de vervangingsopgave van de stuwen in de Maas.

In de onderstaande figuur wordt het resultaat van de eerste twee ontwerplussen weergegeven. Dit omvat de locatie keuze en een realistische ruimtelijk functionele ontwerp voor de basisstuw.



Het resulterende ruimtelijke ontwerp voor de basisstuw.

Na afronding van het basisstuwontwerp is onderzocht hoe een waterkrachtcentrale in dit toekomstige stuwontwerp kan worden geïmplementeerd. Als eerst is de waterkrachtcentraletechnologie gekozen. Er is gekozen om vijzelturbines als technologie te gebruiken. Verschillende ontwerpen van waterkrachtcentrales met vijzelturbines zijn gecreëerd, waarbij eerst is onderzocht of deze direct in de basisstuw kunnen worden geplaatst. Het bleek echter hydraulisch niet haalbaar om meer dan twee vijzelturbines in de basisstuw te plaatsen. Als er meer vijzelturbines zonder ontwerplossing worden toegevoegd leidt tot opstuwing die de waterveiligheid in gevaar kan brengen. Dit heeft geleid tot het bedenken van ontwerplossingen om een waterkrachtcentrale met meerdere vijzelturbines te realiseren, waarbij de hydraulische haalbaarheid wordt gewaarborgd. Dit heeft geresulteerd in drie potentiële implementatieconcepten: A.1 uitneembare vijzelturbines, A.2 vijzelturbines in de uiterwaarde en A.3 integratie van vijzelturbines in de steunpunten.

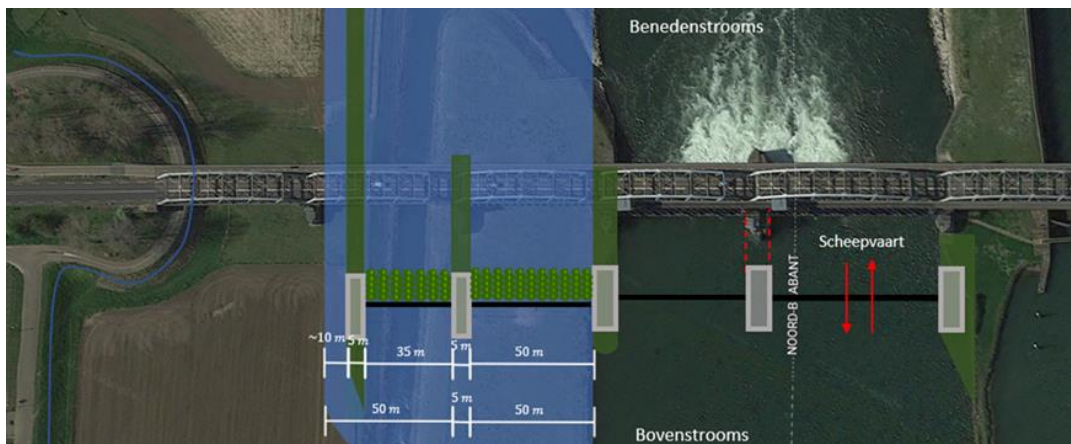
Deze strategieën vormden het vertrekpunt voor verdere ontwikkeling. Binnen elk ontwerpconcept zijn varianten gecreëerd en uiteindelijk de optimale varianten geselecteerd op basis van economische optimalisatie. Dit was essentieel om te voldoen aan het economische haalbaarheids criterium. De meerderheid van de varianten heeft een haalbare business case, zei het dat dit afhankelijk is van fluctuaties in de elektriciteitsprijzen en eventuele subsidies van de overheid voor duurzame energie.

Naast de hydraulische, economische en vismigratie haalbaarheid is ook aandacht besteed aan de impact op scheepvaart, de primaire functie van de stuw. Door te voldoen aan ontwerppeisen wordt aangenomen dat alle varianten van de ontwerpconcepten haalbaar zijn wat betreft scheepvaart.

Uiteindelijk is de optimale manier voor de integratie van een waterkrachtcentrale in de basisstuw bepaald door de optimale variant van elk ontwerpconcept met elkaar te vergelijken aan de hand van zorgvuldig analyses: een Multicriteria-analyse en de netto contante waarde van de winst. Ontwerpconcept A.2 (vijzelturbines in de uiterwaarde) kwam als beste uit de Multicriteria-analyse en lijkt ook economisch haalbaar, zij het afhankelijk van de ontwikkelingen in de elektriciteitsprijs en de beschikbaarheid van subsidies.

Dit onderzoek benadrukt dat de economische haalbaarheid afhankelijk is van verschillende factoren, waaronder de elektriciteitsprijsontwikkeling en subsidies. Een voorwaarde voor het succes van het project is dat het een winstgevende businesscase moet bieden voor een externe partij die de waterkrachtcentrale zal exploiteren. Om het gewenste projectrendement van 12% voor deze commerciële partij te behalen, is bepaald dat voor het gekozen ontwerp een minimale elektriciteitsprijs inclusief subsidies van 100 euro per MWh vereist is.

Kortom, deze initiële haalbaarheidsstudie concludeert dat de implementatie van een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave mogelijk lijkt te zijn binnen de gestelde eisen, wensen, uitgangspunten en evaluatiecriteria. Het ontwerp optimale ontwerp wordt gepresenteerd in de onderstaande figuur. Tijdens het onderzoek is echter gebleken dat bepaalde eisen, wensen en uitgangspunten zijn gewijzigd ten opzichte van het vooraf opgestelde basis van het ontwerp. Dit vraagt om een extra iteratie van de ontwerpplussen om deze wijzigingen door te voeren.



Een ontwerptekening van het voorkeursontwerp, ontwerpconcept A.2, om een waterkrachtcentrale te implementeren in de toekomstige stuw bij Grave.

Als een waterkrachtcentrale, zoals weergegeven in de bovenstaande figuur, met 18 vijzelturbines en een vermogen van ongeveer 152 kW wordt gerealiseerd bij Grave, dan kan deze naar schatting ongeveer 8.000 huishoudens per jaar van elektriciteit voorzien.

In de laatste fase van het onderzoek wordt de bredere toepasbaarheid van het ontwerp onderzocht voor andere Maas-stuwen. De conclusie is dat het ontwerpconcept breed toepasbaar lijkt te zijn, behalve voor de stuw bij Borgharen. Hierdoor wordt aanbevolen om het ontwikkelde ontwerpconcept te overwegen bij alle vervangingsprojecten van Maas-stuwen. In totaal zouden deze stuwen naar schatting ongeveer 32.000 huishoudens van duurzame energie kunnen voorzien.

De eindconclusie benadrukt echter dat, ondanks positieve indicaties, aanvullend en diepgaander onderzoek nodig is vanwege de complexiteit en veelzijdigheid van factoren die de haalbaarheid beïnvloeden. Aanbevelingen voor verder onderzoek worden gepresenteerd in hoofdstuk 9.2.

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Summary	iii
Samenvatting	vi
1 Introductie	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemanalyse	2
1.3 Probleemstelling	3
1.4 Doelstelling	3
1.5 Scope	3
1.6 Ontwerpaanpak & rapportopbouw	4
2 Systeemanalyse	8
2.1 Analyse op globaal schaalniveau	8
2.1.1 Het belang van deze analyse	8
2.1.2 Uitleg van het Maassysteem	8
2.1.3 Analyse van de scheepvaart op de Maas	13
2.2 Analyse van de stuwen in de Maas (regionaal schaalniveau)	15
2.3 Analyse van de stuw bij Grave (lokaal schaalniveau)	18
2.4 Functionele analyse	19
3 Basis van het ontwerp	21
3.1 Functionele eisen	21
3.1.1 Herkomst en opbouw van de eisen	21
3.1.2 Eisen gerelateerd aan de scheepvaartfunctie	22
3.1.3 Eisen gerelateerd aan de functie wateronttrekking	26
3.1.4 Eisen gerelateerd aan overstromingspreventie	27
3.1.5 Eisen gerelateerd aan het waarborgen van de ecologie	28
3.1.6 Eisen gerelateerd aan het geohydrologisch peilbeheer	29
3.1.7 Eisen aan de waterkrachtcentrale	29
3.2 Eisen aan de ruimtelijke kwaliteit	31
3.3 Constructieve eisen	31
3.4 Evaluatiecriteria	32
3.5 Uitgangspunten	35
3.6 Randvoorwaarden	37
4 Keuze van de toekomstige stuwlocatie	39
4.1 Ruwe locatiekeuze	39
4.1.1 Zeefanalyse	39

4.1.2	Systeemspronganalyse	43
4.1.3	Conclusie ruwe locatiekeuze	45
4.2	Precieze locatiekeuze	46
4.2.1	Inventariseren van potentiële locaties nabij de huidige stuw	46
4.2.2	Verificatie van de ontwerpalternatieven	47
4.2.3	Opzet van het evaluatieproces	51
4.2.4	Waardebepaling	52
4.2.5	Globale kostenraming	54
4.2.6	Multicriteria-analyse (MCA)	55
4.2.7	De precieze locatiekeuze	56
5	Functioneel ontwerp voor de basisstuw	58
5.1	Inventarisatie van de benodigde constructie-elementen	58
5.1.1	Inventarisatie van de constructie-elementen	58
5.1.2	Voorlopige keuze in het type stuwdeur	58
5.1.3	Voorlopige keuze in funderingstype	60
5.1.4	Bepalen van globale dimensies	61
5.2	Ontwikkelen van ontwerpalternatieven	62
5.2.1	Opstellen van de ontwerpprincipes	62
5.2.2	Ontwerpalternatief 1 (50 m brede stuwdeuren)	63
5.2.3	Ontwerpalternatief 2 t/m 5	64
5.3	Verificatie van de ontwerpalternatieven	69
5.4	Evaluatie van de ontwerpalternatieven	71
5.4.1	Opzet van het evaluatieproces	71
5.4.2	Waardebepaling	72
5.4.3	Globale Kostenraming	75
5.4.4	Multicriteria-evaluatie	75
5.5	Presentatie en detaillering van het voorkeursalternatief voor de basisstuw	76
6	Inpassing van de waterkrachtcentrale in de basisstuw	79
6.1	Keuze in waterkrachttechnologie	79
6.1.1	Inventarisatie van beschikbare waterkrachttechnologieën	79
6.1.2	Keuze in waterkrachttechnologieën	80
6.1.3	Presenteren van de gekozen waterkrachttechnologie	82
6.2	Ontwerpen van de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw	83
6.2.1	De werking van de stuw met de waterkrachtcentrale ten behoeve van de conceptvorming	83
6.2.2	Creëren van ontwerpalternatieven	86
6.3	Verificatie van de hydraulische haalbaarheid	89
6.4	Evaluëren van de ontwerpalternatieven	92
6.4.1	Opzet van het evaluatieproces:	93
6.4.2	Waardebepaling:	94
6.4.3	Kostenbepaling:	96
6.4.4	Eindevaluatie:	97
6.5	Presentatie van het voorkeursalternatief	97

7	Verbetering van het voorkeursconcept van een waterkrachtcentrale	98
7.1	Conceptvorming	98
7.1.1	Onderscheid oplossingsprincipe ten behoeve van vorming verbeterde concepten	98
7.1.2	“Verbeterd” ontwerpconcept A.1 – Uitneembare vijzelturbines	99
7.1.3	“Verbeterd” ontwerpconcept A.2 – Plaatsing van de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde	100
7.1.4	“Verbeterd” ontwerpconcept A.3 – Integratie van vijzelturbines in de steunpunten	100
7.2	Functioneel uitwerking	101
7.2.1	Functionele uitwerking ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)	101
7.2.2	Functionele uitwerking ontwerpconcept A.2 (vijzelturbines in de uiterwaarde)	115
7.2.3	Functionele uitwerking ontwerpconcept A.3 (vijzelturbines in de steunpunten)	129
7.3	Evalueren van de verbeterde ontwerpenconcepten	141
7.3.1	Opzet van het evaluatieproces	142
7.3.2	Waardebepaling:	143
7.3.3	Netto contante waarde:	152
7.3.4	De eindevaluatie	153
7.4	Presentatie van het geselecteerde ontwerpalternatief	156
7.5	Analyseren van de bredere toepasbaarheid van het geselecteerde ontwerp	158
7.5.1	Schaalbaarheid	158
7.5.2	Vergelijkbaarheid van stuwcomplexen in de Maas	159
7.5.3	Mogelijkheden grootschalige toepassing	166
8	Validatie	168
8.1	Het doel van de validatie	168
8.2	Opzet van de Validatie	168
8.3	Resultaten van de validatie	169
9	Conclusies & Aanbevelingen	174
9.1	Conclusies	174
9.2	Aanbevelingen:	177

Bijlagen

Bijlage A - Methode voor het bepalen van de energieopbrengst

Bijlage B - Structuur van het financieel model

Bijlage C - Functionele uitwerking ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)

Bijlage D - Constructief ontwerp voor de ophangconstructie gebruikt in ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)

Literatuurlijst

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Een van de grootste problemen waarmee de mensheid volgens het IPCC wordt geconfronteerd in de 21^{ste} eeuw is klimaatverandering. Ondanks de grote onzekerheid en het ontbreken van voldoende validatie van de modellen die klimaatverandering bestuderen wordt het volgens het IPCC plausibel geacht dat de meest ernstige gevolgen nog voorkomen kunnen worden wanneer tijdig werk wordt gemaakt van energietransitie. Duurzame energiebronnen hebben een grote potentie om de emissie van broeikasgassen door fossiele brandstoffen tegen te gaan en daarmee de klimaatverandering te remmen. Daarnaast kan het investeren in het ontwikkelen van duurzame energiebronnen andere voordelen hebben zoals bijdrage aan de sociale en economische ontwikkeling, het verzekeren van een duurzame energievoorziening, en het verminderen van de negatieve effecten op de natuur en de gezondheid (IPCC, 2012).

Verschillende studies naar onderwerpen gerelateerd aan klimaatverandering zijn al verricht. Zowel adaptieve als mitigerende maatregelen zijn onderzocht en geïmplementeerd om de mensheid tegen de gevolgen van klimaatverandering te beschermen. Traditioneel, waren maatregelen in Nederland voornamelijk adaptief, bijvoorbeeld de deltawerken. Op dit gebied is Nederland altijd progressief en vooraanstaand geweest. Desalniettemin wordt steeds duidelijker dat mitigerende maatregelen ook noodzakelijk zijn. Mogelijk kunnen door deze maatregelen de meest ernstige gevolgen van klimaatverandering nog voorkomen worden. Het Nederlandse Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2020) heeft in het rapport “klimaatplan 2021-2030” de nationale doelstellingen opgesteld om te voldoen aan de Europese richtlijnen. In dit rapport staat de doelstelling dat 27% van de energieproductie van Nederland duurzame energie moet zijn in 2030.

De Nederlandse overheidsinstantie, het Planbureau voor de Leefomgeving (2020), heeft vastgesteld dat deze doelstelling alleen behaald kan worden als de reductie op broeikasgassen twee keer zo snel gaat als op dit moment. De voorspelling is dat slechts 25% van de energiebronnen in 2030 hernieuwbaar zijn. Om de mitigatiedoelen van de Nederlandse overheid te halen moet de duurzame energieproductie dus snel groeien. Gebruikelijke duurzame energiebronnen zijn zonne-, wind- en waterkrachtenergie. Waterkrachtenergie is een van de oudste duurzame energiebronnen. Toch wordt er aan deze vorm van duurzame energie in Nederland amper aandacht besteed.

In Nederland is een groot aantal stuwen aanwezig. Al deze stuwen hebben grote delen van de tijd enig verval. Dit indiceert dat er in principe potentie aanwezig is om waterkrachtenergie op te wekken. Waterkrachtenergie heeft zelfs een aantal voordelen ten opzichte van andere duurzame energiebronnen zoals een minder vervuilende impact op het omgevingsaanzicht, minder geluidshinder en de continuïteit van stroomlevering.

De komende jaren staan grote vervangingsopgaves van stuwen in Nederland op de planning. De Maas telt in totaal 7 stuwen die allemaal in potentie waterkrachtenergie kunnen opwekken. De Meeste van deze stuwen zijn gebouwd in 1930 en zijn daarom binnen de komende 10 jaar aan vervanging toe (de Jonge, 2014). De geplande vervangingsopgaves maakt dit een uitstekend moment om onderzoek te doen naar innovatieve ideeën. Wellicht is er een mogelijkheid om waterkrachtcentrales te implementeren toekomstige stuwen.

De vraag naar duurzame energie is dus ongekend hoog. Het is daarom van essentieel belang om iedere potentiële duurzame energiebron te onderzoeken; kracht nog moeite mag bespaard worden om

mitigerende maatregelen tegen klimaatverandering te vinden. Dit in combinatie met de aankomende vervangingsopgave van stuwen in de Maas maakt dit het een goed moment om de mogelijkheden van waterkrachtenergie exploitatie in Nederland te onderzoeken. Dit rapport levert daar een bijdrage aan.

1.2 Probleemanalyse

Een aantal problemen liggen er aan te grondslag dat maar een geringe potentie aan waterkrachtenergie benut wordt in Nederland. Problemen beschreven in deze paragraaf moeten opgelost of weerlegd worden voordat waterkrachtcentrales grootschalig geïmplementeerd kunnen worden in de toekomstige stuwen.

Doorgaans wordt in Nederland enkel op kleine schaalgrootte waterkrachtenergie opgewekt in stuwcomplexen. In de stuwcomplexen bij Linne en Lith liggen de enige waterkrachtcentrales in de Maas. In beide stuwcomplexen zijn slechts 4 turbines aanwezig. Hiermee wordt niet de volledige potentie aan waterkrachtenergie geïutiliseerd. Meerdere redenen hebben de utilisatie van het volledige potentieel aan waterkrachtenergie tegengehouden. Als gevolg hiervan is weinig tot geen onderzoek uitgevoerd naar implementatie van een grootschalige waterkrachtcentrale, meer dan 5 turbines. Deze beslissingen komen echter vaak voort uit een voorbarige en mogelijk vooringenomen verwachting zonder basis van grondig onderzoek. De keuze lijkt enkel gebaseerd te zijn op de algemene aanname dat de baten, het opwekken van duurzame energie, nooit opwegen tegen de kosten in Nederland. Deze perceptie is voornamelijk gebaseerd op het feit dat de geografie van Nederland relatief vlak is vergeleken met landen waar doorgaans waterkrachtenergie gewonnen wordt, bijvoorbeeld Oostenrijk. Vroeger werd verwacht dat hierdoor de opbrengst niet opweegt tegen mogelijke negatieve consequenties. Echter zijn de tijden veranderd, nieuwe technologieën om waterkracht op te wekken zijn beschikbaar gekomen en de vraag naar duurzame energie is drastisch toegenomen, waardoor de afweging heroverwogen dient te worden.

Het grootste probleem bij het maken van de afweging ligt in het ontbreken van kennis waardoor een grote onzekerheid heerst over de impact van grootschalige waterkrachtcentrales. Kennis is noodzakelijk voor het maken van een gedegen beslissing. De volgende onzekerheden bestaan:

- Wordt de waterveiligheid in gevaar gebracht ten gevolge van een ongunstige impact op de hydraulische situatie
- Zorgt de impact op de faalkans voor een onrealistische constructie
- Wat is de impact voor de scheepvaart
- Valt er een haalbare business case te realiseren
- Wat is de waarde van duurzame energie
- De impact op vismigratie en of regelgeving implementatie tegenhoudt.

Een ander probleem voor het maken van een gegronde beslissing is het detailniveau en de ontbrekende optimalisaties van het ontwerp. Tot op heden ontbreekt een representatief ontwerp. Een correcte afweging kan pas gemaakt worden wanneer verschillende ontwerpalternatieven ontwikkeld en bestudeerd zijn. Mogelijk voldoet niet elke vorm van waterkrachtcentrales. Ontwerpoplossing en/of optimalisaties kunnen er toe leiden dat voldaan wordt aan de eisen of de (additionele) waarden kunnen verhoogt worden waardoor het wel opportuun geacht wordt.

Daarnaast kunnen waterkrachtcentrales andere voordelen met zich meebrengen voor het stuwcomplex. Een voorbeelden hiervan is dat het kan bijdragen aan een nauwkeurigere afvoerregulatie, waardoor beter omgegaan wordt met droge periodes. Het is echter nog onbekend en onzeker wat voor additionele waarden waterkrachtcentrales kunnen creëren aangezien er nog onvoldoende onderzoek naar gedaan is. Deze waarden kunnen echter de afweging significant beïnvloeden.

De beschreven problemen hebben in essentie te maken met het ontbreken van kennis en het omgaan met onzekerheid in het maken van een keuze. Tot op heden leidt dit tot de voorkeur voor de aanleg van een 'conservatieve' stuw zonder 'ingewikkelde' innovatieve ideeën. De oorsprong van dit standpunt is dat de mensheid enigszins risico-avers is. In dit geval is men met name risico-avers met betrekking tot de impact op de primaire functies van een stuw, scheepvaart en waterveiligheid. Deze aspecten worden dusdanig belangrijk gevonden door de maatschappij dat men het onverantwoordelijk en ongeoorloofd vinden om risico's te nemen. De vraag is echter of een waterkrachtcentrale de primaire functies van een stuw daadwerkelijk in gevaar brengt of dat dit een voorbarige aanname is. Aan de andere kant kan men ook beredeneren dat het misschien nog onverantwoordelijker en ongeoorloofd is om niet elke potentiële duurzame energiebron in Nederland te benutten om klimaatverandering tegen te gaan. Dit begint bij het maken van een correcte afweging. Om dit te doen is het van belang om onderzoek te doen naar de problemen, onzekerheden en ontwerp oplossingen.

1.3 Probleemstelling

Het is nog niet bekend of en hoe de potentie aan waterkrachtenergie van de stuwen in Nederland volledig geëutiliseerd kan worden binnen de regelgeving. Tot op heden ontbreekt er nog de nodige kennis waardoor het lastig is om een gedegen beslissing te maken.

1.4 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is het uitvoeren van een eerste haalbaarheidsstudie naar grootschalige waterkrachtcentrale implementatie in nieuw te ontwerpen stuwen in de Maas.

1.5 Scope

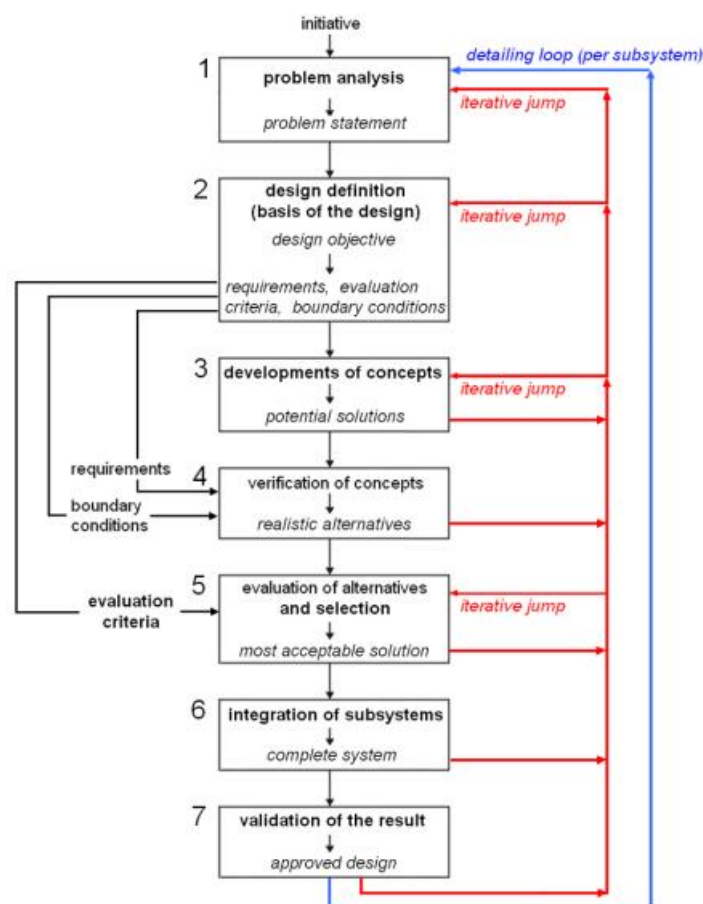
De volgende afbakeningen zijn van toepassing op dit onderzoek:

- Dit onderzoek is beperkt tot de Maas en de stuwen in deze rivier.
- Aanpassingen in de verval-afvoer-relatie voor optimalisatie van waterkrachtenergie zijn buiten beschouwing gelaten.
- Met betrekking tot het ontwerpen valt een deel van de Ruimtelijke kwaliteit buiten de scope van dit onderzoek. Zo valt het optimaliseren van het esthetisch aanzicht buiten de scope.
- Grote wijzigingen op het globale schaalniveau van de rivier de Maas worden niet overwogen. De configuratie van de stuwen blijft ongewijzigd, en het huidige functioneren van de stuw moet behouden blijven.
- Aanpassingen aan de stuwpanden om het verval te vergroten en daarmee de waterkrachtenergie te optimaliseren, evenals veranderingen in de opslagcapaciteit en functies van stuwpanden, worden niet onderzocht. Dit omvat ook de vraag naar het vergroten van de opslagcapaciteit voor het omgaan met droge periodes.
- Optimalisaties om het rendement van de gekozen waterkrachtcentraletechnologie te verhogen, worden niet meegenomen.
- Tweedimensionale en driedimensionale hydraulische analyses vallen buiten de scope van dit rapport.
- Morfologische aspecten van de rivier worden niet behandeld.
- Aanpassingen of optimalisaties van de funderingsdrempel worden niet overwogen.
- Dit rapport doet geen uitspraken over de wenselijkheid van waterkrachtcentrales in toekomstige Maas-stuwen. Dit blijft ter beoordeling van beleidsbepalers.

1.6 Ontwerpaanpak & rapportopbouw

In Nederland zijn een groot aantal stuwen aanwezig waarin potentieel waterkracht energie opgewekt kan worden. Het is de verwachting dat de resultaten in bepaalde mate locatie specifiek zijn omdat ontwerpen van de stuwen uiteenlopen. Omwille van de gelimiteerde tijd van deze thesis is het niet mogelijk om alle stuwen in Nederland te bestuderen. De nieuw te ontwerpen stuw bij Grave is daarom als casestudie genomen. Hiervoor is een ontwerp ontwikkeld die mogelijk bredere toepasbaar is. Ondanks de project afhankelijkheid van het ontwerp kunnen door middel van de casestudie waardevolle conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan. In navolging van de casestudie volgt een generalisatiestap waarin de bredere toepasbaarheid in Maasstuwen onderzocht is.

De basis van de aanpak voor het ontwerpen van de stuw bij Grave is de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode, zoals beschreven staat in “Hydraulic Structures – General Lecture Notes” (Molenaar & Voorendt, 2023). De ontwerpmethode onderscheidt de stappen zoals aangeduid in Figuur 1.1 en hieronder uitgelegd zijn. Dit figuur toont de verschillende ontwerpactiviteiten en de verbanden onderling.



Figuur 1.1: De gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode. Afkomstig van Molenaar & Voorendt (2023).

De volgende fases zijn onderscheiden in de ontwerpmethode:

- Fase 1 – Probleem analyse:
Het doel van deze fase is het verkennen van het probleem. Dit begint met het beschrijven van de aanleiding van het project en het verzamelen van achtergrondinformatie. Door een inventarisatie van de stakeholders te maken worden de belangen inzichtelijk. Daarnaast wordt een functie

analyse uitgevoerd om het functioneren van het systeem vast te stellen. Verder wordt onderzoek gedaan naar randvoorwaarden welke leiden tot beperkingen in het ruimtegebruik en de nodige hydraulische kennis. Uiteindelijk wordt een probleemstelling bepaald die het probleem samenvat en leidt tot de ontwerpdoelstelling.

- Fase 2 – Bepalen van de basis van het ontwerp:
De ingenieur stelt een basis van het ontwerp op om de ontwerpdoelstelling en de eisen van de opdrachtgever te verduidelijken. De probleemanalyse vormt hier de basis voor. De basis van het ontwerp bestaat doorgaans uit de volgende vier onderdelen: een programma van eisen en evaluatiecriteria, randvoorwaarden en uitgangspunten. De eisen zijn opgesteld op basis van de ontwerpdoelstelling en evaluatiecriteria op basis van de belangen van stakeholders.
- Fase 3 – Ontwikkeling van concepten:
Nadat de basis van het ontwerp opgesteld is, moeten ontwerpconcepten worden ontwikkeld. Vormen en technologieën waarmee het probleem kan worden opgelost zijn bedacht. Brainstormsessies worden doorgaans gehouden om eerste concept ideeën te bedenken. Deze fase is gericht op een ruimtelijk en functioneel ontwerp. Het constructieve ontwerp is in eerste instantie buiten beschouwing gelaten. Voor het constructieve ontwerp is in een latere gedetailleerdere ontwerpfase de ontwerpmethodode nogmaals doorlopen.
- Fase 4 – Verificatie van de ontwerpconcepten:
In de verificatiefase zijn de ontwerpconcepten geverifieerd om te controleren of ze functioneren zoals vastgesteld in de ontwerpdoelstelling en gespecificeerd in het programma van eisen. Zowel de functionaliteit als de constructieve veiligheid, bruikbaarheid, duurzaamheid, maakbaarheid en het onderhoud van alle constructie-elementen, subsystemen en het systeem als geheel moeten geverifieerd worden. De verschillende verificaties zijn verspreid over meerdere ontwerplussen afhankelijk van het detailniveau. De uitkomst van de verificatie-fase zijn een aantal realistische ontwerpalternatieven.
- Fase 5 – Evaluatie en selecteren van het optimale ontwerpalternatief:
De evaluatiefase is gericht op het vinden van de juiste balans tussen de gecreëerde waarden en kosten om de waarde te creëren. Het evalueert de haalbaarheid van het ontwerpconcept. Op basis hiervan wordt een geprefereerd ontwerpalternatief geselecteerd. Alle ontwerpalternatieven die meegenomen worden in de evaluatie voldoen aan alle eisen. De evaluatie wordt oneerlijk wanneer dit niet het geval is omdat goede alternatieven dan moeten concurreren met onvolledige of niet correct functionerende alternatieven. Meerdere evaluatiemethoden zoals een Multicriteria-analyse (MCA), Kosten-Baten analyse, risicoanalyse en een 'life cycle approach' kunnen gebruikt worden. De keuze van de evaluatiemethode is afhankelijk van de doelstelling en het gewenste detailniveau van de betreffende ontwerpplus en de wensen van de opdrachtgever.
- Fase 6 – Integratie van subsystemen:
Aangezien de ontwerpmethodode gebruikt kan worden op verschillende detailniveaus waarop subsystemen simultaan worden ontwikkeld moet er een fase zijn waarin deze geïntegreerd worden tot een volledig functionerend systeem. Een overzicht van het ontwerp, de totale kosten, de constructie technologie, materiaal hoeveelheden, materieel een constructieplanning dienen gegeven te worden.
- Fase 7 – Validatie van het resultaat
Dit is de laatste stap. Het is aanbevolen om op het einde een laatste controle te doen van de validiteit van het ontwerp, is de ontwerpdoelstelling juist geformuleerd en correct vertaald naar het programma van eisen. De vraag hierin is of het systeem functioneert zoals voor ogen was. Een onderdeel van het valideren is het controleren of de juiste eisen en criteria zijn gebruikt om het ontwerp te ontwikkelen. Daarnaast is beoordeelt of de ontwerpmethodode geschikt is voor de doelstelling van het onderzoek.

Deze ontwerpmethodologie wordt in het onderhavige rapport in vier ontwerpplussen toegepast. De algehele aanpak van dit onderzoek bestaat uit zeven fases, waarin de eerste zes fases gericht zijn op de casestudie. De fases zijn als volgt:

Fase 1 – Systeemanalyse

Een literatuurstudie en interviews met Rijkswaterstaat vormen de basis voor deze analyse. De uitkomst van deze fase is het verkrijgen van de volgende achtergrondinformatie: een overzicht van de gehele Maas en haar functioneren, een overzicht van de stuwen in de Maas en haar karakteristieke en inzicht in het functioneren van de huidige stuw bij Grave. Daarnaast zijn een stakeholders- en functionele analyse uitgevoerd voor de toekomstige stuwen in de Maas. (Hoofdstuk 2)

Fase 2 – Basis van het ontwerp

Tot op heden ontbreekt een toekomstig stuwontwerp voor de stuw bij Grave. Op basis van de systeemanalyse kan een 'basis van het ontwerp' opgesteld worden waarmee zowel de toekomstige stuw bij Grave als de turbine implementatie hierin ontworpen gaat worden. Het 'basis van het ontwerp' is opgesteld aan de hand van brainstormsessies en interviews met Rijkswaterstaat en werknemers van Royal HaskoningDHV. (Hoofdstuk 3)

Fase 3 – Ontwerplus 1: Locatiekeuze

In deze fase is de ontwerplus afgebeeld in Figuur 1.1 voor het eerst doorlopen. Verschillende locaties zijn door Rijkswaterstaat aangedragen op basis van de constructietechnologie. Vervolgens zijn deze geverifieerd aan de hand van de eisen beschreven in het 'basis van het ontwerp'. Daarna zijn de geverifieerde ontwerpalternatieven met elkaar vergeleken op basis van de evaluatiecriteria. Dit resulteert in het selecteren van het meest realistische ontwerpalternatief en dus een locatie. Tot slot is een optimalisatie slag gemaakt om de exacte locatie te bepalen. (Hoofdstuk 4)

Fase 4 – Ontwerplus 2: Ontwerpen van de basisstuw

De volgende stap is ontwikkelen van een ruimtelijk hydraulisch functioneel ontwerp voor de basisstuw. Zoals eerder aangegeven is er nog geen ontwerp bekend voor de toekomstige stuw bij Grave. Deze dient gegenereerd te worden om te voldoen aan de doelstelling van dit rapport. Voor de tweede keer wordt de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethodologie doorlopen. Ontwerpalternatieven zijn geverifieerd en geëvalueerd aan de hand van de basis van het ontwerp. Een aantal ontwerpkeuzes zijn in deze ontwerpfase aangereikt door Rijkswaterstaat. Deze functioneren als uitgangspunten voor het ontwerp. Een voorbeeld van een dergelijk aspect is dat Rijkswaterstaat twee potentiële deurtypes heeft aangedragen. Op basis van de scheepvaarteis is hier een keuze tussen gemaakt. Vervolgens zijn met dit uitgangspunt ontwerpalternatieven ontwikkeld. Het eindresultaat van deze ontwerpfase is een ontwerp van de basisstuw. (Hoofdstuk 5)

Fase 5 – Ontwerplus 3: Inpassing van de waterkrachtcentrale in de basisstuw

Nadat het ontwerp van de basisstuw is voltooid, verschuift de focus naar het kernaspect van dit onderzoek: het implementeren van een waterkrachtcentrale in een dergelijke toekomstige stuw. Voor de casestudie wordt opnieuw een ontwerplus doorlopen om de optimale manier te bepalen waarop een waterkrachtcentrale in de basisstuw kan worden ingepast.

Als laatste stap in deze onderzoeksfase wordt de bredere toepasbaarheid van het optimale ontwerp dat is geïdentificeerd voor de casestudie, de stuw bij Grave, onderzocht. Aan de hand van kenmerkende eigenschappen wordt onderzocht of dit ontwerp ook toepasbaar kan zijn bij vervangingsprojecten voor andere Maas-stuwen. (Hoofdstuk 6 en 7)

Fase 6 – Validatie van het ontwerp

Als het optimale ontwerp voor de inpassing van de waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave is gekozen, moet als laatste stap het definitieve ontwerp worden gevalideerd. De validatie van het ontwerp wordt uitgevoerd door deze te presenteren aan Rijkswaterstaat. De bevindingen uit deze sessie worden beschreven in hoofdstuk 8.

Dit is de laatste fase van dit onderzoek. Tot slot, worden in hoofdstuk 9 de conclusies van het onderzoek samengevat en aanbevelingen gegeven.

2 Systeemanalyse

Dit hoofdstuk beschrijft de systeemanalyse. De systeemanalyse is uitgevoerd op drie niveaus. Het eerste niveau is de globale analyse. Hierin worden onder andere het Maassysteem als geheel en haar functioneren geanalyseerd. Daarna is een overzicht van de huidige stuwen gegeven. Deze analyse is noodzakelijk voor het onderzoeken van de algemene toepasbaarheid van het ontwerp. Vervolgens verschuift de focus naar de casestudie. Een regionale- en lokale analyses van de stuwpanden rond Grave zijn uitgevoerd om randvoorwaarden voor de casestudie te bepalen. Verder is een bondige probleemanalyse van de huidige stuw bij Grave gegeven. Tot slot, zijn een stakeholders- en functionele analyse voor de casestudie uitgevoerd om respectievelijk de evaluatiecriteria en eisen te bepalen.

2.1 Analyse op globaal schaalniveau

2.1.1 Het belang van deze analyse

Voor het ontwerpproces op lokaal schaalniveau is het nodig om het systeem en haar functioneren op globaal schaalniveau te begrijpen. Lokale interferenties kunnen namelijk mogelijk een negatieve impact hebben op het functioneren van het riviersysteem op globaal schaalniveau. Punten van aandacht dienen uitgelicht te worden zodat deze in acht genomen kunnen worden in het ontwerpproces.

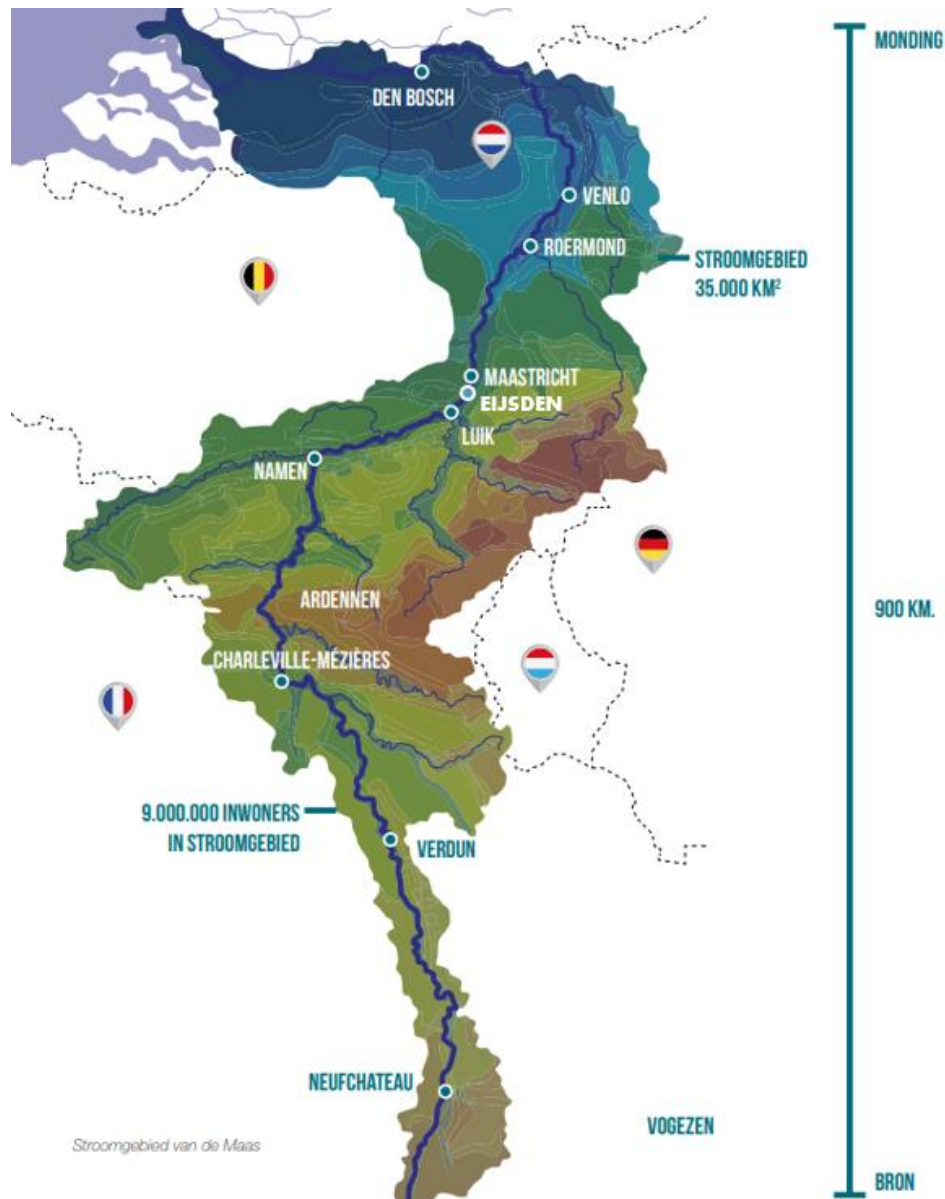
Verder is de systeemanalyse op globaal schaalniveau gebruikt voor het verder verduidelijken van de scope. Er is namelijk nog een aantal aspecten onduidelijk en onzeker over het functioneren van het toekomstige Maassysteem. Een aantal aannames voor het ontwerp en voor beperkingen van de scope moeten worden gemaakt. Het is onmogelijk om elk vraagstuk wat er bestaat voor de toekomstige stuwen te onderzoeken in een thesis. Wanneer geen keuzes in deze ontwerpfase gemaakt worden bestaat het gevaar dat het ontwerp beperkt blijft tot een (te) abstract niveau. Dit maakt trekken van waardevolle conclusies gericht op de waterkrachtcentrales lastig.

De aannames worden in deze paragraaf gedocumenteerd zodat het voor een vervolgstudie duidelijk is welke limitaties het ontwerpproces in deze thesis bevatten. Het is te kort door de bocht om een aantal aspecten bondig op te nemen in de scope van paragraaf 1.5. Voor een aantal aspecten moet de achtergrond, verschillende kanten van het probleem worden beschreven en de aannames worden uitgelegd. Dit is van essentieel belang voor de basis van het ontwerp (hoofdstuk 3). Belangrijke aspecten die in overweging moeten worden genomen bij het definiëren van de werking van de toekomstige stuw zijn:

- Moet het mogelijk zijn dat scheepvaart tijdens hoogwater condities het stuwcomplex kan passeren door de stuwopening(en)?;
- Hoe wil Rijkswaterstaat omgaan met het probleem van bodemdaling?

2.1.2 Uitleg van het Maassysteem

De rivier de Maas is de op één na grootste rivier in Nederland, na de Rijn. Een overzicht van de gehele Maas wordt getoond in Figuur 2.1. De Maas is een 935 km lange regenrivier die ontspringt in het noorden van Frankrijk. De stroomgebieden bevinden zich voornamelijk in de Ardennen en het Eifelgebied. Het water stroomt via België richting Nederland, waar het in het zuiden bij Eijsden binnenkomt. De rivier komt Nederland in het zuiden binnen bij Eijsden. Vanaf daar stroomt de rivier verder richting de Noordzee.

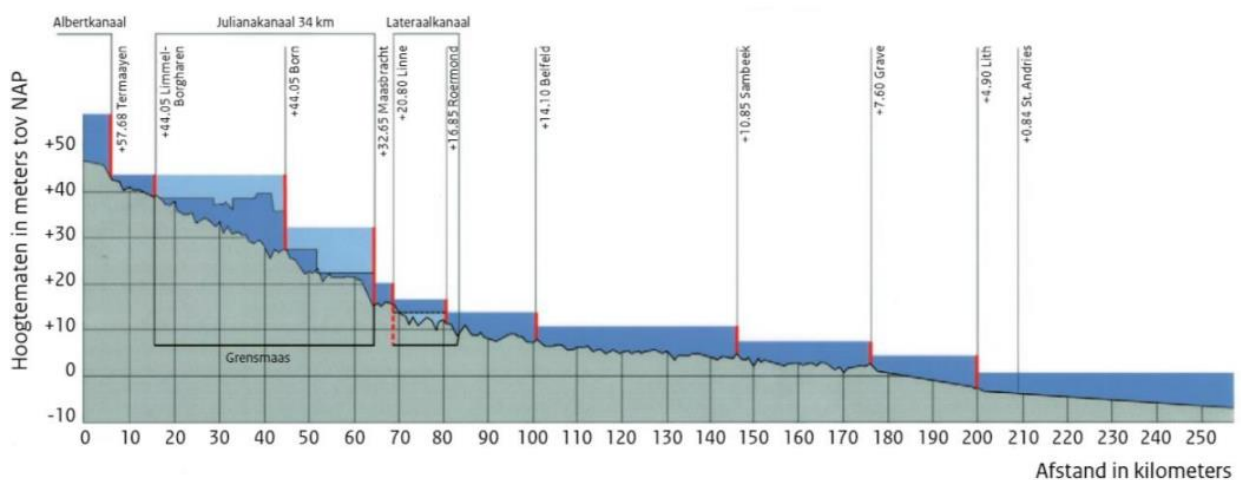


Figuur 2.1: Schematische weergaven van het rivier de Maassysteem, inclusief stroomgebieden. Afkomstig van Asselman et al. (2019) (Aangepast).

De afvoer in de rivier de Maas is voornamelijk afhankelijk van neerslag en in mindere mate van smeltende sneeuw. Vanwege de voornaamste afhankelijkheid van neerslag fluctueert de afvoer sterk. Bij zware neerslag in de Ardennen of het Eifelgebied stroomt het water snel over de steile en ondoordringbare ondergrond naar de rivier, waardoor een dag later al een piekafvoer of zelfs een vloedgolf in Nederland kan aankomen.

Een andere aspect dat sterke fluctuaties van de afvoer veroorzaakt is het effect van de jaargetijden. Er is een duidelijk verschil in afvoer tussen de jaargetijden. In de winter en de start van de lente neemt de afvoer sterk toe door een combinatie van verhoogde neerslag in het stroomgebied, minder infiltratie van water in de ondergrond en een lagere verdamping doordat de temperaturen dan relatief laag zijn. Anderzijds is er ook het probleem van droogte in de zomermaanden. De afvoer in de rivier de Maas is namelijk zeer laag wanneer er weinig tot geen neerslag valt en er veel verdamping optreedt door de hoge temperaturen. De afvoer is dan zodanig laag dat er problemen ontstaan voor de scheepvaart.

In de studie van Asselman et al. (2019) worden verschillende kenmerken van de rivier de Maas beschreven. Zoals hierboven vermeld, wordt de rivier de Maas gekenmerkt door zijn sterk fluctuerende afvoer. Deze fluctueert tussen de 20 en 3000 m³/s, met een gemiddelde van 230 m³/s. De maximaal gemeten afvoer bij luik bedroeg 3000 m³/s (winter 1993). Om continue scheepvaart mogelijk te maken en het overstromingsrisico beter te beheersen, is de rivier de Maas gekanaliseerd, genormaliseerd en zijn stuwen aangelegd. In de vorige eeuw werden zeven stuwen geconstrueerd in het Nederlandse deel van de rivier de Maas. Een overzicht in de langsrichting van de Nederlandse cascades van de rivier wordt getoond in Figuur 2.2. Op de verticale-as worden de hoogtes weergegeven ten opzichte van het Normaal Amsterdams peil (NAP). Dit wordt in het restant van deze thesis aangehouden als referentiepoint.



Figuur 2.2: Een overzicht in langsrichting van het Nederlandse deel van de rivier de Maas met daarin de stuwen en bijbehorende cascades aangegeven. Afkomstig van Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. (2012).

Het Nederlandse deel van de rivier de Maas onderscheidt zes verschillende gedeeltes, die worden gekenmerkt door de samenstelling van de ondergrond: Bovenmaas, Grensmaas, Plassenmaas, Zandmaas, Bedijkte Maas en Getijdenmaas. De verschillen tussen de riviergedeeltes zijn het gevolg van de geologische geschiedenis, menselijk ingrepen en water- en sedimentbeweging. (Asselman et al., 2019) De verschillende riviergedeeltes worden weergegeven in Figuur 2.3. Een korte beschrijving van de riviergedeeltes volgt onder de figuur.



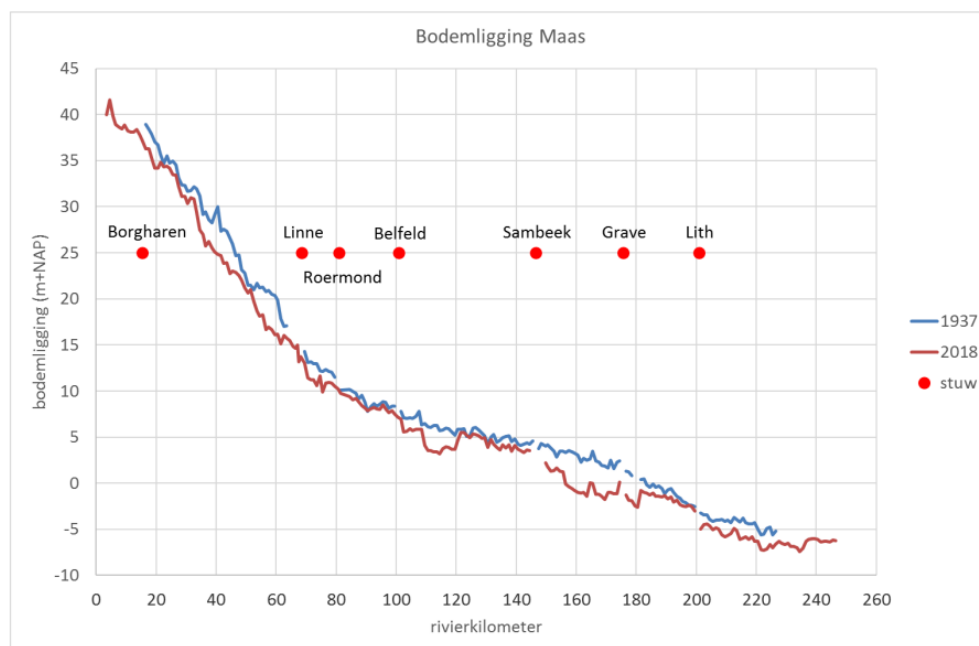
Figuur 2.3: Een bovenaanzicht van de rivier de Maas in Nederland waarin de zes verschillende riviertrajecten worden aangegeven. Afkomstig van Asselman et al. (2019).

Beschrijvingen van de verschillende riviergedeeltes (Asselman et al., 2019):

- **Bovenmaas:** gelegen in het zuidelijke deel van Limburg. Dit deel betreft een heuvellandschap waarin de rivier de Maas zich diep heeft ingesneden en terrassen heeft achtergelaten. De rivier stroomt door een harde mergelbodem die erosiebestendig is. Rond de stedelijke gebieden liggen dijken langs de rivier.
- **Grensmaas:** Dit is het natuurlijkste deel van de Maas in Nederland; dit deel is ongestuwd waardoor water vrij afstroomt. Dit gedeelte heeft een grote natuur- en ecologische waarde. De bodem van dit riviergedeelte is opgebouwd uit grind en zand. De waterdieptes en stroomsnelheden kunnen hier sterk fluctueren. Schepen varen hier via het nabijgelegen Julianakanaal. In eerste instantie waren er plannen om in dit gedeelte van rivier de Maas zeven extra stuwen te construeren om het grote hoogteverschil te overbruggen. Uiteindelijk is er echter besloten om dit niet te doen omdat het te duur en tijdrovend zou zijn voor scheepvaart. Dit resulteerde in de aanleg van het Julianakanaal in 1935.
- **Plassenmaas:** De helling van de rivier wordt vanaf dit punt beduidend flauwer. In het verleden heeft de rivier een grote hoeveelheid grof zand en grind afgezet. Door grindwinning zijn hier grote plassen ontstaan. Deze plassen hebben een dempende werking op hoogwaterpieken. In dit riviergedeelte monden verschillende beken uit in de rivier de Maas. De beroepsscheepvaart varen in dit deel niet over de rivier maar via het nabijgelegen Lateraalkanaal.

- **Zandmaas:** De rivier stroomt hier door een smal dal om zich vervolgens weer te verbreden. Waar de Maas door Venloslenk loopt, liggen dikke pakketten grind in de ondergrond. Op sommige plaatsen ligt juist weer heel fijn zand dicht onder het beddingmateriaal.
- **Bedijkte Maas:** Vanaf Cuijk verandert de rivier echt van karakter. De rivier stroomt hier de laaggelegen overstroomingsgebieden van de Rijn en de Maas in. De rivierbedding is overwegend opgebouwd uit zand. Aan weerszijden van de rivier liggen dijken en hoog opgeslibde weerden met daarachter een landschap van oeverwallen en komgronden. Recentelijk zijn enkele grote Maasmeanders heringericht voor de natuur en de waterveiligheid.
- **Getijdenmaas:** Vanaf hier stroomt de rivier weer vrij af en zijn de invloeden van getijdestromingen merkbaar.

In het rapport 'het verhaal van de Maas' (Asselman et al. 2019) wordt aangegeven dat het rivierbed van de rivier de Maas ingrijpend is veranderd door zand- en grindwinning. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 zijn rivierverruimingsmaatregelen uitgevoerd in de Zandmaas en de Grensmaas. Deze verruimingen zijn gecombineerd met zand- en grindwinning. Zowel in de Plassenmaas, Grensmaas en de Bedijkte Maas zijn gedurende vele jaren grote hoeveelheden zand en grind gewonnen, wat heeft geleid tot aanzienlijke daling van het zomerbed. Figuur 2.4 (Schropp en Tuin, 2021) toont deze daling. Op een aantal plaatsen is het zomerbed in de afgelopen 100 jaar met wel 5 meter gedaald. Naast grindwinning kunnen andere oorzaken van de bodemdaling bodemerosie, bochtafsnijding en zomerbedverdiepingen zijn (Schropp en Tuin, 2021).



Figuur 2.4: Een grafiek van de bodemontwikkeling in rivier de Maas. Afkomstig van Schropp en Tuin. (2021).

De opbrengst van de zand- en grindwinning vormt een belangrijke financieringsbron voor hoogwatermaatregelen en natuurontwikkeling. Men verwacht daarom dat deze activiteit minstens tot 2027 zal voortduren. (Asselman et al. 2019)

Het is essentieel om rekening te houden met de gevolgen van bodemdaling. De bodemdaling heeft voornamelijk gevolgen voor de fundering, scheepvaart en het sedimenttransport. Een hoogteverschil kan ontstaan doordat de rivierbodem daalt terwijl de fundering op dezelfde hoogte blijft. Dit hoogteverschil kan

problemen veroorzaken voor scheepvaart; lokaal kan de diepgang ontoereikend zijn. Ook kan het de stabiliteit van de fundering in gevaar brengen, evenals mogelijke morfologische problemen veroorzaken.

Een correct ontworpen funderingsdrempel is van groot belang om ernstige problemen te voorkomen. Nauwkeurig morfologisch onderzoek is nodig. In het huidige ontwerpproces zijn de gevolgen van bodemdaling en de funderingshoogte geïdentificeerd, maar verder buiten beschouwing gelaten. Er wordt aangenomen dat de toekomstige stuw dezelfde funderingshoogte heeft als de huidige stuw. In de huidige ontwerpfase worden oplossingen voor de omvang van verdere bodemdaling over de levensduur van de toekomstige stuw buitenbeschouwing gelaten. Dit vereist een separaat onderzoek. Omwille van de tijd wordt dit niet betrokken in het huidige ontwerp. Er wordt verwacht dat de impact op de werking van de waterkrachtcentrale gering is. Er wordt verwacht dat dit geen invloed heeft op de conclusies die belangrijk zijn voor de doelstelling van dit onderzoek.

2.1.3 Analyse van de scheepvaart op de Maas

In deze paragraaf wordt de scheepvaart op de rivier de Maas, met nadruk op het gebied rond de stuw bij Grave, geanalyseerd. Deze analyse zal een belangrijke keuze bevatten die de rest van het ontwerpproces beïnvloedt. Momenteel hebben Rijkswaterstaat en andere beleidsbepalende partijen namelijk nog geen duidelijk visie voor scheepvaart tijdens hoogwater. Dit komt doordat de juiste strategie afhangt van diverse conflicterende belangen die eerst grondig moeten worden onderzocht voordat een weloverwogen en definitieve conclusie kan worden getrokken. Na een beknopte beschrijving van de huidige scheepvaart op de Maas, worden de mogelijk opties voor scheepvaart tijdens hoogwater besproken. Uiteindelijk zal er een aanname worden gemaakt op basis van de verwachtingen van experts. Deze aanname zal niet meer veranderen gedurende de rest van het ontwerpproces.

In het verleden zijn er aanpassingen gedaan aan de rivier de Maas om ervoor te zorgen dat deze bijna het hele jaar door bevaarbaar is voor het transport van goederen. De kanalisatie, de normalisatie van de rivier en de constructie van de zeven stuwen hebben ervoor gezorgd dat bijna het hele jaar door voldoende diepgang over de gehele Maas is voor scheepvaart. Met uitzondering van de grensmaas, waar schepen door het nabijgelegen Julianakanaal varen.

In de loop der tijd is de maatgevende scheepvaartklasse veranderd. De dimensies van de maatgevende schepen veranderen continu vanwege de wereldwijd groeiende vraag naar goederentransport. Er bestaat een sterke correlatie tussen de dimensies van de schepen en die van de waterweg. Hierdoor zijn voortdurende aanpassingen aan de rivier nodig. De huidige classificatie van de rivier de Maas is CEMT Va. Rijkswaterstaat (z.d.) heeft aangegeven dat de Maasvaartroute geschikt wordt gemaakt voor de scheepvaartklasse CEMT Vb. Grotendeels wordt de rivier de Maas al geclassificeerd als een CEMT Vb waterweg.

Een belangrijk aspect om aan te geven is dat de stuw bij Grave vaak als alternatieve transportroute wordt gebruikt voor goederen die bestemd zijn voor Duitsland. Dit gebeurt wanneer de waterstanden in de rivier de Waal, de traditionele transportroute naar Duitsland, te laag zijn voor scheepvaart. In de alternatieve transportroute worden de goederen per schip over de rivier de Maas vervoerd tot aan Venlo, waarna de goederen verder landinwaarts worden vervoerd via andere transportmiddelen zoals de weg of het spoor. Het is de verwachting dat deze transportroute in de toekomst nog frequenter zal worden gebruikt als de periodes van droogte in de rivier de Waal blijven toenemen. Het gevolg hiervan is dat de bottleneck rondom Grave waarschijnlijk nog verder toeneemt. Afgelopen jaren is het aantal schepen dat Grave passeert hierdoor al sterk toegenomen. Op basis van de binnenvaartcijfer (Rijkswaterstaat geciteerd in binnenvaartcijfers, 2018) is geconstateerd dat de huidige intensiteit van het scheepvaartverkeer bij Grave ongeveer 12.500 beroepsvoertuigen per jaar bedraagt.

Op dit moment navigeren schepen tijdens hoogwater door het stuwcomplex via de opening(en) van de stuw. Figuur 2.5 toont een hoogwatersituatie bij de stuw in Borgharen. In deze situatie kan de sluis niet worden gebruikt omdat deze volledig onder water staat. Toch kunnen schepen onder deze omstandigheden het stuwcomplex passeren. De stuwdeuren zijn namelijk volledig geopend (ook wel 'gestreken'), waardoor het water vrij afstroomt en de scheepvaart niet wordt belemmerd om door de stuwopeningen te varen. Schepen zijn toegestaan om door de stuwopeningen te varen wanneer de deuren volledig zijn geopend. Het debiet waarbij de stuwdeuren worden geopend, varieert per stuw. Deze debietwaarden worden voor elke stuw weergegeven in Tabel 2.1.



Figuur 2.5: Helikopter foto van de Maas bij de stuw van Borgharen tijdens extreem hoogwater condities. De foto is afkomstig van Rijkswaterstaat (M. Schropp & H. Tuin, symposium, 2021 April 15)

Toen de huidige Maas-stuwen werden ontworpen, ging men ervan uit dat het essentieel was dat schepen ook tijdens hoogwater het stuwcomplex moesten kunnen passeren. De motivatie hiervoor was het vermijden van stilstand, met als doel om de maximale economische potentie van het transportmiddel scheepvaart te benutten. In tegenstelling tot de kennis van ingenieurs tegenwoordig was er destijds nog beperkte kennis beschikbaar over het functioneren van de genormaliseerde Maas en de neveneffecten van dergelijke ingrepen in de natuur. Een bevaarbare stuwopening werd toen gewenst geacht.

Tegenwoordig is er binnen Rijkswaterstaat (Kortlever, 2021) discussie of deze functie noodzakelijk is. Dankzij de toename in beschikbare kennis, met name door data, is het belang van deze functie ter discussie komen staan. Dit komt doordat de frequentie van het strijken van de stuw redelijk klein blijkt te zijn en de duur hiervan gering is. Volgens het rapport van De Onderzoeksraad voor Veiligheid (2018) wordt de stuw slechts één of twee keer per jaar gestreken, en dit duurt doorgaans slechts ongeveer 1 of 2 dagen. Hierdoor vraagt Rijkswaterstaat zich momenteel af of de beperkingen die deze functie oplegt aan de ontwerpvrijheid wel opwegen tegen de voordelen.

De volgende stap is het bespreken van alternatieve oplossingen en het nemen van een beslissing waarmee verder wordt gewerkt in het ontwerpproces. Een potentiële oplossing is om de dimensies van de sluis, met name de waterkerende hoogte, te vergroten en duidelijke bewegwijzering aan te brengen, zodat schepen tijdens hoogwater ook via de sluisen het stuwcomplex kunnen passeren. Een ander optie is om wachttijd voor schepen tijdens hoogwater te accepteren. In dat geval moeten schepen voor de stuw wachten totdat de sluisen weer operationeel zijn. Grondig onderzoek, dat buiten de scope van deze studie

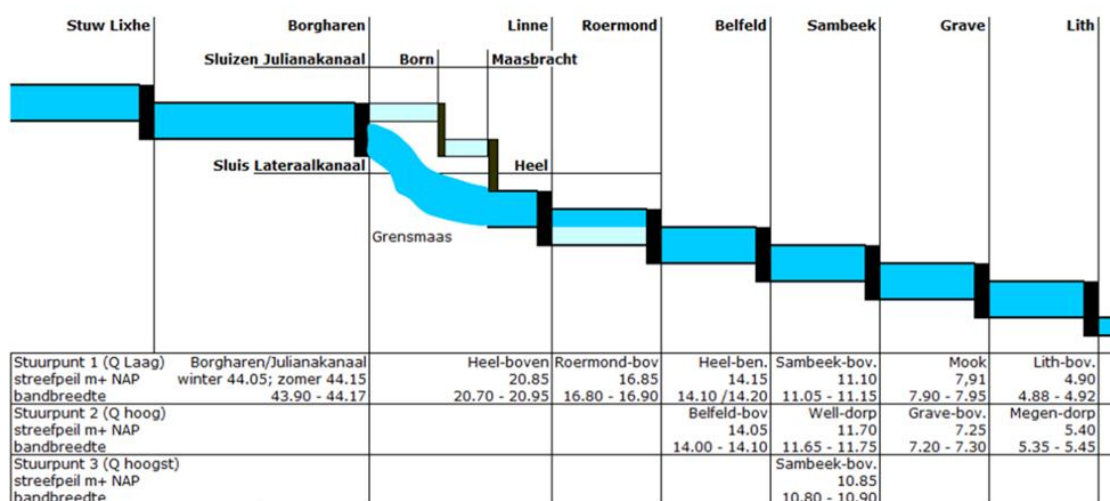
valt, is nodig om een weloverwogen conclusie te trekken. Aspecten die moeten worden onderzocht, zijn onder andere de impact op stakeholders, de potentiële weerstand uit de industrie en politiek, het mogelijke economische verlies, de extra waarde die kan worden gecreëerd in het ontwerp doordat niet meer aan de functie hoeft te worden voldaan, de kosten die gepaard gaan met het vergroten van sluisdimensies en een vergelijking tussen de alternatieven.

Vanwege de gelimiteerde tijd en de focus van deze thesis op de implementatie van waterkrachtcentrale, is besloten dat het ongewenst is om met een openstaande ontwerpkeuze op dit onderwerp verder te werken. Dit zou een extra ontwerpvariabele introduceren, wat het ontwerpproces gecompliceerd en minder onoverzichtelijk zou maken. Ook zou de focus op de doelstelling worden verminderd. In plaats daarvan is op basis van interviews met experts op dit vakgebied, de heren Moll (2022) en Schropp (2021), een besluit genomen. Dit besluit vormt het uitgangspunt voor dit ontwerpproces.

Tijdens de interviews hebben zij hun verwachtingen voor de toekomstige stuwen uitgesproken. Hierbij werd benadrukt dat scheepvaart de primaire functie van een stuw is, en daarom is het niet wenselijk om hier concessies aan te doen. De afwikkeling van goederen is juist tijdens de condities dat de stuw gestreken is groot omdat schepen dan geen wachttijden hebben voor de sluisen. De verwachting is dat de economische waarde van deze functie voor Nederland dermate groot is dat niet van deze functie kan worden afgezien. Uiteindelijk kan het niet handhaven van deze functie mogelijk leiden tot het verlies van de sterke positie van Nederland als handelsland. De conclusie is dus dat het toekomstige stuwontwerp rekening moet houden met de eis dat scheepvaart het stuwcomplex moet kunnen passeren tijdens hoogwater via de stuwopeningen.

2.2 Analyse van de stuwen in de Maas (regionaal schaalniveau)

De volgende stap is het analyseren van de zeven stuwen in de Maas. In Figuur 2.6 worden de stuwpannen en bijbehorende streefpeilen schematisch weergegeven. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen drie afvoerregimes. Deze worden verderop in de huidige paragraaf beschreven.



Figuur 2.6: Schematisch overzicht van de stuwpannen in het riviersysteem de Maas met daarin de bijbehorende streefpeilen afhankelijk van het regime (laag, hoog en hoogst) aangegeven. Afkomstig van Rijkswaterstaat (Kortlever, 2021)

Deze zeven stuwen reguleren de waterstanden in het riviersysteem. Alle stuwen zijn gebouwd rond 1930 en naderen nu het einde van hun levensduur. Volgens het rapport "Vervangingsopgave Natte

Kunstwerken (VONK) Stuwen Maas” (de Jonge, 2014) is geconcludeerd, op basis van andere projecten en frequente inspecties, dat de veroudering van de constructies leidt tot degradatie van de materiaalkwaliteit, wat in de nabije toekomst een probleem zal worden. Bovendien zullen de huidige stuwen niet kunnen voldoen aan toekomstige functionele eisen, rekening houdend met de gevolgen van klimaatverandering.

In hetzelfde rapport wordt ook vermeld dat in het programma RINK (Risico Inventarisatie Natte Kunstwerken) wordt benoemd dat met systematiek onderhoudsmaatregelen de Maas-stuwen tot circa 2030 operationeel gehouden kunnen worden. Het is op dit moment niet de verwachting, dat de levensduur van deze stuwen na 2030 kan worden verlengd, door middel van grootschalige renovatie. (de Jonge, 2014)

In Tabel 2.1 wordt een overzicht gegeven van de geschatte vervangingstijden van de stuwen. De periode voor de vervangingsopgave van de stuwen varieert van 2025 tot 2040. Deze geplande vervangingen van de stuwen bieden een uitstekende gelegenheid om innovatieve ideeën, zoals de integrale implementatie van waterkrachtcentrales, in de toekomstige stuwen te ontwerpen en te onderzoeken. In eerste instantie richt deze thesis zich op de stuw die naar verwachting als eerste aan vervanging toe is, namelijk Grave (rond 2028).

Verderop in Tabel 2.1 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen van de zeven stuwen in de Maas. Deze informatie is afkomstig van Rijkswaterstaat (Schropp & Tuin, 2021). In het volgende gedeelte worden enkele aspecten uit deze tabel belicht om een grondig begrip van de stuw-systemen te verschaffen.

Bij het berekenen van de energieopbrengst is het belangrijk om te beseffen dat de waarde voor het verval, zoals vermeld in Tabel 2.1, niet constant is. Deze waarde is vastgesteld op basis van het streefpeil in zowel het beneden- als bovenstroomse stuwpan. In de praktijk varieert het verval. Deze waarde vertegenwoordigt min of meer de bovengrens van het verval. Afhankelijk van de afvoer varieert het verval tussen nul en deze waarde. Voor waterkrachtcentrales die energie opwekken door zwaartekracht, heeft dit een aanzienlijke invloed op het vermogen van de waterkrachtcentrale. In vergelijking 2.1 wordt de formule weergegeven waarmee het vermogen van een dergelijke waterkrachtcentrale berekend kan worden. Verderop in het rapport, wanneer de optimale waterkrachttechnologie is gekozen, wordt beschreven hoe data gebruikt kan worden om het vermogen te bepalen.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad (\text{vgl. 2.1})$$

Waarin:

$$P = \text{Vermogen [W]}$$

$$\rho = \text{Dichtheid van rivierwater} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$g = \text{valversnelling} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

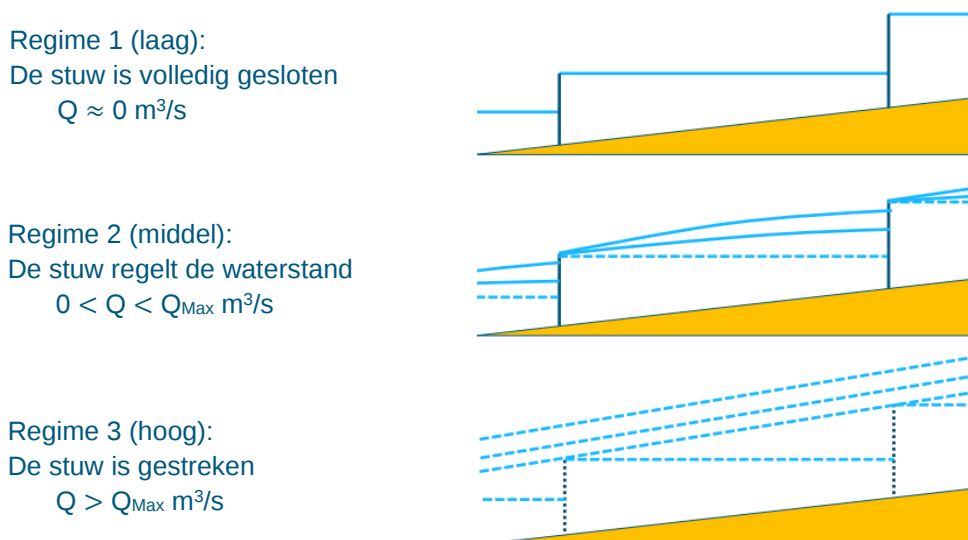
$$Q = \text{debiet} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\eta = \text{rendement [-]}$$

Om te beginnen kan het functioneren van een stuw in de Maas worden onderverdeeld in drie regimes. Een illustratie van deze drie regimes en hun effecten op de waterstand wordt weergegeven in Figuur 2.7. Het eerste regime, bij lage waterafvoeren, betreft een situatie waarin de stuw gesloten is. In deze situatie is het hoogteverschil het grootst, maar kan er geen energie worden opgewekt omdat lekverlies moet worden geminimaliseerd. Het lekverlies moet worden geminimaliseerd zodat goed omgegaan kan worden

met droge periodes; met name nog steeds voldoende diepgang voor schepen is. In het tweede regime, tijdens de operationele fase van de stuw bij gemiddelde waterafvoeren, regelen de stuwdeuren de waterstand stroomopwaarts. De stuwdeuren zorgen ervoor dat de waterstanden stroomopwaarts boven het streefpeil liggen, zodat er voldoende diepgang is voor scheepvaart. Als de waterafvoer blijft stijgen en de stuwdeuren de waterstand niet langer kunnen regelen, treedt het derde regime in werking. In dit regime worden de stuwdeuren gestreken, oftewel volledig geopend. In deze situatie is de volledige afvoercapaciteit nodig om de relatief grote waterafvoer aan te kunnen, met als doel overstromingen te voorkomen. In deze situatie is er geen verval over de stuw, waardoor er geen energie kan worden opgewekt. Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven passeert scheepvaart in deze situatie het stuwcomplex door de stuwopeningen. Voor welke stuwen dit het geval is wordt tevens in de tabel aangegeven. Het moment waarop de stuw wordt gestreken, verschilt per stuw. De verschillende waterafvoer waarbij de stuwen worden gestreken, wordt ook aangegeven in Tabel 2.1. Als de waterafvoer verder toeneemt, kan de waterveiligheid in gevaar komen, en op dat moment is de stuw niet meer functioneel.

Het operationele plan voor de Maas-stuwen kan dus worden onderverdeeld in drie regimes: laag, middel en hoog. Het middelste regime biedt de meeste mogelijkheden om waterkrachtenergie op te wekken. Het is belangrijk op te merken dat het hoogteverschil tijdens dit regime varieert. De drie regimes van het operationeel plan worden schematisch weergegeven in Figuur 2.7.



Figuur 2.7: Schematische weergave van een stuwpand in de Maas met verschillende afvoerregimes. Afkomstig van Kortlever (2021) (Aangepast).

Naast de hierboven genoemde gegevens, is het belangrijk om een aantal andere parameters van de stuwen overzichtelijk in kaart te brengen. Uiteindelijk wordt mede op basis hiervan de bredere toepasbaarheid voor het ontwikkelde ontwerp voor de casestudie onderzocht. Deze parameters worden gegeven in Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Overzicht van eigenschappen van Maas-stuwen. De gegevens zijn grotendeels afkomstig uit het rapport "Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (VONK) Stuwen Maas" (de Jong, 2014). Alleen de waarden voor de parameter 'Moment van strijken' zijn afkomstig uit het symposium stuwen Maas (Schropp & Tuin, 2021).

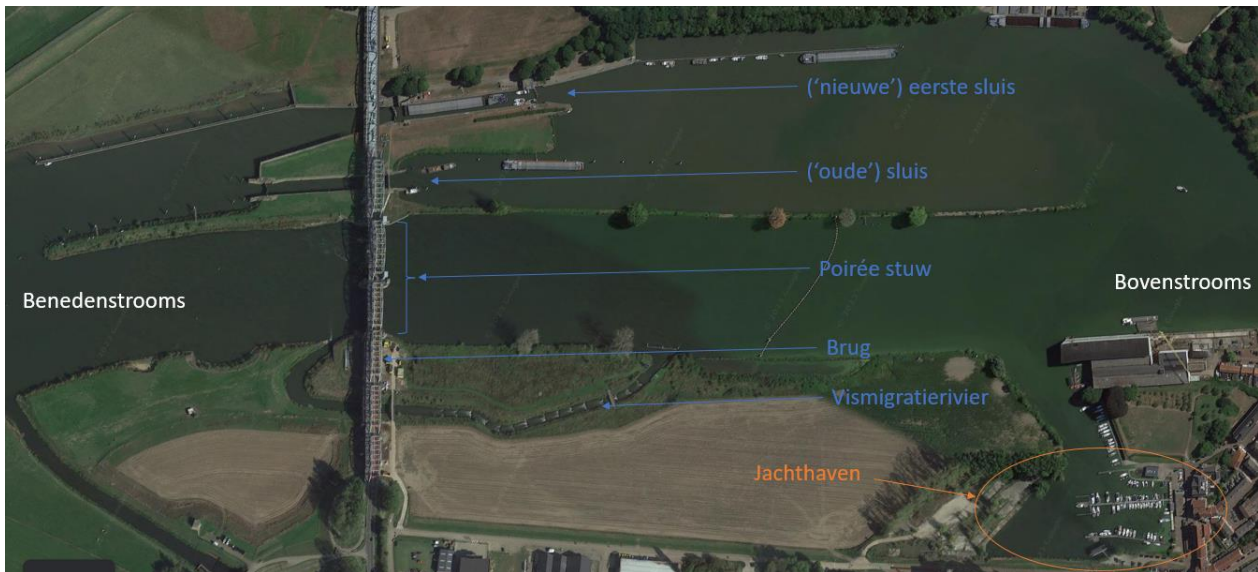
Parameter	Sambeek	Borgharen	Linne	Roermond	Belfeld	Grave	Lith
Type stuw	Poirée/ Stoney	Schuif/klep	Poirée/ Stoney	Poirée/ Stoney	Poirée/ Stoney	Poirée	Schuif/ klep
Bouwjaar [j]	1925	1928	1921	1921	1924	1926	1936
Verwachte jaar voor vervanging	2030-2035	2025 – 2030	2035-2040	2030-2035	2030-2035	2030-2035	2035-2040
Verval [m]		Ca. 5,10	4,0	2,7	3,05	3,05	Ca. 3,90
Streefpeil bovenstrooms [NAP + m]	44,05	20,85	16,85	14,15	11,10	7,95	4,95
Moment van strijken	Ca. 1100	Ca. 1500	Ca. 1300	Ca. 1000	Ca. 800	Ca. 1800	Ca. 1300
Debiet door vismigratierivier	4	4	4	4	4	4	4
Scheepvaart door stuwopening?	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Aanwezigheid Waterkrachtcentrale	-	-	Ja, vier Kaplan turbines	-	-	-	Ja, vier Kaplan turbines

2.3 Analyse van de stuw bij Grave (lokaal schaalniveau)

Het stuwcomplex bij Grave is operationeel sinds 1929. In het stuwcomplex komen meerdere functies samen, zoals transport over de weg en over het water. De brug in het stuwcomplex maakt transport over de weg mogelijk. Deze brug fungeert ook als de belangrijkste ondersteunende structuur van de stuwdeuren. Het systeem voor de regeling van de waterafvoer is gebaseerd op de zogenaamde "omgedraaide poirée" technologie. Daarnaast heeft stuwcomplex een sluis, die het voor scheepvaart mogelijk maakt om het stuwcomplex te passeren, en is er een vismigratierivier aangelegd om het de vismigratie te bevorderen. In Figuur 2.8 wordt een luchtfoto van het stuw complex getoond met daarin alle relevante stuwcomponenten aangegeven.

Met betrekking tot de stuwcomponenten is het belangrijk om twee aspecten aan te geven. Het eerste aspect is dat het verboden is om de huidige brug te slopen. Deze is namelijk beoordeeld met de monumentale status. (Schropp & Tuin, 2021)

Hetzelfde geldt voor de oude sluis. Daarnaast wordt het niet wenselijk geacht op basis van economische redenen om de nieuwe sluis al te vervangen. Deze is namelijk nog niet aan het einde van haar levensduur. (Schropp & Tuin, 2021)



Figuur 2.8: Luchtfoto met daarin aangegeven de verschillende stuwcomponenten. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

2.4 Functionele analyse

Een stuw is een onderdeel van een volledige rivier systeem. Het is daarom van belang om inzichtelijk te maken wat de kerntaken van het riviersysteem zijn. Op het gebied van rivieren heeft RWS de volgende kerntaken opgesteld (Ministeries van IenW, LNV en BZK, 2021):

- Een duurzame leefomgeving
- Waterveiligheid
- Voldoende water
- Schoon en gezond water
- Vlot en veilig verkeer over water

Nu de kerntaken bekend zijn kan een functionele analyse worden uitgevoerd. De functies zijn onderverdeeld in de volgende drie categorieën gebruikt, de beschrijvingen zijn afkomstig uit de college aantekeningen van vak "Hydraulic Structures" (Molenaar & Voorendt, 2023):

- Aanleidende functies:
 - Functies die verband houden met de aanleiding om een systeem te ontwikkelen.
- Behoudende functies:
 - Andere functies die geïntereerd worden door het creëren van de hoofdfuncties. Bij het creëren van het nieuwe systeem moeten deze functies ook in de gaten worden gehouden. Deze functies dragen bij aan het behoud van het aanwezige systeem
- Additionele functies
 - Functies die extra waarde genereren. Deze komen niet voort uit het motief om het systeem te creëren of behouden van het huidige systeem.

Een aantal functies van de toekomstige stuw wijken enigszins af van die van de huidige stuw. De oorzaak hiervan is dat Rijkswaterstaat bepaalde functies van de stuw in de toekomst wil gaan scheiden. In de huidige stuw is bijvoorbeeld de functie van transport over water gecombineerd met die via weg infrastructuur, de stuw is in combinatie met een brug gebouwd. In de toekomst moeten deze functies gescheiden worden voor een vlottere en veiligere afwikkeling van verkeer. Daarnaast maakt dit onderhoud makkelijker. Het huidige uitgangspunt van Rijkswaterstaat, kenbaar gemaakt in een interview met

afgevaardigde M. Schropp (2021), is om het bruggedeelte van de huidige stuw te behouden en separaat een nieuwe stuw aan te leggen. In dit rapport wordt tevens uitgegaan van dit uitgangspunt.

De verschillende stuw functies worden opgesomd in Tabel 2.2.

Tabel 2.2: De toekomstige stuw functies

Aanleidende functie(s): [watermanagement]

1. Het water opstuwen om voldoende waterdiepte te garanderen voor scheepvaart

Behoudende functie(s)

1. Waterbeheer in stuwpanen zodat stakeholders water uit de rivier kunnen onttrekken voor verschillende doeleinden. Voorbeelden hiervan zijn irrigatie van landbouwgrond, drinkwaterwinning of het gebruik als koelwater voor de industrie. (klimaatbestendig)
2. Overstromingspreventie door middel van afvoerregulatie. Verband met dijkhoogte en stabiliteit.
3. Waarborgen van de ecologie van het Maassysteem
4. Geohydrologisch peilbeheer op orde houden i.v.m. omliggende vegetatie, stabiliteit dijken, de natuur en potentiële verzakking van gebouwen.

Additionele functie(s)

1. Opwekken van duurzame energie

3 Basis van het ontwerp

In deze paragraaf worden de eisen, evaluatiecriteria, uitgangspunten en randvoorwaarden gepresenteerd. Het grootste gedeelte van de basis van het ontwerp is toepasbaar op alle toekomstige stuwen in de Maas. Toch is het huidige basis van het ontwerp specifiek gericht op de casestudie, vervangingsopgave van de stuw bij Grave. De basis van het ontwerp heeft zowel betrekking op het ontwerpproces voor de basisstuw als op de inpassing van de waterkrachtcentrale in deze basisstuw.

3.1 Functionele eisen

3.1.1 Herkomst en opbouw van de eisen

De eisen specificeren de manier waarmee de ontwerpdoelstellingen bereikt dienen te worden en definiëren zo het functioneren van de constructie. De eisen worden daarom gekoppeld aan de functies van de stuw. De stuwfuncties zijn bepaald in paragraaf 2.4, 'functionele analyse'. De onderverdeling van de functies wordt aangehouden als structuur voor de basis van het ontwerp. De meeste eisen zijn afkomstig van de opdrachtgever, Rijkswaterstaat.

De functies en bijbehorende eisen zijn bepaald aan de hand van een combinatie van haalbaarheidsstudie, interviews en brainstormsessies:

- Bevindingen uit een eerste haalbaarheidsstudie naar de vervangingsopgave van de stuw bij Grave door Rijkswaterstaat(2021);
- Een interview met een gedeelte van het "RWS-ontwerpt" team (Baijens en Schropp, 2021);
- Een verdiepend een-op-een gesprek met de heer Schropp (2021);
- Meerdere vergaderingen met werknemers van Royal HaskoningDHV (van der Kreeke en Van Heereveld, 2021).

Voorafgaand aan het presenteren van de eisen is het nodig om een aantal aspecten te duiden. Het eerste aspect is dat de eisen nog kunnen veranderen in de toekomst. De eisen in dit hoofdstuk zijn geformuleerd in samenspraak met Rijkswaterstaat ten tijde van een eerste haalbaarheidsstudie naar de vervangingsopgave voor de stuw bij Grave.

Ten tweede, het programma van eisen is opgebouwd uit kwalitatieve- en kwantitatieve eisen. Kwalitatieve eisen, ook wel klant-eisen genoemd, zijn eisen afkomstig van de opdrachtgever. Dit zijn abstract geformuleerde eisen die het beoogde functioneren van de constructie beschrijven. Dit zijn lastig toetsbare eisen aangezien deze abstract geformuleerde zijn, en dus niet concrete eisen stellen aan specifieke constructie elementen. Desalniettemin hebben deze eisen op een bepaalde manier wel degelijk impact op het ontwerp. Dergelijke kwalitatieve eisen kunnen namelijk concreet worden gemaakt door middel van normen en richtlijnen. Hieruit volgen kwantitatieve, ook wel systeem eisen genoemd. De kwantitatieve eisen stellen voorwaarde aan functionele dimensies. Men zou dit kunnen zien als 'toetsbare' eisen die er voor zorgen dat uiteindelijk voldaan wordt aan de eis van de opdrachtgever, de kwalitatieve eis.

Verder kunnen bepaalde eisen in de huidige ontwerpfase, de conceptuele ontwerpfase, nog niet worden uitgedrukt in kwantitatieve eisen. Een voorbeeld hiervan is de kwalitatieve eis dat de stuw onderhoudbaar moet zijn. Dit is een eis die nog niet toetsbaar is. Desalniettemin kunnen deze eisen wel impact hebben op de haalbaarheid van een ontwerpalternatief. Het ene ontwerpalternatief is namelijk eenvoudiger te onderhouden dan het andere. Een dergelijke eis moet al wel op een manier worden meegenomen in het huidige ontwerpproces. Het is zeer ongewenst in een later ontwerpstadium er achter te komen dat het ontwerp onrealistisch is omdat het niet of lastig onderhouden kan worden. In de conceptuele ontwerpfase

kan dit al in enige mate worden beoordeeld. In dit onderzoek is besloten om dergelijke eisen, niet toetsbare eisen die belangrijk zijn voor de haalbaarheid, te betrekken in de evaluatie in plaats van verificatie mee te nemen. In het onderstaande programma van eisen worden deze aangeduid met een voetnoot (*¹) en worden ze opgenomen als evaluatiecriteria, paragraaf 3.4.

3.1.2 Eisen gerelateerd aan de scheepvaartfunctie

De eisen in deze paragraaf zijn opgesteld om de volgende aanleidende functie te waarborgen in het ontwerp:

Het water opstuwen om voldoende waterdiepte te garanderen voor scheepvaart.

In dit programma van eisen worden eerst de kwalitatieve eisen die bij deze functie horen beschreven. Vervolgens worden een aantal van deze eisen uitgewerkt in kwantitatieve eisen. Tot slot, wordt een overzicht gegeven van concrete kwantitatieve eisen.

In Tabel 3.1 wordt het eerste gedeelte van de kwalitatieve eisen gepresenteerd. In de kolom 'ID' is een identificatie aan de eis gegeven. De letter geeft aan op welke functie het betrekking heeft. De 'S' staat bijvoorbeeld voor eisen gerelateerd aan de functie scheepvaart. Deze indicatie wordt gevolgd door een nummering van de eis. De laatste kolom van de tabel wordt gebruikt om voetnoten aan te geven. Verder worden onder de rijen met een 'ID' aanduiding korte uitweidingen en af en toe een kwantificatie bij de desbetreffende eisen gegeven.

Kwalitatieve eisen gerelateerd aan de scheepvaartfunctie:

Tabel 3.1: Programma van functionele eisen gericht op scheepvaart.

*1 niet toetsbare eis maar wordt als evaluatiecriterium in het ontwerpproces betrokken

*2 wordt niet getoetst in de huidige ontwerpfase, een conceptueel ontwerp, ten gevolge van het detail niveau.

*3 kan pas verderop in het rapport kwantitatief worden uitgewerkt.

ID	Omschrijving	Voetnoot
S.1	De nieuwe stuw dient in staat te zijn het huidige streefpijl in een vastgesteld debietbereik te waarborgen; het water dient actief gestuurd te worden.	
	<i>Hiermee wordt voldoende diepgang voor scheepvaart gegarandeerd. Het maximaal te regelen debiet voor de stuw bij grave is 1800 m³/s (Schropp en Tuin, 2021). Na dit debiet dient de stuw gestreken te worden. De stuw regelt het waterpeil dus in een debietbereik van 0 tot 1800 m³/s.</i>	
S.2	Het lekverlies moet beperkt worden. Afgerond dient dit nul te zijn.	*2
	<i>Het lekverlies moet beperkt worden zodat scheepvaart tijdens droge periodes niet in gevaar komt en stakeholders een langere tijd van het jaar water kunnen onttrekken. Ten opzicht van de huidige situatie bij Grave moet het lekverlies significant gereduceerd worden. Deze eis is door Rijkswaterstaat als volgt gekwantificeerd: het lekverlies over de gehele stuw mag slechts 2 m³/s bedragen. (Baijens & Schropp, 2021)</i>	
S.3	Het stuwmiddel dient onder alle omstandigheden te functioneren.	*2
	<i>Onder deze omstandigheden vallen ijsvorming, extreme waterstanden, extreem verval, overstromingssituatie en grote stroomsnelheden.</i>	
S.4	De stuw moet in staat zijn ijs en drijfvuil af te voeren (Kortlever, 2021).	*2
S.5	Bij hoge rivierafvoer moet de stuw instaat zijn sediment voldoende af te voeren	*2

	(Kortlever, 2021).	
	<i>Tijdens hoge afvoeren wordt een significant aandeel van het sediment getransporteerd door de relatief hoge stroomsnelheden. Als het niet mogelijk is om sediment voldoende af te voeren ontstaat er een morfologisch probleem dat de diepgang nodig voor scheepvaart in gevaar kan brengen.</i> <i>De uitwerking en toetsing van de kwantitatieve morfologische eisen valt buiten de scope van dit onderzoek. Dit is een opzichzelfstaand probleem en onderzoek. Ten gevolge van de gelimiteerde tijd van deze thesis is dit buiten beschouwing gelaten.</i>	
S.6	De stuw dient goed en eenvoudig te inspecteren, onderhouden en beheren te zijn.	*1
	<i>Langdurig onderhoud is ongewenst in verband met de vereiste beschikbaarheid van de stuw voor overstromingspreventie, scheepvaart, en omgang met droge periodes. De bereikbaarheid van alle onderdelen is belangrijk. Daarnaast moeten bepaalde constructie-elementen drooggezet kunnen worden voor inspectie en onderhoud. En dient de stuw in staat te zijn om te functioneren tijdens onderhoudswerkzaamheden.</i>	

In paragraaf 2.1.3, 'analyse van de scheepvaart', is vastgesteld dat het in de toekomstige stuw bij Grave mogelijk moet zijn dat scheepvaart tijdens hoogwater het stuwcomplex kan passeren door de stuwopeningen. Voor de stuw bij Grave betekent dit dat schepen door de stuwopeningen varen vanaf een afvoer van 1800 m³/s (Schropp en Tuin, 2021). Deze eis legt een aantal aanvullende eisen en wensen aan het ontwerp op. Een overzicht van de kwalitatieve aanvullende eisen die vanuit de opdrachtgever komen, worden beschreven in Tabel 3.2. De bijbehorende kwantitatieve eisen die invloed hebben op de functionele dimensies zijn uitgewerkt in Tabel 3.3.

Tabel 3.2: Aanvullende kwalitatieve eisen verwant aan de functie scheepvaart tijdens hoogwater condities.

ID	Omschrijving	Voetnoot
S.7	Scheepvaart moet het stuwcomplex tijdens hoogwater, een debiet van 1800 m ³ /s en hoger, kunnen passeren door de stuwopeningen.	
S.8	De stuwopening(en) moet(en) veilig bevaarbaar zijn tijdens hoogwater.	
	<i>Het bevaren van de stuw mag niet te complex zijn, om de stuw veilig bevaarbaar te houden (Schropp, 2021). Ingewikkelde, abrupte en scherpe stuur manoeuvres moeten voorkomen worden. Hiervoor dient gelet te worden op de krommingsstraal van de scheepvaartmanoeuvres. Daarnaast dient het aantal stuurmanoeuvres geminimaliseerd te zijn.</i>	
S.9	Het risico op aanvaring van de stuw moet worden geminimaliseerd.	*2
	<i>Gedegen aanvaarconstructie en bewegwijzering dient aanwezig te zijn.</i> <i>Het toeleidingskanaal moet vroegtijdig aftakken naar de naastgelegen schutsluis, opdat de scheepvaart bij gesloten stuw in alle omstandigheden probleemloos in en uit de stroom kan voegen. Zorg er bij een stuw voor dat de inrichting zodanig is dat de routekeuze duidelijk richting de sluis wijst en er geen verwarring kan ontstaan. Daarnaast dient een boeienlijn diagonaal in de buurt van het keuzepunt te liggen. En zorg voor een goede visuele herkenbaarheid, op de radar en eenduidige aanduiding. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)</i>	

Kwantitatieve eisen gerelateerd aan de scheepvaartfunctie:

In dit gedeelte worden de kwantitatieve eisen opgesteld. Een samenvattend overzicht van deze toetsbare eisen wordt gegeven in Tabel 3.3. De voornaamste eisen die kwantitatief uitgewerkt dienen te worden zijn S.1 en S.8. De rest van de eisen worden beschouwd als niet toetsbaar eisen of vallen buiten het detailniveau van de huidige ontwerpfase.

Voor het opstellen van de eisen is het belangrijk om de maatgevende scheepvaartklasse te bepalen. De maatgevende scheepvaartklasse is afhankelijk van de vaarroute waarin de stuw gelegen is. Voor de casestudie geldt dat Rijkswaterstaat (z.d.) op het moment van schrijven de Maas vaarroute geschikt aan het maken is voor scheepvaartklasse CEMT Vb. In deze thesis wordt aangenomen dat gedurende de levensduur van de toekomstige stuwen in de Maas dit de maatgevende scheepvaartklasse zal zijn en hierop dus ontworpen dient te worden.

Eis S.8: De stuwopeningen moeten veilig bevaarbaar zijn tijdens hoogwater.

De bovenstaande kwalitatieve eis legt een aantal kwantitatieve eisen aan het ontwerp op. Kwantitatieve eisen worden opgelegd aan de breedte van de stuwopeningen, de doorvaarthoogte en de funderingsdiepte en zijn gebaseerd op normen en richtlijnen die gelden in Nederland. Deze eisen moeten er voor zorgen dat de stuw veilig bevaarbaar is.

Minimale benodigde breedte van de stuwopening:

In de richtlijnen vaarwegen (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020) is gesteld dat de doorvaartopening van een stuw moet voldoen aan dezelfde voorwaarden ten aanzien van breedte, ligging en drempeldiepte als een keersluis.

De volgende ontwerpeis is van toepassing op een keersluis en dus de toekomstige stuw: in geval van een nieuw aan te leggen vaarweg moet bij een normaal- of intensiteitsprofiel voor een volledig ongestoorde vaart de keersluis dezelfde bevaarbare breedte hebben als het betreffende vaarwegprofiel.

De dimensies voor het vaarwegprofiel zijn gegeven in de richtlijnen vaarwegen (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020). Hierin is gesteld dat het wenselijk is om op- en afvaart door een opening te laten gaan. Dit betekent dat een tweestrooksverkeer profiel door de stuwopening gevraagd is; dat wil zeggen dat twee maatgevende schepen in tegengestelde richting varen in hetzelfde vaarwegvak.

De benodigde breedte voor een tweestrooksverkeer profiel is afhankelijk van de intensiteit van het verkeer. De volgende stap is dus het bepalen van het type profiel, normaal- of intensiteitsprofiel, op basis van de scheepvaartintensiteit. Op basis van de binnenvaartcijfer (Rijkswaterstaat geciteerd in binnenvaartcijfers, 2018) is geconstateerd dat de huidige intensiteit van de Maas bij Grave ongeveer 12.500 beroepsvoertuigen per jaar is. Het is de verwachting dat dit in toekomst toeneemt. Hierdoor is gekozen om te ontwerpen op een normaalprofiel. De behorende verkeersintensiteit bij deze klassering ligt namelijk tussen de 15.000 en 30.000 beroepsvoertuigen per jaar (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020).

Het minimum vaarwegprofiel voor de beroepsvaart wordt gegeven als een rechthoekig dwarsprofiel. In de vaarwegen richtlijnen is gegeven dat de minimale doorvaarbreedte van een normaalprofiel met maatgevende scheepvaartklasse Vb 45,6 m moet zijn. Daarnaast is aangenomen dat een zijwindtoeslag van 9 m in acht genomen moet worden. Hierdoor komt de totaal benodigde breedte van de doorvaartopening uit op 54,6 m. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)

Deze dimensie voor de doorvaartopening komt overeen met referentieprojecten, stuwen met één doorvaartopening voor op- en afvaart in de Maas. De huidige stuwen in de Maas met dergelijke doorvaartopeningen hebben breedtes variërend tussen de 63m en 68 m. (Ten Hove, 2019)

Mocht er nou niet voldaan kunnen worden aan de wens om een enkele doorvaartopening voor scheepvaart in beide richtingen te creëren dan kunnen meerdere doorvaartopeningen waarin scheepvaart in één richting maar mogelijk is gecreëerd worden. In dit geval gaat op- en afvaart door separate openingen. Naast de minimale breedte voor een doorvaartopening met dubbelstrooksverkeer moet de minimale breedte voor een enkelstrooksverkeer profiel ook worden vastgesteld. Ondanks dat een doorvaartopening preferabel is zullen enkele ontwerpenalternatieven bestaan uit doorvaartopeningen met een enkelstrooksverkeer profiel. In de vaarwegen richtlijnen is hiervoor een minimale doorvaarbreedte van 22,8 m gegeven voor een maatgevende scheepvaartklasse Vb. De zijwindtoeslag zou nader bepaald moeten worden. In dit rapport is aangenomen dat de helft van de windtoeslag bij een dubbelstrooksprofiel volstaat. De windtoeslag die in acht wordt genomen is daarom 4,5 m. Dit resulteert er in dat de totaal benodigde breedte voor de doorvaartopening met verkeer in een enkele richting 27,3 m (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020).

De doorvaarthoogte:

De stuwdeuren in de openingen waar scheepvaart doorheen gaat moeten voldoende hoog geheven worden zodat de schepen er veilig onder door kunnen varen. Hiervoor geldt de volgende richtlijn: de doorvaartopening moet voldoen aan dezelfde voorwaarden ten aanzien van de hoogte als een vaste brug (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)

De doorvaarthoogte is de verticale afstand tussen de maatgevende hoge waterstand voor de scheepvaart en de onderkant van de overspanning boven de vaarweg bij volbelasting. De totale doorvaarthoogte bestaat uit de strijkhogte van de maatgevende scheepvaartklasse en een surplus als veiligheidsmarge (0,3 m). In de richtlijn vaarwegen (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020) is behorend bij een scheepvaartklasse CEMT-klasse Vb een vereiste doorvaarthoogte van 9,1 m nodig. Het is belangrijk om te constateren dat het hier gaat om de doorvaarthoogte tijdens de maatgevende hoogwaterstand.

De funderingsdiepte:

De verticale ligging van de fundering is in principe het referentieniveau voor alle dimensies en positionering van constructie-elementen. De ligging van de fundering is belangrijk voor het bepalen van de stuwdeurhoogte en de hefhoogte. Daarnaast is dit een belangrijke factor in het hydraulisch gedrag. In de huidige ontwerpregel wordt de minimale drempeldiepte bepaald op basis van de eis dat de stuwopening veilig bevaarbaar moet zijn. Voor een veilig bevaarbare stuwopening is het van belang dat er voldoende diepgang aanwezig is ter plaatse van de stuw.

Voor een normaal vaarwegprofiel geldt dat minimaal 1,4 maal de diepgang van het maatgevende schip aanwezig moet zijn (maatgevende diepgang CEMT-klasse Vb is 4,5 m). De drempeldiepte moet dus minimaal 6,3 m onder de waterlijn liggen tijdens hoogwater. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)

Samenvattend overzicht van de kwantitatieve eisen:

Bovenstaande uitwerkingen kunnen tevens bondig geformuleerd worden in kwantitatieve eisen. Een samenvattend overzicht van de kwantitatieve eisen die opgelegd worden aan de toekomstige stuw zijn gegeven in Tabel 3.3. Ten opzichte van de voorgaande tabellen is de kolom 'relatie tot' toegevoegd die aangeeft aan welke kwalitatieve eis het gerelateerd is.

Naast de onderstaande eisen kunnen er aanvullende kwantitatieve eisen ontstaan ten gevolge van gemaakte ontwerpkeuzes in ontwerpproces. Deze worden ten behoeve van de duidelijkheid van het ontwerpproces dan pas betrokken.

Tabel 3.3: Volledig overzicht van de kwantitatieve eisen gericht op de functie scheepvaart.

ID	Omschrijving	Relatie tot:	Voetnoot
S.12	De doorvaartopening moet voldoen aan dezelfde voorwaarden ten aanzien van breedte als een keersluis. De doorvaartopening van de stuw bij Grave moet als verkeer in beide richtingen er doorheen vaart minimaal 54,6 m breed zijn. Wanneer scheepvaart in een enkele richting door de doorvaartopening gaat moet deze minimaal 27,3 m breed zijn. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020).	S.8	
S.13	De doorvaartopening moet voldoen aan dezelfde voorwaarden ten aanzien van drempeldiepte als een keersluis. De drempeldiepte moet daarom 6,3 m onder de waterlijn liggen tijdens hoogwater. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020).	S.8	
S.14	De doorvaartopening moet voldoen aan dezelfde voorwaarden ten aanzien van de hoogte als een vaste brug. De doorvaarthoogte bij de maatgevend hoge waterstand moet voor scheepvaartklasse CEMT Vb minimaal 9,1 m bedragen. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)	S.8	
S.13	De stroomsnelheid van de dwarsstromingen mogen niet te groot zijn.	S.8	*2
	<i>Wat betreft de stroming geldt het volgende: het is van belang om verstoring in de stroomgradiënten in zowel de langsrichting als dwarsrichting zoveel mogelijk te voorkomen. Hierbij geldt dat in de directe omgeving van de stuw tot 1 · L bovenstrooms (met L de lengte van het maatgevende schip) een goede (symmetrische) stroomgeleiding aanwezig moet zijn en geen dwarsstroom. Daarbuiten moet op de rand van de vaarweg voldaan worden aan de criteria die opgesteld zijn voor dwarsstroom. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)</i>		

3.1.3 Eisen gerelateerd aan de functie wateronttrekking

De eisen in deze paragraaf zijn opgesteld om de volgende behoudende functie te waarborgen in het ontwerp:

Stakeholders moeten water uit de rivier kunnen onttrekken voor meerdere doeleinden. Voorbeelden hiervan zijn irrigatie van landbouwgrond, drinkwaterwinning of het gebruik als koelwater voor de industrie. (klimaatbestendig)

In Tabel 3.4 zijn de eisen gerelateerd aan de bovenstaande functie gepresenteerd.

In de tweede rij van Tabel 3.4 zijn een aantal kwalitatieve eisen aangegeven die opgesteld zijn voor de aanleidende functie, paragraaf 3.1.2, maar tevens relevant en toepasbaar zijn voor de huidige behoudende functie. Voor de huidige functie is het tevens van belang dat voldaan wordt aan deze eisen. Deze eisen zijn voornamelijk gerelateerd aan de eis met betrekking tot waarborging van het huidige streefpeil, S.1. In de kwantitatieve uitwerking hiervan, beschreven in paragraaf 3.1.2 is de huidige behoudende functie al meegenomen. Het is daarom overbodig om in deze paragraaf hiervoor aanvullende kwantitatieve eisen op te stellen.

Tabel 3.4: Volledig overzicht van de kwantitatieve eisen gericht op de functie scheepvaart.

ID	Omschrijving	Voetnoot
-	Voor deze functie is het ook van belang dat voldaan wordt aan de eisen S.1, S.2, S.3 en S.5.	
WO.1	Het huidige functioneren van het rivier de Maassysteem moet intact blijven; een systemsprong is niet toegestaan. (Kortlever, 2021)	
	<i>De huidige waterhuishouding, inclusief de geohydrologische, dient behouden te blijven. Stakeholders op bepaalde locaties rekenen op een bepaalde waterstand voor onttrekking van water voor irrigatie, drinkwatervoorziening of koelwater. Daarnaast is dit belangrijk voor overstromingspreventie, de hoogte en stabiliteit van dijken die ontwerpen zijn op bepaalde waterstanden voor bepaalde locaties, en huizen.</i>	

De kwalitatieve eis WO.1 wordt verderop in het rapport, paragraaf 4.1.1, uitgewerkt in een kwantitatieve eis. Hiervoor is echter een uitgebreidere analyse nodig dan opgenomen kan worden in het programma van eisen. Daarnaast is het voor de kwantitatieve uitwerking van eis WO.1 van belang om alle eisen gerelateerd aan het streefpeil in kaart te brengen en de uitwerking hiervan op te nemen in het hoofdrapport.

3.1.4 Eisen gerelateerd aan overstromingspreventie

In deze paragraaf worden eisen opgesteld om in het ontwerp de volgende behoudende functie te waarborgen:

Overstromingspreventie door middel van afvoerregulatie. In verband met de dijkhoogte en stabiliteit mag de waterstand niet te hoog worden.

Kwalitatieve eisen gerelateerd aan de overstromingspreventie:

In Tabel 3.5 is een overzicht van de kwalitatieve eisen gegeven. Voor de huidige behoudende functie is het tevens van belang dat voldaan wordt aan een aantal opgestelde eisen voor de bovenstaande functies. In de tweede rij van Tabel 3.5 zijn daarom deze kwalitatieve eisen die tevens relevant en nodig zijn voor de huidige behoudende functie aangegeven.

Tabel 3.5: Programma van Eisen voor de functie overstromingspreventie.

**1 niet toetsbare eis maar wordt als evaluatiecriterium in het ontwerpproces betrokken*

**2 wordt niet getoetst in de huidige ontwerpfase, een conceptueel ontwerp, ten gevolge van het detail niveau.*

**3 kan pas kwantitatief worden uitgewerkt naar mate het ontwerpproces vordert.*

**4 de exacte eis is afhankelijk van de topgebeurtenis, deze moet nader uitgewerkt worden in een faalkansanalyse*

ID	Omschrijving	Voetnoot
-	Voor deze functie is het van belang dat ook voldaan wordt aan de eisen S.1, S.2, S.4, S.5, S.7 en WO.1.	

O.1	De minimale hoogte van de stuwdeuren moet voldoen aan de in Leidraad Kunstwerken gestelde eisen. (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen [TAW], 2003)	*3
	<i>De exacte waarde van de minimale hoogte is afhankelijk van de hydraulische randvoorwaarden gepresenteerd in paragraaf 3.6. De minimale hoogte is in hoofdstuk 4 uitgewerkt. Het is belangrijk om aan te geven dat Rijkswaterstaat rekening wilt houden met 0,5 m verhoging van het streefpeil in de toekomst ten gevolge van klimaatverandering. (Schropp, 2021)</i>	
O.2	De nieuwe stuw moet voldoende afvoercapaciteit hebben zodat tijdens maatgevend hoogwater geen overstroming plaatsvindt.	
O.3	Als het debiet groter is dan de afvoercapaciteit van de stuw dient de stuw gestreken te zijn.	
	<i>Dit is nodig om voldoende afvoercapaciteit te bereiken. Voor de casestudie betekend dit dat vanaf een debiet van 1800 m³/s de stuw gestreken moet zijn. (Schropp en Tuin, 2021).</i>	
O.5	<i>Het sluitingsproces dient voldoende beschikbaar en betrouwbaar te zijn</i>	*4
O.6	Botsing van een schip op de stuw dient "praktisch" onmogelijk te zijn of de consequenties moeten beperkt worden.	
O.7	De faalkans van de constructie moet voldoen aan de eisen die worden gesteld in de waterwet (2017).	

3.1.5 Eisen gerelateerd aan het waarborgen van de ecologie

De eisen in deze paragraaf zijn opgesteld om in het ontwerp de volgende behoudende functie te waarborgen:

Waarborgen van de ecologie van het Maassysteem.

In de identificatie-kolom zijn deze eisen aangeduid met een 'E'. In Tabel 3.6 is een overzicht van de eisen gegeven. In de eerste rij van de tabel zijn de eisen van paragraaf 3.1.1 die tevens relevant zijn voor de huidige behoudende functie gegeven.

Tabel 3.6: Programma van Eisen ten behoeven van de waarborging van de ecologie.

ID	Omschrijving
-	Voor deze functie is het van belang dat ook voldaan wordt aan de eisen S.1, S.6, WO.1, en O.2.
E.1	Het huidige ecologische systeem mag niet te veel verstoord worden.
E.2	De stuw dient te voldoen aan de gestelde vissterfte-normen in 'het toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren' (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2014).
	<i>Vismigratie vormt een belangrijk aspect van het functioneren van het ecosysteem in het hoofdwatersysteem van Rijkswaterstaat. Slechte passeerbaarheid voor vis van barrières zoals stuwcomplexen is een risico voor het in stand houden van vispopulaties. Het passeerbaar maken van deze barrières, en daarmee het herstel van het longitudinale connectiviteit in de rivieren speelt een sleutelrol in het herstel van populaties van migrerende vissoorten. (Kramer et al., 2021)</i>

De vissterfte normen die gericht zijn op de waterkrachtcentrale technologie zijn gepresenteerd in paragraaf 3.1.7. Daarnaast is er een norm voor het gehele stuw complex, ook wel de absolute vissterfte genoemd. Een stuw op zichzelf verstoort namelijk ook het ecologisch systeem al. De eisen hiervan staan beschreven in het toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren' (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2014). Voor het formuleren van de exacte eis is meer achtergrondkennis nodig over de stuwen in de maas, vissoorten, onderscheid tussen stroomopwaarts en stroomafwaarts migrerende vissen, het ontwerpen en de impact van het ontwerp op de stromingen.

3.1.6 Eisen gerelateerd aan het geohydrologisch peilbeheer

De eisen in deze paragraaf zijn opgesteld om in het ontwerp de volgende behoudende functie te waarborgen:

Geohydrologisch peilbeheer op orde houden i.v.m. omliggende vegetatie, stabiliteit dijken, de natuur en potentiële verzakking van gebouwen..

In de identificatie-kolom zijn deze eisen aangeduid met een 'G'. In Tabel 3.7 wordt een overzicht van deze eisen gegeven. In de eerste rij van de tabel zijn wederom eisen van de voorgaande functies die tevens relevant zijn voor de huidige behoudende functie aangegeven.

Tabel 3.7: Programma van Eisen voor het behoud van het geohydrologisch peilbeheer.

ID	Omschrijving
-	Voor deze functie moet ook voldaan worden aan de eisen S.1, S.3, S.7, WO.1
G.1	Het peilbeheer in de stuwpannen mag niet dusdanig veel veranderen dat het de grondwaterstand significant beïnvloed.
	<i>Mogelijke gevolgen van verandering in het grondwaterpeil zijn dat gebouwen verzakken, vegetatie doodgaat en dijken instabiel worden.</i>

3.1.7 Eisen aan de waterkrachtcentrale

Naast de eisen aan de stuw zijn er ook eisen die specifiek aan de waterkrachtcentrale gesteld zijn. Deze eisen zijn gerelateerd aan de additionele functie:

Opwekken van duurzame energie

In de identificatie-kolom zijn deze eisen aangeduid met 'WKC'. In Tabel 3.8 wordt een overzicht van de eisen gegeven. In de eerste rij van de tabel zijn de eisen van de voorgaande functies die tevens relevant zijn voor de huidige behoudende functie gegeven.

Tabel 3.8: Programma van eisen aan de waterkrachtcentrale

ID	Omschrijving
-	Voor deze functie moet ook voldaan worden aan de eisen S.1, S.3, S.7 en WO.1.
WKC.1	De waterkrachtcentrale technologie moet met betrekking tot de vissterfte voldoen aan de eisen gesteld in het toetsingskader: 'toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren' (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2014).
	<i>Het hierboven aangegeven toetsingskader is een voortzetting van het huidige beleid van</i>

	<i>Rijkswaterstaat. Het toetsingskader stelt dat in gestuwde trajecten van de grote rivieren cumulatief niet meer dan 10% vissterfte (aal en zalm als toets-soorten) op mag treden door waterkrachtcentrales. Indien deze vissterftenorm reeds overschreden wordt door bestaande centrales, kunnen maximaal vijf initiatieven met 'nihil' sterfte ($\leq 0,1\%$) worden toegestaan in de gestuwde trajecten. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2014). Bakker (2015) geeft aan dat het limiet reeds bereikt is. De bestaande waterkrachtcentrales Linne en Lith in de Maas veroorzaken gezamenlijk een cumulatieve vissterfte voor aal en zalmsmolts van meer dan 10%.</i> <i>De vissterfte normen zijn in het toetsingskader nader gespecificeerd voor verschillende vissoorten en tevens is onderscheid gemaakt tussen stroomopwaarts en stroomafwaarts migrerende vis. In het basis van het ontwerp zijn deze niet uitgebreid aangegeven. Hiervoor is verwezen naar het eerder genoemde toetsingskader. De uitwerking van deze toetsing valt buiten de scope van dit onderzoek omwille van de gelimiteerde tijd.</i> <i>De belangrijkste eis in deze thesis is van toepassing op de waterkrachtcentrale technologie. Deze is als volgt: Om het aquatisch milieu te beschermen dient de best realiseerbare techniek voor het project gekozen te worden.</i>
WKC.2	De waterkrachtcentrale technologie moet aantoonbaar voldoen aan de noodzakelijke technische prestaties.
	<i>Een aantal noodzakelijke technische prestaties zijn:</i> - <i>De betrouwbaarheid dient voldoende te zijn. De exacte eis hiervan hangt af van de manier waarop de waterkrachtcentrale geïmplementeerd wordt. De eis kan pas gekwantificeerd worden als het ontwerp bekend is. Het aandeel van de waterkrachtcentrale moet passen in de gevraagde betrouwbaarheid en beschikbaarheid aan het gehele kunstwerk. Hiervoor wordt verwezen naar de eisen F.16 en S.7..</i> - <i>Energie moet ten alle tijden aan het energienet geleverd kunnen worden. Een voordeel van waterkracht energie ten opzichte van andere duurzame energiebronnen is namelijk dat de energievorm vrijwel continu aanwezig is. Het is in mindere mate afhankelijk van externe omstandigheden. (Van Den Noortgaete et al., 2016)</i> - <i>Etc.</i>
WKC.3	De waterkrachtcentrale technologie moet efficiënt inzetbaar zijn in de Nederlandse omstandigheden van beperkte beschikbaar verval.
	<i>Nederland heeft in vergelijking met andere landen waarin waterkracht grootschalig gewonnen wordt afwijkende condities. Het verval over de stuwen in Nederland is namelijk relatief klein. Daarnaast is deze gelimiteerd aanwezig, regelmatig is die gestreken of relatief laag.</i>
WKC.4	De waterkrachtcentrale moeten gerealiseerd worden tegen acceptabele kosten; een haalbare business case moet gerealiseerd worden.
	<i>Rijkswaterstaat (Schropp, 2021) heeft aangegeven de waterkrachtcentrales niet zelf te gaan exploiteren waardoor een derde partij noodzakelijk is. Voor het waterkracht project betekend dit dat het aantrekkelijk moet zijn voor een derde partij om te investeren. Een gunstige business case is noodzakelijk.</i>
WKC.6	Het lekverlies door te waterkrachtcentrale moet geminimaliseerd zijn.

WKC.7	De waterkrachtcentrale moet maakbaar, vervangbaar, onderhoudbaar en te verwijderen zijn.
WKC.8	Het debiet door de turbines moet naar 0 gebracht kunnen worden.

3.2 Eisen aan de ruimtelijke kwaliteit

Ruimtelijke eisen zijn opgelegd door de opdrachtgever terwijl randvoorwaarden worden opgelegd door de omgeving. De ruimtelijke eisen zijn gepresenteerd in Tabel 3.9. Belangrijk om op te merken is dat deze eisen louter casestudie specifieke zijn.

Tabel 3.9: Ruimtelijke Eisen gesteld aan de toekomstige stuw bij Grave.

ID	Omschrijving
R.1	De huidige brug en de sluizen van het stuwcomplex moet behouden blijven. Deze hebben de status van monument. (Heereveld et al., 2021)
	<i>Indirect betekend dit dat de fundering van het huidige stuwcomplex tevens behouden moet blijven.</i>
R.2	Er moet rekening worden gehouden met de aanleg van een nieuwe 'tweede' sluiskolk gedurende de levensduur van de toekomstige stuw. (Schropp, 2021)
R.3	De constructie dient in de omgeving te passen.

3.3 Constructieve eisen

In Tabel 3.10 zijn de constructieve eisen gepresenteerd.

Tabel 3.10 Constructieve Eisen voor de toekomstige stuw bij Grave.

ID	Omschrijving
C.1	De constructie dient te voldoen aan de waterveiligheidseisen.
	<i>Zoals in Tabel 3.5 is aangegeven is dit zowel een functionele als constructieve eis. De stuw dient te voldoen aan de normen die gesteld is aan dijktraject waarin het gelegen is. De laagste faalkans voor het dijktraject waarin de stuw bij grave gelegen is bedraagt 1/3000 per jaar (waterwet, 2017c). Het constructief falen van de stuw is een onderdeel, faalmechanisme, van deze faalkans. Aan dit faalmechanisme is een bijdrage aan de totale faalkans gekoppeld. Het constructief falen van de stuw mag ongeveer 1% van de totale faalkans bedragen (Van der Kreeke, 2021).</i>
C.2	De constructie dient construeerbaar te zijn.
	<i>Deze eis heeft een aantal onderliggende eisen. Voorbeelden van dergelijke eisen zijn:</i> - De stuw moet in staat zijn om tijdens het constructie proces de huidige afvoer te behouden. - De stroomsnelheid ten gevolge van gedeeltelijke blokkade van de waterweg mag niet te hoog worden. - Scheepvaart mag niet te veel hinder ondervinden van het constructie proces. Het stuwcomplex mag niet te lang buitendienst zijn. - Etc.
C.3	De constructie moet voldoen aan de eisen in NEN-EN norm 1990 + NB en de aanvullingen in Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK). (Rijkswaterstaat, 2021)

	De constructie moet voldoen aan de sterkte(Ultimate limit state (ULS)), stijfheid (Service limit state (SLS)) en stabiliteit(ULS) normen. Individuele elementen dienen hierop getoetst te worden. Daarnaast dient getoetst te worden op de volgende aspecten (Molenaar & Voorendt, 2019): - Piping - Het draagvermogen en de zetting van de ondergrond - Opwaartse druk - Laterale afschuiving - Rotatie stabiliteit - Ingebedde diepte van de keermuren - Potentiële ondersteuning van muren en steunpunten (denk aan stutten en ankers) - De vormvastheid van de draagconstructie. - Vervorming en verplaatsing - Bodem erosie; ontgrondingskuil (in het Engels: scour holes) mag geen bedreiging zijn voor de stabiliteit van het kunstwerk - De impact van aardbevingen (zowel op hydraulisch als constructief gebied) - De impact van mensen en dieren. Bovenstaande lijst is niet volledig; uit de faalkans analyse of de NEN-EN normen kunnen nog andere toetsingscriteria volgen. Deze lijst dient als een opzet. Tevens is het belangrijk om te constateren dat de meeste toetsingen ook voor de tijdelijke constructie uitgevoerd dienen te worden.
C.4	Het verlangde constructieve veiligheidsniveau voor natte kunstwerken, stuwen, moet voldoen aan de constructieve betrouwbaarheidsklasse RC3 (gevolgklasse CC3) bij een referentieperiode van 100 jaar. (Rijkswaterstaat, 2021)
C.5	De bodembescherming dient te voldoen aan de gestelde eisen.
	Een aantal van deze eisen zijn: - Bodem erosie ten gevolge van de stuwen en scheepvaart mag niet leiden tot ontgrondingskuilen die de stabiliteit van het kunstwerk in gevaar kunnen brengen. - De stabiliteit van de bodembescherming moet bestand zijn tegen (lokale) stromingen veroorzaakt door de stuw. - De stabiliteit van de bodembescherming moet bestand zijn tegen de belasting van scheepvaart. - Een gedegen opbouw van lagen van de bodembescherming moet ontworpen zijn zodat geen verticaal transport door de bovenste laag mogelijk is. - De bodembescherming moet regelmatig onderhouden worden en dient dus eenvoudig te inspecteren en te onderhouden zijn.

3.4 Evaluatiecriteria

In deze paragraaf worden de evaluatiecriteria gepresenteerd die worden gebruikt om het optimale ontwerp te vinden.

Voorafgaand aan de presentatie van de criteria is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen eisen en evaluatiecriteria. Eisen worden namelijk niet geformuleerd als evaluatiecriteria, aangezien alle alternatieven die worden meegenomen in het evaluatieproces al moeten voldoen aan de gestelde eisen.

Evaluatiecriteria representeren waarden die worden gecreëerd door de constructie bovenop wat strikt vereist is.

De criteria voor dit ontwerpproces zijn gekozen op basis van impact op de functionele en maatschappelijke waarden. In Tabel 3.11 worden de evaluatiecriteria in detail uiteengezet, waarbij onder elke regel waarin een criterium staat enige achtergrondinformatie wordt gegeven om het belang ervan te duiden.

Het exact belang en de relevantie van de evaluatiecriteria verschillen per ontwerpplus. Om deze verschillen uit te drukken in de evaluatie, wordt aan elk criterium een weging toegekend die specifiek is voor elke ontwerpplus. De meetbare indicatoren worden vervolgens ook pas vermeld in het desbetreffende hoofdstuk.

Tabel 3.11: Evaluatiecriteria voor het ontwerpen van de 'basisstuw' en de implementatie van waterkrachtcentrales

ID	Omschrijving
EVA.1	De milieu impact
	<i>Dit criterium richt zich op de potentiële effecten van nieuwe constructies op de natuurlijke omgeving en het ecosysteem met specifieke aandacht voor de vegetatie en de ecologie. Bij het beoordelen van dit criterium worden mogelijke negatieve gevolgen geïdentificeerd die de nieuwe constructie kan hebben op het lokale ecosysteem en de bestaande vegetatie.</i> <i>Het uiteindelijke doel van dit criterium is om de milieu-impact van de constructie te minimaliseren en te zorgen voor een duurzame en harmonieuze integratie met de natuurlijke omgeving. Het waarborgt dat het ontwerp niet alleen voldoet aan de functionele behoeften, maar ook bijdraagt aan het behoud en herstel van het lokale ecosysteem.</i>
EVA.2	Beheer & Onderhoud
	<i>Dit criterium heeft betrekking op het verschil in beheer en onderhoud tussen de verschillende ontwerpalternatieven. Het omvat ontwerpkeuzes die van invloed kunnen zijn op het operationeel plan en de aansturing van de systemen, wat op zijn beurt het beheer kan beïnvloeden. Daarnaast kunnen er verschillen zijn in onderhoud: de strategie, de frequentie van onderhoud en de bereikbaarheid van constructie-elementen. Bij het beoordelen van dit criterium wordt gekeken naar de volgende aspecten: beheerbaarheid, onderhoudscomplexiteit, vervangbaarheid van constructie elementen en de levensduur.</i> <i>Door beheer en onderhoud in een vroeg ontwerpstadium te betrekken, kunnen mogelijke ongemakken en problemen verderop in het ontwerpproces worden voorkomen. Het streven is om een ontwerp te selecteren dat ook praktisch in beheer en onderhoud is gedurende de gehele levensduur.</i>
EVA.3	Duurzaamheid
	<i>Dit criterium is van essentieel belang gezien de huidige problemen omtrent klimaatverandering die in hoofdstuk 1 zijn geconcludeerd en de hoofddoelstelling van deze thesis, namelijk het opwekken van duurzame energie. Dit criterium richt zich op het vinden van een duurzame oplossing voor de waterkrachtcentrale. Bij de beoordeling van dit criterium wordt onder ander naar de aspecten gekeken of de volledige levensduur van de huidige en toekomstige constructie-componenten wordt benut en de kwantiteit aan huishoudens die voorzien kunnen worden van duurzame energie. Door duurzame</i>

	<i>oplossingen te integreren in het ontwerp, kan de waterkrachtcentrale een waardevolle bijdrage leveren aan het verminderen van de klimaatverandering en het bevorderen van een duurzame toekomst.</i>
EVA.4	Aanpasbaarheid
	<i>Het criterium 'aanpasbaarheid' verwijst naar het vermogen om gedurende de levensduur van de constructies nog aanpassingen te maken. Voor het beoordelen van de aanpasbaarheid worden twee scenario's gebruikt.</i> <i>Ten eerste, een scenario waarin waterkrachtcentrale verwijderd moeten worden vóór het einde van de levensduur van de stuw. Dit is zeer aannemelijk, omdat de levensduur van een waterkrachtcentrale doorgaans korter is dan die van de stuw, die een levensduur van ongeveer 100 jaar heeft. Bovendien bestaat er een kans dat na een aantal jaar een betere technologie voor de waterkrachtcentrale beschikbaar en deze moet worden toegepast om het rendement te verhogen. Voor dit scenario is het belangrijk dat de stuw en waterkrachtcentrale zo ontworpen zijn dat wanneer de waterkrachtcentrale verwijderd of vervangen moet worden geen problemen voor het functioneren van de stuw ontstaan.</i> <i>Ten tweede, een scenario waarin Rijkswaterstaat (Schropp, 2021) mogelijk pas in een later stadium van de gebruiksfase een waterkrachtcentrale wil implementeren. Mogelijke redenen hiervoor zijn dat de ontwikkeling van de waterkrachtcentrale inpassing langer duurt dan het ontwerp van de stuw. Een andere reden is dat het budget nog niet beschikbaar is bij de start van de bouw. Een mogelijke derde reden is dat Rijkswaterstaat wellicht eerst wil kijken of de stuw op zichzelf goed functioneert of wilt afwachten tot de huidige waterkrachtcentrale in stuwen in de Maas verwijderd zijn</i> <i>Het criterium "Aanpasbaarheid" is van belang om ervoor te zorgen dat de constructie flexibel en toekomstbestendig is. Het is van belang dat er in het ontwerp voldoende ruimte is om eventuele wijzigingen of aanvullingen aan te brengen, zonder dat dit de functionaliteit, duurzaamheid en materialengebruik van de constructie negatief beïnvloedt.</i>
EVA.5	Beïnvloeding van het stromingspatroon
	<i>Het criterium 'hydraulische complexiteit' heeft betrekking op de mogelijke ongemakkelijkheden en verstoringen in het stromingspatroon die kunnen ontstaan bij het aanleg van een nieuwe stuw en waterkrachtcentrale. Deze aspecten omvatten turbulentie lokale versnellingen, lekverlies, verlies in rendement van de waterkrachtcentrale en andere hydraulische problemen. Het is belangrijk om op te merken dat de alternatieven hydraulisch grof worden geverifieerd, zoals de opstuwing. Het detailniveau van de bovenstaande aspecten valt hier echter buiten die van de huidige conceptuele ontwerpfase. Desalniettemin kan enigszins een kwalitatieve inschattingen worden gemaakt bij welke ontwerpalternatieven negatieve hydraulische gevolgen kunnen optreden, wat zou kunnen leiden tot uitgebreider onderzoek en/of oplossingen, waardoor de constructie duurder wordt en dus minder waardevol.</i>
EVA.6	Additionele veiligheid van scheepvaart
	<i>Dit criterium heeft betrekking op de mate van complexiteit van het stuwcomplex en mogelijke invloed ervan op de veiligheid van scheepvaart. Een ingewikkeld stuwcomplex kan de kans op een botsing met een schip vergroten. Een botsing is zeer ongewenst en moet koste wat het kost worden voorkomen. Hoewel er al enkele eisen zijn opgesteld om de stuw veilig bevaarbaar te maken, kunnen de ontwerpalternatieven nog steeds variëren</i>

	<i>in complexiteit met betrekking tot scheepvaart. In de beoordeling van dit criterium wordt gekeken naar de navigeerbaarheid, bewegwijzering en veiligheidsmaatregelen.</i> <i>Het criterium 'Complexiteit voor scheepvaart' is belangrijk voor een veilige en vlotte doorstroming van de scheepvaart te waarborgen. Door rekening te houden met de complexiteit voor scheepvaart bij de evaluatie van de ontwerpalternatieven, kan een optimale balans worden gevonden tussen de functionaliteit van het stuwcomplex en de veiligheid voor scheepvaart. Dit draagt bij aan een succesvol en waardevol ontwerp dat aan de behoeften van zowel de scheepvaart als het opwekken van duurzame energie voldoet.</i>
EVA.7	Complexiteit van het bouwen
	<i>Voordat het criterium geduid wordt, is het belangrijk om te erkennen dat er een verschil is tussen de eis maakbaarheid en het evaluatiecriterium 'complexiteit van het bouwen'. Zoals in de scope gesteld wordt, paragraaf 1.5, valt de eis met betrekking tot de maakbaarheid van de constructie buiten de scope van deze thesis. Door het evaluatiecriteria kan toch in enige mate al worden ingeschat hoe complex het bouwen gaat zijn. Zeer complexe constructie zijn mogelijk niet te bouwen of duur. Hierdoor zou de waarde van het ontwerp omlaag kunnen gaan in een later ontwerpstadium. Om dit aspect toch al bijtijds te betrekken wordt getracht nauwkeuriger de optimale variant vast te stellen. Naast de extra kosten, kan dit geluidshinder en eventuele stremmingen van de scheepvaart veroorzaken, wat de geschiktheid van een ontwerp kan beïnvloeden.</i> <i>Bij de evaluatie van dit criterium wordt gekeken naar de bouwlocatie, geluidshinder en scheepvaartstremming. Het criterium 'Complexiteit van het bouwen' is van belang om ervoor te zorgen dat de impact van het bouwproces op de kosten en waarde in een redelijk vroeg stadium van het ontwerpproces wordt meegenomen. Het streven naar een ontwerp met een optimale balans tussen constructiecomplexiteit, kostenbeheersing en minimale overlast voor de omgeving is van essentieel belang voor het uiteindelijke succes van de waterkrachtcentrale. Door dit criterium mee te nemen in de evaluatie, kan de meest geschikte ontwerp oplossing worden gekozen die voldoet aan zowel de functionele eisen als de praktische uitvoerbaarheid van het bouwproces.</i>

3.5 Uitgangspunten

Ontwerputgangspunten beschrijven de ontwerpkeuzes die voorafgaand aan dit onderzoek gemaakt zijn door de opdrachtgever. Deze beperken de ontwerpvrijheid enigszins. Een voorbeeld van een ontwerputgangspunt voor de casestudie is de wens van Rijkswaterstaat (Baijens & Schropp, 2021) om een hefdeur systeem te gebruiken als afsluitingsmiddel.

In tegenstelling tot de voorgaande paragrafen ligt de focus in deze paragraaf volledig op de casestudie. In Tabel 3.12 zijn de uitgangspunten voor de casestudie gepresenteerd.

Tabel 3.12: Ontwerputgangspunten voor de stuw bij Grave.

ID	Omschrijving
U.1	Rijkswaterstaat heeft zeven mogelijke ontwerpalternatieven voor de 'basisstuw' bij Grave aangedragen (Delbressine et al., 2021). Alleen deze zeven ontwerpalternatieven aangedragen door Rijkswaterstaat worden beschouwd om de locatie vast te stellen.

	<i>Zoals bekend is het vroegtijdig aandacht besteden aan het constructieproces aan te raden. Tijdens het constructieproces kunnen maatgevende situaties voorkomen waardoor bepaalde ontwerpen niet realistisch zijn. De afdeling 'RWS-ontwerpt' van Rijkswaterstaat heeft zelf een eerste haalbaarheid studie gedaan naar de vervangingsopgave van de stuw bij Grave. Het resultaat van deze studie zijn zeven potentiële ontwerp oplossingen welke variëren in constructie technologie en de te vervangen elementen in 2030. Deze variaties resulteren in verscheidene toekomstige stuw locaties. De zeven ontwerpen van Rijkswaterstaat zijn ontwerp alternatieven uit een eerste haalbaarheid studie waardoor het detailniveau nog niet toereikend. Deze ontwerpen dienen louter als uitgangspunt voor het vaststellen van de toekomstige stuw locatie bij Grave. Daarna dient een volledig 'basisstuw' ontworpen te worden.</i>
U.2	<i>'1-op-1' vervanging is opportuun geacht; dit betekent dat de toekomstige stuw zo dichtbij als mogelijk op de huidige stuw locatie moet komen te liggen.</i>
	<i>In eis S.1 is gesteld dat het huidige functioneren van de Maas intact moet blijven; een systeemsprong is niet toegestaan. Vervolgens heeft Rijkswaterstaat (Schropp & Baijens, 2021) in een interview het uitgangspunt meegegeven dat de toekomstige zo dichtbij als mogelijk tegen de huidige stuw moet komen aan te liggen.</i>
U.3	<i>De verschillende functies van het stuwcomplex dienen in de toekomst gescheiden te worden. (Schropp, 2021)</i>
	<i>Weg- en waterinfrastructuur dienen gescheiden te worden. Voor de casestudie betekend dit dat enkel het stuw gedeelte ontworpen hoeft te worden. De motivatie hiervoor is dat de consequentie van een faalmechanisme minder groot is. Als er bijvoorbeeld een schip botst op de stuw dat dan transport over weg geen hinder ondervindt. Of nog belangrijker, dat als een schip botst op de stuw dat het vervoer over de brug gevaar loopt omdat de constructie bezwijkt. Daarnaast is een andere reden voor het scheiden dat onderhoud aan beide makkelijker wordt.</i>
U.4	<i>Een vismigratie rivier moet opgenomen worden in het ontwerp.</i>
	<i>Voor deze thesis is aangenomen dat een vismigratie rivier geconstrueerd moet worden.</i>
U.5	<i>Rijkswaterstaat heeft twee type stuwdeuren aangedragen welke zij realistisch en opportuun achten. Met deze twee type stuwdeuren zijn verder gewerkt; andere type stuwdeuren worden in dit rapport niet meegenomen.</i>
	<i>RWS heeft twee type stuwdeuren aangedragen, een radiaal- en hefdeur. De keuze tussen deze twee is afhankelijk van de uitkomst van het onderzoek naar scheepvaart tijdens hoogwater. In paragraaf 3.1.2 is vastgesteld dat verwacht mag worden dat er geen concessies aan de scheepvaart worden gedaan. Op basis hiervan is het hefdeur principe aangenomen als uitgangspunt. Als na onderzoek blijkt dat het toestaan van scheepvaart door de stuw tijdens hoogwater niet noodzakelijk is dan is een radiaal deur de optimale variant volgens Rijkswaterstaat (Kortlever, 2021). Impressies schetsen van deze deuren zijn aangeleverd door RWS.</i>
U.6	<i>Scheepvaart dient door stuwopeningen te kunnen tijdens hoogwater</i>
U.7	<i>Een waterspiegel stijging van 0,5 m moet in acht genomen worden.</i>
	<i>Verschillende scenario's ten gevolge van klimaatverandering zijn voor handen. RWS heeft op basis van historische gebeurtenissen de verwachting meegegeven dat het streefpeil waarschijnlijk met 0,5 m stijgt in de levensduur van de constructie. (Schropp, 2021)</i>

3.6 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden zijn project specifiek. Voor alle stuwen dienen deze individueel geanalyseerd te worden. In Tabel 3.13 is een opsomming gegeven van de relevante randvoorwaarden die nodig zijn voor deze eerste haalbaarheidsstudie. Let op, de randvoorwaarden in deze paragraaf zijn gericht op het onderzoek naar de toepasbaarheid van waterkrachtcentrales. Wanneer het stuw ontwerp volledig uitgewerkt moet worden, dienen aanvullende randvoorwaarden bepaald te worden. Voorbeelden van aanvullende randvoorwaarden zijn het vaststellen van 2-dimensionele stroompatronen, mist- en regenintensiteit, lucht- en watertemperatuur, verdiepende morfologische aspecten, en de frequentie, dikte en periode van ijsvorming.

Een opsomming van de randvoorwaarden gebruikt voor dit onderzoek is gegeven in Tabel 3.13. Dit zijn algemene beschrijvingen van randvoorwaarden en kunnen dus gebruikt worden voor andere stuw vervangingsopgaves in Nederland. Deze dienen per locatie onderzocht en uitgewerkt te worden.

De randvoorwaarden worden in Tabel 3.13 geïdentificeerd met de aanduiding 'rvw'. Dit staat voor randvoorwaarden. Deze aanduiding wordt gevolgd door een categorisering van de randvoorwaarden. Hiervoor is de volgende indeling toegepast: Hydraulische (= rvw.H.), Ruimtelijke (= rvw.R.) en Geotechnische randvoorwaarden (= rvw.G.).

Tabel 3.13: Opsomming van de benodigde randvoorwaarden

ID	Omschrijving
rvw.H	Hydraulische randvoorwaarden
	<i>De hydraulische randvoorwaarden bevatten de volgende aspecten:</i> • <i>De bathymetrie ter plaatse van de gekozen stuw locatie</i> [rvw.H.1] • <i>Beneden- en bovenstroomse waterstanden (streefpeilen)</i> [rvw.H.2] • <i>De benodigde waterkerende hoogte van de stuw</i> [rvw.H.3] <i>* inclusief randvoorwaarden m.b.t. windopslag(windset), golven door de wind, surplus (veiligheidsmarge), dijkhoogte en verwachte impact van klimaatverandering.</i> • <i>Afvoer karakteristieke</i> [rvw.H.4] • <i>Het maatgevende debiet, het ontwerpdebiet en zomerdebiet (het te strijken debiet)</i> [rvw.H.5] • <i>Het debiet-verval relatie ($Q-\Delta h$ relatie)</i> [rvw.H.6] • <i>Voorkomstfrequentie van droge periodes</i> [rvw.H.7] • <i>Voorkomstfrequentie van het strijken van de stuw</i> [rvw.H.8] • <i>De impact van een droog en nat jaar op de randvoorwaarden</i> [rvw.H.9] • <i>Morfologisch(gegevens over de rivier bodem zoals het verhang en de ruwheid)</i> [rvw.H.10] • <i>Dichtheid van het water</i> [rvw.H.11]
rvw.R	Ruimtelijke randvoorwaarden
	<i>Een regionale en lokale analyse moeten uitgevoerd worden. Het is dan belangrijk om de volgende aspecten vast te stellen als randvoorwaarden:</i> • <i>De locaties van bewoonde gebieden (steden en dorpen)</i> [rvw.R.1] • <i>De ligging van bochten in de rivier</i> [rvw.R.2] • <i>Locaties van toekomstige ingrepen in het rivier systeem</i> [rvw.R.3] • <i>De beschikbare breedte van de vaarweg & de breedte</i>

	van de uiterwaarde [rvw.R.4] Het ruimtelijk ontwerp van de 'oude' brug (onder andere de locaties van de steunpunten en de ligging en dimensies van de fundering) [rvw.R.5]
rvw.G	Geotechnische randvoorwaarden
	In de eind fase van het ontwikkelen van een ontwerp is uitvoerig geotechnisch onderzoek nodig. In deze thesis volstaat het vaststellen van de volgende aspecten: - De opbouw van de ondergrond [rvw.G.1] - Grondwaterstanden [rvw.G.2] - Geotechnische eigenschappen van de ondergrond zoals: de dichtheid, het draagvermogen, samendrukbaarheid en permeabiliteit. [rvw.G.3] - Aardbevingsklasse [rvw.G.4]

4 Keuze van de toekomstige stuwlocatie

In dit hoofdstuk wordt voor de eerste keer de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode gebruikt om de locatie voor de toekomstige stuw te kiezen. De huidige ontwerplus is opgesplitst in twee delen. In het eerste gedeelte, paragraaf 4.1, wordt een ruwe locatie gekozen. Na de ruwe locatiekeuze volgt in het tweede gedeelte, paragraaf 4.2, een preciezere locatiekeuze. Dit hoofdstuk resulteert in een definitieve locatiekeuze die na de huidige ontwerplus niet meer zal variëren.

4.1 Ruwe locatiekeuze

Het doel van deze paragraaf is het verkrijgen van een geschikte globale indicatie voor de locatie van de toekomstige stuw. Dit proces omvat een zeefanalyse om geschikte en ongeschikte gebieden in kaart te brengen (paragraaf 4.1.1). Hierbij wordt specifiek rekening gehouden met de eisen gerelateerd aan de functies scheepvaart en overstromingspreventie. Vervolgens wordt ook onderzoek gedaan naar de hydraulische consequenties van een verplaatsing van de stuw (paragraaf 4.1.2). Het vermijden van een significante systeemsprong is een belangrijke vereiste, omdat de opdrachtgever het huidige functioneren van het riviersysteem wilt behouden. Daarom wordt in deze ontwerplus de maximaal toelaatbare verplaatsing van de stuw onderzocht. Tot slot, wordt in paragraaf 4.1.3 het overzicht gegeven van geschikte en ongeschikte gebieden voor de toekomstige stuw.

4.1.1 Zeefanalyse

In de zeefanalyse worden de geschikte en ongeschikte gebieden voor de stuw in kaart gebracht gebaseerd op het programma van eisen. Met name de kwalitatieve eis met betrekking tot een veilig bevaarbaar stuw (S.8) en de overstromingspreventie (O) zijn van groot belang voor de zeefanalyse, omdat ze rechtstreeks verband houden met het functioneren van de stuw en de impact van een mogelijke overstroming.

De uitgangspunten van Rijkswaterstaat, dat er in de toekomst wederom zeven stuwen in de Maas moeten liggen en dat het huidige functioneren van de riviersysteem behouden moet worden, leiden ertoe dat min of meer vergelijkbare stuwpannen als in de huidige situatie, weergegeven in Figuur 2.2, moeten worden aangehouden. Deze uitgangspunten beperken het onderzoeksgebied tot de stuwpannen gelegen tussen Sambeek en Lith. Een aanzienlijke verplaatsing van de stuwpannen is omwille van deze uitgangspunten niet wenselijk.

Voordat het beneden- en bovenstroomse stuwpan van Grave wordt geanalyseerd, moeten de eisen met betrekking tot een veilig bevaarbare stuw (S.8) en de overstromingspreventie (O) verder worden uitwerkt in een aantal concreter toetsbare criteria voor de locatiekeuze.

Opstellen van toetsbare criteria voor de zeefanalyse:

Voor de kwalitatieve eis S.8 - De stuwopening(en) moet(en) veilig bevaarbaar zijn tijdens hoogwater - zijn de volgende concrete en toetsbare eisen opgesteld:

- Het plaatsen van een stuw in een bocht of in de buurt van een bocht moet voorkomen worden. *Een stuw die gelegen is in een bocht van de rivier is lastiger te passeren voor scheepvaart. De schepen zijn in dat geval al bezig met het uitvoeren van een stuurmanoeuvres alvorens ze nog door de stuw moeten navigeren. Ook kan dit zorgen voor een onoverzichtelijker situatie waardoor de kans op botsingen toeneemt. De extra stuurmanoeuvres en het verminderde zicht verhogen het risico op een botsing. Dit is zeer ongewenst; een botsing van een schip op de stuw moet voorkomen worden.*

- Het plaatsen van een stuw in een riviergedeelte waar verschillende stromingen bij elkaar komen zoals kanalen of vertakkingen moeten worden voorkomen.

Een gecompliceerde hydraulische situatie kan ontstaan die navigatie rond de stuw bemoeilijkt. Dit kan tevens het risico op aanvaringen verhogen. Het vermijden van stuwplaatsing op locaties waar verschillende stromingen samenkomen, is van groot belang om de veilige navigatie rond de stuw te waarborgen.

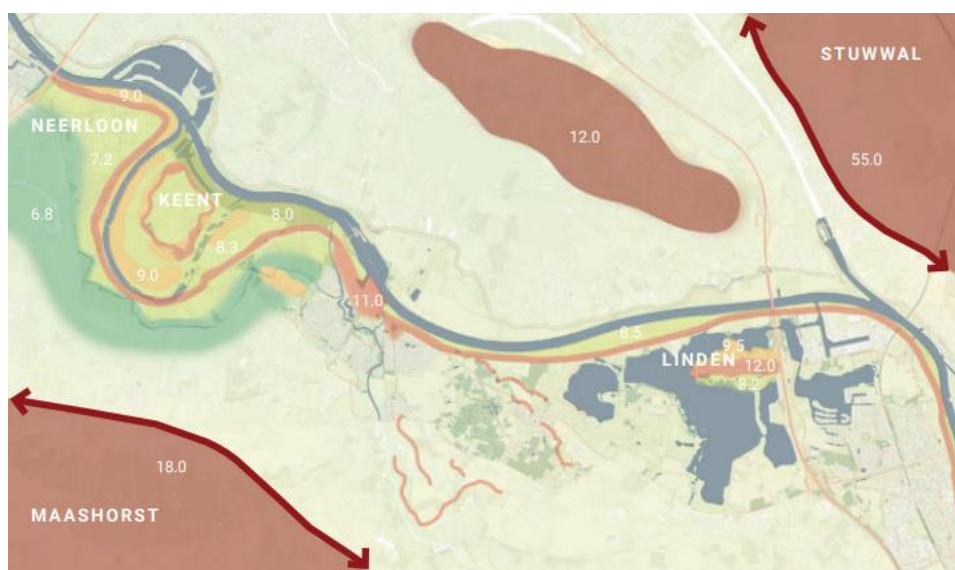
Voor de kwalitatieve eisen O gerelateerd aan de overstromingspreventie kunnen de volgende concrete toetsbare eisen worden opgesteld voor de locatiekeuze:

- Het plaatsen van de stuw naast een dichtbevolkt gebied met uitzondering van Grave moet in het belang van de waterveiligheid worden voorkomen.

Het plaatsen van een stuw naast een dichtbevolkt gebied, met uitzondering van Grave, kan aanzienlijke consequenties hebben bij het falen er van. Dit kan leiden tot de noodzaak van grote en dure veiligheidsmaatregelen, zoals het versterken en of verhogen van de dijken. Daarnaast kan het plaatsen van een stuw naast een dichtbevolkt gebied een negatieve lokale impact op de geohydrologische situatie hebben. Een mogelijk gevolg hiervan is het verzakken van huizen. Het plaatsen van de stuw bij een dichtbevolkt gebied wordt op basis van deze twee aspecten niet opportuun geacht.

De huidige eis geldt echter niet het riviergedeelte gelegen rond het dorp Grave. Het plaatsen van de stuw in dit gebied veroorzaakt hoogstwaarschijnlijk geen problemen met betrekking tot de bovenstaande punten. Het dorp Grave heeft namelijk een aantal gunstige eigenschappen. Zowel de geografische ligging als de historie van het gebied spelen hier een belangrijke rol in.

In het rivierdeel rond Grave zijn de eerste Maasmeanders te vinden. Het proces van opslibbing met rivierslib heeft er voor gezorgd dat de oude Maasmeanders hoog in het landschap zijn komen te liggen. Er is een inversie van het landschap ontstaan: hoge, droge akkers buitendijks en lage, natte weidegronden binnendijks. Figuur 4.1 toont het hoogteprofiel van de omgeving, waaruit blijkt dat de stad Grave (NAP +11 m) significant hoger ligt dan de omgeving, vanwege de overgang van terrassen naar meanderende Maas (Shengenga et al, 2020).



Figuur 4.1: Opvallende hoogtes en laagtes langs het dijktrace bij Grave. Afkomstig van Shengenga et al. (2020).

Ten tweede, wijkt de stad Grave af van andere dichtbevolkte gebieden in de buurt. Het is namelijk een

vestingstad waar door de geschiedenis heen al meerdere hydraulische maatregelen genomen zijn (Shengenga et al, 2020). Hierdoor is in het verleden al een waterverdedigingslinie rondom Grave aangelegd. Onder andere grachten en deuren ter overstromingspreventie zijn aanwezig. Daarnaast is de gemeenschap van Grave al gewend om naast een stuw te wonen waardoor verwacht kan worden dat de maatschappelijke weerstand relatief kleiner zal zijn. De conclusie is dat het geoorloofd is om een toekomstige stuw in de buurt van Grave neer te leggen.

Naast de bovenstaande eisen zijn er nog andere belangrijke aspecten waarmee rekening moet worden gehouden in de zeefanalyse:

- Op het moment van schrijven van dit rapport worden er plannen gemaakt voor toekomstige ingrepen in het riviersysteem om de ecologie en natuur te verbeteren. Om deze reden wordt het niet opportuun geacht om de nieuwe stuw te plaatsen in gebieden die zijn aangewezen voor verbeteringen in de ecologie en natuur. Het ontwerpen van een stuw in een dergelijk gebied zou veel onzekerheid met zich meebrengen en zou tegenstrijdig zijn met de plannen om de ecologische en natuur kwaliteit te verbeteren. De specifieke gebieden waarover dit gaat zullen worden beschreven tijdens de zeefanalyse.

Zeefanalyse van het bovenstrooms stuwpan:

Er is besloten om de zeefanalyse te beperken tot het riviergedeelte Cuijk-Grave. Verder bovenstrooms zoeken naar een geschikte locatie wordt als onrealistisch beschouwd vanwege het risico op een significante systeemsprong. In paragraaf 4.1.2 wordt het criterium met betrekking tot de systeemsprong uitgewerkt in een maximale afstand waarbinnen de stuw mag worden verplaatst. Voor de huidige analyse kan met een hoge mate van zekerheid worden gesteld dat deze maximale afstand niet verder bovenstrooms is dan Cuijk.

In Figuur 4.2 zijn de ongeschikte riviergedeeltes voor het plaatsen van de stuw aangeduid.



Figuur 4.2: satellietbeelden van het gebied bovenstrooms van de stuw bij Grave met daarin de belangrijkste ongeschikte riviergedeeltes aangegeven. Rode riviergedeeltes geven locaties aan waar per definitie geen stuw mag worden geplaatst. Gele riviergebieden moet preferabel vermeden worden. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

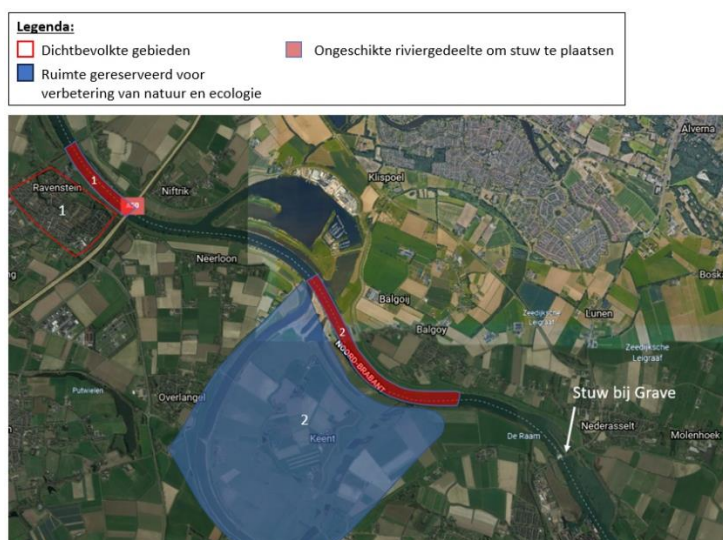
De verschillende gebieden aangegeven in Figuur 4.2 zijn om uiteenlopende redenen ongeschikt:

- **Riviergedeelte 1:** dit is gelegen naast een relatief dichtbevolkt gebied, namelijk de dorpen Overasselt en Ewijk.
- **Riviergedeelte 2.1 & 2.2:** Naast deze riviergedeeltes is een gebied aangewezen voor het verbeteren van de natuur en ecologie (Aangeduid als het blauwe gebied in Figuur 4.2 met nummer 2). Waterschap aa de maas (Shengenga et al., 2020) voert verkennende studies uit om de ecologie, natuur en recreatie te bevorderen door uitwisseling van water tussen de Maas en de Kraaijenbergse plassen te creëren. Gezien deze plannen en het belang van de verbeteringen wordt het ongewenst geacht om in riviergedeelte 2.1 de stuw te plaatsen, waar het water uitgewisseld zou worden. Evenzo zou het plaatsen van de stuw in riviergedeelte 2.2, gezien de nabijheid, conflicteren met de beoogde verbeteringen. Het wordt daarom niet wenselijk geacht om hier de stuw te plaatsen. Het standpunt rond deze riviergedeeltes kan wijzigen wanneer meer over dit project bekend wordt.
- **Riviergedeelte 3:** Dit is een ongeschikt deel van de rivier vanwege de aanwezigheid van het Maas-Waalkanaal. Zoals eerder aangegeven, is dit met betrekking tot scheepvaart geen ideale locatie. Een onduidelijke situatie kan ontstaan, mogelijk hevige dwarsstroming kunnen optreden en de verwachting dat relatief veel stuurmanoeuvres redelijk snel achter elkaar nodig zouden zijn vergroten het risico op aanvaring. Ook fungeert het Maas-Waalkanaal als een belangrijke transportroute die de Waal aan de Maas met elkaar verbind. Het plaatsen van de stuw dichtbij dit punt kan leiden tot een bottleneck voor scheepvaart. Zowel scheepvaart van en naar het Maas-Waalkanaal als scheepvaart op de Maas moeten hier passeren en kunnen verkeerscongestie veroorzaken. Dit kan leiden tot een ruimtegebrek en chaos op het water.
- **Riviergedeelte 4:** dit deel is gelegen naast een relatief dichtbevolkt gebied, namelijk het dorp Cuijk.

De resterende riviergedeeltes in het bovenstroomse stuwpannd worden als geschikt beschouwd voor de plaatsing van de stuw.

Zeefanalyse van het benedenstroomse stuwpannd:

De ongeschikte riviergedeeltes in het benedenstroomse gelegen stuwpannd van Grave worden aangegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3: satellietbeelden van het gebied benedenstrooms van de stuw bij Grave met daarin de belangrijkste randvoorwaarden gemarkeerd. In rood worden de ongeschikte riviergedeeltes aangegeven. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

De verschillende gebieden aangegeven in Figuur 4.3 zijn om uiteenlopende redenen ongeschikt:

- **Riviergedeelte 1:** dit is gelegen naast een relatief dichtbevolkt gebied, namelijk de stad Ravenstein.
- **Riviergedeelte 2:** Naast dit riviergedeelte is ook een gebied aangewezen voor het verbeteren van de natuur en ecologie (Shengenga et al., 2020). Daarom wordt het plaatsen van een stuw in dit riviergedeelte als ongewenst en onrealistisch beschouwd.

Naast de bovenstaande indicatie van ongeschikte gebieden is het belangrijk om het meanderende karakter van de rivier de Maas benedenstrooms van Grave te behandelen. Hier begint de rivier de Maas sterk te meanderen door het gebrek aan verhang. Vooral tussen Grave en 's-Hertogenbosch zijn meanders prominent aanwezig (Waterschap Aa en Maas, 2022).

De tendens van de afgelopen jaren is om dergelijke karakteristiek zoals het meanderen te koesteren. Er wordt meer ruimte aan de rivier gegeven, wat gunstig is voor de ruimtelijke kwaliteit, ecologie, recreatie en overstromingspreventie. Het plaatsen van een stuw in een gebied dat bij uitstek geschikt is voor het meanderen van de Maas zou zonde zijn. Het plaatsen van een stuw en extra kanaliseren van de rivier kan het meanderen verstoren. Dit wordt als ongewenst beschouwd. Bovendien kan het meanderende karakter een gevaar zijn voor de stabiliteit en functionaliteit van de stuw zijn wanneer besloten wordt om in dit deel toch de stuw te plaatsen. Daarom wordt het benedenstroomse vervanging van de stuw als niet realistisch en opportuun beschouwd, en wordt het dus uitgesloten van verdere overweging in dit onderzoek. In het restant van dit onderzoek zal er uitsluitend op bovenstroomse locaties voor de toekomstige stuw worden gericht.

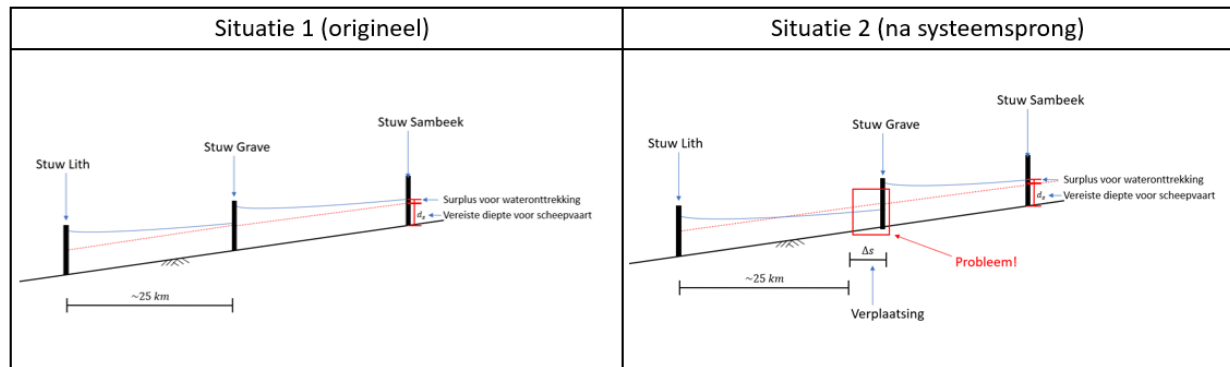
4.1.2 Systeemspronganalyse

Verskillende stakeholders zijn afhankelijk van het huidige waterbeheer in de Maas. Voor scheepvaart is voldoende diepgang in het stuwpannd essentieel. Andere stakeholders zoals fabrieken, boeren en omwonende onttrekken water uit de Maas voor diverse doeleinde zoals irrigatie, drinkwater of koeling. Rijkswaterstaat heeft aangegeven dat alle functies behouden moeten blijven in het toekomstige riviersysteem (Schropp & Tuin, 2021). Dit betekent dat vergelijkbare stuwpannen als in de huidige situatie, weergegeven in Figuur 2.2, behouden moeten blijven en dat er geen significante systeemsprong mag plaats vinden. Dit heeft geleid tot de uitgangspunten dat in de toekomst wederom zeven stuwen in de Maas moeten worden geconstrueerd, en dat het opportuun is om deze stuwen nagenoeg één-op-één te vervangen. Deze paragraaf onderzoekt de maximale systeemsprong, oftewel de afstand dat de toekomstige stuw mag worden verplaatsen zonder functies te verliezen.

Vanwege de bovenstaande uitgangspunten hoeft alleen het gebied tussen Sambeek tot Lith te worden onderzocht voor de toekomstige stuwlocatie. Voordat de maximale verplaatsing wordt bepaald, zal eerst bondige worden uitgelegd wat de negatieve effecten van een systeemsprong kunnen zijn.

De Maas wordt opgestuwd om voldoende diepgang voor scheepvaart te genereren en om het voor andere stakeholders mogelijk te maken om water te onttrekken. De Maas heeft een subkritische stroming, wat betekent dat de waterstanden in de stuwpannen worden bepaald door de benedenstroomse stuw. Het operationeel plan en de waterkerende hoogte van de stuwen worden bepaald op basis van de gewenste waterstand in het bovenstroomse stuwpannd. De stuw moet het water dusdanig opstuwen dat er in het gehele stuwpannd voldoende diepgang voor scheepvaart aanwezig is en dat er een surplus aan water is dat kan worden onttrokken voor de functies van de stakeholders. Om de waterkerende hoogte van de stuwdeuren te bepalen wordt gebruik gemaakt van stuwkrommen. In situatie 1 van Figuur 4.4 is een dergelijke stuwkromme schematisch weergegeven.

In Figuur 4.4 worden twee situaties schematisch weergegeven om de problemen voor de stakeholders te duiden als gevolg van een verplaatsing van de stuw in bovenstroomse richting. Alleen de problemen die ontstaan bij een bovenstroomse verplaatsing worden besproken, aangezien paragraaf 4.1.1 heeft aangetoond dat dit de enige geschikt optie is. Situatie 1 toont de huidige stuwkromme van Sambeek tot Lith. Situatie 2 toont een overdreven schematisering van het probleem dat ontstaat door een significante verplaatsing van de stuw bij Grave in bovenstroomse richting.



Figuur 4.4: drie situaties ter verduidelijking van problemen die ontstaan door verplaatsing van de stuw. LINKS: de huidige situatie. MIDDEN: verplaatsing van de stuw in benedenstroomse richting.

De gradiënt van de stuwkromme blijft constant tussen beide situaties, omdat de rivierkarakteristieke die dit bepalen, zoals de ruwheid en bodemhelling, niet veranderen. Dit betekent dat als de stuw bij Grave aanzienlijk stroomopwaarts wordt verplaatst, de waterdiepte benedenstrooms van de toekomstige stuw mogelijk niet voldoende voor scheepvaart, vooral tijdens droge periodes.

Een potentiële oplossing is om de volgorde van vervanging aan te passen. Als de stuwen in stroomopwaarts volgorde kunnen worden vervangen, dan kan de waterkerende hoogte benedenstrooms alvast aangepast worden om het waterpeil in het bovenliggende stuwpand te garanderen. De onveranderde gradiënt van de stuwkromme in combinatie met de verhoging van de waterkerende hoogte zorgt ervoor dat er voldoende diepgang behouden blijft in het stuwpand tussen Grave en Sambeek de stuw bij Grave stroomopwaarts wordt verplaatst. Het is echter belangrijk om op te merken dat deze ingreep ook vereist dat de dijkhoogtes langs het stuwpand worden verhoogd.

Helaas is er een probleem; de geplande volgorde van vervanging zal waarschijnlijk niet worden aangepast. In paragraaf 2.2 is aangegeven dat de stuw bij Grave als eerste moet worden vervangen. Het is niet aannemelijk dat Rijkswaterstaat de geplande volgorde nog gaat veranderen aangezien deze stuw in de slechtste staat verkeerd. Dit aspect in combinatie met de kosten voor het verhogen van de stuwdeuren en dijken, heeft ertoe geleid dat de voorgestelde oplossing niet in overweging wordt genomen. Dit betekend dat de verplaatsing van de stuw stroomopwaarts niet mag leiden tot een significante systeemsprong.

De volgende stap is het vaststellen van de maximaal toelaatbare verplaatsing. In principe kan dit op vier verschillende manier worden bepaald:

1. Analytisch benadering op basis van een stuwkromme
2. Door middel van een data-analyse. Waterpeil-data van meerdere locatie in de rivier zou verzameld moeten worden om het waterpeil te modelleren en deze te extrapoleren om de toegestane verplaatsing te bepalen.
3. Een aanname op basis van kennis van een deskundige.

4. Een 2-dimensionale of zelfs 3-Dimensionale hydraulische analyse, bijvoorbeeld met SOBEK of WAQUA.

Voor dit onderzoek wordt een keuze gemaakt op basis van relevantie voor het onderzoek, rekentijd en nauwkeurigheid.

In de eerste optie ontbreekt een belangrijk aspect waardoor deze optie afvalt voor dit onderzoek. Dit betreft het aspect wateronttrekking uit het systeem door stakeholders. Hierdoor wordt de waterdaling over het nieuwe stuwpand niet correct ingeschat.

De tweede optie neemt het aspect van wateronttrekking door stakeholders wel mee. Echter, heeft deze methode weer andere nadelen die het ongeschikt maakt voor het doel van dit onderzoek. Dit is een relatief langdurige methode. Redelijk veel data moet namelijk worden opgehaald en er moet een model in elkaar worden gezet die voldoende nauwkeurig is. Aangezien de winst in nauwkeurigheid onzeker is en het een tijdrovend proces is, wordt afgezien van deze methode.

De derde optie is de minst nauwkeurige optie en er kan niet volledig op vertrouwd worden om definitieve conclusies te trekken. Aan de andere kant is dit wel de minst tijdrovende optie en blijkt deze methode relatief betrouwbaar te zijn wanneer een deskundige met uitgebreide kennis wordt geraadpleegd. Wanneer een gekwalificeerde expert wordt ingeschakeld, valt de mate van onnauwkeurigheid enigszins mee. Deze benadering introduceert echter inherent onzekerheid, omdat deze gebaseerd is op het inzicht en de kennis van een ander individu.

De vierde optie is de methode die je in de ideaal wereld zou willen uitvoeren. De nauwkeurigheid is namelijk hoog. Aan de andere kant is dit wel een arbeidsintensief en tijdrovend proces. Deze methode zou dan ook gewenst zijn als het doel van dit onderzoek was om de systeemsprong en de mogelijke gevolgen hiervan te analyseren. Dit is het echter niet het geval. Er is besloten omwille van de tijdsduur geen gebruik te maken van deze methode.

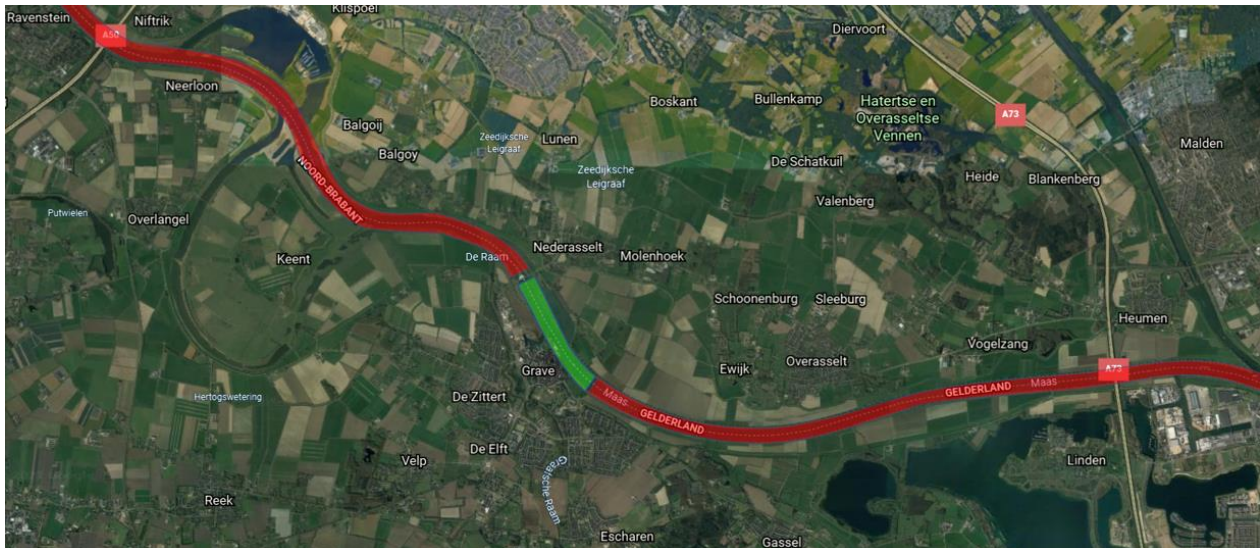
Concluderend, vallen methode 1 en 2 af op basis van een combinatie van het relatief lang durende proces en de marginale betrouwbaarheid die hiermee gewonnen wordt. Omwille van de focus op het doel van dit onderzoek, de inpassing van waterkrachtcentrales en niet het optimale ontwerp voor de toekomstige stuw bij Grave, vallen deze twee methode af. Methode 3 wordt dus gebruikt om de maximale afstand van de systeemsprong in te schatten. In een interview met Rijkswaterstaat (Baijens & Schropp, 2021) werd aangegeven dat een verplaatsing over een afstand groter dan 1 km als onrealistisch wordt aangenomen. Met een grotere verplaatsing hoeft geen rekening te worden gehouden.

4.1.3 Conclusie ruwe locatiekeuze

De belangrijkste conclusies van de zeefanalyse zijn:

- Dat de stuw niet in benedenstroomse richting kan worden verplaatst;
- Bovenstrooms zijn vier delen van de rivier om uiteenlopende redenen beoordeeld als ongeschikte locaties voor de toekomstige stuw;
- Bovenstrooms is een deel van de rivier geïdentificeerd waarin het ongewenst is om de stuw te plaatsen op basis van natuurontwikkelingsplannen;
- De verplaatsing van de stuw in bovenstroomse richting wordt gelimiteerd tot 1 km om een significante systeemsprong te voorkomen.

In Figuur 4.5 wordt het resultaat van de zeefanalyse getoond. Hierin zijn de geschikte rivier gedeeltes om de toekomstige stuw te plaatsen in groen aangegeven en de ongeschikte gebieden in rood. In de volgende stap moet de exacte locatie van de toekomstige stuw in het groene gebied worden gekozen.



Figuur 4.5: Resultaten van de zeefanalyse. In groen: het geschikte rivierdeel. In rood: de ongeschikte rivierdelen. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

4.2 Precieze locatiekeuze

Nu ruwweg de locatie voor de toekomstige stuw bekend is wordt in deze paragraaf de precieze locatie in. Hiervoor is een gedeelte van de ontwerpplus opnieuw voor doorlopen.

Het verschil met de ruwe locatie keuze is dat in de precieze locatiekeuze uitsluitend in het groen gemarkeerd deel van de rivier weergegeven in Figuur 4.5 wordt gezocht naar de optimale locatie. Daarnaast worden de locaties geologisch geverifieerd. Uiteindelijk wordt een optimale locatie uit de realistische locaties gekozen op basis van een Multicriteria-analyse.

4.2.1 Inventariseren van potentiële locaties nabij de huidige stuw

Voor het verder inventariseren van geschikte locaties in het geschikte rivier deel wordt gebruik gemaakt van de eerder beschreven haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat naar de vervangingsopgave van de stuw bij Grave. In deze studie worden 7 ontwerpalternatieven ontwikkeld waarin de locatie een van de variabelen is. Dit biedt uitkomst voor het zojuist beschreven dilemma. De 7 ontwerpalternatieven kunnen in de huidige ontwerpstudie dienen als de eerste schetsenontwerpen om de locatie te bepalen. Een bijkomend voordeel door gebruik te maken van het onderzoek van Rijkswaterstaat is dat het ontwerpresultaat zo relevant als mogelijk wordt gehouden.

In de presentatie 'symposium stuwen Maas – Werken met de winkel open' (Delbressine et al., 2021) worden de resultaten van de eerste haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat naar de vervanging van de stuw bij Grave gepresenteerd. In deze haalbaarheidsstudie stond de vraag centraal of het mogelijk is om een stuw te vervangen met behoud van de huidige functies tijdens de bouwphase. Zoals onder civiel ingenieurs bekend is het vroegtijdig aandacht besteden aan het constructieproces aan te raden. Tijdens het constructieproces kunnen maatgevende situaties voorkomen waardoor bepaalde ontwerpen niet

realistisch zijn. Bouwwerkzaamheden kunnen er namelijk toe leiden dat tijdelijk een gedeelte van de waterweg geblokkeerd wordt waardoor opstuwning en/of hogere stroomsnelheden kunnen optreden. Beide aspecten kunnen de waterveiligheid in gevaar brengen. Ontwerpoplossingen moeten bedacht worden om hier goed mee om te gaan. De construeerbaarheid heeft dus consequenties voor het ruimtebeslag, het toekomstige stuw ontwerp en de locatiekeuze. Door het onderzoek van Rijkswaterstaat te gebruiken kan vroegtijdig rekening worden gehouden met het constructieproces. Voor dit onderzoek kan dan priori gesteld worden dat een stuw construeerbaar is op gekozen locatie. Alle locaties zijn namelijk gebaseerd op ontwerpalternatieven die construeerbaar zijn.

Een aantal ontwerpalternatieven uit de haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat hebben dezelfde locatie. Uiteindelijk kunnen de ontwerpalternatieven onderverdeeld worden in 3 potentiële locaties voor bovenstroomse vervanging van de stuw. Deze locaties zijn aangeduid in Figuur 4.6.



Figuur 4.6: Resultaat van de inventarisatie van potentiële stuwlocaties op basis van haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

4.2.2 Verificatie van de ontwerpalternatieven

In deze paragraaf worden de drie locatie weergegeven in Figuur 4.6 geverifieerd op de verder relevante eisen voor de locatiekeuze. Dit betreffen de geologische geschiktheid en de scheepvaarteis die stelt dat de stuw veilig bevaarbaar moet zijn.

De belangrijke eisen met betrekking tot de beschikbaarheid voor scheepvaart tijdens het bouwproces en de maakbaarheid van een stuw op de desbetreffende locatie zijn a priori door Rijkswaterstaat al geverifieerd. Deze eisen worden daarom niet meer geverifieerd in dit ontwerpproces.

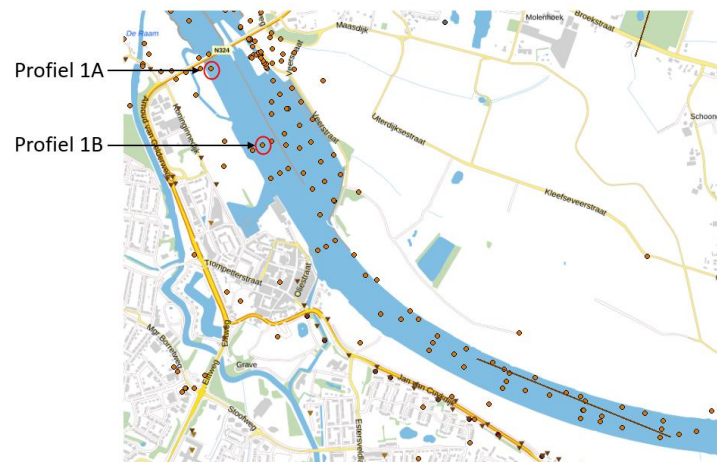
Locatie A – direct bovenstrooms van de huidige stuw:

Locatie A wordt in dit deel geverifieerd op de geologische geschiktheid en de scheepvaarteis voor een veilig bevaarbare stuw.

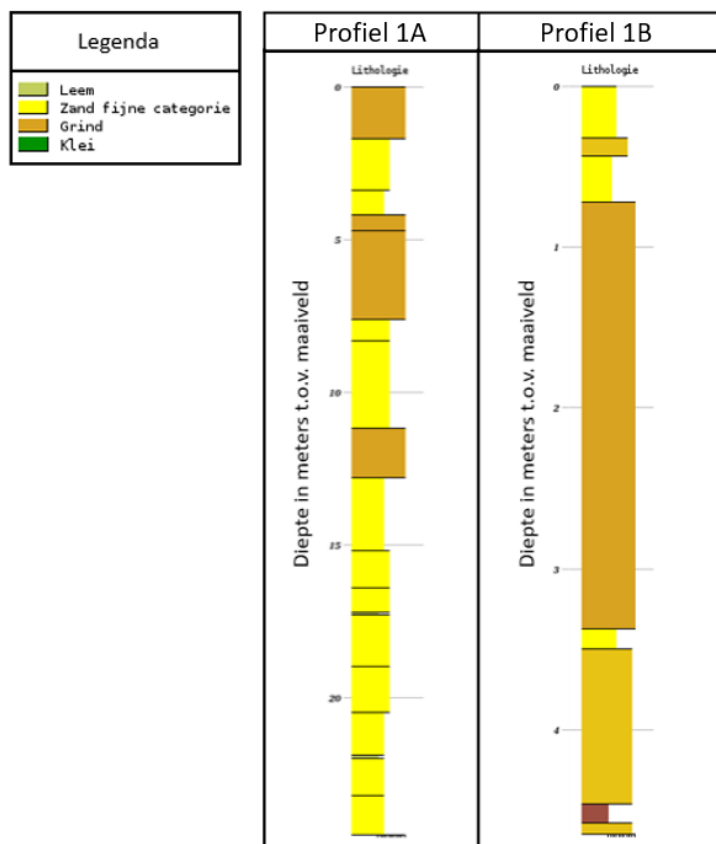
Geologische geschiktheid:

De eerste stap is het maken van een aannemen voor het funderingsontwerp. In de huidige ontwerpfase wordt een plausibele aanname gemaakt gebaseerd op ervaring en het huidige stuwontwerp. Dit heeft geresulteerd in de aanname dat de stuw op een staal fundering komt te liggen waarvan de dikte kan variëren tussen de 1 en 3 m. De belangrijks geologische verificatie is dat de stuw op een onsamendrukbare ondergrond komt te liggen zodat de zakking van de stuw nihil blijft. De toetsbare eis hiervoor is dat de fundering op een zand of grind laag komt te liggen.

In Figuur 4.7 worden de locaties van de gebruikte grondprofielen weergegeven. Figuur 4.8 zijn de corresponderende grondprofielen van deze locaties weergegeven.



Figuur 4.7: duiding van locaties van grondprofielen die gebruikt worden om de geologische geschiktheid van locatie A te verifiëren. Afkomstig van: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens> (Aangepast).



Figuur 4.8: grondprofielen van de locaties 1A en 1B om de geologische geschiktheid van locatie A te verifiëren. Afkomstig van: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens> (Aangepast).

Op basis van Figuur 4.8 kan worden geconcludeerd dat de ondergrond op locatie A geschikt is om een stuw te plaatsten. De ondergrond bestaat voornamelijk uit zand en grind waardoor de zakking klein blijft. Belangrijk om op te merken is dat bij de aanwezigheid van grindlaag extra aandacht aan onderloopsheid moet worden besteed. Gelukkig zijn er voldoende ontwerpmaatregelen die in een latere ontwerpfase kunnen worden genomen voorhanden waardoor dit geen probleem hoeft te zijn. Dus locatie A is geologisch geschikt voor het plaatsen van een stuw.

Scheepvaarteis voor een veilig bevaarbare stuw:

De scheepvaarteis voor een veilig bevaarbare stuw die in dit deel van het ontwerpproces moet worden geverifieerd is het aspect dat de stuw niet in een bocht met een te kleine radius mag komen te liggen.

In Figuur 4.6 is te zien dat locatie A in een deel van de rivier ligt dat relatief recht loopt. De huidige stuw is min of meer op de dezelfde locatie gelegen waardoor gesteld mag worden dat deze locatie voldoet aan de scheepvaarteis.

Locatie B – direct bovenstrooms van de sluis van de huidige stuw:

Dezelfde verificaties als voor locatie A zijn uitgevoerd voor locatie B.

Geologische geschiktheid:

Figuur 4.9 toont de locatie van het gebruikte boormonster en het bijbehorende grondprofiel. Op basis van deze grondmonster wordt geconcludeerd dat deze ondergrond voldoet. De bovenste klei laag moet namelijk verwijderd worden aangezien de fundering dieper komt te liggen.



Figuur 4.9: Locatieduiding van het grondprofielen en het bijbehorende grondprofiel om de geschiktheid van locatie B te verifiëren. Afkomstig van: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens> (Aangepast).

Scheepvaarteis voor een veilig bevaarbare stuw:

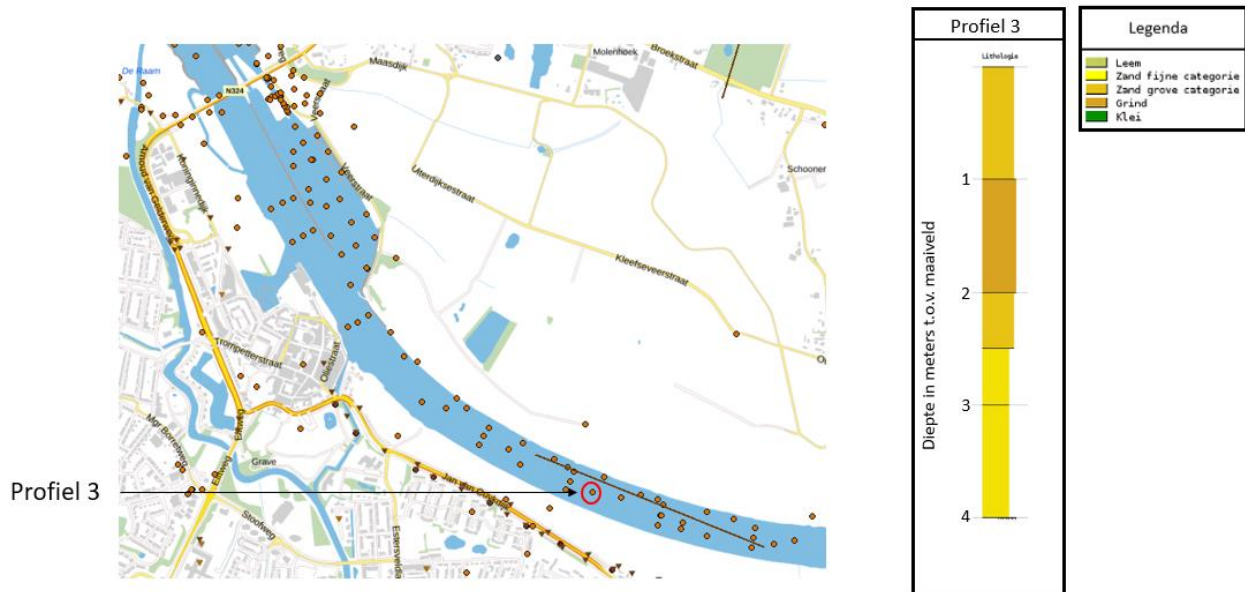
In Figuur 4.6 is te zien dat locatie B in een deel van de rivier ligt dat relatief recht loopt. De sluis van de huidige stuw ligt benedenstrooms van deze locatie. Dit maakt deze locatie geschikt voor scheepvaart.

Locatie C – Ongeveer 800 m bovenstrooms van de huidige stuw:

Dezelfde verificaties als voor locatie A en B zijn uitgevoerd voor locatie C.

Geologische geschiktheid:

Figuur 4.10 toont de locatie van het gebruikte boormonster en het bijbehorende grondprofiel. Op basis van deze grondmonster wordt geconcludeerd dat de ondergrond op deze locatie geschikt is om de toekomstige stuw te plaatsen. De grondlaag waarin de fundering komt te liggen bestaat namelijk uit zand en/of grind. Wederom is het belangrijk om een vervolgstudie de onderloopsheid te toetsen.



Figuur 4.10: Locatieduiding van het grondprofielen en het bijbehorende grondprofiel om de geschiktheid van locatie B te verifiëren. Afkomstig van: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens> (Aangepast).

Scheepvaartis voor een veilig bevaarbare stuw:

In Figuur 4.6 is te zien dat locatie C in een bocht ligt. Dit kan leiden tot veiligheidsproblemen voor scheepvaart. Desondanks is deze locatie niet als ongeschikt beoordeeld aangezien het een relatief flauwe bocht is. Hierdoor kunnen eenvoudig aanpassingen aan de rivier en het stuwontwerp worden gemaakt die er voor zorgen dat de schepen het stuwcomplex alsnog zonder complexe stuurmanoeuvres kunnen passeren. Daarom hoeft deze locatie niet afgekeurd te worden en wordt ook deze locatie meegenomen in de evaluatie.

4.2.3 Opzet van het evaluatieproces

Na verificatie van de alternatieven blijven drie potentiële locaties voor de toekomstige stuw over. Een Multicriteria-analyse wordt uitgevoerd om de optimale locatie te bepalen.

De evaluatiecriteria opgesteld in de basis van het ontwerp, paragraaf 3.4, worden gebruikt in de Multicriteria-analyse. De relevantie van deze evaluatiecriteria varieert naargelang de ontwerpstep. Een aantal evaluatiecriteria zijn van groter belang van de huidige ontwerpstep, terwijl de locaties op andere criteria niet onderscheiden. Een aantal evaluatiecriteria zijn gericht op een hoger detailniveau en kunnen pas worden geëvalueerd wanneer er een 'concreet' ontwerp beschikbaar is. Om deze reden zijn de evaluatiecriteria daarom gewogen in de Multicriteria-analyse.

De wegingsscores variëren van 0 tot 5. De toekenning van wegingen aan de evaluatiecriteria is als volgt:

- **Milieu impact:** Gewicht van 4. Dit criterium is van groot belang omdat verstoring van de ecologie en natuur moet worden voorkomen. De locatie kan aanzienlijk invloed hebben op de natuur en ecologie. Vooral als de stuw bijvoorbeeld in de uiterwaarde of in een nevengeul wordt geplaatst.
- **Beheer & onderhoud:** Gewicht van 1. Voor de locatiekeuze is dit criterium minder belangrijk, aangezien het beheer en onderhoud met name afhankelijk zijn van het detailontwerp, het operationeel en de onderhoudsstrategie. Het wordt verondersteld dat de locaties het beheer en onderhoud niet significant beperken; voor elke locatie kan een goed beheer- en onderhoudsplan worden opgesteld.

- **Duurzaamheid:** Gewicht van 5. Duurzaamheid is een cruciaal criterium aangezien het doel van deze thesis is om bij te dragen aan de verduurzaming van Nederland. Door in een vroeg ontwerpstadium nadrukkelijk rekening te houden met duurzaamheid kan tijdig milieuschade worden geminimaliseerd. Daarnaast moeten bepaalde componenten van het huidige stuwcomplex voor het einde van hun levensduur worden vervangen afhankelijk van de locatie. Het vervangen van deze stuwcomponenten voor het einde van hun levensduur is niet duurzaam.
- **Aanpasbaarheid:** Gewicht van 1. De locaties hebben geen invloed op de aanpasbaarheid van het ontwerp niet. Op elke locatie kunnen even gemakkelijk een waterkrachtcentrale worden toegevoegd en verwijderd. Dit criterium kan pas worden beoordeeld als er een 'concreet' ontwerp is.
- **Beïnvloeding van het stromingspatroon:** Gewicht van 2. Hoewel dit criterium niet doorslaggevend is in de huidige ontwerpfase, heeft de locatie wel enige impact op dit aspect. Verplaatsingen kunnen (geo)hydrologische problemen veroorzaken, zoals verzakkingen van huizen. Meestal zijn er echter ontwerp oplossingen beschikbaar voor deze problemen. Om deze reden is dit aspect niet als eis opgenomen en heeft het een relatief lage weging.
- **Additionele veiligheid voor scheepvaart:** Gewicht van 1. Alle locaties voldoen al aan de eisen met betrekking tot een veilig bevaarbare stuw. Verder is er geen onderscheid te maken in de locaties op additionele veiligheid. De complexiteit voor scheepvaart om het stuwcomplex te passeren valt nog niet te trekken enkel op basis van de locatie.
- **Complexiteit van het bouwen:** Gewicht van 1. Dit criterium wordt in de huidige ontwerpfase als minder belangrijk beoordeeld, omdat het a priori al geverifieerd is door Rijkswaterstaat.

4.2.4 Waardebepaling

De scores van de Multicriteria-analyse worden weergegeven in Tabel 4.1. De beoordelingen in deze evaluatie zijn relatief ten opzichte van elkaar. Alle criteria worden beoordeeld op een schaal van 0 tot 200. Een score van 200 geeft aan dat het desbetreffende alternatief zeer gunstig scoort ten opzicht van de andere alternatieven. Een score van 100 is neutraal, terwijl een score van 0 aangeeft dat het betreffende alternatief slecht presteert in vergelijking met de andere alternatieven.

Tabel 4.1: Relatieve beoordeling van de locaties.

Evaluatiecriteria	Weging	A (Direct bovenstrooms van de stuw)	B (Direct bovenstrooms van de sluis)	C (800 m bovenstrooms)
Milieu impact	4	100	90	40
Beheer & Onderhoud	1	100	100	100
Materiaalgebruik	1	100	100	100
Duurzaamheid	5	180	100	60
Beïnvloeding van het Stromingspatroon	2	100	100	30
Additionele veiligheid voor scheepvaart	1	90	100	100
Complexiteit van het bouwen	1	100	100	100
Totale gewogen score	-	1890	1460	920

Onderbouwing van de bovenstaande scores:

Milieu impact:

Locatie A en B scoren min of meer vergelijkbaar op dit criterium, aangezien verwacht wordt dat de impact op de natuur en ecologie op deze locatie gelijk is aan die van de huidige stuwlocatie. De verandering in de locatie is namelijk voor beide marginaal. Daarentegen is het voor locatie C een ander verhaal. Op het eerste oog lijkt deze locatie een ongunstige impact te hebben, omdat 'nieuwe' natuur verstoord wordt door de ingrijpende aanpassingen die gepaard gaan met het plaatsen van een stuw.

Het kleine verschil tussen locatie A en B wordt veroorzaakt doordat het voor het construeren van een stuw op deze locatie noodzakelijk is om de huidige sluis te slopen. Rijkswaterstaat (Bajens & Schropp, 2021) heeft aangegeven dat het huidige stuwcomplex beoordeeld is met een monumentale status. Bij voorkeur blijven de huidige brug en sluis behouden. Dit wordt niet gezien als een keiharde/absolute eis aangezien deze componenten gesloopt mogen worden als er een goede onderbouwing voor is. Desalniettemin heeft het een waarde als deze componenten behouden blijven. In alle ontwerpalternatieven wordt de brug behouden. Al locatie B wordt gekozen moet de sluis echter worden gesloopt, wat de score van locatie B lager maakt dan die van locatie A.

Beheer & Onderhoud:

Op dit moment is er geen reden om aan te nemen dat de locatie een negatieve invloed zal hebben op het beheer en onderhoud. Er wordt aangenomen dat het beheer en onderhoud op alle locaties vergelijkbaar kunnen worden uitgevoerd. Daarom worden alle drie de locaties als gelijkwaardig beoordeeld.

Duurzaamheid:

De locatie heeft indirect een aanzienlijke impact op de duurzaamheid van het ontwerp. De locatiekeuze bepaald onder andere welke stuwcomponenten in 2030 moeten worden vervangen. Rijkswaterstaat (Kortlever, 2021) heeft de wens geuit om alleen de stuwcomponent van het complex te vervangen. De sluis is bijvoorbeeld nog niet aan het einde van haar levensduur en moet bij voorkeur worden behouden. Dit zou de meest duurzame oplossing zijn. De locatiekeuze stelt echter andere uitgangspunten aan het ontwerp. Als locatie A wordt gekozen, is het mogelijk om de huidige sluis in het nieuwe complex te integreren. Dit is echter niet mogelijk op alle locaties; bepaalde locaties vereisen vervanging van constructiecomponenten die nog niet aan het einde van hun levensduur zijn. Voor Locatie C is het noodzakelijk om direct een nieuwe sluis aan te leggen zodat het verval op de nieuwe locatie overbrugbaar is voor scheepvaart. Voor locatie B geldt ook dat er direct een nieuwe sluis moet worden aangelegd. De nieuwe stuwcomponent wordt namelijk gebouwd op de plek van de huidige sluis. Het vervangen van constructie-componenten voor het einde van hun levensduur wordt als weinig duurzaam beschouwd. Dit is de voornaamste reden om de locatie B en C een significant lagere beoordeling te geven.

Het verschil tussen locatie B en C is dat voor locatie C nog meer ingrepen nodig zijn. Voor deze locatie moeten onder andere ook nieuwe ontsluitingsroutes worden aangelegd, i.e. voor locatie A en B geldt dat deze na enige aanpassing kunnen worden (her)gebruikt. Op basis hiervan zijn locatie A en B gunstiger beoordeeld wat betreft duurzaamheid.

Aanpasbaarheid:

Op dit moment in het ontwerpproces is er geen aanleiding om te veronderstellen dat een van de locaties een beperking oplegt aan de aanpasbaarheid. Daarom worden alle drie locaties als gelijkwaardig beoordeeld.

Beïnvloeding van het Stromingspatroon:

Eén locatie valt op dit criterium uit de toon. De systeemsprong bij verplaatsing van de stuw naar locatie A en B zal marginaal zijn, omdat dit de stuw nagenoeg 1-op-1 wordt vervanging. Deze marginale systeemsprong beïnvloed het functioneren van het riviersysteem enkel over een zeer kleine afstand. Daarentegen is het verplaatsen van de stuw naar locatie C een ander verhaal. Hoewel deze locatie binnen de toelaatbare afstand valt, paragraaf 4.1, kan het toch een lokale impact op het riviersysteem hebben. Ondanks dat er aan de eisen wordt voldaan kan deze verplaatsing negatieve consequenties hebben voor stakeholders. Problemen kunnen bijvoorbeeld ontstaan met de diepgang in de haven gelegen bij Grave. Ook verandert lokale (geo)hydrologische situatie, wat mogelijke kan leiden tot problemen voor vegetatie en de stabiliteit van de constructies in het achterland. De stuw mag worden verplaatst, maar in dat geval zijn ontwerp oplossingen nodig. Of dit wenselijk is moet worden bepaald in een vervolgstudie. In deze thesis wordt het negatieve (geo)hydrologische aspect opgenomen in dit evaluatiecriterium aangezien het belangrijk is om dit soort aspecten al in een vroeg stadium in kaart te brengen en rekening mee te houden in de locatiekeuze. Het heeft namelijk zowel een economische als maatschappelijke waarde om dit soort problemen te vermijden. Locatie C scoort dus aanzienlijk slechter op dit evaluatiecriterium.

Additionele veiligheid voor scheepvaart:

De locaties scoren vergelijkbaar op dit criterium, omdat in paragraaf 4.1 al is aangetoond dat alle drie de locaties voldoen aan de eisen die aan de locatie gesteld zijn voor een veilig bevaarbare stuw. Toch wordt locatie A als enigszins complexer beschouwd, wat de stuw minder veilig zou kunnen maken. De reden hiervoor is dat de sluis aan de rechterkant van de waterweg blijft liggen. Rijkswaterstaat (Kortlever, 2021) heeft aangegeven dat ze in de toekomstige Maas-stuwen meer uniformiteit willen, onder meer om het voor scheepvaart overzichtelijker en daarmee veiliger te maken. Om dit te bewerkstelligen willen ze bij voorkeur alle sluizen aan dezelfde kant van de rivier plaatsen. De meeste stuwcomplexen hebben sluizen aan de linkerkant van de rivier. Dit kan op locatie B en C worden gerealiseerd, maar niet op locatie A, waardoor deze variant lager scoort op het aspect van complexiteit voor scheepvaart. De verwachting is echter dat het praktisch onmogelijk is om deze uniformiteit in alle Maas-stuwen te realiseren omdat elke stuw specifieke eisen en wensen met betrekking tot de ruimtelijke indeling hebben. Dit verklaart het relatief kleine verschil in scores.

Complexiteit van bouwen:

Zoals eerder beschreven is de maakbaarheid van een stuw op elke locatie geverifieerd door de eerste haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat als uitgangspunt te nemen. Alle locaties zijn afkomstig van ontwerpalternatieven die door Rijkswaterstaat zijn ontwikkeld op basis van construeerbaarheid. Op het detailniveau van de huidige ontwerpplus lijkt het bouwen van een stuw op alle drie de locatie even goed en gemakkelijk te zijn. Daarom worden alle locatie als gelijk beoordeeld.

4.2.5 Globale kostenraming

De kosten voor de locaties zijn globaal geraamd. Hiervoor zijn scores van 0 tot 200 gebruikt. De beoordeling hiervan is relatief aan elkaar. Een score van 200 geeft aan dat de aanleg van een stuw op deze locatie wordt verwacht veel duurder te zijn dan een locatie met een score van 100. Het referentiepunt voor de scores is op 100 gezet. De relatieve kosten inschatting van de locaties worden weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Globale kostenraming van de locaties om een toekomstige stuw te bouwen relatief ten opzichte van elkaar

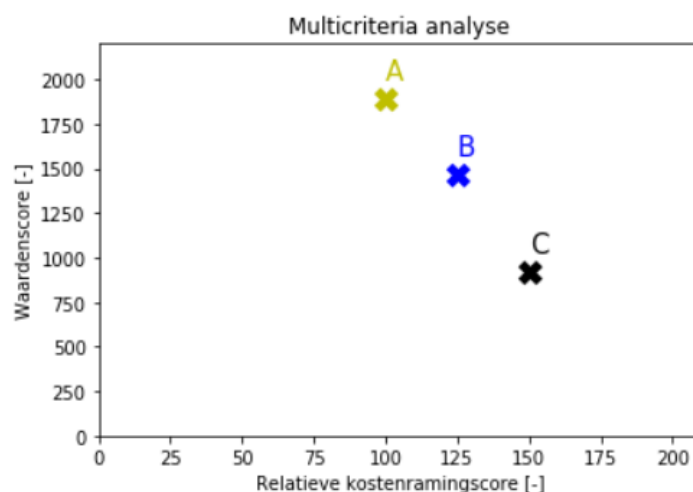
	A (Direct bovenstrooms van de stuw)	B (Direct bovenstrooms van de sluis)	C (800 m bovenstrooms)
Kosten	100	125	150

Drie aspecten maken het plaatsen van een stuw op locatie C duurder dan op de andere locaties. Het eerste aspect is dat naast het bouwen van een nieuwe stuw direct ook een nieuwe sluis gebouwd moet worden zodat scheepvaart kan passeren. Het tweede aspect betreft de kostenposten voor het aanleggen van nieuwe ontsluitingsroutes en het extra grondverzet dat nodig is. Het is de verwachting dat de rivier op locatie C nog verbreed moet worden om de sluis en stuw te plaatsen. Het grondverzet is een relatief dure kostenpost in waterbouwkundige projecten. Ten derde kan verwacht worden dat extra kosten om geen negatieve gevolgen te ondervinden van de kleine lokale systeemsprong. Lokaal moeten dijkhoogtes worden aangepast om het streefpeil te waarborgen en maatregelen tegen de verzakking van huizen moeten worden genomen.

Het verschil tussen locatie A en B zit in het aspect dat bij het plaatsen van de stuw op locatie B ook direct een nieuwe sluis moet worden aangelegd. Aangezien de stuw op locatie B voor de huidige sluis komt te liggen moet deze worden verplaatst naar de linkerkant van de rivier. Locatie A is daarom met betrekking tot de kosten het meest gunstig.

4.2.6 Multicriteria-analyse (MCA)

De geschikte locaties worden geëvalueerd door de toegekende waarden- en kostenscores uit te zetten in een grafiek. Een grafische representatie van de uitkomst van de Multicriteria-analyse wordt weergegeven in Figuur 4.11.



Figuur 4.11: Grafische representatie van de Multicriteria-analyse.

Op basis van Figuur 4.11 wordt geconcludeerd dat het plaatsen van de toekomstige stuw op locatie A optimaal is. Deze locatie heeft namelijk het gunstigste ratio tussen de waarde en kosten.

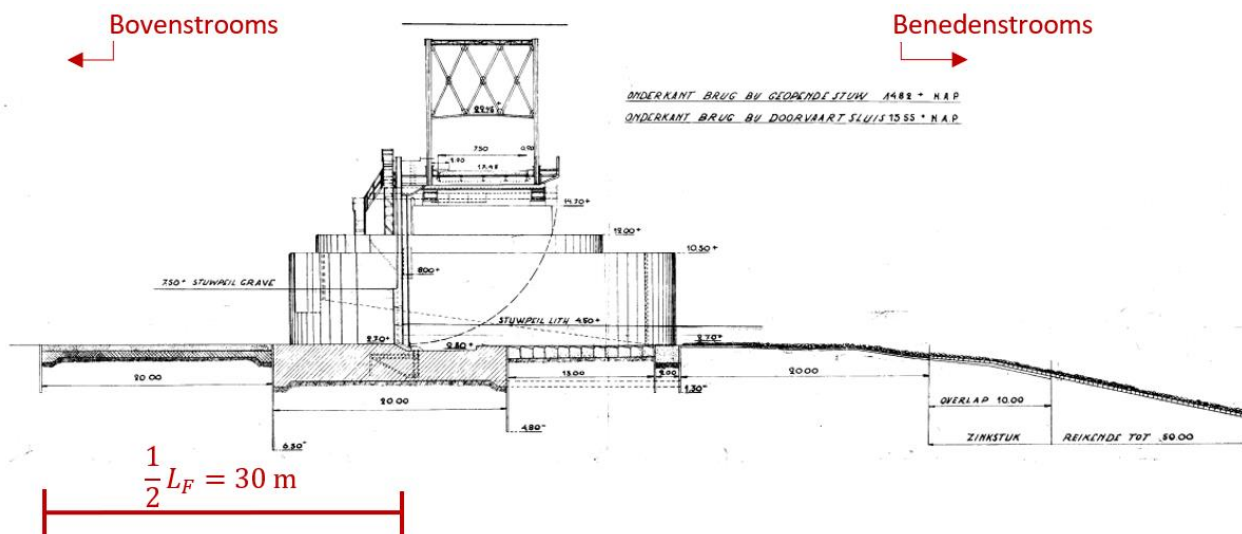
Het resultaat van deze ontwerpplus is voorgelegd aan het “RWS-Ontwerpt team” van Rijkswaterstaat (2021). Gedurende dit interview gaf de opdrachtgever aan tevens te verwachten dat de toekomstige stuw

net bovenstrooms van de huidige stuw komt te liggen. Dit wordt in dit onderzoek gezien als een bevestiging op de gemaakte keuze.

4.2.7 De precieze locatiekeuze

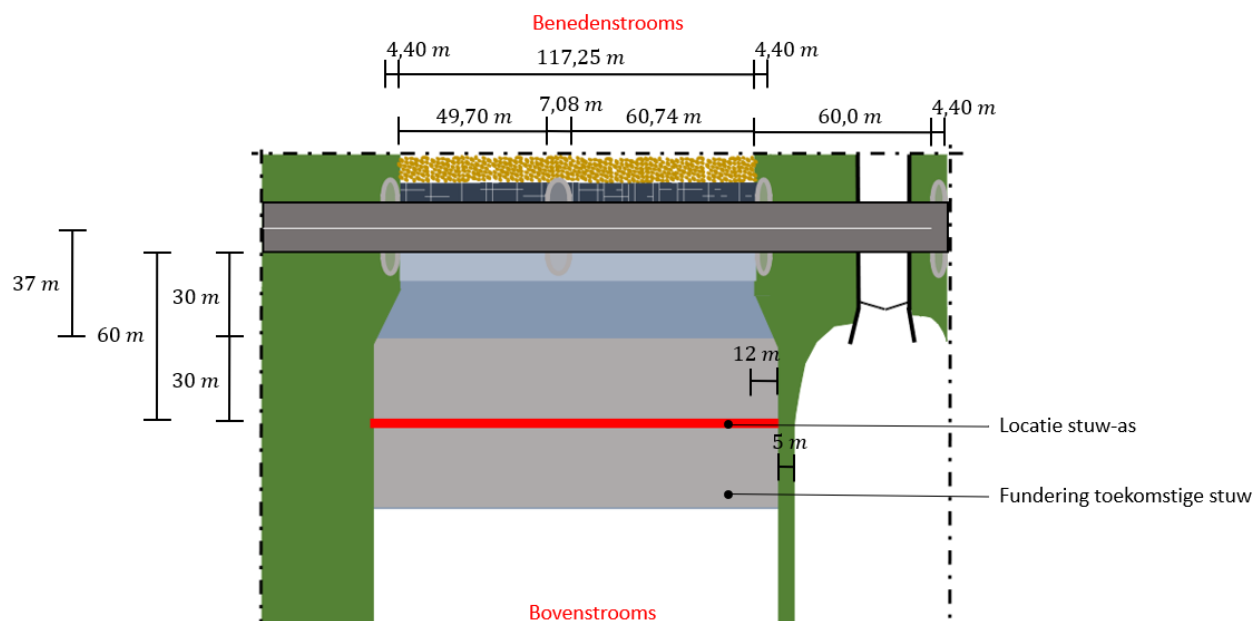
Locatie A, net bovenstrooms van de huidige stuw, is geselecteerd als de locatie voor het toekomstig stuwontwerpen.

Tot nu toe is een schetsontwerp gebruikt om de verschillende locaties met elkaar te vergelijken. De volgende stap is het bepalen van de exacte locatie. In het ontwerpproces van Rijkswaterstaat, op basis waarvan de locatie zijn bepaald, wordt voor locatie A gesteld dat dit de locatie is waarin de toekomstige stuw zo dicht mogelijk op de huidige stuw komt te liggen. Echter, de fundering van de huidige stuw voorkomt dat de nieuwe stuw binnen een meter afstand kan worden geplaatst. De oude brug moet namelijk behouden blijven, wat hoogstwaarschijnlijk betekent dat de fundering ervan intact moet blijven. Om de exacte locatie van de nieuwe stuw-as ten opzichte van die van huidige stuw te bepalen, moeten de dimensies van de huidige fundering worden onderzocht. Daarnaast moet er een ruwe inschatting worden gemaakt van de dimensies voor de nieuwe fundering. In Figuur 4.12 wordt een ontwerp-tekening getoond van de fundering die behouden moet blijven om de oude brug te ondersteunen.



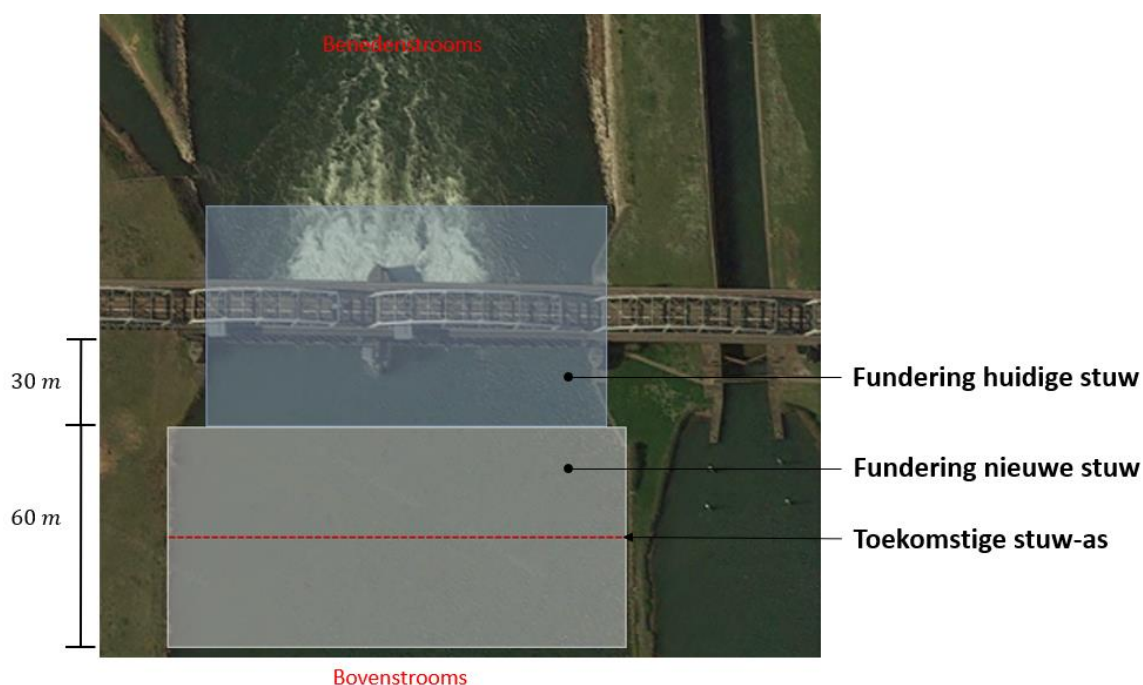
Figuur 4.12: Ontwerptekening van de doorsnede van de oude stuw bij Grave. Afkomstig van Royal HaskoningDHV (2021)

In Figuur 4.12 is zichtbaar dat de fundering van de oude stuw reikt tot 30 m bovenstrooms van de huidige stuw-as. Direct bovenstrooms van deze fundering moet de nieuwe fundering dus worden aangelegd aangezien voor locatie A gesteld wordt dat deze zo dicht mogelijk op de huidige stuw zich bevindt. In dit ontwerp stadium wordt ervan uitgegaan dat de toekomstige stuw-as zich in het midden van de fundering komt te liggen. Tevens wordt aangenomen dat de toekomstige stuw op een fundering op staal wordt geplaatst met een geschatte lengte van ongeveer 60 m. Hierdoor zal de stuw-as van de toekomstige stuw zich 60 m bovenstrooms van de huidige stuw-as bevinden. Deze locatie wordt weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.13: schematische weergave van het bovenaanzicht met daarin de nieuwe stuw aangegeven.

De nieuwe stuw-as komt dus 60 m bovenstrooms van de huidige stuw-as te liggen. Gedurende het verdere verloop van dit onderzoek wordt niet afgeweken van deze locatie. Alle ontwerpalternatieven worden ontwikkeld op deze specifieke locatie. In Figuur 4.14 is een impressie weergave van de inpassing in de omgeving te zien.



Figuur 4.14: Schematische weergave van de ligging van de nieuwe stuw op de locatie. Afkomstig van <https://earth.google.com/> (aangepast).

5 Functioneel ontwerp voor de basisstuw

Na de zorgvuldige locatiekeuze, is de volgende stap het ontwerpen van de toekomstige stuw. Zoals beschreven in de aanpak, wordt in eerste instantie een stuwontwerp zonder waterkrachtcentrale ontwikkeld. In hoofdstuk 6 wordt vervolgens onderzocht hoe een waterkrachtcentrale in dit stuwontwerp kan worden geïmplementeerd. Een stuw zonder waterkrachtcentrale wordt in dit rapport aangeduid als de basisstuw. Het realistisch ontwerp voor de basisstuw wordt bepaald door de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode toe te passen.

5.1 Inventarisatie van de benodigde constructie-elementen

Voorafgaand aan het ontwikkelen van de verschillende ontwerpalternatieven: wordt een inventarisatie gemaakt van de constructie-elementen waaruit de stuw moet bestaan, worden een aantal aannames en ontwerpkeuzes gemaakt en worden een aantal functionele dimensies bepaald.

De belangrijkste aspecten waarvoor priori ontwerpkeuzes worden gemaakt betreffen het gewenste stuwdeurtype en funderingstype. Deze aspecten zullen vervolgens niet meer variëren gedurende het ontwerpproces; Deze aspecten zijn geen variabele tussen de ontwerpalternatieven. De redenen dat vooraf een keuze wordt gemaakt is om het aantal varianten enigszins te beperken, waardoor gefocust kan worden op de doelstelling van dit rapport, en het ontwerp relevant te houden voor Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat heeft namelijk al een idee voor het stuwdeurtype, en afwijken van dit idee zou afbreuk doen aan de relevantie van dit ontwerpproces. Daarnaast wordt priori een keuze voor het funderingstype gemaakt omdat dit geen invloed heeft op de uitkomst van dit onderzoek, omdat dit het gedrag van de waterkrachtcentrale niet beïnvloed en een marginale impact heeft op de evaluatiecriteria. Het ontwerp van de fundering vindt pas plaats in de constructieve ontwerplus.

5.1.1 Inventarisatie van de constructie-elementen

Het detailniveau van de huidige ontwerplus is globaal. Dit betekent dat het exacte ontwerpen van bijvoorbeeld verbindingen of een waterafdichting buiten de scope van de huidige ontwerplus valt. De volgende constructie-elementen worden wel ontworpen in het basisstuw-ontwerp:

- Fundering ;
- Steunpunten (inclusief landhoofden);
- Stuwdeuren;
- Bewegingswerken (inclusief de aandrijving);
- Vismigratierivier.

5.1.2 Voorlopige keuze in het type stuwdeur

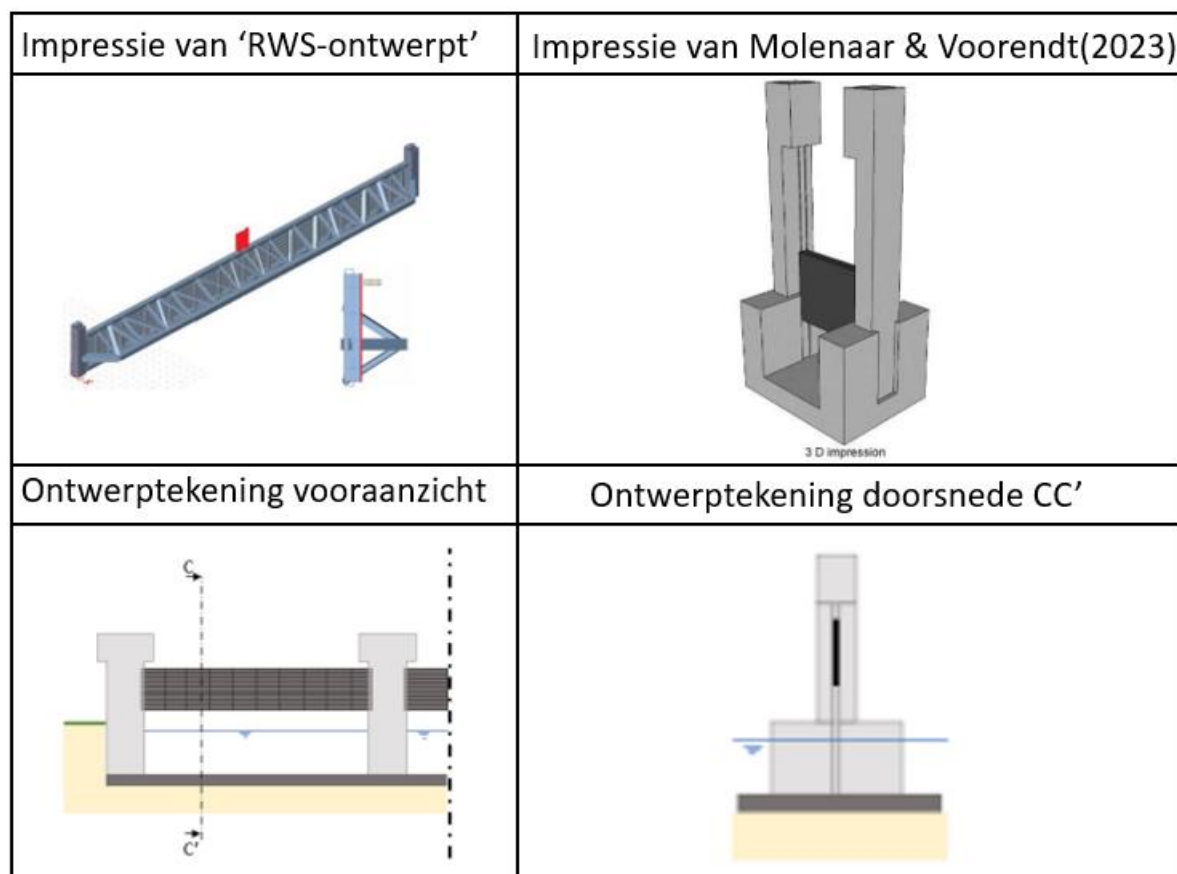
In dit rapport wordt voor het selecteren van het stuwdeurtype niet de volledige ontwerpmethode doorlopen. Dit was overbodig aangezien Rijkswaterstaat al een verkennende studie hiernaar heeft uitgevoerd. Tijdens het symposium 'stuwen Maas' (Kortlever, 2021) zijn de bevindingen van deze ontwerpstudie gepresenteerd. Deze bevindingen vormen de basis voor de keuze van het meest geschikte stuwdeurtype. In dit hoofdstuk worden de bevindingen uit de haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat uiteengezet en wordt uiteindelijk een de optimale keuze voor het stuwdeurtype voor het huidige ontwerponderzoek gemaakt.

Rijkswaterstaat heeft in totaal twaalf verschillende typen stuwdeuren geëvalueerd. Rijkswaterstaat is in haar eerste haalbaarheidsstudie tot de conclusie dat twee specifieke type stuwdeuren de voorkeur hebben en aangedragen moeten worden als uitgangspunten voor het toekomstig stuwontwerp. Er worden

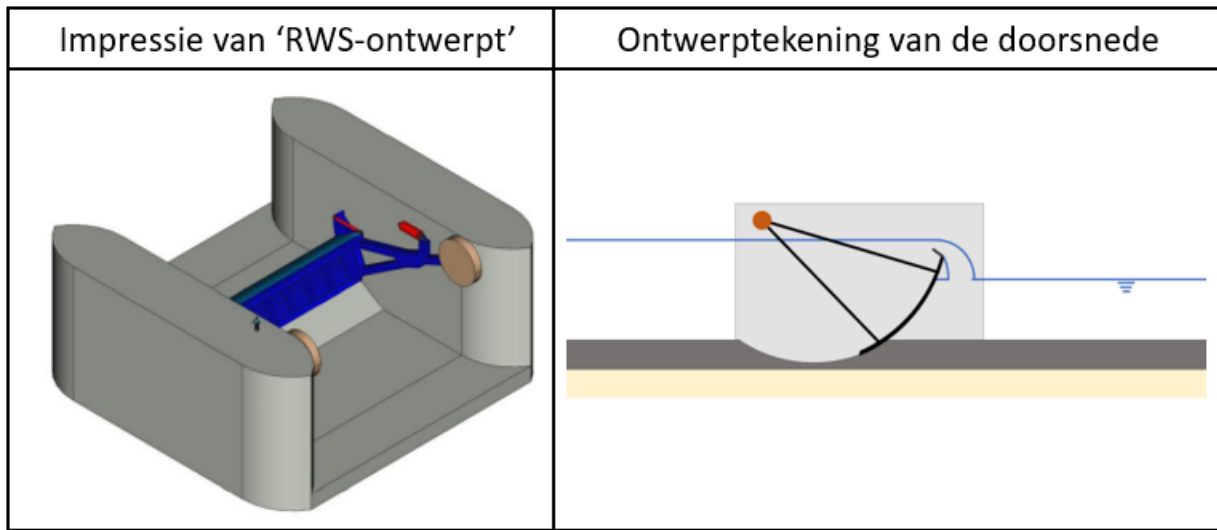
twee typen stuwdeuren aangedragen omdat ten tijde van de haalbaarheidsstudie nog geen definitieve beslissing was genomen over hoe scheepvaart tijdens hoogwater het stuwcomplex moet gaan passeren. Zoals aangegeven in paragraaf 2.1.3, bestaan er twijfels over het al dan niet toestaan van scheepvaart door de stuwopeningen tijdens dergelijke omstandigheden. Deze keuze heeft zodanige implicaties op de basis van het ontwerp dat dit resulteert in een voorkeur voor een ander stuwdeurtype.

In de huidige paragraaf worden de twee stuwdeurtypen die Rijkswaterstaat als optimaal beschouwt voor beide scenario's besproken. Vervolgens wordt een keuze gemaakt voor het stuwdeurtype waarmee in de rest van dit ontwerponderzoek verder wordt gewerkt.

Een belangrijke bevinding uit de haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat is dat hefdeuren het meest geschikt zijn om toe te passen wanneer de stuwopeningen bevaarbaar moet zijn. Als dit niet het geval is worden naar beneden draaiende segmentschuiven als optimaal verondersteld. Beide alternatieven scoren hoog in de evaluatie van Rijkswaterstaat en hebben weinig onderscheid van elkaar. Niettemin is het vraagstuk van scheepvaart, of deze al dan niet door de stuwopeningen mag plaatsvinden, nog niet volledig geïntegreerd in deze evaluatie. Visuele impressies en ontwerptekeningen van de hefdeur en de segmentschuif worden respectievelijk weergegeven in Figuur 5.1 en Figuur 5.2.



Figuur 5.1: LINKS BOVEN: impressie van een hefdeur afkomstig van Kortlever(2021). RECHTS BOVEN: impressie van een hefdeur afkomstig van Molenaar & Voorendt (2019). LINKS ONDER: vooraanzicht van een hefdeur. RECHTS ONDER: Doorsnede van een hefdeurontwerp



Figuur 5.2: : LINKS: impressie van een segmentschuif afkomstig van Kortlever (2021). RECHTS: doorsnede ontwerp van een segmentschuif.

Hoewel de evaluatie van Rijkswaterstaat aantoont dat er weinig verschil is tussen de segmentschuif en de hefdeur, concludeert deze evaluatie dat de segmentschuif het meest geschikt is. Deze keuze is gebaseerd op factoren zoals duurzaamheid en de beperkte impact op het omgevingsaanzicht. Echter, is de segmentschuif niet geschikt wanneer scheepvaart via de stuwopeningen vereist is. De configuratie van een neerwaarts bewegende segmentschuif maakt het voor schepen onmogelijk om door de opening te varen vanwege de beperkte diepgang. Tenzij de fundering aanzienlijk wordt verdikt, zodat er genoeg ruimte is om de schuif onder het drempelniveau te laten zakken. Dit blijkt echter onpraktisch en onrealistisch. Daarom heeft Rijkswaterstaat de segmentschuif als ongeschikt beoordeeld met betrekking tot scheepvaart. Een alternatieve oplossing, waarbij de segmentschuif omhoog draait bij opening en scheepvaart er dus onderdoor kan varen, wordt door Rijkswaterstaat eveneens als onrealistisch beoordeeld. Dit komt door de relatief zware constructie die nodig is. Hierdoor komen de voordelen van de segmentschuif ten opzichte van de hefdeur, waaronder de positieve visuele impact en duurzaamheid, te vervallen. Volgens het onderzoek van Rijkswaterstaat wordt de hefdeur als realistisch en optimaal beschouwd wanneer de stuwopeningen bevaarbaar moeten zijn. De keuze voor het stuwdeurtype is uiteindelijk afhankelijk van de eisen met betrekking tot scheepvaart. (Kortlever, 2021)

In paragraaf 2.1.3, getiteld 'analyse van de scheepvaart', wordt aangenomen dat de stuw tijdens hoogwater geschikt moet zijn voor de doorgang van scheepvaart via de stuwopeningen. Op basis van deze aanname wordt voor dit ontwerponderzoek het volgende geconcludeerd: de eis voor een veilig bevaarbare stuw resulteert in de definitieve keuze voor de hefdeur. Deze keuze wordt als een vaststaand uitgangspunt beschouwd voor het vervolg van het ontwerpproces.

5.1.3 Voorlopige keuze in funderingstype

Doorgaans worden stuwen geconstrueerd met een fundering op staal (in het Engels: shallow foundation) of een fundering op palen (in het Engels: deep foundation). Een voorlopige keuze tussen deze twee funderingstypes wordt in deze paragraaf gemaakt.

Volgens Molenaar & Voorendt (2017) zijn funderingen op staal doorgaans goedkoper en eenvoudiger te construeren dan funderingen op palen. Er wordt daarom geadviseerd om eerst te onderzoeken of een fundering op staal volstaat. Als eerste verificatie dient onderzocht te worden of het draagvermogen van de

ondergrond toereikend is en de zetting acceptabel is. Wanneer een fundering op staal niet volstaat dan is een fundering op palen vereist.

Funderingen op staal worden meestal toegepast op niet samendrukbare ondergronden zoals zand aangezien dan de zetting acceptabel zal zijn (Molenaar & Voorendt, 2017). In paragraaf 4.3.1 is vastgesteld dat de bovenste grondlagen op de toekomstige stuwlocatie grotendeels uit zand bestaan. Eigenschappen van deze ondergrond indiceren dat een fundering op staal volstaat. Voorlopig is het daarom gerechtvaardigd om aan te nemen dat in de toekomst een fundering op staal wordt toegepast.

Het huidige hoofdstuk concentreert zich op het ruimtelijk hydraulisch functioneel ontwerp waardoor de bovenstaande eenvoudige onderbouwing en verificatie van de keuze voorlopig volstaan. Ten tijde van het definitieve ontwerp dienen aanvullende verificaties met een hoger detailniveau uitgevoerd te worden.

5.1.4 Bepalen van globale dimensies

Het ontwerp van bepaalde constructie-elementen wordt niet of marginaal beïnvloed door het functioneel ontwerpproces. Als onderdeel van het functioneel ontwerpproces worden voor deze constructie-elementen globale inschattingen van de dimensies gemaakt. Met deze aannames zijn vervolgens ontwerpalternatieven ontwikkeld.

Een aantal van de constructie-elementen worden generiek ontworpen in de huidige ontwerpfase. Met de term generiek worden twee aspecten aangeduid. Generiek in de zin dat alle constructie-elementen binnen een ontwerpalternatief dezelfde dimensies hebben. In het ontwerp variëren bijvoorbeeld de dimensies van de steunpunten niet. Het tweede aspect waar generiek op duid is dat de constructie-elementen niet meer variëren tussen de verschillende ontwerpalternatieven. Voor alle ontwerpalternatieven worden bijvoorbeeld hetzelfde ontwerp voor de steunpunten gebruikt.

Door gebruik te maken van generieke constructie-elementen nemen de vrijheidsgraden van het ontwerp af waardoor het aantal ontwerpalternatieven gereduceerd wordt. Hierdoor komt de focus meer op het doel van deze ontwerpstudie te liggen, namelijk de inpassing van een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw. Het is voor een eerste conceptuele ontwerp ongewenst en onrealistisch om uitgebreid te variëren met dergelijke constructie-elementen.

Voor het eerste conceptuele ontwerp worden de volgende manier gebruikt om de dimensies te bepalen: referentieprojecten, vuistregels, ervaring en kennis van experts, kentallen en literatuur. Op deze manier is de ontwerpoplossing in bepaalde maten gebaseerd op bewezen technologieën. Een overzicht van de generieke constructie-elementen inclusief eerste aanname voor de dimensies wordt gegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Overzicht van de generieke dimensies in het ontwerp

*1 wordt bepaalt door het ruimtelijk ontwerp

*2 wordt pas bepaalt in het constructieve ontwerp en is voor het ruimtelijk ontwerp niet noodzakelijk

Constructie-element	Dimensie	Symbool	Grootheid	Eenheid
Fundering	Lengte	L_f	60	m
	Breedte	B_f	*1	m
	Dikte	t_f	~2	m
Hefdeur	Hoogte	h_g	7,3	m
	Breedte	B_g	*1	m

	Dikte	t_g	*2	m
Steunpunt	Hoogte	h_s	24	m
	Lengte	L_s	30	m
	Breedte	B_s	7	m
	Dikte	t_s	*2	mm

De stuwdeurbreedte is niet generiek bepaald maar ingegeven door het ruimtelijk ontwerp. Echter is het wel nodig om de maakbaarheid na te gaan. Een inschatting van realistische dimensies is noodzakelijk voordat een onrealistische constructie ontworpen wordt. Op basis van een interview met een constructeur (van der Kreeke, 2022) is vastgesteld dat een overspanning van 60 m realiseerbaar is. Tijdens dit interview is tevens aangegeven dat het voor een stuw nog economisch gunstiger is om een overspanning van 50 a 60 m te hebben in plaats van het toevoegen van een extra steunpunt waardoor kleinere deuren gebruikt kunnen worden.

Uiteindelijk dienen de dimensies van de constructie-elementen geoptimaliseerd te worden. Dit is een verdiepend onderdeel van de constructieve ontwerpcyclus. Voor elk constructie-element en/of subsysteem dient in een latere fase een eigen ontwerpplus doorlopen te worden. Omwille van de tijd en om de focus op de doelstelling van dit onderzoek te houden valt deze optimalisatiestap buiten de scope van deze studie.

5.2 Ontwikkelen van ontwerpalternatieven

In deze paragraaf worden de ontwerpalternatieven voor de basisstuw ontwikkeld. Voorafgaand aan het presenteren van de ontwerpalternatieven is een overzicht gegeven van de ontwerpprincipes.

5.2.1 Opstellen van de ontwerpprincipes

De volgende ontwerpprincipes worden gebruikt om de ontwerpalternatieven te ontwikkelen:

- In het toekomstige stuwontwerp wordt de stuw fysiek gescheiden van de brug. Enkel het stuw-element wordt ontworpen. In het ruimtelijk ontwerp is het belangrijk om rekening te houden met het feit dat de huidige brug blijft staan. Dit heeft namelijk impact op de scheepvaart.
- De as van de stuwdeuren wordt in het midden van de nieuwe fundering geplaatst. Eventuele optimalisaties in de positionering van de stuwdeuren ten opzichte van de fundering worden buiten beschouwing gelaten.
- De fundering van de nieuwe stuw komt dieper te liggen dan die van de huidige stuw, die op +2,2 NAP ligt (Van Heereveld et al., 2020). De eis S.13 schrijft voor voor de nieuwe scheepvaartklasse, CEMT Vb, een diepgang van 6,3 m vereist is. Zoals eerder vermeld, ligt het bovenstroomse streefpeil op +7,95 m NAP. Dit impliceert dat het bovenkant van de drempel op +1,65 m NAP moet komen te liggen.
- Volgens eis R.1 is verbreding van de stuw alleen mogelijk binnen de uiterwaarde, vanwege het behoud van de oude sluis.
- Er worden geen aanpassingen gedaan aan de afvoerregulatie; er wordt aangenomen dat het operationeel plan hetzelfde blijft als voor de huidige stuw.

De ontwerpalternatieven zijn ontwikkeld door middel van brainstormsessies en 'trial-and-error'. De belangrijkste variabelen in dit ontwerpproces zijn het aantal stuwopeningen, dat overeenkomt met het aantal steunpunten, de positionering van de stuwopeningen en de breedtes van de stuwdeuren.

In de huidige ontwerplus wordt a priori rekening gehouden met de hydraulische impact. Op basis van vereenvoudigde hydraulische analyse wordt een basis vastgesteld voor de minimaal benodigde doorstroombreedte van de toekomstige stuw. Voor elk ontwerp wordt als uitgangspunt genomen om ongeveer te voldoen aan deze breedte.

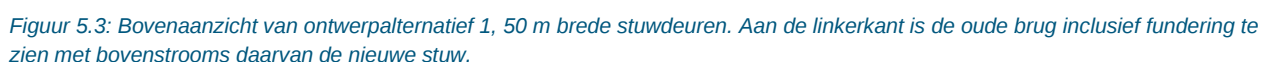
Het is van belang dat de afvoercapaciteit van de nieuwe stuw vergelijkbaar is met die van de huidige stuw om negatieve hydraulische effecten, zoals opstuwing, te voorkomen. De afvoercapaciteit rond de oude en nieuwe stuw neemt echter af doordat er weerstand aan het rivier-systeem wordt toegevoegd zonder dat er ook weerstand wordt verwijderd. Naast de steunpunten die onder de oude brug blijven staan, worden steunpunt(en) van de nieuwe stuw toegevoegd als weerstand. Het behoud van de oude brug en fundering resulteert er in dat elke constructie die wordt toegevoegd extra weerstand veroorzaakt. Dit kan mogelijk ongewenste opstuwing veroorzaken. Echter, zorgt de nieuwe hoogte van de drempel voor enige compensatie. Hierboven wordt beschreven dat de drempel van de nieuwe stuw 0,55 m lager komt te liggen dan die van de oude stuw. Deze diepteverlaging fungeert als compensatie voor de toegevoegde weerstand. Bij een vergelijkbare doorstroombreedte van de toekomstige stuw als die van de huidige stuw (ongeveer 110 m), wordt een winst van ongeveer 60,5 m² aan nat oppervlak behaald. Ter vergelijking, het natte oppervlak van een steunpunt met de dimensies zoals vermeld in paragraaf 5.1.4 bedraagt ongeveer 44,1 m² (B≈7 m, waterdiepte≈6,3 m). Het extra natte oppervlak dat een extra steunpunt inneemt, komt ongeveer overeen met de winst doordat de fundering en drempel van de toekomstige stuw lager worden geplaatst. Dus voor het toevoegen van een extra steunpunt aan het riviersysteem is geen compensatie nodig. Mede hierdoor kan gesteld worden dat vooraf rekening wordt gehouden met de hydraulische eis als gesteld wordt dat de toekomstige stuw een vergelijkbaar doorstroomoppervlak heeft als die van de huidige stuw. Deze aanpak wordt als rechtvaardig beschouwd, omdat al compensatie wordt geboden voor het toevoegen van een steunpunt in de waterweg.

5.2.2 Ontwerpalternatief 1 (50 m brede stuwdeuren)

Het eerste ontwerpalternatief is gebaseerd op een stuwdeurbreedte die Rijkswaterstaat is voorgesteld. In een interview met vertegenwoordigers van het 'RWS-ontwerpt' team (Schropp and Baijens, 2021) werd aangegeven dat een stuwdeurbreedte van 50 m realistisch wordt geacht. Deze waarde vormt de basis voor het eerste alternatief. De functionele dimensie voor de stuwdeur uit de eerste haalbaarheidsstudie van Rijkswaterstaat wordt overgenomen. Deze schatting was gebaseerd op kentallen en referentieprojecten van hefdeuren zonder een gedetailleerd ruimtelijk ontwerp. De door Rijkswaterstaat aangenomen breedte was vooral bedoeld om het constructieproces te onderzoeken (Delbressine et al., 2021). Tijdens het interview met het 'RWS-ontwerpt' team werd benadrukt dat deze dimensie nog variabel is en niet gebaseerd is op uitvoerig onderzoek.

Een aanvullende wens van Rijkswaterstaat was om één ontwerp voor alle stuwopeningen in de Maas te ontwikkelen. Dit zou onder andere resulteren in uniforme stuwdeuren tussen alle Maas-stuwen. Het idee hier achter is dat de stuwdeuren dan inwisselbaar zijn waardoor het aantal benodigde reserveonderdelen zou verminderen. (Kortlever, 2021).

Op basis van de door Rijkswaterstaat verstrekte stuwdeurbreedte en de wens voor uniforme stuwdeuren is ontwerpalternatief 1 gecreëerd. Figuur 5.3 toont een ontwerp van de nieuwe stuw, bestaande uit twee identieke stuwopeningen met een breedte van 50 m.

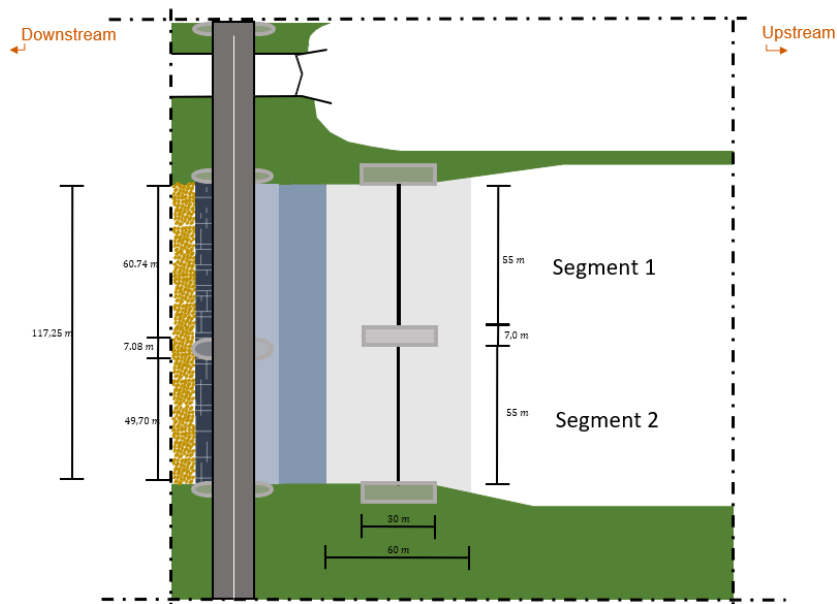


5.2.3 Ontwerpalternatief 2 t/m 5

Het vasthouden aan uniforme stuwdeuren lijkt voor de situatie bij Grave geen realistisch doel te zijn. Dit wordt mede beïnvloed door factoren zoals het behoud van de oude brug en de locatie van de nieuwe stuw, die relatief dicht bij elkaar liggen. Uit de verificatie en evaluatie die worden beschreven in paragraaf 5.1.3 blijkt dat het lastig is om dit te verwezenlijken. Het is gerechtvaardigd om van dit idee af te stappen. De wens voor uniformiteit is momenteel binnen Rijkswaterstaat meer een concept dan een gevalideerd doel. De haalbaarheid ervan is nog niet volledig onderzocht. Na overleg met Rijkswaterstaat (Schropp, 2021) is besloten om deze wens los te laten. Gezien de beperkte tijd, de focus op de doelstelling en de wens om de ontwerpvrijheid van de ingenieur in deze fase niet te beperken, is ervoor gekozen om ook van dit uitgangspunt af te stappen.

Ontwerpalternatief 2A & 2B (55 m doorvaartbreedte):

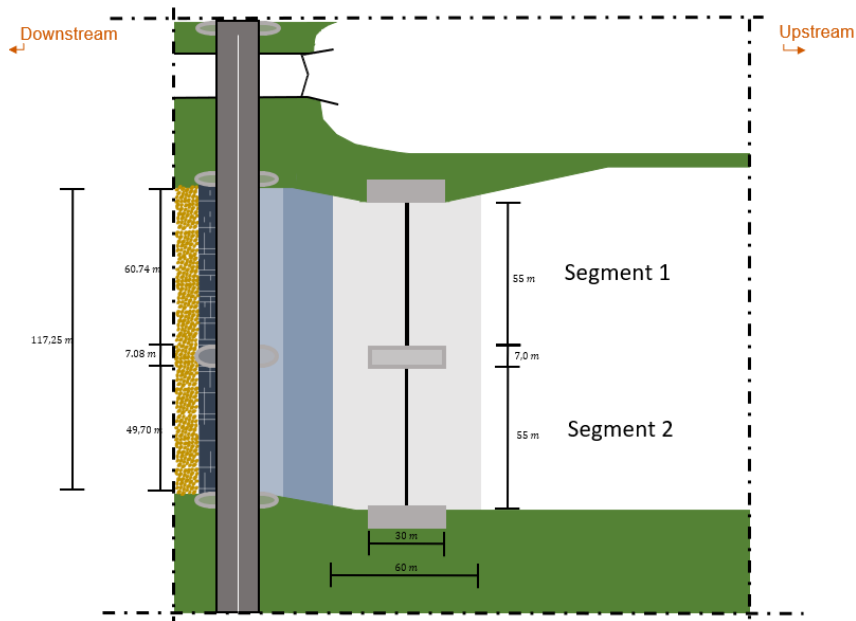
In dit ontwerp alternatief is nog getracht om vast te houden aan het uitgangspunt van uniforme stuwdeuren. Dit kan bereikt worden met 2 of 3 doorstroombopeningen. In beide gevallen moet afgestapt worden van de door Rijkswaterstaat aangedragen breedtedimensie van de stuwdeuren. In eerste instantie zijn ontwerpalternatieven, 2A en 2B, ontwikkeld bestaande uit 2 segmenten. De stuwdeurbreedte moet 55 m bedragen om aan de eis met betrekking van de totale doorstroombreedte(110 m) te voldoen. Figuur 5.4 geeft een dergelijk ontwerpalternatief weer. In dit alternatief is het middelste steunpunt precies in het midden van de vaarweg gelegen.



Figuur 5.4: Ontwerpalternatief 2A, steunpunt in het midden van de vaarweg

De positionering van de steunpunten kan nog aangepast worden met het oog op scheepvaart. Ontwerpalternatief 2B weergegeven in Figuur 5.5 heeft een andere positionering wat betreft de steunpunten. De ligging van de stuw wordt aangepast om het steunpunt in de vaarweg op te lijnen met die van de brug die blijft staan.

Welke configuratie het meest geschikt is wordt bepaald in de verificatie en evaluatie. Merk op dat de ligging van de stuw in dit ontwerpalternatief enigszins verschuift; de stuw ligging komt gedeeltelijk in de oorspronkelijke uiterwaarde te liggen.

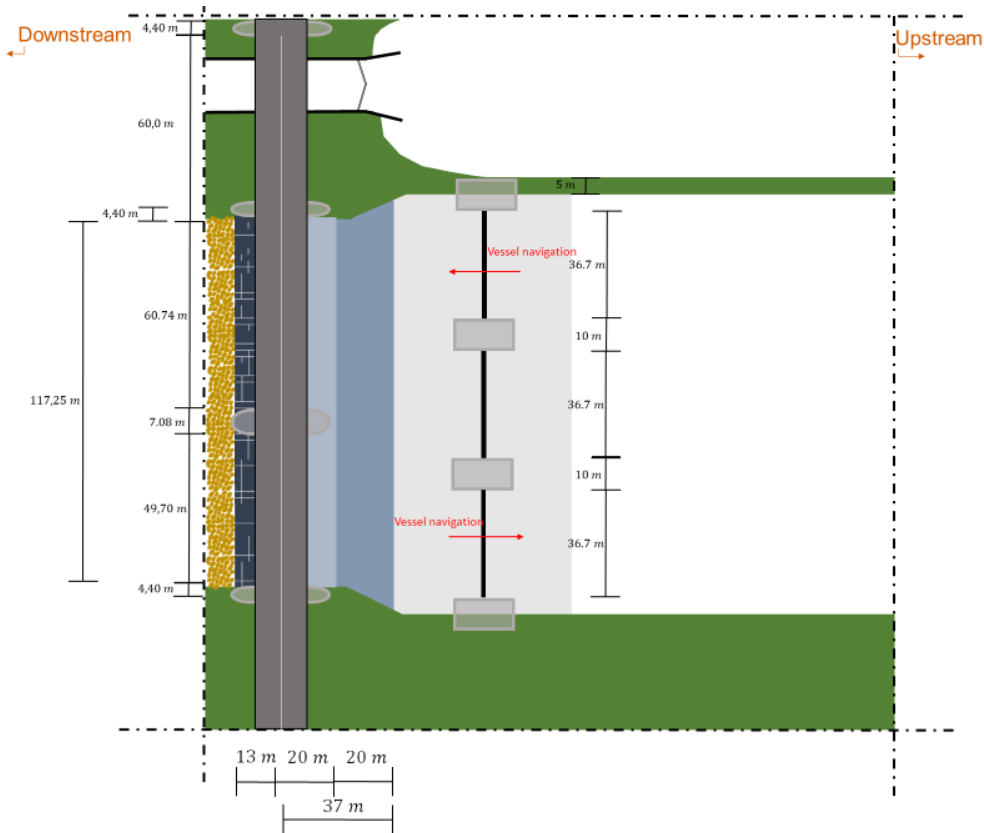


Figuur 5.5: Ontwerpalternatief 2B, steunpunt in de vaarweg op gelijnd aan die van de brug.

Ontwerpalternatief 3 (enkelstrookse doorvaartopeningen van 36,7 m):

Door te kiezen voor 3 stuwoeningen/segmenten kan ook voldaan worden aan de wens naar uniforme stuwdeuren en de eis van de totale doorstroombreedte. Wanneer 3 stuwdeuren op deze manier worden toegepast hebben zij allemaal een breedte van 36,7 m. Een dergelijk ontwerp alternatief is weergegeven in Figuur 5.6.

Het gevolg van een extra stuwoening/segment is dat een extra steunpunt in de vaarweg geplaatst wordt. Dit betekent dat de vaarweg (lokaal) verbreed dient te worden; een gedeelte van de toekomstige stuw dient in de uiterwaarde gebouwd te worden om voldoende doorstroombreedte te bereiken. Het is belangrijk om de vaarweg geleidelijk, taps toelopend, te verbreden om lokale hydraulische problemen te voorkomen.



Figuur 5.6: Bovenaanzicht van ontwerpalternatief 3.

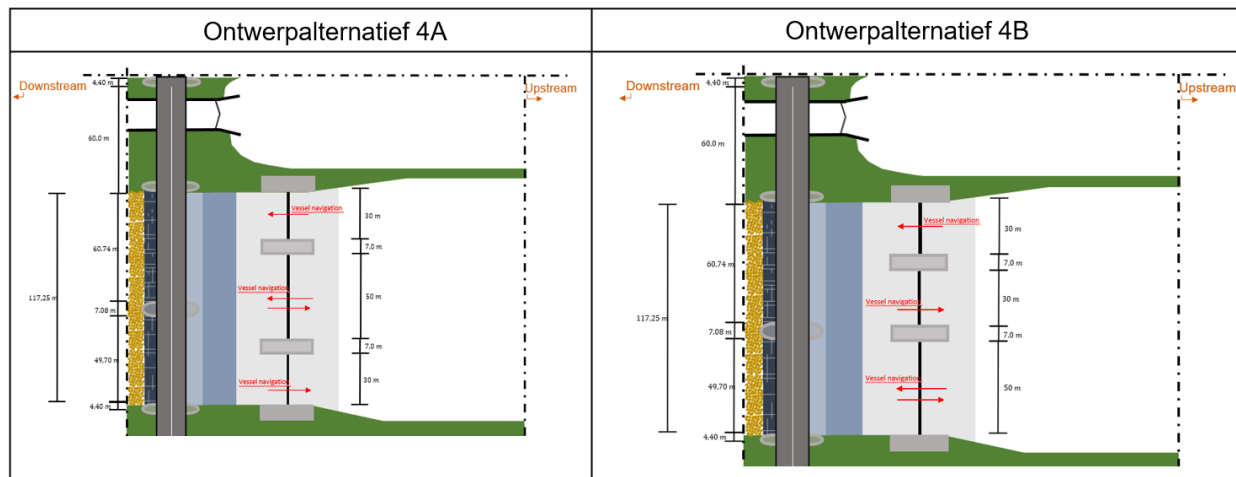
Belangrijk om op te merken zijn de complicaties dit ontwerpalternatief met zich meebrengt voor scheepvaart. Het is maar de vraag of dit voldoet aan de eisen en wensen met betrekking tot scheepvaart. Dit moet blijken uit de verificatie van de eisen. Echter kan nu al geconcludeerd worden dat de stuwdeurbreedtes relatief klein zijn waardoor scheepvaart in beide richtingen door een segment onmogelijk is. In eis S.10, is gesteld dat om scheepvaart in beide richtingen door een segment mogelijk te maken minimaal 54,6 m breed moet zijn. Er is echter een ontwerpoplossing mogelijk: er kan gekozen worden om segment slechts scheepvaart in een richting toe te staan. In Figuur 5.6 zijn met rode pijlen een suggestie voor de vaarrichtingen aangegeven. Het segment aan de oeverkant bij grave wordt voor scheepvaart stroomopwaarts gebruikt en het segment aan de kant van de oude sluis voor stroomafwaarts. In een later stadium kan bepaald worden of het gewenst is om scheepvaart stroomopwaarts of -afwaarts door het middelste segment te laten gaan. De keuze hierin hangt af van de intensiteit, wat de bottleneck is en de belangen.

Het is de vraag of ontwerpalternatief volledig kan voldoen aan de scheepvaarteisen die zijn opgesteld in paragraaf 3.1.2. Het ontwerp oogt in eerste instantie complex voor scheepvaart. Uit de verificatie en evaluatie zal de impact blijken. Om niet voortijdig een potentieel ontwerp af te schrijven is er gekozen om dit ontwerpalternatief mee te nemen in de verificatie en evaluatie

Ontwerpalternatieven 4A, 4B & 4C (combinatie enkel- en dubbelstrookse doorvaartopeningen):

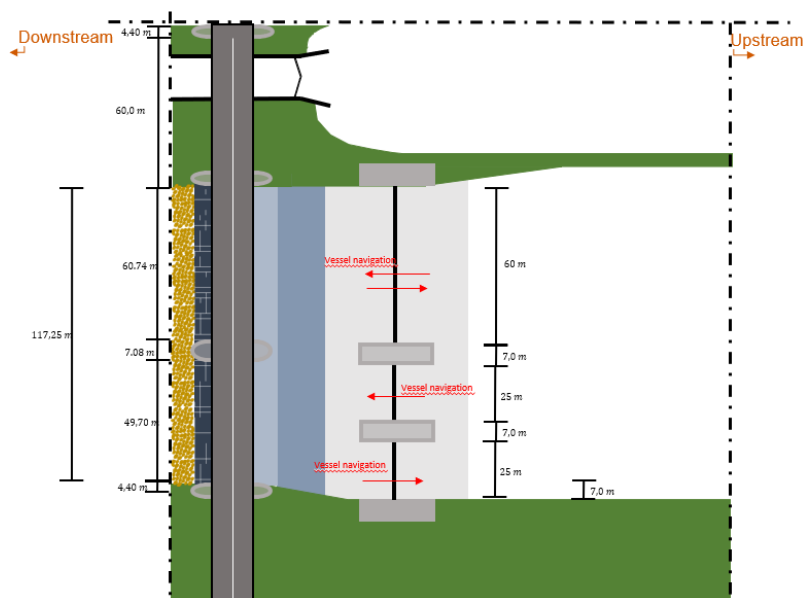
In de ontwerpalternatieven 4A en 4B zijn de ontwerpalternatieven 1 en 3 gecombineerd. Een ontwerpoplossing met stuwopeningen met zowel enkelstrooks als dubbelstrooks vaarwegprofiel zijn ontwikkeld. Voor het segment met een dubbelstrooks vaarwegprofiel is de gangbare breedte van de stuwdeuren uit ontwerpalternatief 1 (50 m) genomen. Om te voldoen aan de totale doorstroombreedte komt de breedte van de kleine segmenten uit op 30 m. In Figuur 5.7 zijn twee mogelijke configuraties voor

deze stuwdeurdimensies weergegeven. De configuratie heeft met name invloed op de verificatie van de scheepvaart eisen.



Figuur 5.7 Ontwerpalternatief 4A en 4B

Met de scheepvaartseisen in het achterhoofd is ontwerpalternatief 4C ontwikkeld. De bovenstaande ontwerpalternatieven voldoen namelijk niet aan eis S.10 met betrekking tot de minimaal vereiste doorvaartbreedte (54,6 m). In ontwerpalternatief 4C is daarom de doorvaartopening waardoor scheepvaart in beide richtingen vergroot naar 60 m. Als gevolg hiervan kunnen de kleinere segmenten versmald worden. Een dergelijk ontwerp is weergegeven in Figuur 5.8.

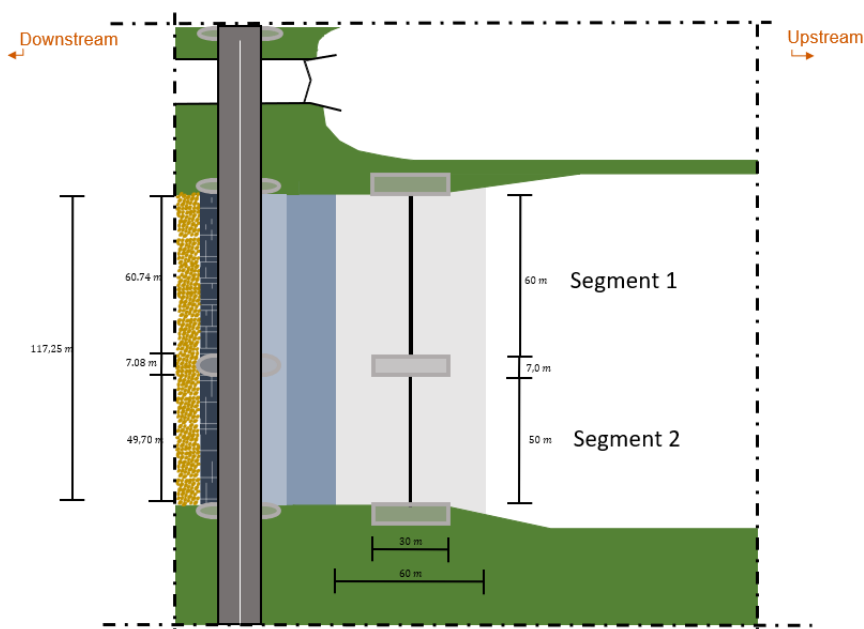


Figuur 5.8: Ontwerpalternatief 4C

Ontwerpalternatief 5 (60 m doorvaartopening):

Figuur 5.9 geeft het laatste ontwerpalternatief weer. Bij het ontwikkelen van dit ontwerpalternatief is vooraf rekening gehouden met de eisen voor scheepvaart. Een consequentie hiervan is dat wederom afgestapt wordt van de uniforme stuwdeuren. De basis van dit ontwerp is om vast te houden aan de spandimensies van de oude brug. Als gevolg hiervan zijn de steunpunten van de oude brug en de toekomstige stuw op gelijnd waardoor het overzichtelijker wordt voor scheepvaart en dus veiliger. Een stuwdeurbreedte van 60

m is ruimschoots voldoende voor scheepvaart in beide richtingen. Alleen dit segment is al voldoende voor alle scheepvaart. Hierdoor is het mogelijk om het kleinere segment te gebruiken voor een waterkrachtcentrale.



Figuur 5.9: Ontwerpalternatief 5

5.3 Verificatie van de ontwerpalternatieven

In deze paragraaf wordt een verificatie van de ontwerpalternatieven uitgevoerd op basis van het programma van eisen dat is opgesteld in hoofdstuk 3.

De hydraulische eisen, de eisen met betrekking tot het streefpeil en afvoercapaciteit, zijn zoals in beschreven paragraaf 5.2.1 a priori geverifieerd. In deze conceptuele ontwerpfase wordt deze verificatie bereikt door het handhaven van een minimale doorstroombreedte in elk ontwerp. Voor het conceptuele ontwerp is deze aanpak adequaat en zijn de aannames die hieraan ten grondslag liggen gerechtvaardigd. In een meer geavanceerde ontwerpfase is het noodzakelijk om een gedetailleerde 2- of zelfs 3-Dimensionale hydraulische analyse uit te voeren om nauwkeurig te verifiëren of de toegevoegde weerstand door de nieuwe stuw leidt tot hydraulische problemen, zoals opstuwing.

Mocht uit de gedetailleerde hydraulische analyse blijken dat stuwontwerp niet voldoet aan de hydraulische eisen, dan betekent dit niet dat het resulterende ontwerp in deze ontwerpfase onbruikbaar is. In dat geval moeten er oplossingen worden gezocht om de toegevoegde weerstand te compenseren. Een mogelijke oplossing zou kunnen zijn om een deel van de uiterwaarde uit te graven, bijvoorbeeld voor de aanleg van een vismigratierivier. Gezien het huidige detailniveau en de beschikbare oplossing is besloten om geen uitgebreide hydraulische verificatie uit te voeren op basis van 2D- of 3D-analyses. De enige hydraulische eis die in de huidige ontwerpplus wordt geverifieerd, is de die van de doorstroombreedte. Deze eis wordt weergegeven in Tabel 5.2 met de identificatie H.1.

De functionele eisen die in de huidige ontwerpplus moeten worden geverifieerd, worden uiteengezet in Tabel 5.2. Vooral de eisen die betrekking hebben op de veiligheid van scheepvaart zijn geselecteerd uit de basis van het ontwerp. Deze tabel bevat de relevante kwantitatieve eisen die moeten worden getoetst.

De kwantitatieve eisen zijn van belang in deze huidige ontwerpfase om te voldoen aan de kwalitatieve eis S.8, die stelt dat de stuwopeningen veilig bevaarbaar moeten zijn tijdens hoogwater.

Tabel 5.2: overzicht van de te verifiëren eisen voor de basisstuw.

ID	Type eis	Beschrijving
H.1	Kwantitatief	Opstuwing moet voorkomen worden. Om hieraan te voldoen is de eis opgesteld dat de doorstroombreedte van de toekomstige stuw minimaal 110 m bedragen.
S.12	Kwantitatief	In deze eis in de basis van het ontwerp wordt voor het realiseren van een veilig bevaarbare stuw het volgende gesteld: Voor verkeer in beide richtingen moet de minimale breedte van een stuwopening 54,6 m zijn. Wanneer scheepvaart in een enkele richting door de doorvaartopening gaat moet deze minimaal 27,3 m breed zijn. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020).
S.aanvullend	Kwantitatief	Om te voldoen aan eis S.8 wordt in de basis van het ontwerp gesteld dat er geen ingewikkelde, abrupte en scherpe stuurmanoeuvres elkaar snel op te volgen. Dit maakt de kans op een botsing aanzienlijk groter. Door de locatie keuze en het behoud van de oude brug moet een aanvullende eis opgesteld worden om een veilig bevaarbare stuw te creëren. Om veel abrupte en scherpe stuurmanoeuvres te voorkomen en het overzichtelijker te maken voor scheepvaart moet een eis aan de positionering van de doorvaartopening worden gesteld. De doorvaartopening van de nieuwe stuw mag niet komen te liggen op een positie waar direct achter de opening het steunpunt van de oude brug in de weg ligt. Dit zou te onoverzichtelijk zijn, te veel stuurmanoeuvres vereisen en dus de kans op een aanvaring vergroten.

In Tabel 5.3 worden de resultaten van de verificatie per relevante eis weergegeven. Wanneer een ontwerpalternatief op basis van een van de eisen niet voldoet wordt deze als ongeschikt beoordeeld en daarom uitgesloten van de evaluatie, paragraaf 5.4.

Tabel 5.3: Verificatie van de ontwerpalternatieven

*1 er zou aan deze eis voldaan worden als er scheepvaart in een richting door alle stuwopening toegestaan is

Eis (ID)	1	2A	2B	3	4A	4B	4C	5
H.1	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S.12	✗*1	✓	✓	✗*1	✗*1	✗*1	✓	✓
S.aanvullend	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✓

Op basis van de bovenstaande verificatie worden een aantal ontwerpalternatieven uitgesloten. De ontwerpalternatieven die geschikt blijken zijn ontwerpalternatief 2B, 4C en 5.

Ontwerpalternatief 1 valt af omdat de totale doorvaartbreedte niet toereikend is, wat resulteert in een hydraulische tekortkoming ten opzichte van de gestelde eisen. De doorvaartbreedte moet volgens eis H.1 minstens 110 m zijn, terwijl het ontwerpalternatief slechts 100 m biedt. Dit zou een aanzienlijke en onrealistische compensatie vereisen om de toegevoegde weerstand te compenseren.

Op basis van de eisen die moeten zorgen voor een veilig bevaarbaar stuw worden ontwerpalternatief 1, 3, 4A en 4B als ongeschikt beoordeeld. In ontwerpalternatief 1 ontbreekt een doorvaartopening met een breedte groter dan 54,6 m, waardoor niet wordt voldaan aan eis S.12. Tenzij wordt besloten om toch uit te gaan van eenrichtingsverkeer door een stuwopening, dan is 50 m breedte per opening voldoende. Wanneer hiervoor gekozen wordt gelden echter andere problemen voor dit ontwerpalternatief. De positionering van de doorvaartopeningen vormt dan namelijk een probleem. Steunpunt(en) komen in de vaarweg van de doorvaartopening te liggen, waardoor niet wordt voldaan aan S.aanvullend.

Ontwerpalternatief 2A voldoet aan de eisen H.1 en S.12; er is voldoende doorstroombreedte (110 m) en de doorvaartopeningen zijn ook toereikend (55 m). Echter, de positie van de middelste steunpunten leidt tot problemen doordat ze niet in een lijn liggen, wat een steunpunt in de vaarweg plaatst en dus niet voldoet aan eis S.aanvullend.

Ontwerpalternatief 2B voldoet aan alle eisen. De totale doorstroombreedte en de stuwdeurbreedte zijn toereikend.

Ontwerpalternatief 3 voldoet alleen aan eis S.12 als scheepvaartverkeer stroomafwaarts en stroomopwaarts wordt gescheiden over de stuwopeningen. Dit ontwerpalternatief voldoet dan echter alsnog niet aan eis S.aanvullend,. De posities van de steunpunten zijn ongunstig ten opzichte van elkaar, een aantal steunpunten vormen obstakels in de vaarweg, waardoor een onoverzichtelijke situatie ontstaat die de kans op botsingen kan vergroten. Hetzelfde geldt voor ontwerpalternatief 4A en 4B. Bovendien maakt de afwisseling van tweerichtingsstuwopeningen en eenrichtingsstuwopeningen de situatie nog complexer. Deze ontwerpalternatieven worden daarom als ongeschikt beschouwd.

Ontwerpalternatieven 4C en 5 voldoen wel aan alle gestelde eisen. Op basis van deze verificatie blijken de ontwerpalternatieven 2B, 4C en 5 als enige geschikt. De volgende stap is het kiezen van het optimale ontwerp voor de basisstuw uit deze alternatieven.

5.4 Evaluatie van de ontwerpalternatieven

5.4.1 Opzet van het evaluatieproces

Na de verificatie blijven de ontwerpalternatieven 2B, 4C en 5 over als geschikte ontwerpen. Om het optimale ontwerpalternatief te vinden worden deze varianten geëvalueerd door middel van een Multicriteria-analyse.

Voor de Multicriteria-analyse worden wederom de evaluatiecriteria beschreven in de basis van het ontwerp, paragraaf 3.4, gebruikt. Aangezien de relevantie per ontwerpplus varieert, is de eerste stap het toekennen van wegingsscores aan de evaluatiecriteria.

De wegingsscores variëren van 0 tot 5. De toekenning van wegingen aan de evaluatiecriteria is als volgt:

- **Milieu impact:** Gewicht van 4. Dit criterium is van groot belang omdat verstoring van de ecologie en natuur moet worden voorkomen. De huidige ontwerpplus heeft een relatief grote impact op dit gebied. Het is namelijk onvermijdelijk dat de basisstuw concessies doet aan de natuur en ecologie. Het basisstuw ontwerp heeft dus een aanzienlijke invloed op de milieu impact. Vooral als een de stuw dusdanig verbreedt moet worden dat er een groot deel van de constructie in de uiterwaarde wordt gebouwd.
- **Beheer & onderhoud:** Gewicht van 2. Dit criterium is in de huidige ontwerpplus gematigd belangrijk. Er wordt op dit moment verondersteld dat er voor elk ontwerpalternatief wanneer die

verder wordt uitgewerkt goed te onderhouden is. Nadere uitwerking, zoals het opstellen van een operationeel plan en onderhoudsstrategie, is nodig om duidelijke verschillen tussen de varianten te zien.

- **Duurzaamheid:** Gewicht van 5. Duurzaamheid is in elke ontwerpplus een cruciaal criterium aangezien het doel van deze thesis is om bij te dragen aan de verduurzaming van Nederland. Door in een vroeg ontwerpstadium nadrukkelijk rekening te houden met duurzaamheid kan tijdig milieuschade worden geminimaliseerd.
- **Aanpasbaarheid:** Gewicht van 2. Dit criterium is in de huidige ontwerpplus gematigd belangrijk. Er wordt verwacht dat de basisstuw niet hoeft te worden aangepast gedurende de gebruiksfase van de stuw.
- **Beïnvloeding van het stromingspatroon:** Gewicht van 3. Dit criterium is relatief belangrijk maar niet doorslaggevend in de huidige ontwerpplus. De ruimtelijke indeling van de nieuwe basisstuw heeft een impact op het stromingspatroon. Echter wordt niet verwacht dat op basis van dit ontwerp onoverkomelijke hydraulische problemen zullen optreden in tegenstelling tot andere ontwerpplusen. Het toepassen van hefdeuren is een bewezen techniek.
- **Additionele veiligheid van scheepvaart:** Gewicht van 2. Dit criterium wordt als niet doorslaggevend beschouwd, omdat alle ontwerpalternatieven al voldoen aan de gestelde scheepvaartseisen. De scheepvaart zou hierdoor in alle ontwerpalternatieven veilig de stuw moeten kunnen passeren. Desalniettemin kan er toch enig verschil in gradatie van veiligheid zitten tussen de ontwerpalternatieven.
- **Complexiteit van het bouwen:** Gewicht van 1. Dit criterium wordt in de huidige ontwerpfase als minder belangrijk beoordeeld. De ontwerpalternatieven worden op dezelfde locatie gerealiseerd en zijn opgebouwd uit vergelijkbare constructie-elementen, waardoor er weinig onderscheid verwacht kan worden op dit criterium. Daarnaast wordt verondersteld dat elk ontwerpalternatief maakbaar is.

5.4.2 Waardebepaling

De scores van de Multicriteria-analyse zijn weergegeven in Tabel 5.4. De beoordelingen in deze evaluatie zijn relatief ten opzichte van elkaar. De scores voor alle criteria variëren van 0 naar 200. Een score van 200 betekent dat het desbetreffende alternatief zeer gunstig scoort ten opzichte van de andere alternatieven. Een score van 50 is een neutrale score ten opzichte van de andere alternatieven terwijl een score van 0 betekend dat het betreffende alternatief slecht presteert.

Tabel 5.4: Relatieve beoordeling van de ontwerpalternatieven (MCA)

Evaluatiecriteria	Weging	2B	4C	5
Milieu impact	4	75	75	100
Beheer en onderhoud	2	125	100	100
Duurzaamheid	5	100	100	100
Aanpasbaarheid	2	100	100	100
Beïnvloeding van het stromingspatroon	3	90	80	100
Additionele veiligheid voor scheepvaart	2	70	100	110
Maakbaarheid	1	100	100	100
Totale gewogen score	-	1760	1740	1900

De milieu impact:

Ontwerpalternatief 2B en 4C hebben relatief gezien een grotere negatieve impact op de omgeving aangezien in beide gevallen een gedeelte van de toekomstige stuw in de uiterwaarde gebouwd moet worden. Het bouwen in de uiterwaarde kan flora en fauna verstoren en wordt dus als onwenselijk beschouwd. Echter, is de verbreding in de uiterwaarde relatief gezien marginaal. Dit bedraagt slechts 7 m. Daarom zijn aan deze alternatieven een score van 75 toegekend. Ontwerpalternatief 5 is hierbij neutraal, deze bevordert de ecologie niet, maar heeft ook niet echt nadrukkelijke nadelen ten opzichte van de huidige situatie.

Beheer en Onderhoud:

Op het gebied van beheer ontlopen de alternatieven elkaar niet. In alle gevallen kan het huidige operationeel plan behouden blijven. Verder zijn de stuw ontwerpen uit vergelijkbare componenten opgebouwd die vergelijkbaar functioneren, waardoor er geen verschil in onderhoud op dit detailniveau te herkennen is.

Met betrekking tot onderhoud heeft ontwerpalternatief 2B gunstige eigenschappen. In dit ontwerp wordt namelijk gebruik gemaakt van een uniform deurontwerp; alle deuren hebben dezelfde dimensies. De stuwdeuren worden hierdoor inwisselbaar. In dat geval hoeft er maar een reserve model worden opgeslagen, wat uiteindelijk ook gunstig is voor de duurzaamheid en kosten.

Duurzaamheid:

Op het gebied van duurzaamheid ontlopen de alternatieven elkaar nauwelijks aangezien gesteld wordt dat in de huidige ontwerplus met name de ruimtelijke indeling varieert. Verder zijn de stuwen grotendeels vergelijkbaar opgebouwd. Het materiaalgebruik in de ontwerpalternatieven is min of meer vergelijkbaar. Tevens zijn er geen indicaties dat het ontwerp van de basisstuw opbrengst van duurzame energie beïnvloed. Op basis van het huidige detailniveau is in deze ontwerplus geen verschil in de mate van duurzaamheid van de ontwerpen te constateren.

Aanpasbaarheid:

De aanpasbaarheid van de ontwerpalternatieven om in de toekomst nog een waterkrachtcentrale te implementeren is vergelijkbaar. Om hier een gedegen beoordeling van te geven moet eerst de waterkrachtcentrale worden ontworpen. Daarom worden alle drie de ontwerpalternatieven in de huidige ontwerplus, die gericht is op het ontwerpen van een basisstuw zonder waterkrachtcentrales, beoordeelt met een score van 100.

Beïnvloeding van het stromingspatroon:

Met betrekking tot dit criterium is een belangrijk verschil tussen de alternatieven te zien. In ontwerpalternatief 5 veranderden de stroomlijnen niet en dus het stromingspatroon anders. De reden hiervoor is dat er geen versmalling is en de steunpunten van de nieuwe stuw in een lijn komen te liggen met die van de oude stuw. Bij ontwerpalternatief 2B en 4C is dit niet het geval. In ontwerpalternatief 4C wordt er een extra steunpunt aan het systeem toegevoegd. Hierdoor heb je geen rechte stroomlijnen meer en zal er meer turbulentie in het stromingspatroon ontstaan, tevens kunnen lokaal versnellingen optreden. Dit kan zowel nadelige effecten voor scheepvaart als het rendement van de vijzelturbines hebben. Op basis van dit aspect wordt aan dit ontwerpalternatief een score van 80 toegekend.

Voor ontwerpalternatief 2B wordt verwacht dat de impact minder groot is. In dit alternatief wordt geen extra steunpunt toegevoegd maar zijn de steunpunten van de oude en nieuwe stuw niet in een lijn. Dit kan het stromingspatroon ook enigszins veranderen. Dit hoeft echter niet problematisch te zijn. Een score van 90 is toegekend aan alternatief 2B op het criterium 'Beïnvloeding van het stromingspatroon'.

Additionele veiligheid voor scheepvaart:

Naast de ontwerpregels legt de veilig bevaarbaar eis twee wensen op aan het stuwontwerp. Deze wensen moeten leiden tot een veiliger systeem. Voldoen aan de wensen is echter niet noodzakelijk om te voldoen aan de eisen. Op verschillende manieren kan namelijk al voldaan worden aan de eis zonder dat voldaan wordt aan de wensen. Desalniettemin zijn er optimalisaties mogelijk die de veiligheid met betrekking tot botsingen kan bevorderen.

In de Richtlijnen Vaarwegen.(Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020) is beschreven dat bij voorkeur maar een enkele doorvaartopening aanwezig is. Het gevolg van deze eis is dat zowel scheep op- als afvaart door dezelfde opening gaat.

Het risico op aanvaring van de stuw kan tevens geminimaliseerd worden door een gedegen aanvaarconstructie en bewegwijzering dient aanwezig te zijn. Het toeleidingskanaal moet vroegtijdig aftakken naar de naastgelegen schutsluis, opdat de scheepvaart bij gesloten stuw in alle omstandigheden probleemloos in en uit de stroom kan voegen. Zorg er bij een stuw voor dat de inrichting zodanig is dat de routekeuze duidelijk richting de sluis wijst en er geen verwarring kan ontstaan. Daarnaast dient een boeienlijn diagonaal in de buurt van het keuzepunt te liggen. En zorg voor een goede visuele herkenbaarheid, op de radar en eenduidige aanduiding. (Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2020)

Alle ontwerpalternatieven voldoen aan deze wens doordat een doorvaartopening met 54,7 m breedte aanwezig is. Dit betekent dat het in geen van de alternatieven nodig is om scheepvaart ook nog door andere opening te laten varen.

Een andere wens is ter kennen gegeven in een interview met een afgevaardigde van het "RWS-Ontwerpt" team (Schropp, 2021). Hierin werd aangegeven dat het bevaren van de stuw niet te complex mag zijn. Dit sluit aan bij de eis dat de stuw veilig bevaarbaar moet zijn. Ingewikkelde, abrupte en scherpe stuur manoeuvres moeten voorkomen worden aangezien dit de kans op een botsing verhoogt. Hiervoor dient gelet te worden op de krommingsstraal van de scheepvaartmanoeuvres en het aantal stuurmanoeuvres kort op elkaar. Het aantal abrupte en scherpe stuurmanoeuvres moet minimaal zijn om de kans op botsingen te verlagen. Dit aspect wordt in deze evaluatie meegenomen door een wens te stellen aan de positionering van de steunpunten.

Zoals in het basis van het ontwerp gesteld blijft de huidige brug behouden. In hoofdstuk 4 is gekozen dat de toekomstige stuw kort bovenstrooms op de brug komt te liggen. Ingewikkelde situaties voor scheepvaart kunnen ontstaan om dat schepen kort achterelkaar de nieuwe stuw en de oude brug moeten passeren. Wanneer de steunpunten heel ongunstig ten opzichte van die van de brug worden geplaatst kan een onveilige en onbevaarbare situatie ontstaan. Wanneer dit het geval is scoort het ontwerpalternatief laag op het criterium 'Additionele veiligheid voor scheepvaart'

Ontwerpalternatief 4C en 5 zijn op het gebied van doorvaartbaarheid gunstiger dan 2B. De reden hiervoor is de positionering van de stuw ten opzichte van de landhoofden. In ontwerpalternatief 2B liggen de landhoofden van de nieuwe stuw namelijk niet in een lijn met die van de brug die blijft liggen. Hierdoor worden schepen mogelijk meer blootgesteld aan gevaarlijke abrupte snel elkaar opvolgende stuurmanoeuvres. De landhoofden van de brug liggen verdekt in het vaarwegprofiel achter de stuwopening bestemd voor scheepvaart, segment 1. Dit maakt ontwerpalternatief 2B significant minder aantrekkelijk.

Verder wordt gesteld dat ontwerpalternatief 5 het overzichtelijkst is doordat hier geen extra steunpunt is toegevoegd. Dit bevordert de additionele veiligheid voor scheepvaart ook enigszins. Vandaar een score van 110 voor dit alternatief.

Maakbaarheid:

Op dit moment onderscheiden de ontwerpalternatieven elkaar nog niet op het gebied van maakbaarheid. Het gros van de constructie-elementen hebben in de ontwerpalternatieven globaal hetzelfde ontwerpen. Bovendien wordt verondersteld dat het constructieproces hetzelfde is voor elk alternatief. Daarom is aan elk ontwerpalternatief een score van 100 toegekend.

5.4.3 Globale Kostenraming

De kosten voor de ontwerpalternatieven zijn kwalitatief ingeschat. Hiervoor zijn scores gebruikt die variëren tussen de 0 en 200. De beoordeling hiervan is tevens relatief aan elkaar. Een score van 200 betekent dat een alternatief duurder is dan het alternatief met een score van 50. Het referentiepunt voor de scores is op 100 gezet. In Tabel 5.5 is de beoordeling van de ontwerpalternatieven uiteengezet.

Tabel 5.5: Relatieve beoordeling van de kosten

Parameter	2B	4C	5
Kosten	100	160	80

De bovenstaande beoordeling is voornamelijk gebaseerd op twee variaties. De kosten ontlopen elkaar namelijk niet veel omdat de ontwerpen grotendeels vergelijkbaar zijn.

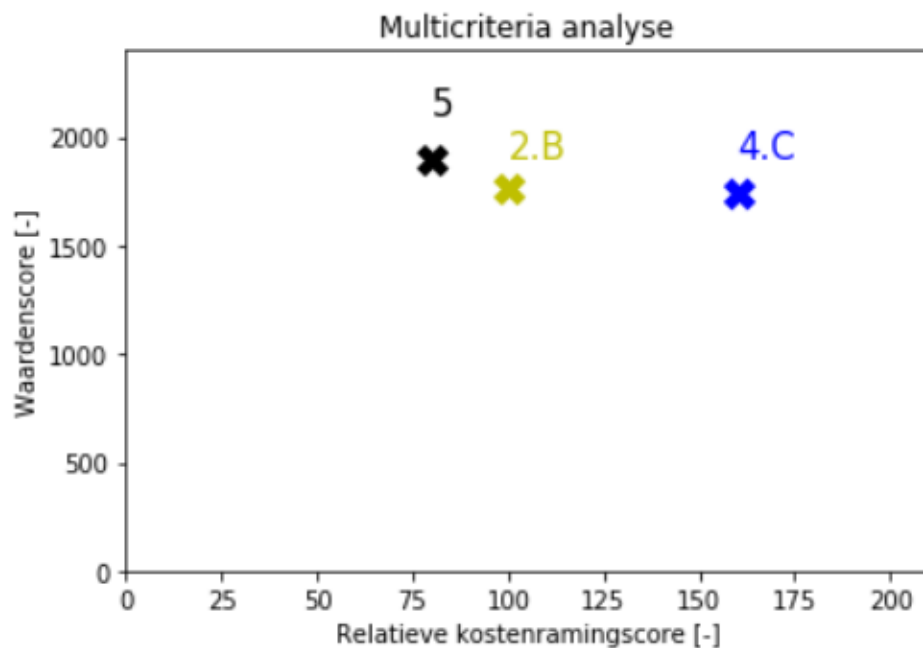
Het eerste aspect waarin de ontwerpalternatieven variëren is het extra grondverzettingswerk. Ontwerpalternatieven die gedeeltelijk in de uiterwaarde gebouwd gaan worden hebben een aanvullende kostenpost. Dit is terug te zien in de beoordeling van ontwerpalternatief 4C. In dit ontwerpalternatief moet er in de uiterwaarde worden gebouwd om de weerstand van het extra steunpunt dat aanwezig is te compenseren. Verder moet in ontwerpalternatief 2B tevens in de uiterwaarde worden gebouwd om het mogelijk te maken dat het steunpunt in de vaarweg goed gepositioneerd word. De impact van deze kosten is nog marginaal te noemen ten opzichte van de andere aanvullende kostenpost. De impact hiervan op de kosten is zo marginaal omdat al grondverzettingswerk verricht moet worden bij de aanleg van de stuw. Een aantal kubieke meter extra werk is in dat geval niet van significante invloed op de kosten.

De andere kostenpost die de ontwerpalternatieven onderscheiden betreft het bouwen van een additioneel steunpunt. Op basis van een mening van een expert is aangenomen dat het economisch nog optimaal is om een stuwdeur met een overspanning van 60 m toe te passen dan het creëren van een extra steunpunt waardoor de stuwdeur dimensies afnemen. (citaat Peter van der Kreeke). Dit leidt er toe dat ontwerpalternatief 4C relatief hoge kosten heeft.

Deze twee aspecten resulteert er in dat ontwerpalternatief 5C relatief gezien het best scoort op het gebied van kosten. Voor dit ontwerpalternatief is als enige geen extra grondverzettingswerk nodig. Daarnaast heeft dit alternatief er ook geen aanvullend steunpunt nodig.

5.4.4 Multicriteria-evaluatie

In de Multicriteria-analyse worden de kosten en baten met elkaar vergeleken. Voor deze vergelijking worden de scores bepaald in paragraaf 5.4.2 en 5.4.3 uiteengezet in een grafiek. Deze grafiek wordt weergegeven in Figuur 5.10.



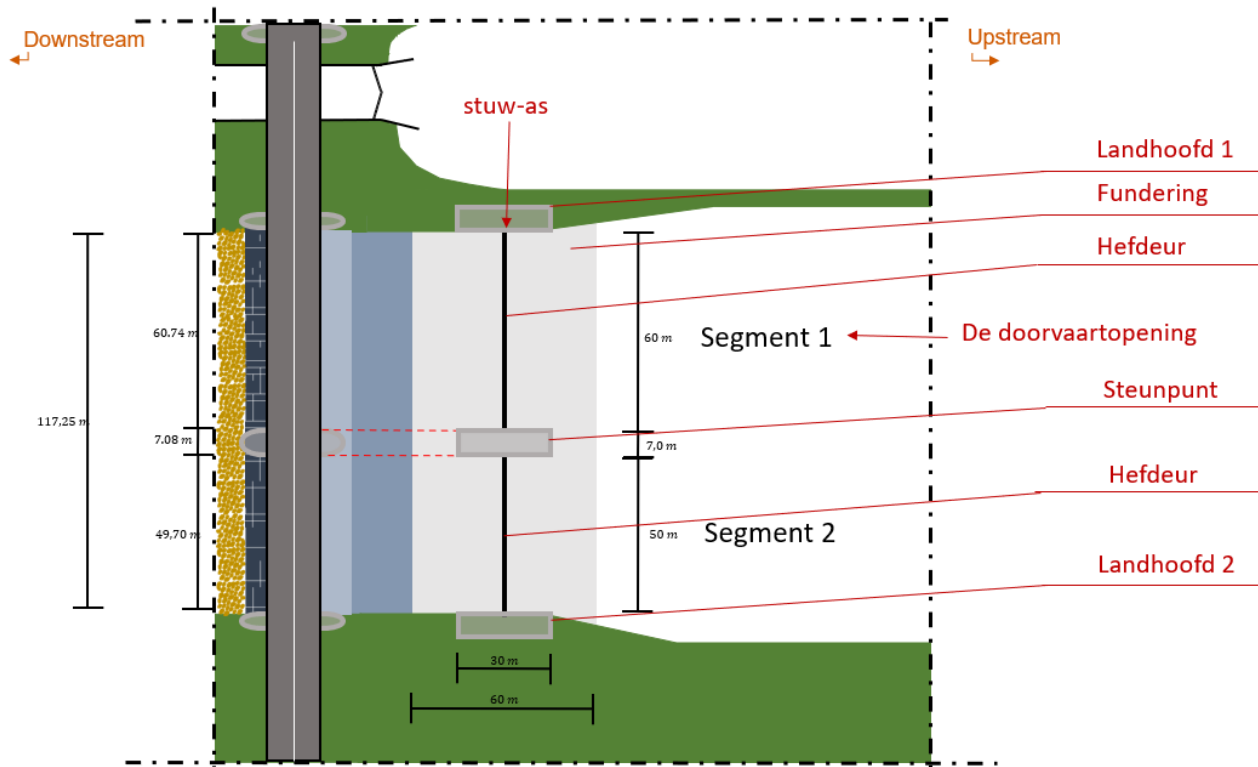
Figuur 5.10: Grafische representatie van de Multicriteria-analyse.

Op basis van de in Figuur 5.10 weergegeven grafische representatie van de Multicriteria-analyse moet geconcludeerd worden dat ontwerpalternatief 5 het beste kosten en waarden ratio heeft. Het heeft namelijk de hoogste waarden en de laagste globale kosten. Ontwerpalternatief 5 wordt dus als meest optimaal beschouwd.

5.5 Presentatie en detaillering van het voorkeursalternatief voor de basisstuw

In de huidige paragraaf wordt een overzicht gegeven van het definitieve ontwerp voor de basisstuw. In het restant van deze ontwerpstudie wordt verder gewerkt met dit ontwerp. Het ontwerp wordt tevens gedetailleerd uitgewerkt door middel van ontwerptekeningen. Hierin zijn kwantitatieve eisen die functionele dimensies aan het ontwerp opleggen verwerkt. Dit betreffen met name kwantitatieve eisen die de stuw veilig bevaarbaar moeten maken zoals de minimale doorvaarthoogte en de ligging van de fundering.

Uit de evaluatie komt dat ontwerpalternatief 5 het meest geschikt is. Een ontwerptekening met daarin de verschillende constructie-elementen is weergegeven in Figuur 5.11.

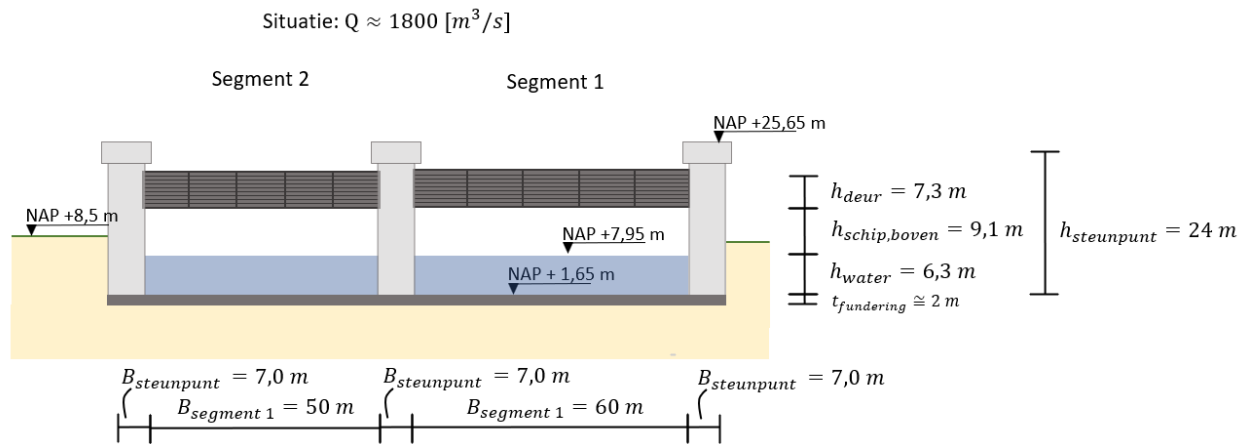


Figuur 5.11: Bovenaanzicht van het definitieve ontwerp van de basisstuw.

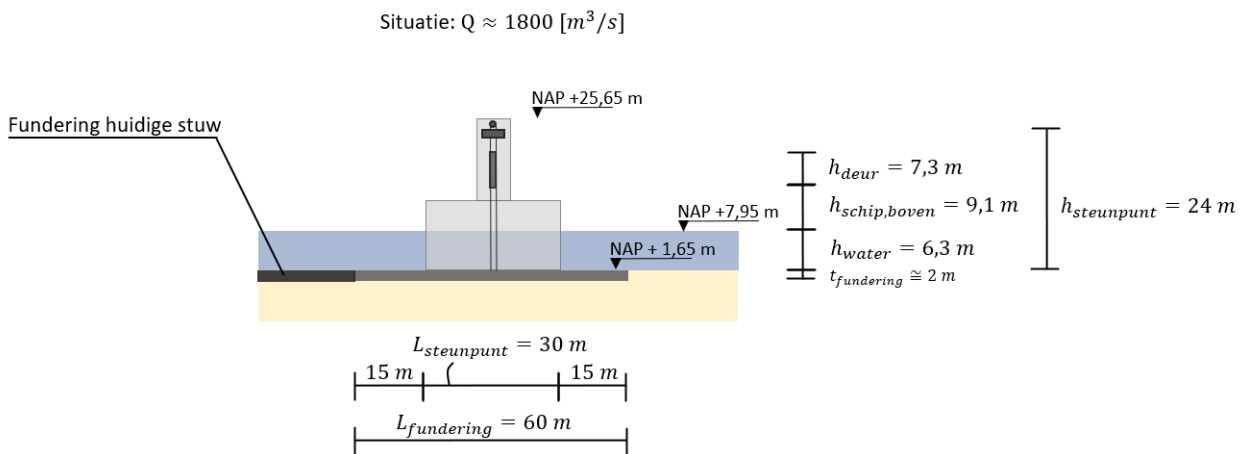
Voor een veilig bevaarbaar stuwcomplex op deze locatie is het van belang om tussen de steunpunten in de waterweg van de oude en toekomstige stuw een geleidingsconstructie te plaatsen. Dit is in Figuur 5.11 aangegeven met de rode stippellijnen. Hier dient een geleidingswerk gerealiseerd te worden om te voorkomen dat scheepvaart verkeerd varen doordat het onoverzichtelijk is. Dit kan een dunne betonnen constructie zijn die de steunpunten met elkaar verbindt of enkel een (staal) geleidingswerk. Het exacte detail ontwerp hiervan dient in een vervolgstudie uitgewerkt te worden.

De volgende stap is het uitwerken van het bovenaanzicht, Figuur 5.11, in een volledig ontwerp. Hiervoor dienen ontwerptekening van de doorsnede en het vooraanzicht ontwikkeld te worden. Kwantitatieve eisen die de functionele dimensies bepalen, paragraaf 3.1.2, dienen daarvoor uitgewerkt te worden in de ontwerptekeningen.

Voor een veilig bevaarbare stuw is het van belang dat voldaan wordt aan eis S.13 en S.14. De eerste eis stelt dat de drempeldiepte 6,3 m onder de waterlijn tijdens hoogwater moet komen te liggen om het voor scheepvaart mogelijk te maken door de stuw te varen tijdens hoogwater. Op basis hiervan is de diepteligging van de fundering bepaald. De tweede eis stelt dat onder hoogwater omstandigheden de doorvaarthoogte 9,1 m moet zijn. Het is dus zaak dat de hefdeuren voldoende hoog geheven worden. In Figuur 5.12 en Figuur 5.13 zijn deze eisen verwerkt in de uitwerking van ontwerpalternatief 5.



Figuur 5.12: Een vooraanzicht van het meest realistische ontwerpalternatief van de basisstuw direct na het strijken van de stuw.



Figuur 5.13 Een zijaanzicht van het meest realistische ontwerpalternatief van de basisstuw direct na het strijken van de stuw.

6 Inpassing van de waterkrachtcentrale in de basisstuw

De volgende stap in het ontwerpproces is het doorlopen van een ontwerplus voor de inpassing van een waterkrachtcentrale in de basisstuw. Als eerst dient een waterkrachtcentraletechnologie gekozen te worden, paragraaf 6.1. Daarna wordt in de resterende paragrafen een ruimtelijk functionele ontwerplus doorlopen voor de inpassing van de gekozen waterkrachtcentraletechnologie in de basisstuw.

6.1 Keuze in waterkrachttechnologie

In deze paragraaf wordt een inventarisatie van beschikbare waterkrachttechnologieën gemaakt. Vervolgens wordt een keuze gemaakt op basis van een verificatie en evaluatie. Tot slot, worden een aantal specificaties van de gekozen technologie gegeven.

6.1.1 Inventarisatie van beschikbare waterkrachttechnologieën

De studie 'Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland ' van Royal HaskoningDHV (Van Den Noortgaete, 2016) vormt de basis van de inventarisatie naar beschikbare waterkrachttechnologieën. In dit rapport worden twee methode voor energiewinning overwogen:

- Energiewinning uit verval;
- Energie uit stroming.

De eerste methode spreekt voor zich. De tweede methode benut de energie van een waterstroom voor het produceren van elektrische energie. Volgens Van Den Noortgaete (2016) zijn deze stromingsturbinen economisch rendabel vanaf stroomsnelheden van ongeveer 1,5 a 2 m/s. Dergelijke situatie kunnen in Nederland voorkomen, meestal bij bochten of vernauwingen. Het is echter niet aannemelijk dat dergelijke stroomsnelheden gedurende langere tijd aanwezig zijn rond de stuw bij Grave. Daarom is besloten om alleen naar energiewinning uit verval te kijken.

Op basis van het onderzoek van Royal HaskoningDHV (Van Den Noortgaete, 2016) worden veertien technologieën geïdentificeerd. Voor een beschrijving en karakteristieke van de technologieën wordt verwezen naar het onderzoek van Royal HaskoningDHV. De volgende veertien technologieën voor energiewinning uit verval worden overwogen in dit onderzoek:

- Bulp (kaplan) turbine;
- Cross-flow turbine;
- Vijzelturbine;
- Bovenslaand waterrad;
- Middenslaand waterrad;
- Onderslaand waterrad;
- VLH;
- Gravitation Water Vortex Plant;
- Horizontale turbine;
- Lamella turbine;
- Kata Max Wheel;
- Das Bewegliche Wasserkraftwerk;
- Hydro Generator;
- Overa Wheel.

6.1.2 Keuze in waterkrachttechnologieën

In deze paragraaf wordt een keuze tussen de waterkrachttechnologieën gemaakt. Dit wordt gedaan door een verificatie en evaluatie uit te voeren.

Verificatie:

De technologieën moeten worden geverifieerd op de eisen die worden gesteld aan de waterkrachtcentrale die worden gepresenteerd in de basis van het ontwerp, paragraaf 3.1.7. De relevante eisen voor de huidige ontwerpplus worden herhaald in Tabel 6.1. Om eis WKC.1 te toetsen is eigenlijk grondig onderzoek nodig wanneer een volledig stuwontwerp bekend is. In de huidige ontwerpfase wordt deze eis getoetst door de mate van visvriendelijkheid te gebruiken. In de studie 'Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland' van Royal HaskoningDHV is per technologie de visvriendelijkheid ingeschat. Deze beoordeling wordt in de huidige ontwerpfase gebruikt om de eis WKC.1 te toetsen. Na de keuze en een definitief ontwerp voor de waterkrachtcentrale moet dit uitvoeriger worden geverifieerd.

Tabel 6.1: Overzicht van de relevante eisen voor de keuze in waterkrachttechnologie

ID	Type eis	Beschrijving
WKC.1	Kwalitatief	De waterkrachtcentrale technologie moet met betrekking tot de vissterfte voldoen aan de eisen gesteld in het toetsingskader: 'toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren'(Rijkswaterstaat [RWS] & Water, Verkeer en Leefomgeving [WVL], 2014). Deze eis wordt getoetst op basis van de mate van visvriendelijkheid.
WKC.2	Kwalitatief	De waterkrachtcentrale technologie moet aantoonbaar voldoen aan de noodzakelijke technische prestaties.

Om eis WKC.1 te verifiëren wordt dus naar de beoordeling van de visvriendelijkheid gekeken die volgt uit de studie 'Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland ' van Royal HaskoningDHV. Alleen de technologieën beoordeeld met een ++ in dit onderzoek volstaan.

Voor de verificatie van eis WKC.2 worden twee sub-eisen opgesteld. De eerste sub-eis is dat vijzelturbines een aanzienlijke afvoer moeten kunnen verwerken. Om dit toetsbaar te maken wordt gesteld dat de afvoer minimaal 5 m³/s moet bedragen, dit wordt aangegeven als eis WKC.2.1. In de tweede eis, WKC.2.2, wordt gesteld dat de technologie onder een vervalbereik van 0,5 tot 5 m operationeel moet kunnen zijn. Om het maximale rendement te benutten moet de technologie ook onder omstandigheden met een laag verval nog energie opwekken.

In Tabel 6.2 worden de resultaten van de verificatie per relevante eis weergegeven. Wanneer een ontwerpalternatief op basis van een van de eisen niet voldoet wordt deze als ongeschikt beoordeeld en dus niet meegenomen in de evaluatie. De waarden voor de parameters zijn afkomstig uit het onderzoek van Royal HaskoningDHV (2016). Op basis van deze waarden is de verificatie gebaseerd.

Tabel 6.2: Verificatie van de waterkrachttechnologieën. De waarden voor het afvoerbereik en het vervalbereik en boordeling van de visvriendelijkheid zijn afkomstig uit de studie 'Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland ' van Royal HaskoningDHV (2016).

Technologie:	Beoordeling visvriendelijkheid	Eis WKC.1	Afvoerbereik [m ³ /s]	Eis WKC.2.1	Vervalbereik	Eis WKC.2.2
Bulb turbine	- -	✗	1 – 100	✓	2 – 15	✓
Cross-flow	- -	✗	0,04 - 10	✓	1 – 200	✗

turbine						
Vijzelturbine	++	✓	0,01 - 10	✓	0,5 - 10	✓
Bovenslaand waternrad	++	✓	0,1 – 2,5	✗	3 – 10	✗
Middenslaand waternrad	++	✓	0,5 – 7	✓	1,5 – 4	✗
Onderslaand waternrad	++	✓	0,5 – 20	✓	0,5 – 2	✗
VLH	+	✗	10 – 27	✓	1,5 – 4,5	✗
Gravitation Water Vortex Plant	+	✗	0,02 – 20	✓	0,7 – 2	✗
Horizontale turbine	+	✗	1 – 50	✓	2 – ...	✗
Lamella turbine	++	✓	0,5 – 10	✓	0,5 – 10	✓
Kata Max Wheel	++	✓	0,5 – 3	✗	1,5 – 20	✗
Das Bewegliche Wasserkraftwerk	+	✗	> 5	✓	2 – 5	✗
Hydro Generator	++	✓	1 – 10	✓	2 – 10	✗
Overa Wheel	++	✓	1 – 5	✓	2 – 3,5	✗

Op basis van Tabel 6.2 wordt geconcludeerd dat alleen de vijzelturbine en lammella turbine voldoen aan alle drie de eisen.

Evaluatie:

Voor deze evaluatie wordt afgeweken van de evaluatiecriteria van de basis van het ontwerp, paragraaf 3.4. Die criteria zijn namelijk gericht opgesteld voor het toekomstige stuwwontwerp. Voor de keuze tussen de waterkrachtcentrale technologieën is het criterium dat het een bewezen technologie belangrijker en relevanter. Hierdoor is het bijvoorbeeld aannemelijker dat de waterkrachtcentrale betrouwbaarder is, kunnen minder kinderziekten worden verwacht en kan de vismortaliteit beter beoordeeld worden op basis van praktijk ervaring in plaats van proeftesten. Beide aspecten zorgen uiteindelijk voor meer draagvlak bij de opdrachtgever.

Volgens de studie van Royal Haskoning DHV (Van Den Noortgaete, 2016) is in 2016 de vijzelturbine al in commercial gebruik, terwijl de lammella turbine pas twee keer is toegepast in waterkrachtcentrales in Duitsland. Aangezien er geen recentere data beschikbaar is, worden deze gegevens gebruikt voor de evaluatie. Op basis van het criterium dat een bewezen technologie de voorkeur heeft, wordt de vijzelturbine gekozen. In onderzoek van RoyalHaskoningDHV (van Heereveld et al., 2020) wordt beweerd dat de vijzelturbines de best realiseerbare technologie is. De vijzelturbine technologie wordt opgevat als een technologie die op basis van aantoonbare ervaringen visvriendelijk is. In dit

De bovenstaande keuze wordt versterkt door drie positieve eigenschappen van de vijzelturbine technologie.

De eerste positieve eigenschap is het feit dat er uitgebreid onderzoek is gedaan naar de vijzelturbines, waardoor gesteld mag worden dat deze technologie bewezen visvriendelijk is. Met name in Duitsland en Oostenrijk wordt deze waterkrachtcentrale technologie veel toegepast. Naar deze waterkrachtcentrales is door de jaren heen veel onderzoek gedaan. In de studie waterkrachtcentrale Grave (van Heereveld et al., 2020) zijn deze onderzoeken gebundeld om de visvriendelijkheid te beoordelen. Volgens een van de onderzoekers van dit rapport Gabriel Ghodrati (2021), een ecooloog, is dit op dit moment de enige bewezen visvriendelijke technologie die wordt toegestaan door Rijkswaterstaat.

De tweede positieve eigenschap is dat er al onderzoek is gedaan technologie nog visvriendelijker te maken. Verschillende aanpassingen zijn aan de technologie gedaan om de visvriendelijkheid te bevorderen. Daarnaast wordt oplossingen gezocht om de vismigratie te bevorderen. Hiervoor wordt de toepassing van een vissluis direct naast de vijzelturbines aan weerszijde onderzocht. (van Heereveld et al., 2020).

De derde positieve eigenschap is dat de ontwikkeling van deze technologie al dusdanig ver is dat door kleine functionele aanpassingen het rendement verhoogt kan worden. De hellingshoek van de vijzelturbines is namelijk aanpasbaar aan de benedenstroomse waterstand, waardoor het rendement verhoogt wordt. Hierdoor wordt de maximale potentie aan gravitatie-energie benut.

Concluderend heeft de vijzelturbine een aantal belangrijke voordelen omdat het al in commercieel gebruik is waardoor voor deze technologie verder ontwikkeld is en goed gekeurd is door Rijkswaterstaat. Dit heeft doen besluiten om voor de vijzelturbine technologie te kiezen.

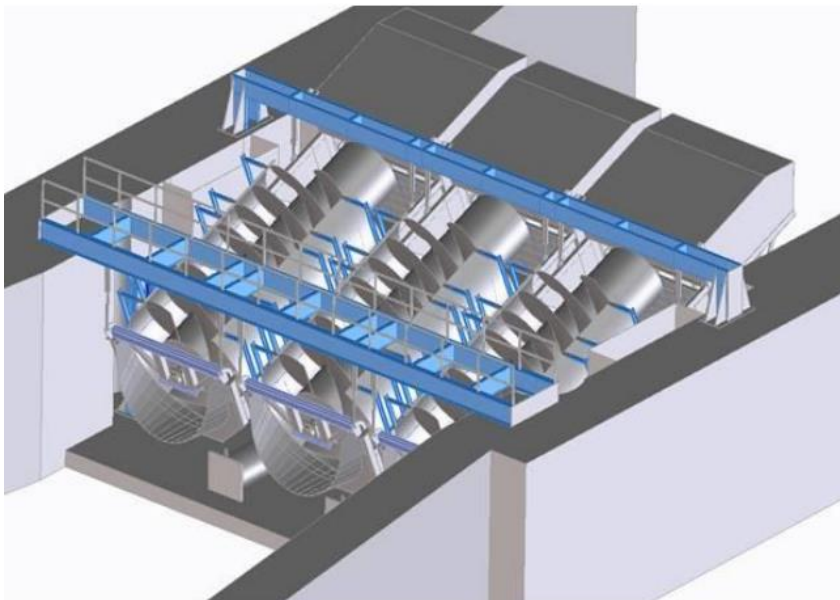
6.1.3 Presenteren van de gekozen waterkrachttechnologie

De vijzelturbine technologie is dus gekozen als meest geschikte waterkrachttechnologie om toe te passen in de toekomstige stuw bij Grave. In Figuur 6.1 en Figuur 6.2 worden twee impressies van waterkrachtcentrales weergegeven waarin de vijzelturbine technologie is toegepast. De belangrijkste karakteristieke van deze technologie zijn:

- Het maximale debiet door een vijzelturbine bedraagt: $8 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Een motor is op de vijzelturbines geïnstalleerd om de afvoer door een vijzelturbine te regelen. De afvoer kan met een stapgrootte van $1 \text{ m}^3/\text{s}$. De minimale afvoer, dit is de afvoer wanneer de vijzelturbines uit staan, bedraagt $2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Doordat er altijd een afvoer van $2 \text{ m}^3/\text{s}$ door de vijzelturbines stroomt is het noodzakelijk om een deur te realiseren die de afvoer naar nul brengt. Dit is met name belangrijk voor de omgang met droge periodes.
- Naast de debietregeling functie van de motor, functioneert deze tevens als opstartmechanisme om energie op te wekken. Een dergelijke vijzelturbine moet eerst opgang worden gebracht voor het energie op gaat wekken. Een externe energie bron is nodig om dit proces in gang te zetten.
- De efficiëntie van de vijzelturbine is variabel. Zoals eerder aangegeven hangt dit af van de benedenstroomse waterstand. Het voordeel van vijzelturbines is dat de hellingshoek aangepast kan worden naar de benedenstroomse waterstand waardoor de efficiëntie per situatie wordt geoptimaliseerd.
- Het vermogen is afhankelijk van het verval. Deze wordt verderop in het onderzoek bepaald op basis van een data-analyse.
- De exacte dimensies van de vijzelturbine kunnen worden aangepast aan de omstandigheden waardoor het rendement verhoogt kan worden. Voor deze conceptuele ontwerpfase wordt aangenomen dat de vijzelturbines een diameter van 4 m hebben en een lengte van 11 m.



Figuur 6.1: impressie van een vijzelturbine. Een vijzelturbine geplaatst in de dommel bij St. Michiels. Afkomstig van van Heereveld et al. (2020).



Figuur 6.2: impressie van een ontwerp voor een waterkrachtcentrale waarin 3 vijzelturbines worden toegepast. Afkomstig van van Heereveld et al. (2020).

6.2 Ontwerpen van de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw

In deze paragraaf wordt voor de 3^{de} keer de ontwerplus doorlopen. De ontwerplus is toegepast om een realistisch ontwerp voor de inpassing van de waterkrachtcentrale in de basisstuw te ontwikkelen.

6.2.1 De werking van de stuw met de waterkrachtcentrale ten behoeve van de conceptvorming

Ten behoeve van de conceptvorming wordt in deze paragraaf de werking van de stuw met de waterkrachtcentrale beschreven. Hierin wordt met name aandacht besteed aan de samenhang tussen de componenten, de waterkrachtcentrale en de hefdeuren. De volgende (functionele) principes zijn opgesteld aan de inpassing van een waterkrachtcentrale in de basisstuw:

- De waterkrachtcentrale is onderdeel van het afvoerregulatiesysteem en draagt dus bij aan de waarborging van het streefpeil.

Het conceptuele idee voor de samenwerking van de waterkrachtcentrale en de hefdeuren wordt hieronder uitgewerkt in een operationeel plan.

Bij grave wordt momenteel geregeld op de peilhoogte. Het doel is om een peil van NAP+7,95 m +/- 5 cm te handhaven. Verder dient rekening te worden gehouden met het debiet door de vispassage (4 m³/s) en het lekverlies (van Heereveld et al., 2020). Het lekverlies mag in de toekomst slechts 2 m³/s zijn. Dit betekent dat pas vanaf 6 m³/s afvoer op de maas pas aangevangen kan worden met het opwekken van energie.

In paragraaf 6.1 is de eigenschap beschreven dat vijzelturbines de afvoer door middel van een motor nauwkeurig kunnen regelen. Elke vijzelturbine is in staat een afvoer tussen de 2 en 8 m³/s nauwkeurig te regelen met een stapgrootte van 1 m³/s. Deze eigenschap kan mogelijk positief bijdrage aan de wens van Rijkswaterstaat om de omgang met droge periodes te verbeteren. Het conceptuele idee is dat de waterkrachtcentrale de laagste zone van het afvoerregulatiesysteem voor haar rekening neemt. Geleidelijk worden vijzelturbines aangezet. Deze kunnen van 2 m³/s tot en met 8 m³/s met een stapgrootte van 1 m³/s nauwkeurig worden geregeld. Nadat alle vijzelturbines volledig operationeel zijn nemen de hefdeuren van de basisstuw de verdere afvoerregulatie over; de hefdeuren garanderen dan het vereiste streefpeil. De vijzelturbines blijven zonder beperking operationeel, energie opwekken, totdat de stuw gestreken wordt. Bij een gestreken stuw is er geen verval over de stuw meer aanwezig. Dit betekent dat er dan geen energie meer wordt opgewekt. Na het strijken van de stuw worden daarom de vijzelturbines uitgezet. Op dat moment stroomt er nog een debiet van 8 m³/s water door elke vijzelturbines.

Twee aspecten moeten uitgelicht worden. In paragraaf 6.1 wordt gesteld dat het minimale debiet door een vijzelturbine 2 m³/s is; de aanwezige motor die de afvoer regelt kan de afvoer niet verder terugbrengen. Dit betekent dat een sluitmechanisme in of voor de vijzelturbines nodig is om de afvoer naar nul te brengen. Verderop, in deze paragraaf wordt een sluitmechanisme ontworpen die bestaat uit één hefdeur die alle vijzelturbines tegelijk afsluit. Het tweede aspect dat extra aandacht vereist is de laatste stap in het operationeel plan. Stel dat een waterkrachtcentrale met 3 vijzelturbines wordt toegepast, dan kan de afvoer door middel van de vijzelturbines tussen de 12 en 30 m³/s met een stapgrootte van 1 m³/s nauwkeurig worden geregeld. De laatste stap van het operationeel plan betreft dus het sluiten van de deur voor de vijzelturbines. De nauwkeurigheid van deze stap is relatief laag ten opzichte van de stappen die de vijzelturbines kunnen nemen. Voor 3 vijzelturbines is dit namelijk van 12 m³/s naar 6 m³/s. Als oplossing wordt er gekozen om de deuren voor de vijzelturbines te sluiten en het aller laagste afvoerbereik te regelen met een fijnregelklep die wordt bevestigd op één van de hefdeuren van de basisstuw.

De bovenstaande beschrijving leidt tot het opstellen van een operationeel plan; regelschema voor de bediening van de stuw en waterkrachtcentrale. In het operationeel plan wordt het aantal draaiende vijzelturbines gekoppeld aan de optredende afvoer. Het concrete operationele plan is afhankelijk van het aantal vijzelturbines dat de waterkrachtcentrale huisvest. Het aantal vijzelturbines is een van de hoofdvariabele in het ontwikkelen van ontwerpalternatieven. Ter verduidelijking van het concept wordt in Tabel 6.3 een voorbeeld van een operationeel plan gegeven voor een waterkrachtcentrale waarin 3 vijzelturbines worden gehuisvest.

Tabel 6.3: Een voorbeeld van een operationeel plan waarin de waterkrachtcentrale 3 vijzelturbines huisvest.

*1: Dit is een schatting naar de nauwkeurigheid waarmee hefdeuren de afvoer regelen. In een latere ontwerpfase dient dit accuraat onderzocht te worden. De exacte waarde is op dit moment niet relevant voor het conceptuele ontwerp.

Conditie	Afvoerbereik [m ³ /s]	Status	Aantal draaiende vijzelturbines [-]	Nauwkeurigheid afvoerregulatie [m ³ /s]
----------	-------------------------------------	--------	--	--

Verliezen	$0 \leq Q \leq 4$	Debiet door vispassage	Geen	n.v.t.
	$4 \leq Q \leq 6$	Lekverlies	Geen	n.v.t.
Extreem lage afvoer situatie:	$6 \leq Q \leq 12$	Fijnregelklep regelt de waterstand	Geen	1
Laagwater	$12 \leq Q \leq 20$	1 ^{ste} turbine wordt ingeschakeld	1	1
	$20 \leq Q \leq 28$	2 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	2	1
	$28 \leq Q \leq 36$	3 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	3	1
Normale afvoer	$36 \leq Q \leq 1800$	Alle turbines operationeel en hefdeuren regelen afvoer	3	5 a 10 ^{*1}
Hoogwater	$Q > 1800$	Stuw is gestreken alle turbines zijn uitgeschakeld	Geen	n.v.t.

- De afvoer door de stuw dient min of meer naar nul gebracht te worden in periodes van droogte. Door de vijzelturbines blijft echter altijd 2 m³/s stromen. Het is daarom noodzakelijk om een mechanisme te ontwerpen die zorgt dat de afvoer door de vijzelturbines naar nul gaat.

In paragraaf 6.1 wordt gesteld dat het minimale debiet door een vijzelturbine 2 m³/s is; de aanwezige motor die de afvoer regelt kan de afvoer niet verder terugbrengen. Een gedegen sluitmechanisme dient ontworpen te worden om de afvoer naar nul te brengen.

Op basis van de functionaliteit kan in deze fase van de thesis al één uitspraak worden gedaan met betrekking tot het sluitmechanisme. Er is gekozen om het sluitmechanisme te scheiden van de vijzelturbines. Een sluitmechanisme dat geïntegreerd is in de vijzelturbines wordt niet opportuun geacht. De belangrijkste redenen om de systemen, het opwekken van energie en volledige sluiting tijdens droge periodes, te scheiden is dat onderhoud makkelijker wordt en het ten goede komt aan de robuustheid van het systeem. De hefdeuren van de basisstuw kunnen functioneren als het opzichzelfstaande sluitmechanisme. Deze dienen dus ook geplaatst te worden in de waterkrachtcentrale.

- De positionering van de waterkrachtcentrale is beperkt in de langsrichting van de rivier. Deze dient op de fundering van de toekomstige stuw zoals ontworpen in hoofdstuk 5 geplaatst te worden.

In deze thesis worden enkel ontwerpalternatieven ontwikkeld waarin de vijzelturbines geplaatst worden op de fundering ontworpen in hoofdstuk 5. Grote aanpassingen aan het ontwerp van deze fundering zijn achterwegen gelaten. Er is aangenomen dat de fundering constructief zo ontworpen kan worden dat het de toegenomen belasting door de waterkrachtcentrale kan weerstaan. In potentie kan de waterkrachtcentrale mogelijk zelfs een positieve bijdrage tegen het faalmechanisme van opwaartse druk.

Daarnaast is het plaatsen van de vijzelturbines op de fundering van de huidige stuw die behouden blijft buitenbeschouwing gelaten.

Dus de positie van de vijzelturbine varieert van 30 m bovenstrooms tot 30 m benedenstrooms van de 'basisstuw' as.

- Het wordt opportuun geacht om de vijzelturbines zo dicht als mogelijk op de stuw as te plaatsen.

De grootste negatieve hydraulische effecten zoals een lokale systeemsprong en ongewilde stromingspatronen kunnen hiermee worden voorkomen.

- De hellingshoek van de vijzelturbines moet verstelbaar zijn.

De gekozen waterkrachtcentrale technologie, de vijzelturbine, maakt het mogelijk om het rendement te optimaliseren. Het rendement wordt geoptimaliseerd door de hellingshoek van de vijzelturbines aan te passen aan de actuele benedenstroomse waterstand (Van Heereveld, 2020). Deze functie moet behouden blijven waardoor het belangrijk is om in het ontwerp de vijzelturbines enige verticale bewegingsvrijheid te geven.

6.2.2 Creëren van ontwerpalternatieven

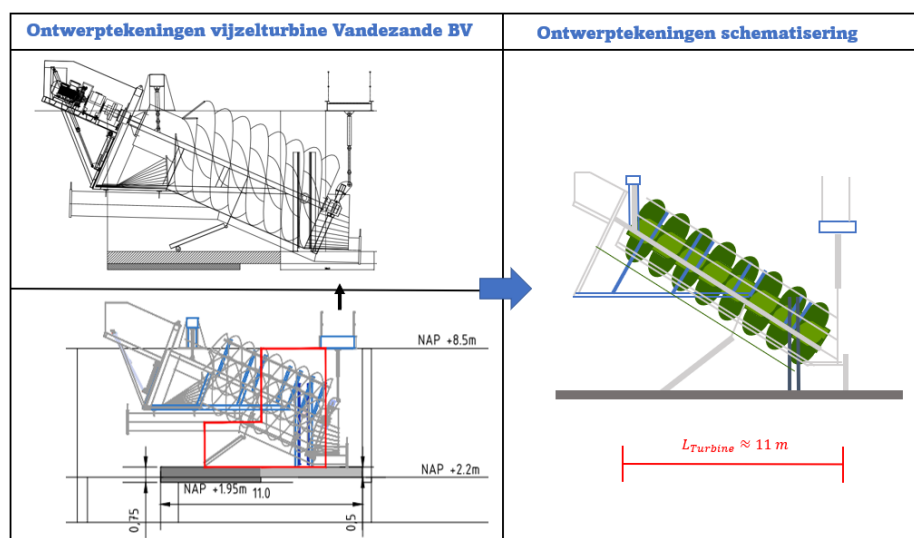
Nu de belangrijkste principes voor het ontwerp bekend zijn, kan gestart worden met het ontwikkelen van ontwerpalternatieven. Deze zijn ontwikkeld door middel van een combinatie van 'trial and error' en brainstormsessies.

In eerste instantie wordt gericht op het conceptueel ontwerpen van de stuw in langsricting van de rivier; de manier waarop vijzelturbines geïntegreerd worden ten opzichte van de basisstuw. In eerste instantie is de hoofdvariabele in deze ontwerpplus: de positionering van de vijzelturbines ten opzichte van de basisstuw. Nadat dit bepaald is, gaat onderzocht worden hoeveel vijzelturbines op een dergelijke manier geïntegreerd kunnen worden.

De volgende ontwerpalternatieven voor de positionering van de vijzelturbines zijn tot stand gekomen:

- Benedenstrooms van de basisstuw;
- Bovenstrooms van de basisstuw;
- Benedenstrooms van de 'basisstuw' met een aanpassing aan de stuwdeur(en) van de basisstuw.

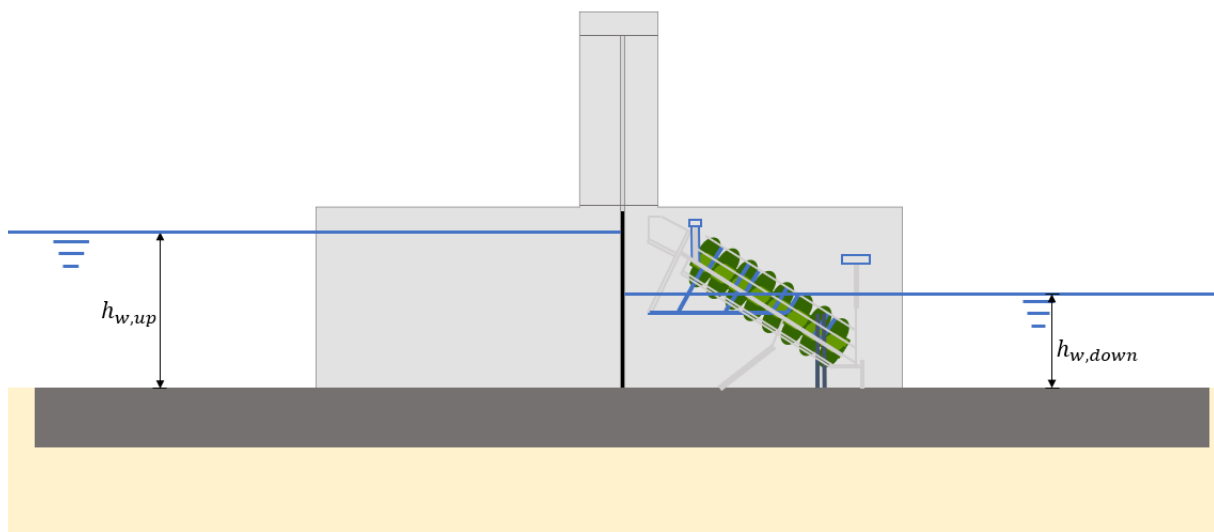
In dit hoofdstuk wordt in het ontwerp niet het exact ontwerp van de vijzelturbines gebruikt, maar een schematisering van het ontwerp gebruikt. De orde grote van de dimensies komt overeen. De uitwerking van het exacte ontwerp naar de schematisering wordt weergegeven in Figuur 6.3.



Figuur 6.3: LINKS: Twee ontwerptekeningen van een vijzelturbine ontworpen door Vandezande BV (Van Heereveld et al., 2020). RECHTS: schematisering van een vijzelturbine die gebruikt wordt in de ontwerptekening in dit hoofdstuk.

Ontwerpalternatief A – benedenstroomse implementatie ten opzichte van de basisstuw

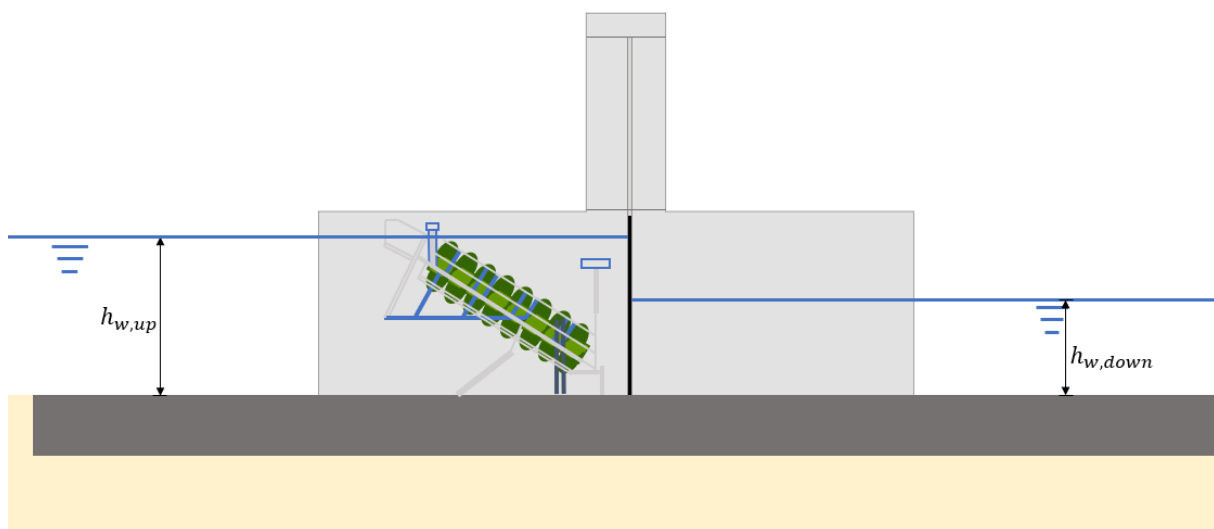
De meest voordehand liggende positionering van de vijzelturbine ten opzichte van de basisstuw is zo dicht mogelijk benedenstrooms van de hefdeuren. Dit ontwerpalternatief wordt weergegeven in Figuur 6.5. In de situatie van de figuur zijn de hefdeuren gesloten. Neemt de afvoer toe dan worden de hefdeuren voor de turbines geheven. Na het heffen van de stuwdeuren treedt het verval op over de vijzelturbines en kan er dus energie worden gewonnen.



Figuur 6.4: ontwerpalternatief A, benedenstroomse implementatie t.o.v. de basisstuw, in de situatie dat de stuwdeuren gesloten zijn.

Ontwerpalternatief B – bovenstrooms van de ‘basisstuw’

Figuur 6.5 toont een ontwerpalternatief waarin de vijzelturbine bovenstrooms van de basisstuw geïmplementeerd is.



Figuur 6.5: ontwerpalternatief B, bovenstroomse implementatie t.o.v. de basisstuw, in de situatie dat de stuwdeuren gesloten zijn.

Op het eerste oog heeft dit ontwerpalternatief een aantal nadelen. De voornaamste nadelen hebben betrekking tot falen en het ongemak voor onderhoud. Het plaatsen van de vijzelturbines bovenstrooms

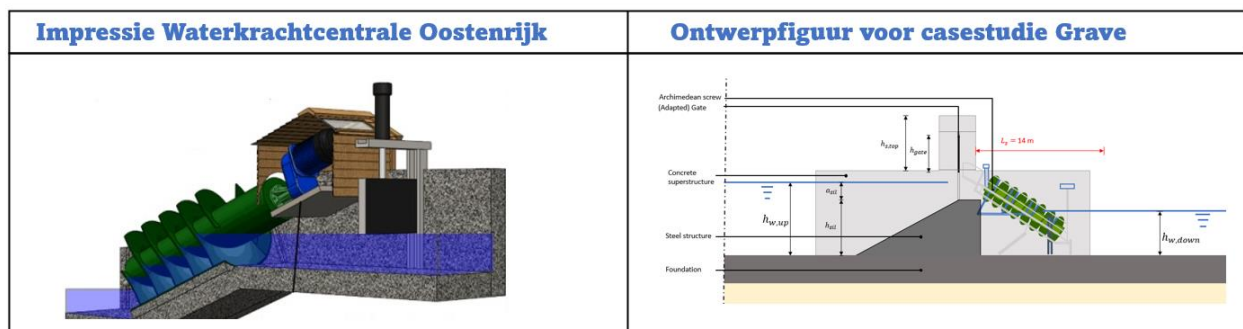
van de basisstuw zorgt voor additionele risico's. Het nadeel ligt voornamelijk in de faalconsequentie. Mocht de vijzelturbine losraken door bezwijken van de ondersteunende constructie dan kan dit tot de ongewenste consequenties leiden dat de vijzelturbine botst of zelfs vast komt te zitten onder de hefdeur. Het gevolg hiervan is dat de stuw tijdelijk niet zal functioneren. Dit is onacceptabel als dit tijdens een periode van hoogwater gebeurt of als de stuw te lang niet beschikbaar is. Het faalmechanisme is in essentie vergelijkbaar met de eis waarin gesteld is dat de kans op botsing van een schip op de stuw geminimaliseerd moet worden (eis S.9). Dit betekent dat de kans op het faalmechanisme dat de vijzelturbines botsen op de stuw ook geminimaliseerd moet worden.

Ontwerpalternatief C - benedenstrooms van de 'basisstuw' met een aanpassing aan stuwdeuren van de 'basisstuw'

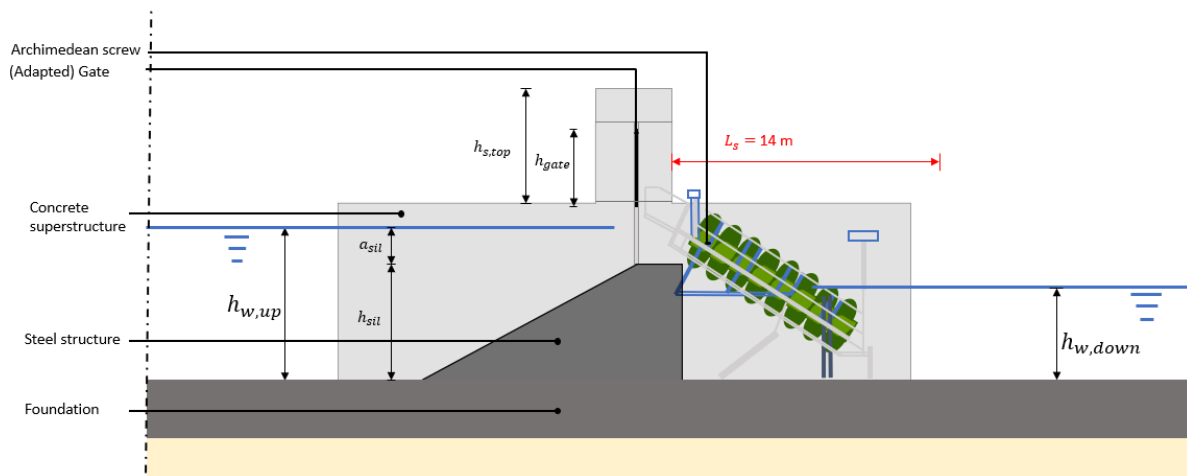
In Figuur 6.7 is het concept ontwerp van alternatief 3, benedenstroomse implementatie na aanpassing van de stuwdeuren, weggegeven. Het idee komt voort uit het ontwerp dat getoond wordt aan de linkerkant in Figuur 6.6 (Charisiadis, 2015). Dit is een impressie van een waterkrachtcentrale met vijzelturbines die regelmatig wordt toegepast in landen zoals Oostenrijk.

De vijzelturbines worden in dit ontwerpalternatief benedenstrooms van de stuw geplaatst. Het verschil met ontwerpalternatief A is de additionele staalconstructie die op de stuw-as wordt geplaatst. Hierdoor ontstaat een vergelijkbaar ontwerp met het voorbeeld van een waterkrachtcentrale zoals die uitgevoerd wordt in Oostenrijk. De hoogte dimensie van de hefdeur(en) voor de waterkrachtcentrale kunnen hierdoor kleiner worden. De vijzelturbines hebben een openingsdiameter van 4 m, waardoor een stuwdeur van ongeveer 4,5 m zou kunnen volstaan. De stuwdeurhoogte wordt dus gereduceerd van 7,3 m naar om en nabij de 4,5 m.

Een bijkomstigheid van dit ontwerp is dat de additionele constructie kan dienen als waterafdichting. Dit is een belangrijk aspect voor een gedetailleerdere ontwerp plus aangezien eis S.2 stelt dat het lekverlies geminimaliseerd moet worden. In de voorgaande ontwerpalternatieven moet er een waterafdichting tussen en onder de turbines worden gerealiseerd.



Figuur 6.6: LINKS: een impressie van een waterkrachtcentrale met vijzelturbines in Oostenrijk (Charisiadis, 2015), RECHTS: ontwerpalternatief C..



Figuur 6.7: ontwerpalternatief C, benedenstroomse implementatie met een aanpassing in het 'basisstuw'-ontwerp, in de situatie dat de stuwdeur open is.

6.3 Verificatie van de hydraulische haalbaarheid

In dit stadium van het ontwerpproces moeten de volgende eisen worden geverifieerd:

- De stuw moet in staat zijn het huidige streefpeil in een vastgesteld debietbereik te waarborgen; het water dient actief gestuurd te worden (eis S.1).
- De waterveiligheid van de omgeving mag niet in gevaar komen (eis O.2)

Waarborging van het streefpeil:

De bovenste eis hoeft in dit stadium van de ontwerp plus nog niet op het hoogste detailniveau te worden geverifieerd. Desondanks is het handig om alvast stil te staan bij deze eis, zodat in een later ontwerpstadium niet tegen grote problemen wordt aangelopen. Het huidige streefpeil is door het huidige regelregime, de debiet-verval-relatie, te waarborgen. De vijzel turbines worden zo opgenomen in het operationeel plan dat het regelregime niet vergelijkbaar blijft. De positionering van de vijzel turbines in langsrichting heeft hier een marginale invloed op. Het hangt met name af van het aantal vijzel turbines en het operationeel plan. Beide worden concreet pas in een later ontwerpstadium bepaald.

Verder is het belangrijk dat de vijzel turbines de functies met een vergelijkbare betrouwbaarheid en beschikbaarheid als de hefdeuren vervullen. Dit aspect kan nog niet worden geverifieerd omdat daarvoor een volledig stuwontwerp nodig is. Voor nu wordt aangenomen dat aan de betrouwbaarheid en beschikbaarheid eisen voldaan kan worden.

Tot slot, moeten twee aspecten uitgelicht worden die belangrijk zijn voor het waarborgen van het streefpeil tijdens droge periodes. Het is belangrijk dat dan voldoende water in de stuwpanen wordt vastgehouden. Rijkswaterstaat heeft hiervoor gesteld dat de afvoer inclusief het lekverlies niet groter dan 2 m³/s mag zijn (eis S.2). De daadwerkelijke verificatie van deze eis valt buiten de scope van de huidige ontwerp plus aangezien een volledig ontwerp van een hoger detailniveau nodig is. Desalniettemin moeten twee aspecten alvast worden uitgelicht. Het eerste aspect is dat een gedegen afsluiting voor de vijzel turbines ontworpen moet worden. Alle ontwerpalternatieven voldoen aan deze eis door de hefdeuren van de basisstuw te gebruiken als sluitingsmechanisme. Daarnaast wordt aangenomen dat het mogelijk is om aan de eis met betrekking tot het lekverlies te voldoen. Er wordt verondersteld dat er in een ontwerp plus met een hoger detailniveau een gedegen waterafdichting ontworpen kan worden aangezien er voldoende referentieprojecten voor de vijzel turbine-technologie bekend zijn waarin dit het geval is.

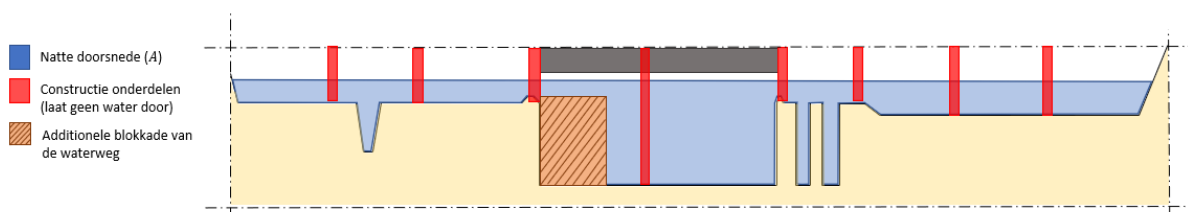
Verificatie van de waterveiligheid:

De tweede eis is kritischer dan de eerste en het vereist een analyse om de ontwerpalternatieven te verifiëren. In eis O.2 wordt gesteld dat het toevoegen van een constructie aan het riviersysteem slechts tot 1 mm opstuwing mag leiden. In deze verificatie wordt onderzocht of een waterkrachtcentrale in de basisstuw kan worden geïmplementeerd zonder de opstuwingsnorm te overschrijden. De verificatie dient gemaakt te worden voor de maatgevend hoogwatersituatie. De opstuwing is namelijk vooral gevaarlijk voor de waterveiligheid tijdens maatgevend hoogwatercondities.

Voorafgaand aan de analyse moet de scope worden aangescherpt. Het eerste aspect is dat in deze analyse gaat om maatgevend hoogwater. Het tweede aspect is dat in eerste instantie wordt aangenomen de basisstuw zoals ontworpen in hoofdstuk 5 geen opstuwing veroorzaakt. Dit kan gesteld worden omdat in dit hoofdstuk priori ontworpen is op de afvoercapaciteit door te ontworpen op basis van voldoende doorstroomoppervlak.

In eerste instantie hoeft er geen onderscheid gemaakt te worden tussen de ontwerpalternatieven, omdat er geen verschil zit in mate waarin het weerstand aan het systeem toevoegt. De breedte die de vijzelturbines in alle ontwerpalternatieven inneemt zijn hetzelfde, en er is ook geen verschil in het debiet dat vijzelturbines kunnen regelen; de breedte en afvoer capaciteit varieert niet tussen de varianten. Hierdoor is de impact wat betreft opstuwing hetzelfde.

De implementatie van een waterkracht centrale heeft invloed op het doorstroomoppervlak van de stuw en dus de afvoercapaciteit. Een verminderde afvoercapaciteit leidt tot opstuwing. Als demonstratie is een situatie met 8 turbines met een breedte van 4.5 m genomen. Figuur 6.8 geeft schematisch de situatie weer. De in beige gestreepte rechthoek geeft het gedeelte aan wat bezet wordt door de vijzelturbines. In de maximale afvoersituatie bedraagt het debiet door één vijzelturbine $8 \text{ m}^3/\text{s}$. De afvoer door de turbine wordt als nihil gezien ten opzichte van het maatgevend debiet ($Q \sim 4200 \text{ m}^3/\text{s}$). In verhouding is het debiet wat door de acht vijzelturbines samen wordt afgevoerd relatief gezien klein en niet significant. Acht vijzelturbines bezetten namelijk een breedte van 36 m waardoor slechts $64 \text{ m}^3/\text{s}$ water stroomt. Als hier geen vijzelturbines zouden zijn geïmplementeerd zou er door het deel dat bezet wordt door de vijzelturbines een significant hoger debiet stromen dan $64 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 6.8: Een schematisering van het dwarsdoorsnede profiel ter plaatsen van die nieuwe stuw met daarin een blokkade van de waterweg ten gevolge van vijzelturbine implementatie

Er wordt aangenomen dat de impact van de waterkrachtcentrales op de stroomsnelheid ter plaatse van de stuw marginaal is. Als het debiet en de stroomsnelheid min of meer gelijk zijn tussen de situatie met en zonder waterkrachtcentrale dan moet het natte oppervlak tijdens de maatgevende situatie ook gelijk blijven op basis van behoud van massa en momentum. Onvermijdelijk betekend dit dat als de doorstroombreedte afneemt de waterdiepte (lokaal) toeneemt. Het fenomeen opstuwing ontstaat. Er kan gesteld worden dat het toevoegen van weerstand altijd resulteert in opstuwing. Vooral wanneer de oude constructie niet uit de rivier wordt verwijderd. Dan wordt er namelijk ook geen weerstand uit het systeem gehaald, dus resulteert elke constructie die je toevoegt in een weerstand. Mogelijk zorgt deze weerstand voor een opstuwing onder de 1 mm, dan is het wel mogelijk om een waterkrachtcentrale te realiseren. Dit

is echter niet aannemelijk aangezien er zonder de inpassing van de waterkrachtcentrale al weerstand aan het riviersysteem wordt toegevoegd, in de vorm van de basisstuw.

Een inschatting naar de uiterste dimensies die als weerstand tot het systeem toegevoegd mag worden kan bepaald worden op basis van de volgende vergelijking:

$$\Delta A = \Delta h \cdot B \quad (\text{vgl. 6.1})$$

Waarin:

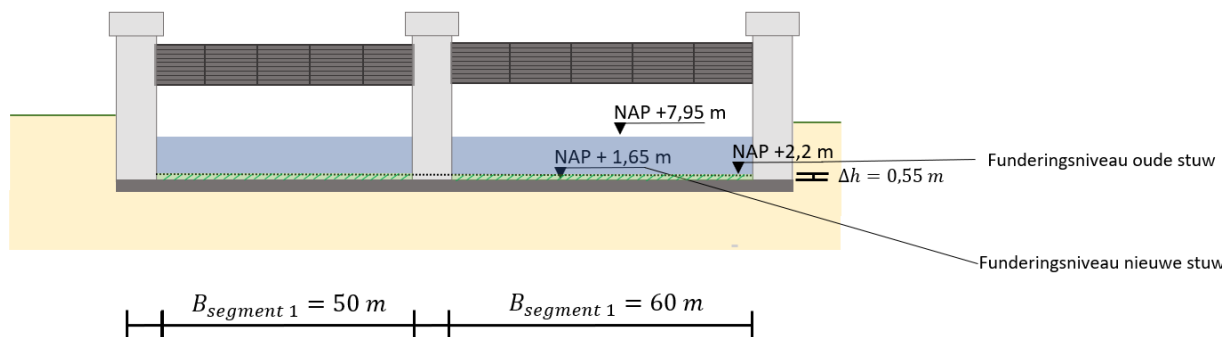
ΔA = toegestane afname van het natte oppervlak

Δh = toegestane opstuwing = 1 mm

B = benadering van de totale breedte ≈ 500 m

Voor een eerste inschatting wordt een benadering van de totale breedte, inclusief uiterwaarde, gebruikt om het oppervlak te bepalen dat de vijzelturbines mogen bezetten (ΔA). De rivier wordt voor de eerste schatting geschematiseerd als een rechthoek om een orde grote gevoel te krijgen van de toegestane toename in het natte oppervlak. De bovenstaande waardes resulteert in een maximaal toegestane afname van het natte oppervlak met 0,5 m². Dit zou het oppervlak zijn wat de waterkrachtcentrale mag bezetten, in dat geval ontstaat er nog geen opstuwing. Het oppervlak is dusdanig klein dat niet eens één turbine kan worden geïnstalleerd. Eén vijzelturbine bezet namelijk al een oppervlak van 27 m² van de rivier. Het debiet dat door dit oppervlak gaat is nagenoeg nul, in verhouding met het maatgevende debiet. Dit betekent dat het toevoegen van een vijzelturbine al dusdanig veel weerstand toevoegt waardoor er opstuwing zal ontstaan.

Bij de bovenstaande analyse moet een kanttekening bij de aannames worden gemaakt. Er wordt namelijk uitgegaan van het meest conservatieve geval: dat enkel het inpassen van de basisstuw al zou leiden tot een verhoging van de weerstand die tot opstuwing leidt. Dit is echter niet helemaal het geval. Als start uitgangspunt werd gesteld dat de funderingsdiepte gelijk is aan die van oude stuw. Echter wordt aan het einde van hoofdstuk 5 geconcludeerd dat de toekomstige stuw dieper moet komen te liggen. Dit zorgt voor enigszins ruimte met betrekking tot het toevoegen van weerstand. Het doorstroomoppervlak neemt toe door de grotere diepte en het feit dat de breedte van de basisstuw op deze aanpassing nog niet ontworpen was. Dit betekent dat de weerstand afneemt. Deze afname in de weerstand kan mogelijk worden gebruikt om een waterkrachtcentrale te implementeren. De volgende stap is om te onderzoeken of het toch mogelijk is om een aantal vijzelturbines in het basisstuw ontwerp in te passen. Het in Figuur 6.9 gearceerde groene oppervlak geeft de toename in het doorstroomoppervlak weer.



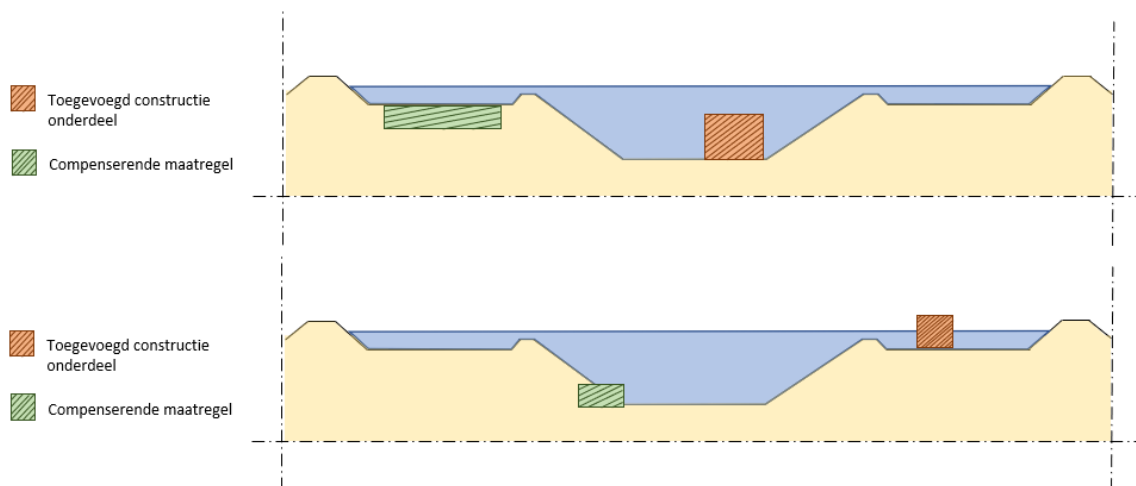
Figuur 6.9: Schematisering van de stuw om het verschil in funderingsniveau te verduidelijken

Het groen gearceerde oppervlak heeft een hoogte afmeting van 0,55 m en een totale breedte van 120 m. De toename in het natte oppervlak bedraagt dan 66 m². Dit betekent dat ongeveer twee vijzelturbines

toegepast kunnen worden zonder dat er opstuwung ontstaat. Deze conclusie is hetzelfde voor alle ontwerpalternatief uit paragraaf 6.2.3.

Het doel van deze studie is om grootschalige waterkrachtcentrale in te passen in de toekomstige Maas-stuw(en). Er zijn maatregelen denkbaar waardoor het mogelijk wordt om meer vijzelturbines te implementeren. Hiervoor dient gekeken te worden naar compenserende maatregelen. Er zijn twee type compenserende maatregelen mogelijk.

De eerste manier wordt weergegeven in Figuur 6.10. Het oppervlak van de doorsnede wat bezet wordt door vijzelturbines, in rood gearceerd, dient ergens gecompenseerd te worden, bijvoorbeeld door het uitgraven van het in groen gearceerde gebied in de uiterwaarde. Andere opties zijn het verbreden van de basisstuw of het graven van een nevengeul. De tweede optie heeft te maken met het kritische moment. Opstuwung is namelijk met name een probleem in de maatgevende situatie. In deze situatie is er gevaar voor waterveiligheid. Het zou een potentiële oplossing kunnen zijn om de weerstand tijdelijk, tijdens hoogwater, te verwijderen uit het riviersysteem. Dit zou kunnen worden bewerkstelligd door de vijzelturbines bijvoorbeeld uitneembaar te maken. In dat geval worden de vijzelturbines in de rivier geplaatst onder normale afvoerstandigheden en verwijderd tijdens maatgevend hoogwater.



Figuur 6.10: Twee dwarsdoorsnede profielen waarin de additionele constructie en een voorbeeld van compenserende maatregelen zijn aangegeven.

Dus op basis van deze eerste haalbaarheidsanalyse kan geconcludeerd worden dat het zonder compenserende maatregel slechts mogelijk is om een waterkrachtcentrale met twee vijzelturbines te implementeren in de basisstuw. Als volgende stap moet onderzocht worden of er realistische ontwerpen ontwikkeld kunnen worden voor de compenserende maatregelen waardoor het wel mogelijk wordt om een waterkrachtcentrale met meer vijzelturbines te realiseren.

6.4 Evalueren van de ontwerpalternatieven

In paragraaf 6.3 is geconcludeerd dat het ongeacht het ontwerpalternatief lastig wordt om een grootschalige waterkrachtcentrale te realiseren zonder compenserende maatregel. Zonder dergelijke maatregelen kan er niet worden voldaan aan de overstromingspreventie-eisen. Derhalve moet in de volgende stap gericht worden op ontwerpoplossingen waardoor een waterkrachtcentrale wel gerealiseerd kan worden. Zoals hierboven beschreven zijn er ontwerpoplossingen denkbaar.

Voordat ontwerpen voor de waterkrachtcentrale met compenserende maatregelen ontwikkeld gaan worden, is het zaak om een keuze tussen de huidige ontwerpalternatieven te maken. Op basis van een vergelijking van deze alternatieven kunnen er namelijk al conclusie worden getrokken met betrekking tot de positionering van de vijzelturbines in langsrichting van de rivier. Voordat ontwerpoplossingen worden verbeterd wordt dus eerst een (realistisch) voorkeursalternatief gekozen. Dit voorkeursalternatief vormt de basis voor het verdere ontwerpproces. In de huidige paragraaf wordt door middel van een evaluatie het voorkeursalternatief bepaald.

6.4.1 Opzet van het evaluatieproces:

Het voorkeursalternatief wordt geselecteerd op basis van een Multicriteria-analyse. In deze analyse worden de ontwerpalternatieven beoordeeld aan de hand van de evaluatiecriteria die zijn vastgelegd in de basis van het ontwerp (paragraaf 3.4). Vervolgens worden globale kostenramingen van de ontwerpalternatieven gemaakt. Daarna worden de totale waarden van de evaluatiecriteria afgezet tegen kosten om de ontwerpalternatieven te evalueren en uiteindelijk een voorkeursalternatief te bepalen, welke verder ontwikkeld gaat worden in het restant van dit onderzoek.

De eerste stap in het evaluatieproces is het beoordelen van de relevantie van de evaluatiecriteria. Dit verschilt namelijk per ontwerp. De evaluatiecriteria zijn gewogen in de Multicriteria-analyse met scores variërend van 0 tot 5. De toekenning van wegen aan de evaluatiecriteria is als volgt:

- **Milieu impact:** Gewicht van 3. Dit criterium heeft een aanzienlijk belang in de huidige ontwerp, maar is niet doorslaggevend. Het is relatief belangrijk omdat verstoring van de ecologie en natuur zo veel mogelijk voorkomen moet worden. Het inpassen van een nieuwe stuw brengt onvermijdelijke concessies met zich mee, waardoor het in deze ontwerp minder doorslaggevend is. De extra impact ten gevolge van de waterkrachtcentrale is relatief klein. Niettemin blijft het voorkomen van extra impact door de waterkrachtcentrale van betekenis.
- **Beheer & onderhoud:** Gewicht van 5. Dit criterium neemt een essentiële positie in, omdat het beheer en onderhoud van cruciaal belang zijn om het systeem optimaal te laten functioneren.
- **Duurzaamheid:** Gewicht van 5. Duurzaamheid is door het hele ontwerpproces al een cruciaal thema en criterium. Het doel van deze thesis is namelijk gericht op de bijdrage aan de verduurzaming van Nederland. Door in een vroeg ontwerpstadium nadrukkelijk rekening te houden met duurzaamheid kan tijdig milieuschade worden geminimaliseerd.
- **Aanpasbaarheid:** Gewicht van 3. Dit is een relatief belangrijk criterium maar niet doorslaggevend. Het is relatief belangrijk omdat nog onbekend is op welk moment Rijkswaterstaat de waterkrachtcentrale in het stuwcomplex wil inpassen, waardoor het kiezen van een relatief flexibel ontwerp voordelen heeft. Het is echter niet doorslaggevend aangezien er nog genoeg tijd is tot de bouw van de constructie start om een gedegen afweging en keuze hierin te maken.
- **Beïnvloeding van het stromingspatroon:** Gewicht van 2. Dit is een minder belangrijk criterium in de huidige ontwerp omdat er nog geen volledig ontwerp van de waterkrachtcentrale is, wat heeft geleid tot een gewicht van 2. Desalniettemin moet er naar dit aspect gekeken worden in de positionering van de vijzelturbines ten opzicht van de basisstuw.
- **Additionele veiligheid van scheepvaart:** Gewicht van 1. Dit criterium wordt als niet doorslaggevend beschouwd, omdat dit met name afhangt van het ontwerp in dwarsrichting van de rivier.
- **Complexiteit van het bouwen:** Gewicht van 1. In de huidige ontwerpfase wordt dit criterium niet als doorslag beschouwd, gezien het al complexe constructieproces van een nieuwe stuw en de inherente verstoring voor de omgeving. De veronderstelde marginale impact van de waterkrachtcentrale op deze complexiteit heeft geleid tot een gewicht van 1.

6.4.2 Waardebepaling:

De scores van de Multicriteria-analyse worden weergegeven in Tabel 6.4. De beoordelingen in deze evaluatie zijn relatief ten opzichte van elkaar. De scores voor alle criteria variëren van 0 naar 200. Een score van 200 betekent dat het desbetreffende alternatief zeer gunstig scoort ten opzicht van de andere alternatieven. Een score van 50 is een neutrale score ten opzichte van de andere alternatieven terwijl een score van 0 betekend dat het betreffende alternatief slecht presteert.

Tabel 6.4: Relatieve beoordeling van de ontwerpalternatieven (MCA)

Evaluatiecriteria	Weging	A (benedenstrooms)	B (bovenstrooms)	C (op de stuw-as)
Milieu impact	3	100	100	110
Beheer en onderhoud	5	120	100	80
Duurzaamheid	5	100	100	100
Aanpasbaarheid	3	100	100	50
Beïnvloeding van het stromingspatroon	2	100	90	120
Additionele veiligheid voor scheepvaart	1	100	50	100
Maakbaarheid	1	100	100	80
Totale gewogen score	-	2100	1930	1800

De milieu impact:

Over het algemeen scoren alle ontwerpalternatieven zeer vergelijkbaar op dit onderdeel. De impact op de ecologie en natuur op basis van de huidige variabele is hetzelfde. Er wordt aangenomen dat de positionering ten opzichte van de basisstuw hier geen significante onderscheidende impact op heeft. Het verschil tussen de ontwerpalternatieven ligt in de esthetische kwaliteit. Ontwerpalternatief C heeft een voordeel ten opzichte van de andere ontwerpalternatieven. Dit is dat door de extra staalconstructie de hoogte van de hefdeur afneemt en dus de steunpunthoogte ook. Hierdoor wordt het omgevingsaanzicht minder vervuult. Het is echter essentieel om op te merken dat dit slechts het geval is voor het deel waar de vijzelturbines worden geplaatst. De rest van de stuw vervuult het omgevingsaanzicht alsnog. Daarom scoort ontwerpalternatief C marginaal beter op het criterium milieu impact.

Beheer en Onderhoud:

Op het onderdeel beheer en onderhoud scoren de alternatieven B en C slechter dan ontwerpalternatief A. Het beheer is voor alle alternatieven vergelijkbaar aangezien ze gebruik maken van hetzelfde operationeel plan. Het onderscheid ligt echter in het onderhoud. Alternatief B kan relatief lastiger drooggezet worden. Er dient een droogzetschot bovenstrooms geplaatst te worden terwijl in de andere alternatieven de stuwdeur deze functie vervult. Het gevolg hiervan is dat een robuuster droogzetschot ontworpen dient te worden.

Ontwerpalternatief C scoort relatief gezien slechter dan zowel ontwerpalternatief A als B. De reden hiervoor is dat er een extra constructie-element, de staalconstructie, onderhouden moet worden, welke redelijk lastig bereikbaar is. De staalconstructie kan niet worden drooggezet door gebruik te maken van de hefdeur, aangezien deze op de staalconstructie gepositioneerd is. Derhalve moeten onderhoudswerkzaamheden onderwater worden uitgevoerd of is een extra droogzetschot nodig. Een bijkomend nadeel van de eerste onderhoudsaanpak is de reparatietijd langer is waardoor de

beschikbaarheid omlaag gaat. Beide opties worden als niet opportuun beschouwd. Dit heeft er in geresulteerd dat ontwerpalternatief C slechter scoort op het gebied van beheer en onderhoud.

Duurzaamheid:

Op het gebied van duurzaamheid ontlopen de ontwerpalternatieven elkaar niet veel. Er kan nog geen indicatie worden vastgesteld dat een ontwerpalternatief resulteert in een afname in het rendement van de vijzelturbines en dus afname in het opwekken van duurzame energie.

Daarnaast wordt aangenomen dat het materiaalgebruik min of meer vergelijkbaar is. Men zou kunnen verwachten dat ontwerpalternatief C wat dit betreft gunstig is doordat de hoogte van de hefdeur afneemt. Hier tegenover staat echter de noodzaak van een extra staalconstructie.

Aanpasbaarheid:

Op het gebied van aanpasbaarheid om in de toekomst nog een waterkrachtcentrale te implementeren verschillen de ontwerpalternatieven van elkaar. Op dit gebied valt met name ontwerpalternatief C uit de toon. Zoals in de basis van het ontwerp vermeld, kan het zijn dat de waterkrachtcentrale pas tijdens de levensduur van de stuw wordt ingepast of dat de vijzelturbines verwijderd moeten worden gedurende de levensduur. In beide gevallen compliceert de extra staalconstructie van ontwerpalternatief C de aanpasbaarheid. Vooral in combinatie met de kleinere hefdeuren. Wanneer de waterkrachtcentrale pas later wordt ingepast, dan zijn er eigenlijk te grote hefdeuren gebruikt. Deze dienen dan aangepast of verwijderd te worden. In het geval de waterkrachtcentrale vervangen moet worden dan levert de additionele staalconstructie en de bijbehorende aangepaste stuwdeuren complexiteit op en een beperking van ontwerp vrijheden. Het is aannemelijk dat de staalconstructie dan aangepast of verwijderd dient te worden.

Tussen de andere ontwerpalternatieven, A en B, worden geen noemenswaardige verschillen op het gebied van aanpasbaarheid gezien. Deze scoren allebei 100.

Beïnvloeding van het stromingspatroon:

Met betrekking tot dit criterium zijn een aantal verschil tussen de alternatieven te zien. Met name ontwerpalternatief C wijkt af van de andere alternatieven. Op basis van een eerste inschatting wordt verondersteld dat ontwerpalternatief A en B een vergelijkbaar stromingspatroon hebben. Het bovenstrooms plaatsen van de vijzelturbines wordt als enigszins nadeliger beoordeelt aangezien er een aparte stroming tussen de hefdeur en de vijzelturbine kan ontstaan wanneer de hefdeur gesloten wordt. Mogelijk resulteert dit in een dynamische belasting op de vijzelturbines.

Ontwerpalternatief C kan mogelijk een gunstige werking hebben op het stromingspatroon. De staalconstructie kan er voor zorgen dat het water geleidelijk aanstroomt waardoor er minder turbulente stroming is, wat uiteindelijk ten mogelijk ten gunste kan komen aan het rendement van de vijzelturbines. In de ontwerpalternatieven A en B kan een situatie ontstaan waarin de onderste helft van de waterkolom voor de vijzelturbine stilstaat of zelfs een neer voorkomt. Dit kan een negatieve impact op hebben op het rendement. Voor nu wordt aangenomen dat een dergelijk staalconstructie het stromingspatroon positief beïnvloed. Op basis hiervan scoort ontwerpalternatief C het beste op dit evaluatiecriterium. In een vervolgonderzoek moet nog wel worden onderzocht of dit daadwerkelijk het geval is.

Additionele veiligheid voor scheepvaart:

Op basis van dit criterium scoort met name ontwerpalternatief B slecht. Het plaatsen van de vijzelturbines bovenstrooms van de 'basisstuw' brengt additionele risico's met zich mee. De reden hiervoor is dat de vijzelturbine minder opvallen dan een stuwdeur. Deze komen namelijk minder ver boven de waterlijn uit

tijdens hoogwater. Wanneer de vijzelturbines dan voor de stuwdeuren worden gepositioneerd, kan een schipper het mogelijk pas te laat door hebben en dus op de vijzelturbines varen. Naast dat de vijzelturbines minder opvallen, is de consequentie van falen voor scheepvaart ook ernstiger. Mocht in dit ontwerpalternatief op een manier de turbine losraken dan kan dit tot ongewenste consequenties voor de basisstuw leiden. De turbines kunnen na het losraken botsen op de hefdeuren. Dit leidt hoogstwaarschijnlijk tot het tijdelijk niet functioneren van de stuw. Hierdoor kan de beschikbaarheid ernstig achteruit gaan waardoor scheepvaart op de Maas mogelijk tijdelijk stil komt te liggen.

Verder wordt er tussen de ontwerpalternatieven A en C geen verschil gezien in de veiligheid van scheepvaart. Deze scores beide 100 en ontwerpalternatief B scoort 50 op het gebied van dit evaluatiecriterium.

Maakbaarheid:

Er wordt aangenomen dat alle alternatieven maakbaar zijn. Ontwerpalternatief C onderscheidt zich omdat een extra constructiestap nodig is. Bij ontwerpalternatief A en B hoeven enkel vijzelturbines in de waterweg geplaatst te worden. Echter bij ontwerpalternatief C dient ook een staalconstructie geplaatst te worden. Op basis hiervan is de maakbaarheid van alternatief C ingeschat als relatief lastiger ingeschat. De mate van complexiteit hangt echter wel af van het moment van inpassen van de waterkrachtcentrale: bij de initiële bouw van de toekomstige stuw of tijdens de levensduur van de stuw. In het laatste geval, moet mogelijk ook nog de stuwdeur worden aangepast.

6.4.3 Kostenbepaling:

De kosten voor de ontwerpalternatieven zijn kwalitatief ingeschat. Hiervoor zijn scores gebruikt die variëren van 0 naar 200 gebruikt. De beoordeling hiervan is tevens relatief aan elkaar. Een score van 200 betekent dat een alternatief duurder is dan het alternatief met een score van 50. Het referentiepunt voor de scores is op 100 gezet. In Tabel 6.5 is de beoordeling van de ontwerpalternatieven uiteengezet.

Tabel 6.5: Relatieve beoordeling van de kosten.

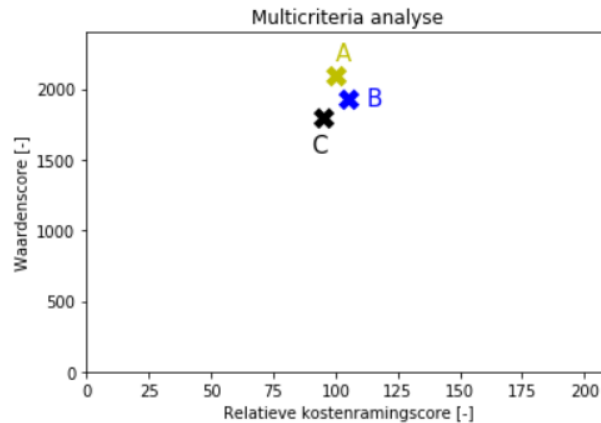
Parameter	A (benedenstrooms)	B (bovenstrooms)	C (op de stuw-as)
Kosten	100	105	95

Tussen ontwerpalternatief A en B is het verschil in kosten marginaal. Het enige wat beweert zou kunnen worden is dat voor ontwerpalternatief A een minder robuuster droogzetschot nodig is en dus duurder goedkoper is.

Hoe ontwerpalternatief C ten opzichte van de andere twee ontwerpalternatieven presteert met betrekking tot de kosten kan twee kanten op worden beredeneerd. Aan de ene kant kan de reductie in hefdeurhoogte leiden tot een lagere kosten omdat minder materiaal nodig is, het hefsysteem minder hefvermogen aan hoeft te kunnen en de deur hoeft minder robuust te worden uitgevoerd om dat de hydraulische belasting minder is. Daartegenover staat echter de extra kosten van de additionele staalconstructie. Hoe deze twee kosten aspecten zich tot elkaar verhouden is op dit moment lastig in te schatten omdat een gedetailleerder ontwerp, voorkeur heeft een constructieve ontwerpplus, hiervoor nodig is. In de huidige conceptuele ontwerpfase wordt aangenomen dat dit ontwerpalternatief een kosten reductie oplevert. Echter wordt het voordeel als marginaal beschouwd aangezien verwacht wordt dat dit niet de bepalende kostenfactor voor het realiseren van een haalbare businesscase is voor de waterkrachtcentrale. Onder de streep ontlopen de kosten van de ontwerpalternatieven elkaar dus weinig in de huidige ontwerpplus.

6.4.4 Eindevaluatie:

De ontwerpalternatieven worden geëvalueerd door de scores en kosten uit te zetten in een grafiek. Deze grafiek is weergegeven in Figuur 6.11.



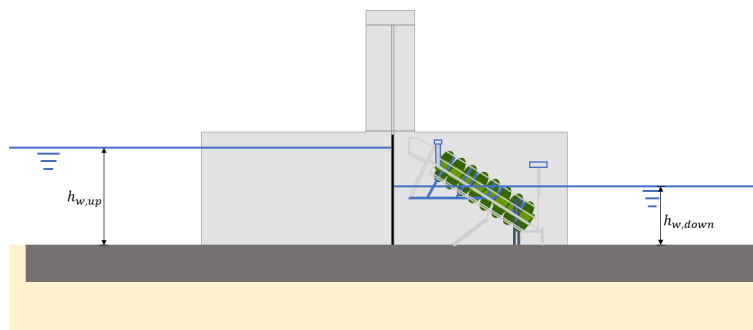
Figuur 6.11: Grafische representatie van de Multicriteria-analyse

In Figuur 6.11 is duidelijk zichtbaar dat uit de Multi-criteria analyse volgt dat ontwerpalternatief A het meest geschikt is. Het kosten-baten ratio van dit ontwerpalternatief is het gunstigst. Dit wordt gezien als het voorkeursalternatief om mee verder te werken in het restant van dit onderzoek. Voor dit ontwerpalternatief moet naar ontwerpoplossingen worden gezocht waardoor het hydraulisch wel haalbaar is om meer dan twee vijzelturbines toe te passen.

6.5 Presentatie van het voorkeursalternatief

Het heeft de voorkeur om de vijzelturbines ten opzichte van de basisstuw te positioneren zoals in ontwerpalternatief A het geval is. De vijzelturbines moeten dus direct benedenstrooms van de hefdeuren van de basisstuw worden geplaatst. In Figuur 6.12 wordt een dergelijk ontwerp nogmaals weergegeven.

Het huidige ontwerp betreft enkel een voorkeursontwerp in langsrichting van de rivier. De volgende stap omvat het ontwikkelen van een volledig waterkrachtcentrale-ontwerp. In paragraaf 6.3 is geconcludeerd dat er zonder compenserende maatregelen het slechts mogelijk is om twee vijzelturbines te implementeren. Het doel van dit onderzoek is om waterkracht grootschalig te benutten. Het is daarom zaak om in de volgende fase de aangedragen ontwerpmaatregelen verder te onderzoeken. Door een van de ontwerpmaatregelen toe te passen moet het hydraulisch haalbaar worden om meer dan twee vijzelturbines toe te passen.



Figuur 6.12: voorkeusalternatief om vijzelturbines in de basisstuw te implementeren, ontwerpalternatief A.

7 Verbetering van het voorkeursconcept van een waterkrachtcentrale

De in hoofdstuk 6 gecreëerde ontwerpalternatieven voldoen stuk voor stuk niet aan de hydraulische eisen. Het is daarom zaak om het voorkeursconcept uit hoofdstuk 6 dusdanig te verbeteren dat het hydraulisch wel mogelijk is om een waterkrachtcentrale te realiseren in de basisstuw. In het huidige hoofdstuk worden meerdere ontwerpoplossingen ter verbetering van het voorkeursconcept onderzocht. Hiervoor is wederom de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethodologie doorlopen. Het eindresultaat van deze ontwerpplus is een realistisch ontwerp voor het implementeren van een waterkrachtcentrale in de basisstuw.

7.1 Conceptvorming

Ontwerpalternatief A uit hoofdstuk 6, benedenstroomse plaatsing van de vijzelturbine, wordt beschouwd als het voorkeursalternatief en zal in de huidige ontwerpfasen daarom fungeren als uitgangspunt.

In paragraaf 6.2.3 werd het opstuwingsprobleem veroorzaakt door implementatie van de waterkrachtcentrale uiteengezet. De basisstuw is op een dusdanige manier ontworpen dat er geen opstuwing optreedt die de waterveiligheid in gevaar brengt. Echter, wanneer weerstand, in dit geval een waterkrachtcentrale, wordt toegevoegd aan de basisstuw leidt dit tot een opstuwing die de waterveiligheid in gevaar brengt. Door middel van brainstormsessies zijn twee oplossingsprincipes onderscheiden waardoor het implementeren van een waterkrachtcentrale in de basisstuw wel mogelijk moet zijn. Deze ontwerpoplossingen hebben geresulteerd in drie verbeterde ontwerpconcepten die in de volgende paragrafen worden toegelicht.

7.1.1 Onderscheid oplossingsprincipe ten behoeve van vorming verbeterde concepten

Twee oplossingsprincipes worden onderscheiden:

- Oplossingsprincipe 1: Het tijdelijk vergroten van de afvoercapaciteit.

Dit eerste oplossingsprincipe is ontstaan om het opstuwingsprobleem te minimaliseren. In paragraaf 6.2.3 wordt uitgelegd dat opstuwing alleen een gevaar vormt voor de waterveiligheid tijdens maatgevend hoogwater. Zelfs een kleine opstuwing kan in deze situatie al leiden tot een overstrooming en uiteindelijk het bezwijken van de dijk. Gedurende de rest van de tijd veroorzaakt de toegevoegde weerstand geen opstuwing die de waterveiligheid in gevaar brengt. Daarom is het innovatieve idee ontstaan om tijdens deze periode de weerstand tijdelijk uit de rivier te halen. Dit heeft geleid tot het verbeterde ontwerpconcept A.1, waarbij gebruik wordt gemaakt van uitneembare vijzelturbines.

- Oplossingsprincipe 2: Permanente compenserende maatregelen

Het tweede oplossingsprincipe betreft het permanent vergroten van de afvoercapaciteit. Dit wordt bereikt door het doorstroomoppervlak van de basisstuw in absolute zin te vergroten. Door het absolute doorstroomoppervlak, het natte oppervlak van de uiterwaarde en het zomerbed samen, te vergroten wordt er ondanks de aanwezigheid van een waterkrachtcentrale netto geen weerstand aan het riviersysteem toegevoegd. Hierdoor blijft er voldoende afvoercapaciteit behouden en treedt er geen onacceptabele opstuwing op, zelfs met aanwezigheid van een waterkrachtcentrale.

Twee manieren zijn bedacht om een waterkrachtcentrale te implementeren zonder netto weerstand toe te voegen aan de rivier:

- A.2: Plaatsing van de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde. (§7.1.3)

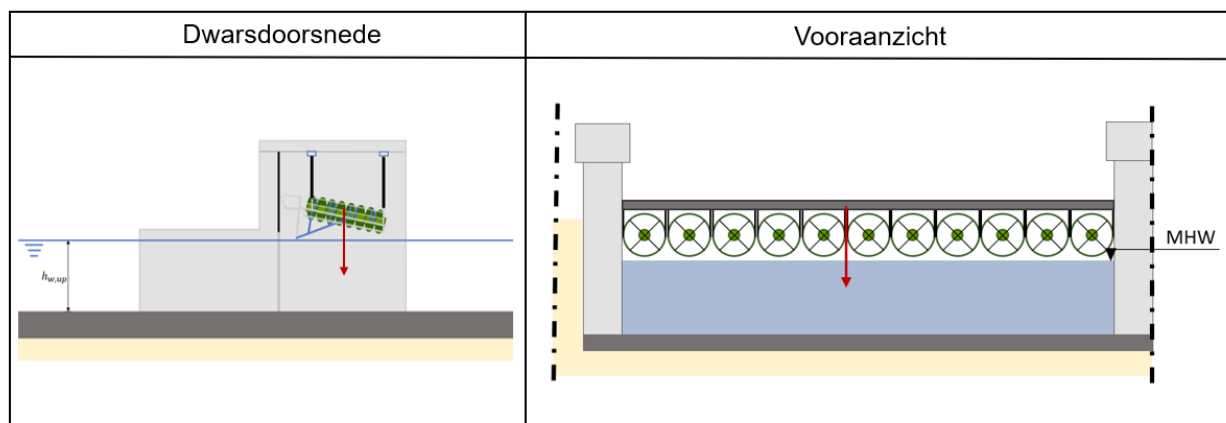
- A.3: Integratie van vijzelturbines in de steunpunten.

(§7.1.4)

7.1.2 “Verbeterd” ontwerpconcept A.1 – Uitneembare vijzelturbines

Door de vijzelturbines uitneembaar te maken, wordt de weerstand die leidt tot een problematische opstuwing uit de rivier gehaald. Op het kritische moment, maatgevend hoogwater, is de hydraulisch situatie dan gelijk aan die van de basisstuw, die voldoet aan de hydraulische eisen. Hierdoor blijft de volledige afvoercapaciteit van de basisstuw beschikbaar tijdens hoogwater.

Op verscheidene manieren kunnen de vijzelturbines uitneembaar worden gemaakt. In de huidige paragraaf wordt ter conceptvorming de variant met een verticaal hefsysteem genomen. Een dergelijk systeem wordt in Figuur 7.1 weergegeven tijdens de fase dat de turbines uit de rivier genomen zijn.



Figuur 7.1: schetsontwerp van ontwerpalternatief A.1 in de situatie dat de vijzelturbines uit de rivier genomen zijn ($Q > 1800 \text{ m}^3/\text{s}$). LINKS: doorsnede ontwerp in langsrichting van de rivier. RECHTS: vooraanzicht zonder de hefdeuren.

Het operationeel plan voor het uitneembare systeem bestaat uit drie fases:

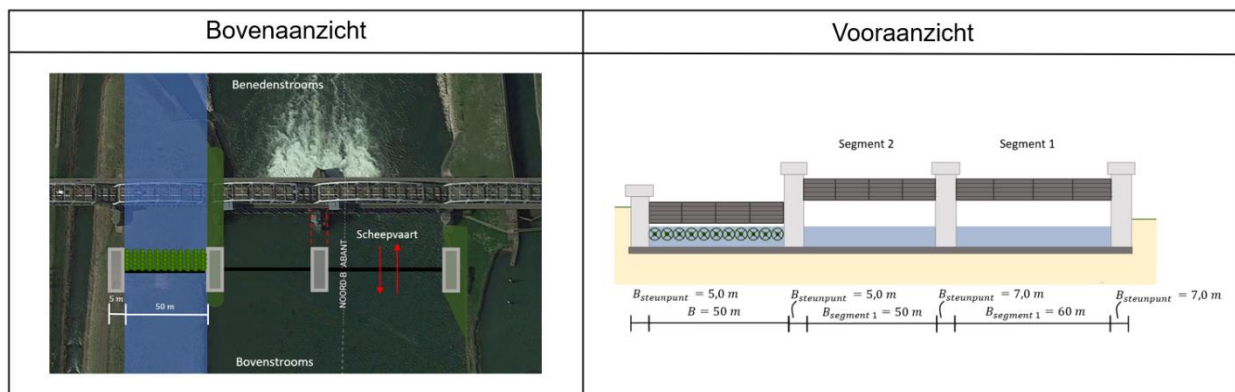
1. In deze fase zijn de hefdeuren van de basisstuw gesloten en zijn de vijzelturbines nog niet operationeel. Op dit moment hangen de vijzelturbines in de rivier.
2. Vervolgens wordt de hefdeur voor de vijzelturbines omhoog geheven en worden de vijzelturbines geleidelijk ingeschakeld. De vijzelturbines hangen op dit moment in de rivier en wekken energie op.
3. Nadat de stuw gestreken is, wekken de vijzelturbines geen energie meer op en kunnen ze zonder verlies in energieproductie worden geheven. Het is belangrijk om de vijzelturbines te heffen voordat de maatgevend hoogwaterstand (ongeveer $4000 \text{ m}^3/\text{s}$) wordt bereikt.

Het belang van optimale energieproductie conflicteert niet met het belang van het uitneembaar maken van de vijzelturbines voor de waterveiligheid. Dit komt doordat er een aanzienlijk verschil is tussen het moment van strijken van de stuw, dat plaatsvindt bij een debiet van ongeveer $1800 \text{ m}^3/\text{s}$, en het kritische moment voor opstuwing, de maatgevend hoogwater condities ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

In het functioneel ontwerp, paragraaf 7.2 wordt dit ontwerp verder uitgewerkt.

7.1.3 “Verbeterd” ontwerpconcept A.2 – Plaatsing van de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde

Ter compensatie van de toegevoegde weerstand, de waterkrachtcentrale, wordt een deel van de uiterwaarde uitgegraven om daar vijzelturbines te plaatsen. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in Figuur 7.2. Het optimaal aantal vijzelturbines en de beste locatie voor deze uitbereiding van de basisstuw worden bepaald in het functioneel ontwerp, paragraaf 7.2.

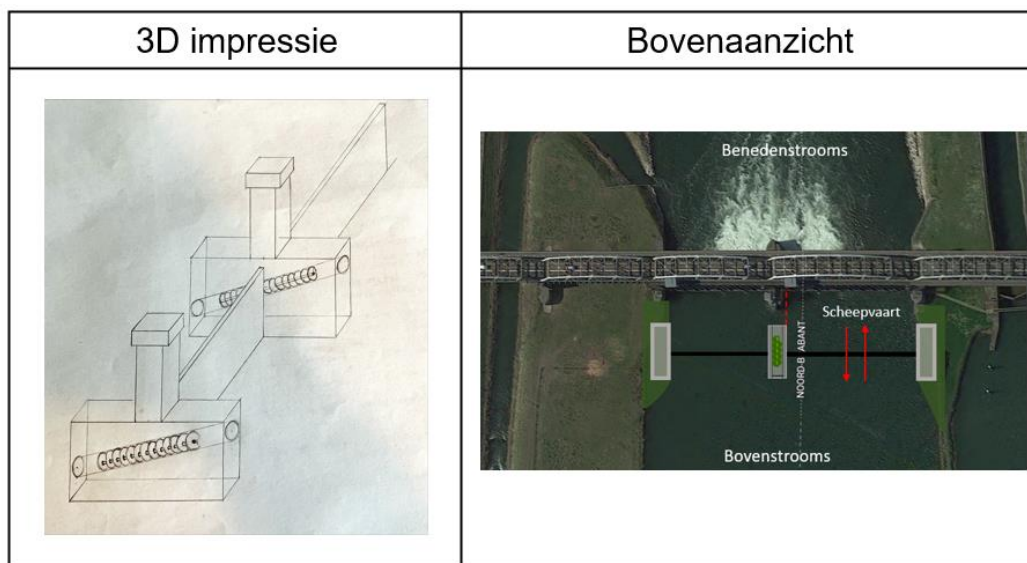


Figuur 7.2: Schetsontwerp van ontwerpalternatief A.2, een waterkrachtcentrale in de uiterwaarde. LINKS: bovenaanzicht. RECHTS: vooraanzicht.

7.1.4 “Verbeterd” ontwerpconcept A.3 – Integratie van vijzelturbines in de steunpunten

In ontwerpconcept A.3 worden vijzelturbines geïntegreerd in de steunpunten van de basisstuw. Normaal gesproken laten de steunpunten geen water door en werken deze alleen als weerstand. Door de vijzelturbines in de steunpunten te integreren, wordt dit oppervlak ook gebruikt om extra afvoercapaciteit te creëren. Er is dan geen compenserende maatregel nodig omdat de vijzelturbines geen reductie in afvoercapaciteit veroorzaken en dus geen opstuwning.

Figuur 7.3 toont een impressieschets en een bovenaanzicht van ontwerpconcept A.3. Tijdens maatgevend hoogwater condities staan de vijzelturbines volledig open. Op dat moment wordt er geen energie opgewekt maar stroomt wel een debiet van ongeveer 8 m³/s door de vijzelturbine.



Figuur 7.3: Ontwerptekeningen alternatief A.3, vijzelturbines in de steunpunten. LINKS: een impressieschets. RECHTS: een bovenaanzicht waarin in het middelste steunpunt een vijzelturbines is geïntegreerd.

7.2 Functioneel uitwerking

In de paragraaf worden de verbeterde ontwerpconcepten uitgewerkt om ze functioneel te maken. Zoals hierboven beschreven zijn er nog meerdere variaties binnen de ontwerpconcepten denkbaar. In deze paragraaf worden ontwerpkeuzes gemaakt waarbij met name rekening wordt gehouden met functionele eisen zodat het systeem op de gewenste manier gaat functioneren. Daarnaast spelen ook evaluatiecriteria een rol bij het maken van deze ontwerpkeuzes.

7.2.1 Functionele uitwerking ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)

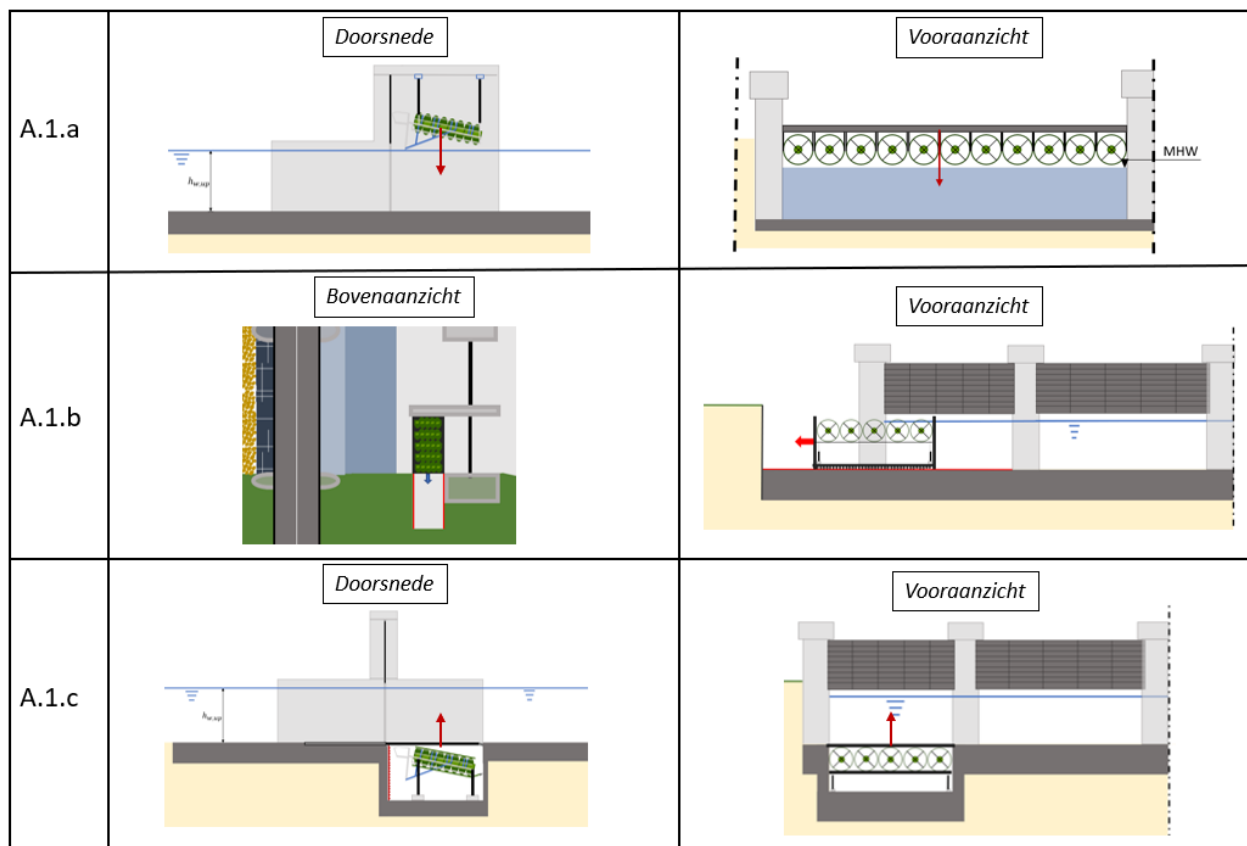
Tot nu toe ligt er alleen een ontwerpconcept. Een functioneel ontwerp ontbreekt nog, laat staan een enigszins optimaal ontwerp. Om het ontwerp functioneel te maken moeten nog een aantal afwegingen worden gemaakt aangezien de uitwerking van het concept kan variëren. Deze paragraaf bevat een overzicht van alle gemaakte keuzes om tot een werkend ontwerp te komen voor het verbeterde ontwerpconcept A.1, uitneembare vijzelturbines. Een gedetailleerde beschrijving van alle afwegingen is te vinden in bijlage C.

1. Keuze in de manier om vijzelturbines uitneembaar te maken

Er is een aparte ontwerplus doorlopen om het systeem dat de vijzelturbines uitneembaar moet maken te ontwerpen. De volledige ontwerplus van dit subsysteem wordt beschreven in bijlage C.1. Drie manieren worden serieus overwogen om de vijzelturbines uitneembaar te maken:

- Ontwerpalternatief A.1.a – Een verticaal hefsysteem omhoog;
- Ontwerpalternatief A.1.b – Een verticaal hefsysteem omlaag de fundering in;
- Ontwerpalternatief A.1.c – Een horizontaal rolsysteem de uiterwaarde in.

In Figuur 7.4 worden de ontwerptekeningen van de variant weergegeven.



Figuur 7.4: Ontwerptekeningen van de variantie in de manier van het uitneembaar maken van de vijzelturbines.

Op basis van een Multicriteria-analyse wordt uiteindelijk de voorkeursvariant gekozen. De volgende evaluatiecriteria zijn opgenomen in de Multicriteria-analyse: milieu impact, beheer & onderhoud, duurzaamheid & circulariteit, de complexiteit van het construeren en de mate van hydraulische complexiteit meegenomen. De varianten zijn kwalitatief beoordeeld ten opzichte van elkaar op basis van deze evaluatiecriteria. Vervolgens is er een globale kostenraming gemaakt waarna de varianten met elkaar vergeleken zijn op basis van het kosten-baten-ratio.

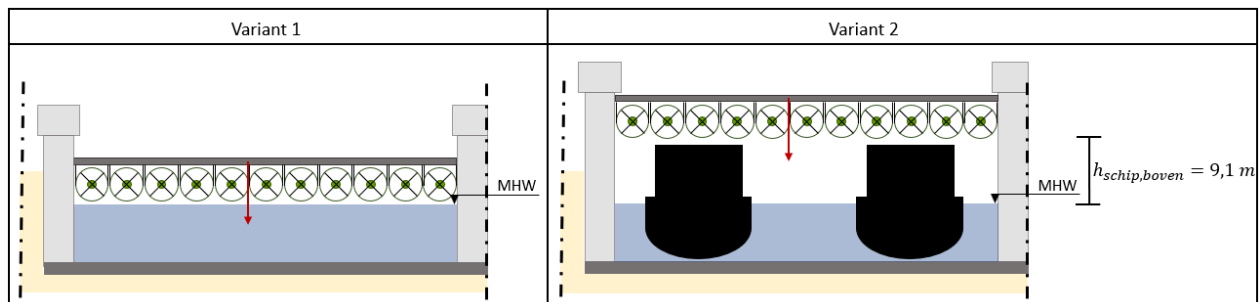
Op basis van de Multicriteria-analyse wordt gekozen voor ontwerpalternatief A.1.a, een verticaal hefsysteem omhoog. Dit alternatief heeft veruit het beste kosten-baten-ratio. Het scoort vooral goed op de evaluatiecriteria 'beheer & onderhoud' en 'duurzaamheid & circulariteit'. Daarnaast is dit een relatief goedkope variant, omdat er geen extra grondverzet nodig is. Het verticale hefsysteem omhoog wordt verder uitgewerkt in het restant van de huidige ontwerpplus, paragraaf 7.1.2.

2. Bepalen van de hefhoogte

In bijlage C.2 wordt gedetailleerd beschreven hoe de hefhoogte is bepaald. Voor het bepalen van de hefhoogte zijn twee maatgevende eisen van belang:

1. De doorvaarthoogte tijdens de maatgevend hoogwaterstand moet minimaal 9,1 m bedragen (Deze eis is gebaseerd op de eisen S.8 en S.12 uit de basis van het).
2. De vijzelturbines moeten boven de maatgevend hoogwaterstand geheven kunnen worden omwille van de waterveiligheid (deze eis is gebaseerd op eis O.2 uit de basis van het ontwerp).

Figuur 7.5 toont twee ontwerpen voor het hefsysteem. Variant 1 voldoet enkel aan eis 2, waarbij de vijzelturbines net boven de waterlijn worden geheven. Variant 2 voldoet aan beide eisen en maakt scheepvaart onder de turbines door mogelijk.



Figuur 7.5: Links: variant 1 waarin de vijzelturbines net boven de rivier worden geheven. RECHTS: variant 2 waarin de vijzelturbines dusdanig hoog geheven worden dat scheepvaart door de doorvaartopening mogelijk is.

De keuze in hefhoogte heeft een grote impact op het ontwerp, omdat dit indirect de locatie en het maximaal aantal toe te passen turbines bepaalt:

- Variant 1: in deze variant is het alleen mogelijk om vijzelturbines te installeren in de stuwopeningen die niet bevaarbaar zijn. Het installeren van turbines op een dergelijke manier verbiedt dat schepen door de desbetreffende opening kunnen varen. Aangezien scheepvaart mogelijk moet blijven kunnen in de andere opening geen turbines worden geplaatst.
- Variant 2: in deze variant is het hefsysteem geschikt om vijzelturbines over de volledige breedte van de basisstuw te plaatsen. Ondanks de aanwezigheid van vijzelturbines blijven de doorvaartopeningen geschikt voor scheepvaart; de schepen kunnen tijdens hoogwater onder de turbines door varen.

Een gedetailleerde afweging tussen de varianten wordt gemaakt in bijlage C.2. Uiteindelijk wordt gekozen voor variant 1 vanwege de positieve impact op de ruimtelijke kwaliteit en de robuustheid van het systeem. De scheiding van de twee gebruiksfuncties, scheepvaart en energieopwekking, bevordert de robuustheid van het systeem, aangezien falen van de ene functie in deze variant geen invloed heeft op het ander functionele-aspect. Het verschil in kosten tussen de varianten wordt als verwaarloosbaar gezien waardoor de bovenstaande motivatie er toe heeft geleid om voor variant 1 te kiezen.

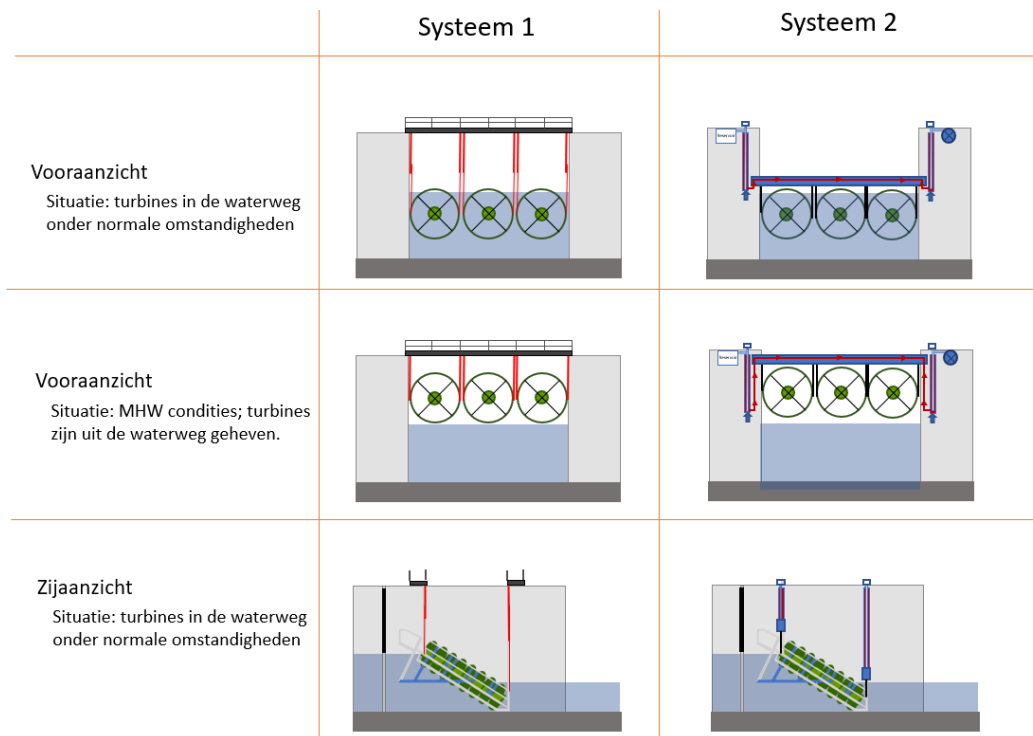
3. Keuze in type bewegingswerk

Wat betreft het type bekeringswerk moeten twee keuzes worden gemaakt:

- Keuze 1: Het heffen van vijzelturbines individueel of het heffen van de vijzelturbines als geheel door de draagbalk te heffen?
- Keuze 2: Hydraulisch of mechanisch heffen?

Keuze 1 - Individueel heffen of een draagbalk heffen:

In Figuur 7.6 worden de kansrijke systemen weergegeven. Het eerste systeem maakt gebruik van vaste draagbalken, of loopbordessen, waar de vijzelturbines met hydraulische cilinders aan zijn opgehangen. Vier hydraulische cilinders per vijzelturbine zorgen voor het heffen, terwijl de draagbalk rigide op de steunpunten ligt. Bij de tweede optie hangen daarentegen juist alle vijzelturbine star aan een draagbalk en beweegt de draagbalk. Bewegingswerken in de steunpunten zorgen ervoor dat de draagbalk met de vijzelturbines als geheel verticaal kan bewegen.



Figuur 7.6: Verscheidene aanzichten van twee hefsystemen. LINKS: systeem 1 waarbij de vijzelturbines apart van elkaar geheven kunnen worden. RECHTS: systeem 2 waarbij de vijzelturbines als geheel worden geheven door een draagbalk te heffen.

In bijlage C.3 wordt een kwalitatieve afweging tussen de systemen beschreven. Uiteindelijk wordt gekozen voor systeem 2. Zowel de energieopbrengst als de kosten voor beide systemen zijn min of meer vergelijkbaar. Voordelen op het gebied van robuustheid van het systeem, het beheer en onderhoud en de impact op de ruimtelijke kwaliteit hebben geleid tot de keuze voor systeem 2.

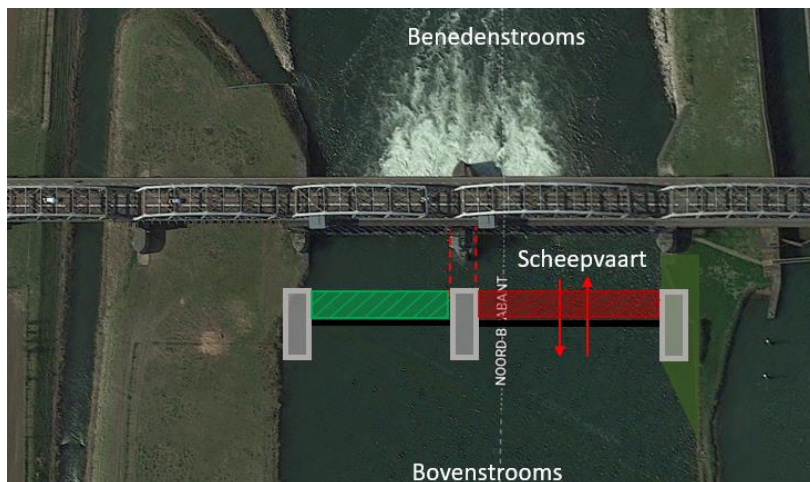
Keuze 2 – hydraulisch of mechanisch heffen:

Er zijn twee potentiële bewegingswerken beschikbaar om het gekozen systeem te heffen. Dit betreft het hydraulische heffen met cilinders of het mechanisch heffen door middel van contragewicht. Uiteindelijk is er op basis inschatting gemaakt door van der Kreeke (van der Kreeke & van Heereveld, 2021) op basis van zijn ervaring gekozen voor een mechanisch bewegingswerk. In bijlage C.3 is voor deze keuze een bondige onderbouwing gegeven.

4. Locatiekeuze

De volgende stap is het bepalen van geschikte locaties in de basisstuw voor de implementatie van uitneembare vijzelturbines.

Doordat de vijzelturbines uitneembaar gemaakt zijn, wordt het maximaal aantal toepasbare vijzelturbines niet langer gelimiteerd door de overstromingspreventie-eisen. In principe zou het mogelijk zijn om vijzelturbines over de volledige breedte van de stuw te plaatsen. Er zijn echter andere limiterende factoren. Vanwege de combinatie van scheepvaart-eisen en de gekozen hefhoogte is het niet mogelijk om vijzelturbines over de volledige stuwbreedte te implementeren. De linker doorvaartopening is ongeschikt voor scheepvaart vanwege de beperkte breedte. Daarom is dit de ideale stuwopening om uitneembare vijzelturbines te plaatsen. In Figuur 7.7 wordt het geschikte gebied voor het plaatsen van uitneembare vijzelturbines weergegeven in het groen.



Figuur 7.7: Een bovenaanzicht met daarin geschikte en ongeschikte gebieden voor het plaatsen van vijzelturbines in de basisstuw aangegeven. In het groen gearceerde gebied kunnen uitneembare vijzelturbines geplaatst worden.

5. Bepalen van het aantal vijzelturbines

Nu de geschikte ruimte is vastgesteld, kan het “optimaal” aantal vijzelturbines voor ontwerpconcept A.1 worden bepaald.

De eerste stap is het creëren van varianten. Op basis van een ruimtelijk ontwerp is vastgesteld dat het aantal turbines kan variëren tussen de 1 en 11 vijzelturbines. Het is belangrijk om op te merken dat wanneer bij de varianten waarin minder dan 11 vijzelturbines worden toegepast het linker segment in tweeën wordt verdeelt. Er is een extra steunpunt en twee stuwdeuren nodig om de waterkrachtcentrale en een stuwopening waar het water vrij af kan stromen van elkaar te scheiden. Waarom dit functioneel noodzakelijk is staat beschreven in bijlage B.5.

Door het extra steunpunt wordt het mogelijk om te variëren met het aantal vijzelturbines. varianten mee te nemen in de evaluatie tussen de verbeterde ontwerpconcepten (A.1, A.2 en A.3). Bovendien moeten naderhand nog meerdere ontwerpplussen worden doorlopen voordat het definitieve en optimale ontwerp bereikt wordt. Als vastgesteld is welk van de drie ontwerpconcepten de beste oplossing is voor het waterveiligheidsprobleem, dan kan binnen dat ontwerp nogmaals gekeken worden of het ontwerp wat blijkt uit deze evaluatie ook daadwerkelijk de optimale is.

Het is mogelijk om a priori aan de eindevaluatie al een aantal waardevolle conclusies te trekken waardoor niet elke variant meegenomen hoeft te worden. Het optimaal aantal vijzelturbines wordt als economisch optimaal beschouwd in de huidige ontwerpfase. In de basis van het ontwerp wordt namelijk aangegeven dat het van essentieel belang is dat een rendabele businesscase wordt gerealiseerd. Door een variant te kiezen die hieraan voldoet wordt het ontwerpconcept als economisch haalbaar beschouwd. Voor het bepalen van de economische optimale variant wordt een analyse gebruikt die uit vier delen bestaat: bepalen van de financiële opbrengst, globale kostenraming, het vergelijken van de kosten en baten door de netto contante waarde van de winst te bepalen en het berekenen van het project rendement (in het Engels: Internal Rate of Return). In de laatste twee delen wordt de optimale variant bepaald.

Deel 1 – Bepalen van de financiële opbrengst:

Voor het bepalen van de financiële-opbrengst is een python-script ontwikkeld waarin het aantal turbines de invoervariabele is. Andere belangrijke invoerparameters zijn de terugverdientijd en het scenario voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs. De totale financiële-opbrengst wordt bepaald door de netto contante waarde (in het Engels: Net Present Value) van de energieopbrengst over de terugverdientijd te

berekenen. Om dit te bepalen wordt de methode gebruikt die beschreven wordt in bijlage B, “Structuur van het financiële model”.

In het kort, wordt de financiële opbrengst van de waterkrachtcentrale bepaald door de netto contante waarde van de financiële jaaropbrengsten over de terugverdientijd bij elkaar op te tellen. Voor de terugverdientijd is aangenomen dat dit 15 jaar is.

Om de netto contante waarde van de financiële jaaropbrengst te bepalen moet de gemiddelde energieopbrengst over een jaar worden bepaald. De financiële jaaropbrengst wordt vervolgens bepaald door de gemiddelde energieopbrengst in een jaar te vermenigvuldigen met de elektriciteitsprijs.

Voor de berekening van de financiële jaaropbrengst is de gemiddelde jaarwaarde van de opgewekte elektriciteit gebruikt. Over de terugverdientijd, die op 15 jaar is gesteld, is de gemiddelde jaarwaarde een correcte representatie. In deze periode wordt namelijk zowel goede (natte), als slechte (droge) jaren verondersteld te zitten.

Aangezien de elektriciteitsprijs sterk fluctueert en er subsidies kunnen worden verkregen voor duurzame energie, is het belangrijk om rekening te houden met uiteenlopende scenario's voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs. Deze scenario's worden bepaald op basis van een data-analyse, zoals beschreven in bijlage B. De financiële opbrengst wordt dus vier keer berekend met variërende scenario's voor de elektriciteitsprijs. Door gebruik te maken van verschillende scenario's wordt het voor Rijkswaterstaat en een derde partij inzichtelijk wanneer het gunstig is om een investering te doen.

De methode om de gemiddelde energieopbrengst in een jaar te bepalen wordt beschreven in bijlage A, ‘Methode voor het bepalen van de energieopbrengst’. Hierin staat uitgelegd hoe met een parametrisch model, dat in python is ontwikkeld, de gemiddelde energieopbrengst in een jaar wordt bepaald. Dit model maakt gebruik van historische data. Op basis van deze historische data worden het vermogen en het aantal vollasturen bepaald. De manier waarop beide parameters worden bepaald staat uitvoerig beschreven in bijlage A. Wanneer een waarde voor beide parameters gevonden is kan de gemiddelde energieopbrengst in jaar worden berekend. Deze methode staat volledig en uitvoerig beschreven in bijlage A. Het pythonscript dat volgens deze methode is ontwikkeld wordt voor elke variant uitgevoerd.

Nadat voor elke variant de gemiddelde energieopbrengst in een jaar bepaald is, worden deze waarden ingevoerd in het deel van het pythonscript waarmee de financiële opbrengst wordt berekend. De achterliggende methode voor dit deel van het pythonscript staat beschreven in bijlage B.

Deel 2 – Globale kostenraming:

Om uiteindelijk het optimaal aantal vijzelturbines te bepalen dient naast de impact op de opbrengst ook een inschatting van de impact van het aantal vijzelturbines op de kosten verkregen te worden. In gedeelte wordt de impact van het aantal vijzelturbines op de kosten onderzocht door een globale kostenraming te maken. De kosten worden berekend met een variërend aantal vijzelturbines van 1 t/m 11.

De kostenraming in dit onderzoek is gebaseerd op referentieprojecten en kentallen. De kosten van het gros van de constructie-elementen worden bepaald door kentallen voor de prijs te gebruiken die afkomstig zijn van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.). Door het volume van constructie-elementen te berekenen kunnen met de kentallen de kosten bepaald worden.

Uiteindelijk wordt de netto contante waarde van de investeringskosten en de operationeel kosten bepaald. Deze worden in het financiële model voor de netto contante waarde berekening meegenomen zoals wordt beschreven in Bijlage B.

De kosten die opgenomen zijn in de kostenramingen zijn:

- De materiaalkosten. Alleen die kosten die uitsluitend kunnen worden toegeschreven aan de waterkrachtcentrale en de ondersteunende constructie. Wat er onder materiaalkosten valt hangt specifiek af van de ontwerpconcepten. Verderop volgt een opsomming van de specifieke kostencomponenten voor ontwerpconcept A.2.
- De operationele kosten worden als percentage van de investeringskosten betrokken. Jaarlijks wordt 5% van de investeringskosten in rekening gebracht als operationele kosten. Voor de huidige ontwerpfase, een conceptueel ontwerp, volstaat een benadering van deze kosten door een percentage van de investeringskosten te nemen. In het rapport “Duurzame energie locatie Panheel” (Pronk et al., 2017) wordt beschreven dat verwacht mag worden dat de onderhoudskosten in de orde van 5 procent van de investeringskosten zullen liggen. Er wordt aangenomen dat dit percentage onafhankelijk is van het aantal vijzelturbines.

Kosten die buiten de scope vallen zijn de aanvullende onderzoeks- en ontwikkelingskosten die nog nodig zijn, de bouwkosten, personeelskosten, transportkosten en kosten die voortkomen uit de impact op de faalkansverdeling en daarmee het verdere constructieve ontwerp van de basisstuw. Met deze aspecten worden ook bijvoorbeeld de indirecte kosten van een waterkrachtcentrale op die van bodembescherming bedoeld. Daarnaast moeten andere constructie-componenten mogelijk robuuster worden uitgevoerd door de impact op de faalkansverdeling. En daarom duurder worden. In de huidige conceptuele ontwerpfase was het lastig om al deze kostenaspecten te betrekken. Met name omdat onduidelijk en onzeker is aan welke kostenpost deze aspecten worden toegeschreven.

De investeringskosten worden zoals hierboven op basis van materiaalgebruik berekend. De extra materiaalkosten om een waterkrachtcentrale in de uiterwaarde te realiseren die worden opgenomen in de huidige kostenraming zijn opgebouwd uit de volgende kostenposten:

- De vijzelturbines;
- Additionele steunpunten ten opzichte van het basisstuw ontwerp;
- Overige kostencomponenten die beïnvloed worden doordat een extra steunpunt nodig is;
- Grondverzettingswerk.

Voordat de kosten van de bovenstaande componenten worden berekend is noodzaak om nog een aantal aannames in de kostenraming te geven:

- Voor de staffel van vijzelturbines wordt aangenomen dat 20 vijzelturbines ongeveer 20% goedkoper zijn dan 1 vijzelturbines (van Heereveld, 2022). Dit percentage loopt exponentieel met het aantal vijzelturbines dat besteld wordt.
Het bovenstaande percentage is gebaseerd op de kennis van een expert met betrekking tot de markt van waterkrachtenergie.
- De financiële doelstelling, de verwachte winst voor een derde partij, wordt in de huidige berekening nog buiten beschouwing gelaten.

De volgende stap is het bepalen van parametrische uitdrukkingen voor de materiaalkosten.

Kosten van één vijzelturbine:

In het onderzoek “Duurzame energie locatie Panheel” (Pronk et al., 2017) is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor een vergelijkbare waterkrachtcentrale. Op basis dit referentieproject worden de CAPEX en OPEX van een vijzelturbine ingeschat.

De investeringskosten (CAPEX) voor een waterkrachtcentrale met één vijzelturbine bedraagt 341.000 euro exclusief BTW. Dit is opgebouwd uit de kosten van de vijzelturbine zelf (285.000 euro), elektrische voorzieningen (25.000 euro) en 10% onvoorziene kosten (31.000 euro). De kosten van de aanvullende

civiele-werken, die dienen als draagconstructie van de vijzelturbine, vallen buiten dit bedrag. Deze dienen nog ontworpen te worden. (Pronk et al., 2017)

Identificeren van de kosten-impact van een extra steunpunt:

Zoals hierboven beschreven is het nodig om een extra steunpunt te realiseren wanneer minder dan het maximaal aantal vijzelturbines wordt toegepast. Hierdoor moeten voor de varianten A.1.1 t/m A.1.10 extra kostencomponenten in beschouwing worden genomen.

In een variant op ontwerpconcept A.1 waarin minder dan 11 turbines worden geïnstalleerd, komen significante kosten kijken ten gevolge van het extra steunpunt. Deze extra kosten zitten in de volgende aspecten:

1. Het materiaalgebruik voor het extra steunpunt;
2. Grondverzettingswerk van de nodige verbreding van rivier.
3. Een verandering in het ontwerp van de deur(en);
4. Aanpassingen in het bewegingswerken van de hefdeuren.

1. Kostenpost: Aanvullend materiaalgebruik:

Als eerst wordt berekend hoeveel extra beton en staal er nodig is voor het extra steunpunt. Vervolgens worden deze volumes vermenigvuldigd met de kentallen voor de beton- en staalprijs.

Voor het steunpunt wordt het ontwerp van de steunpunten van de basisstuw gebruikt. De eigenschappen van het extra steunpunt worden opgesomd in Tabel 7.1. Voor de muurdikte en het wapeningsratio zijn realistische aannames gedaan. Een ruwe aanname volstaat op dit moment omdat het gaat om een globale kostenraming. Het aangenomen wapeningsratio betreft zowel de wapening in langs- als in dwarsrichting.

Tabel 7.1: Eigenschappen van het steunpunt

Eigenschappen van het steunpunt:			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h	15	m
Breedte (b)	b	7	m
Lengte (L)	L	20	m
Muurdikte (t)	t	0,5	m
Wapeningsratio	ρ_{totaal}	1	%
<u>Dichtheid:</u>			
Beton	ρ_b	2400	kg/m ³
Wapeningsstaal	ρ_s	7850	kg/m ³

De bovenstaande eigenschappen resulteren er in dat 504 m³ beton en 5,04 m³ staal nodig is. Naast deze hoeveelheid beton en staal moet een bekisting worden gebouwd om het steunpunt te construeren. De kosten hiervan wordt berekend door het oppervlak van de bekisting te bepalen. Voor het construeren van dit steunpunt moet een oppervlak van 810 m² bekist worden.

Met de bovenstaande waardes, en de kentallen van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.), kan een globale schatting van de extra kosten worden gemaakt. Dit wordt gepresenteerd in Tabel 7.2.

Tabel 7.2: Kosten indicatie van het toevoegen van een extra steunpunt, op basis van materiaalgebruik. De kosten per eenheid zijn afkomstig van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.)

Kostenpost	Kosten indicator	Waarde	Kosten per eenheid	Eenheid	Kosten
Beton	Inhoud	504 m ³	€ 158,-	per m ³	€ 79.632
Wapenings- staal	Gewicht	39564 kg	€ 2,20,-	per kg	€ 87.040
Bekisting	Oppervlak	810 m ²	€ 89,50,-	per m ²	€ 72.495
Totale directe kosten					€ 239.168

2. Kostenpost: extra grondverzet

Het volume van de uit te graven grond dient als eerst bepaald te worden. In Tabel 7.3 worden de dimensies gegeven. De hoogte bedraagt het verschil tussen het maaiveld (NAP +8,5 m) en de onderkant van de fundering (NAP -0,35 m). De resterende dimensies corresponderen met die van het steunpunt.

Tabel 7.3: Berekening van het volume grond dat uitgegraven moet worden.

Volume grondverzetting:			
Dimensies:			
Hoogte	h	8,85	m
Breedte (b)	b	7	m
Lengte (L)	L	20	m
Volume	V	1.239	m^3

Voor het kengetal van het grondverzet is aangenomen dat er droog gegraven kan worden. Volgens Van der Horst (2018) bedraagt de kosten van deze werkzaamheden ongeveer 5 euro per kubieke meter. Het bedrag van het extra grondverzet komt dan neer op 6.195 euro.

De enige kanttekening die bij deze kosten geplaatst moet worden is dat de kosten lager kunnen uitvallen omdat er toch al grondverzet nodig is voor het construeren van de basisstuw. Dit reduceert de prijs enigszins.

3. Overige kostenposten die beïnvloed worden door het plaatsen van een extra steunpunt:

Naast de kosten ten gevolge van een extra steunpunt, resulteert het toevoegen van een steunpunt er ook in dat het ontwerp van andere constructie-elementen veranderen en daarmee ook impact op de kosten kunnen hebben.

Het ontwerp van de stuwdeuren veranderd bijvoorbeeld. De stuwopening heeft in plaats van een deur twee hefdeuren nodig. Extra kosten worden gemaakt omdat een extra ontwerpstap nodig is. Daarnaast zijn twee keer zoveel bewegingswerken nodig. Daartegenover staat echter dat de deur minder robuust uitgevoerd hoeft te worden omdat de overspanning minder is. Het materiaalgebruik is daardoor minder. Dit resulteert er tevens in dat per bewegingswerk minder draagvermogen geheven hoeft te worden waardoor de bewegingswerken per stuk goedkoper zijn. Uiteindelijk is aangenomen dat al deze aspecten tegen elkaar weggezet kunnen worden in een globale kostenraming. Het is tevens de verwachting dat de impact van deze aanpassingen relatief klein is op de totale kostenraming.

4. Samenvattend:

De belangrijkste aspecten met betrekking tot de eerste globale kostenraming zijn als volgt:

- 1 vijzelturbine kost €341.000,- (de aanvullende civiele kosten voor een waterkrachtcentrale zoals de waterafdichting vallen hier buiten);
- De staffel van vijzelturbines bedraagt. Wanneer 20 vijzelturbines worden aangeschaft is de prijs per vijzelturbine 20% lager. Hiervoor is een exponentiele functie opgesteld om de korting te berekenen afhankelijk van het aantal vijzelturbines dat wordt afgenomen.
- Voor varianten waarin niet het maximaal aantal vijzelturbines (11) wordt toegepast is het noodzakelijk om een extra steunpunt te genereren. In deze bijlage is geschat dat een extra steunpunt in totaal €245.363,- kost.

Deze kosten zijn opgenomen in het financiële model beschreven in bijlage B. De volgende stap is het berekenen van de netto contante waarde van de winst en het project rendement. Op basis van deze twee parameters worden vervolgens de varianten op het ontwerpconcept geëvalueerd.

Deel 3 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.1 op basis van de netto contante waarden van de winst:

Zoals eerder vermeld, wordt de netto contante waarde van de winst gebruikt om de varianten te beoordelen en daarmee het economisch optimale aantal vijzelturbines te bepalen. De methode om dit voor elke variant te berekenen wordt uitvoerig beschreven in Bijlage B, getiteld 'Structuur van het financieel model'. In het kort wordt in het financiële model een geldstroomdiagram (in het Engels: Cash flow diagram) opgesteld, waarin zowel de opbrengsten zoals berekend in Deel 1 als alle kosten zoals berekend in Deel 2 worden opgenomen. Uiteindelijk worden de netto contante waarde van alle opbrengst en kosten van elkaar afgetrokken, wat resulteert in een netto contante waarde van de winst.

Voor het geldstroomdiagram wordt een terugverdientijd van 15 jaar gehanteerd. Het doel dat is geformuleerd voor de casestudie bij Grave is namelijk dat de investerende partij binnen 15 jaar haar investering plus en het gewenste projectrendement wil hebben terugverdient. Vervolgens kan de waterkrachtcentrale worden verkocht of worden vervangen door verbeterde technologie. Deze aanname is gebaseerd op een realistisch vergelijkbaar project, het waterkrachtcentraleproject beschreven in het rapport "Duurzame energie locatie Panheel" (Pronk et al., 2017).

Een python-script is ontwikkeld om een geldstroomdiagram te genereren en op basis daarvan de netto contante waarde van de winst te berekenen. Dit is gedaan volgens de structuur zoals beschreven in bijlage B. Met behulp van dit Python-script kan eenvoudig de winst worden berekend voor alle varianten. Voor elke variant wordt deze berekening vier keer uitgevoerd, waarbij de elektriciteitsprijs tussen de berekeningen varieert. De elektriciteitsprijs fluctueert namelijk sterk en is afhankelijk van subsidies. De reden om verschillende scenario's te hanteren is om te onderzoeken binnen welke omstandigheden een haalbare business case kan worden gerealiseerd.

In Bijlage B.3 wordt de methode beschreven om hoe op basis van twee analyses vier scenario's voor de elektriciteitsprijs worden ontwikkeld. De eerste analyse omvat een data analyse van de APX spotmarkt voor elektriciteitsprijzen om een representatieve prijs voor elektriciteit vast te stellen. In de tweede analyse worden subsidieregelingen onderzocht, aangezien bedrijven die duurzame energie produceren momenteel gebruik kunnen maken van subsidieregeling SDE++ (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023). Dit rapport maakt nog gebruik van de oudere SDE+-subsidieaanvraag (2016), zoals beschreven in het rapport "Duurzame energie locatie Panheel" (Pronk et al., 2017).

Het is essentieel om scenario's te hanteren waarin zowel met als zonder subsidie wordt geëvalueerd, aangezien het gebruik van subsidies de haalbaarheid van het investeringsvoorstel kan vertekenen, ook wel corrupt kan maken. Het is namelijk van belang te onderzoeken of een rendabele businesscase mogelijk is zonder subsidies, aangezien in sommige landen mogelijk geen subsidies worden verstrekt of deze niet beschikbaar zijn, wat de bredere toepasbaarheid kan beïnvloeden. Daarnaast bestaat het risico dat subsidies in de komende jaren worden stopgezet. In dat geval is het relevant om te onderzoeken of een rendabele businesscase kan worden gerealiseerd. Het doel van dit rapport strekt zich immers verder uit dan de specifieke casestudie.

Samengevat houdt dit onderzoek rekening met vier scenario's:

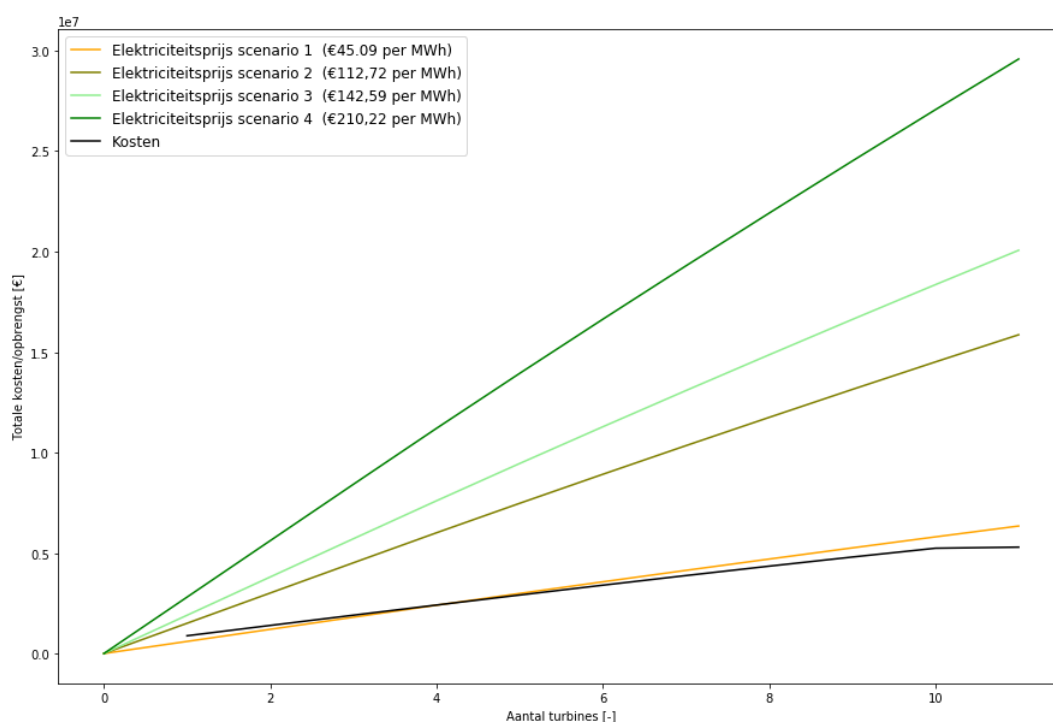
- Case 1: Hier wordt aangenomen dat de elektriciteitsprijs terugkeert naar het constante prijsniveau tussen 2008 en 2015. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 45,09 EUR/MWh.
[Gemiddelde prijs, geen subsidie]
- Case 2: Hier wordt verwacht dat de elektriciteitsprijs gedurende de terugverdienperiode hoog blijft. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 112,72 EUR/MWh.
[Hoge prijs, geen subsidie]
- Case 3: Hier wordt aangenomen dat de elektriciteitsprijs terugkeert naar het constante prijsniveau tussen 2008 en 2015. Er wordt gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze

case bedraagt 142,72 EUR/MWh.

[Gemiddelde prijs, wel subsidie]

- Case 4: Hier wordt verwacht dat de elektriciteitsprijs gedurende de terugverdienperiode hoog blijven. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 210,22 EUR/MWh
[Hoge prijs, wel subsidie]

De volgende stap omvat het berekenen van de netto contante waarde van de winst voor elke variant van ontwerpconcept A.1. Voor een gedetailleerde uitleg van deze berekeningen wordt verwezen naar Bijlage B. Op basis van Figuur 7.8 worden de varianten beoordeeld door de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen te vergelijken met de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn.



Figuur 7.8: Een grafische representatie van de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen tegenover de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn met variërend aantal vijzelturbines.

Op basis van de grafiek getoond in Figuur 7.8 worden waardevolle conclusies getrokken met betrekking tot de economisch optimale variant voor ontwerpconcept A.1:

- **Scenario 1 voor de elektriciteitsprijs:** In het geval dat in de toekomst scenario 1 voor de elektriciteitsprijs wordt gehandhaafd, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert.
- **Enigszins hogere elektriciteitsprijs:** Als de elektriciteitsprijs enigszins hoger ligt dan die in scenario 1, dan geldt voor elke variant dat de opbrengsten de kosten overstijgen, wat betekent dat het geen financiële last vormt om een waterkrachtcentrale te realiseren. Het is echter belangrijk op te merken dat dit nog niet noodzakelijkerwijs betekent dat de gewenste winst voor de derde partij wordt behaald en het dus een economisch haalbaar ontwerp is. Deze afweging is afhankelijk van het berekende projectrendement, zoals beschreven in Deel 4.
- **Electriciteitsprijzen in de buurt van scenario's 2, 3 of 4:** Als de toekomstige elektriciteitsprijs in de buurt ligt van een van de scenario's 2, 3 of 4, dan is er een winstgevende businesscase

mogelijk. Het is echter belangrijk op te merken dat economische haalbaarheid afhangt van de financiële doelstellingen van de exploitant.

- **De invloed van de elektriciteitsprijs en subsidies:** Scenario 1 illustreert dat voor een winstgevende businesscase het noodzakelijk is om ofwel gebruik te kunnen maken van subsidies, of dat de elektriciteitsprijs op zichzelf moet stijgen in vergelijking met de periode van 2008 tot en met 2015. De laatste optie lijkt redelijk aannemelijk en realistisch, gezien de structurele veranderingen sinds die periode. Voor verdere toelichting wordt verwezen naar Bijlage B.3. Er wordt daarom aangenomen dat het waarschijnlijk is dat dit ontwerpconcept economisch haalbaar is.
- **Variant met 11 vijzelturbines (variant A.1.11):** Het grootste verschil tussen opbrengsten en kosten doet zich voor wanneer wordt gekozen voor een variant met 11 vijzelturbines. Dit geldt voor elk scenario van de elektriciteitsprijs. De oorzaak hiervan is dat aanzienlijk meer energie wordt opgewekt en dat de kostencomponent van een extra steunpunt komt te vervallen.

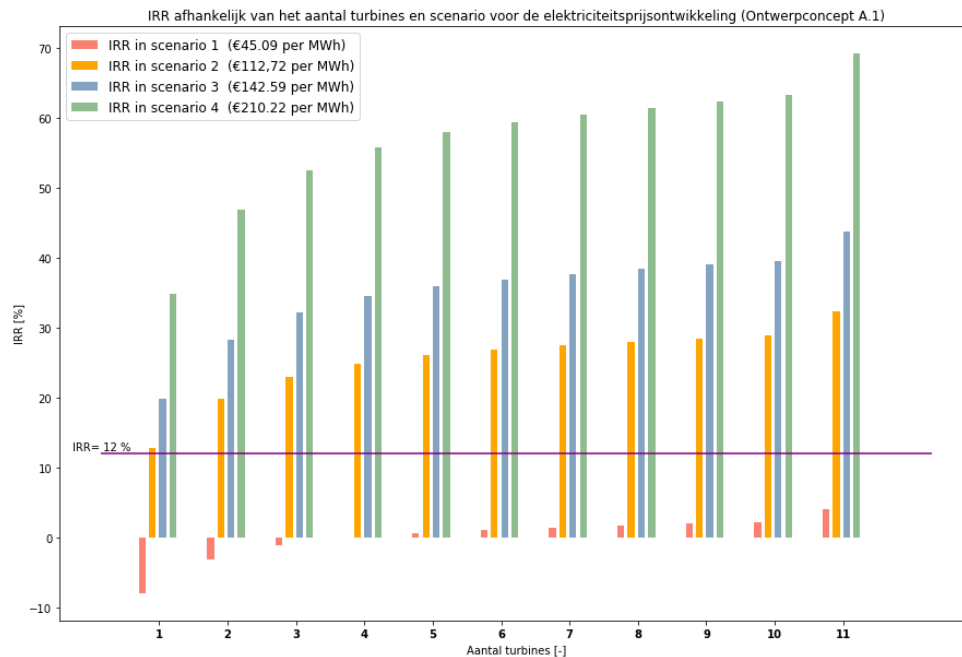
Deel 4 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.1 op basis van het project rendement:

Zoals eerder opgemerkt, biedt de voorgaande analyse geen definitieve uitspraak over de economische haalbaarheid van de varianten, omdat het gewenste projectrendement nog niet is opgenomen in dit model. Zoals eerder beschreven, zal een derde commerciële partij de waterkrachtcentrale moeten exploiteren, omdat Rijkswaterstaat hier zelf geen interesse in heeft. Voor deze commerciële partij is het van cruciaal belang dat het project een bepaald rendement oplevert om aan hun financiële doelstellingen te voldoen.

Zoals uiteengezet in bijlage B.7, wordt het projectrendement berekend door de netto contante waarde van de opbrengsten te delen door alle kosten die gedurende de terugverdientijd worden gemaakt. In dit financiële model is een projectrendement van 12% aangenomen als financiële doelstelling. Deze aanname komt redelijk overeen met wat doorgaans wordt gehanteerd door commerciële partijen als minimale vereiste voor een haalbaar duurzaam energieproject. De daadwerkelijke financiële doelstelling kan echter variëren, afhankelijk van de complexiteit en het risico van het te ontwikkelen project, zowel technisch als institutioneel (Pronk et al., 2017).

Het is belangrijk op te merken dat in deze casestudie ervan uitgegaan wordt dat een commerciële partij het project zal exploiteren. Als Rijkswaterstaat besluit om zelf de exploitatie te verzorgen of als een burgercollectief deze taak op zich neemt, kan de financiële doelstelling mogelijk minder streng zijn.

Het projectrendement speelt een leidende rol bij het bepalen van de optimale variant en heeft voorrang boven de analyse in deel 3, die meer gedetailleerde inzichten verschaft. In Figuur 7.9 wordt een grafisch overzicht gegeven van het projectrendement van de varianten onder verschillende scenario's voor de elektriciteitsprijs.



Figuur 7.9: overzicht van de projectrendementen van de varianten op ontwerpconcept A.3, met daarin variërende elektriciteitsprijzen.

Uit Figuur 7.9 kunnen waardevolle conclusies worden getrokken:

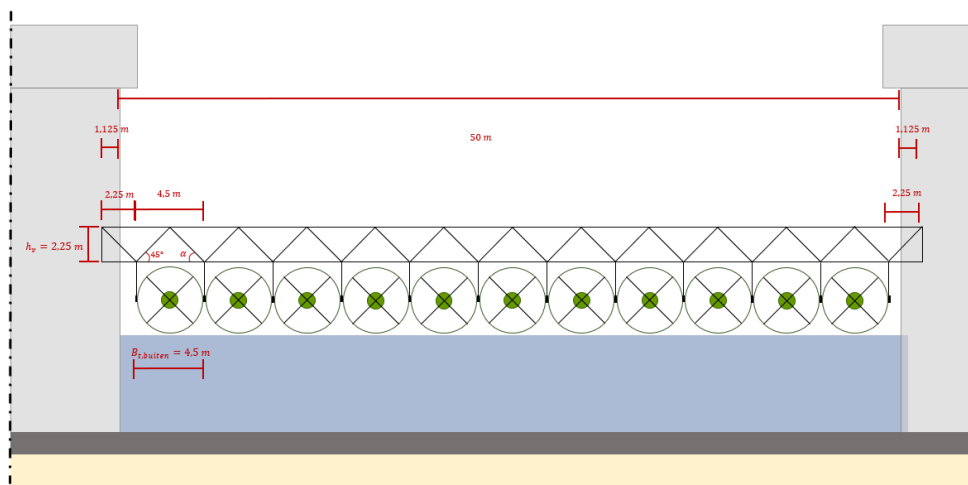
- In het geval dat de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs in de toekomst verloopt volgens scenario 1, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert. De projectrendementen van alle varianten liggen onder het gewenste project rendement van 12%.
- Om de optimale variant te vinden, moet worden gekeken naar een variant die in minimaal drie verschillende prijsscenario's het gewenste projectrendement behaalt. Uit Figuur 7.9 blijkt dat dit voor alle varianten het geval is.
- De variant met 11 vizeelturbines levert ongeacht het scenario voor de elektriciteitsprijs het hoogste projectrendement op. Deze variant wordt beschouwd als de economisch optimale variant.
- Het is van essentieel belang om op te merken dat de gevonden projectrendementen relatief hoog zijn. Een projectrendement van 70% is onrealistisch. Er dient daarom opgemerkt te worden dat in de bovenstaande grafiek terug te zien is dat niet alle kosten, bijvoorbeeld de indirecte kosten, zijn meegenomen in het financieel model. Desalniettemin kan de grafiek wel uitstekend gebruikt worden om de varianten met elkaar te vergelijken.

6. Ontwerpen van de ophangconstructie

Naast de hydraulische, scheepvaart-, vismigratie- en economische haalbaarheid is het voor dit ontwerpconcept belangrijk om al een inschatting te kunnen maken van de constructieve haalbaarheid. Dit is belangrijk omdat er een relatief uniek constructie-element wordt toegepast, namelijk een ophangconstructie waaraan 11 vizeelturbines worden bevestigd. Voor de andere ontwerpconcepten kan met een redelijke mate van zekerheid worden gesteld dat ze constructief mogelijk zijn. Een draagbalk van het verbeterde ontwerpconcept A.1 is echter zo uniek. Voor een dergelijke draagbalk met bijbehorende belasting zijn geen referentieprojecten bekend. Wanneer de ophangconstructie constructief niet mogelijk is, heeft het geen zin om dit ontwerpconcept in de evaluatie tussen de ontwerpconcepten te betrekken (paragraaf 7.3). Voor de andere ontwerpconcepten kan met een redelijke mate van zekerheid worden gesteld dat ze constructief mogelijk zijn. De ophangconstructie die dit ontwerpconcept nodig heeft, is echter dusdanig uniek dat voorafgaand aan de evaluatie al een inschatting moet worden gemaakt of dit überhaupt mogelijk is.

In bijlage D, 'constructief ontwerp voor de ophangconstructie gebruikt in ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)', wordt een constructieve ontwerplus uitgevoerd om de ophangconstructie te ontwerpe. Het is niet om het optimale ontwerp van de ophangconstructie te bepalen, maar om vast te stellen of het überhaupt haalbaar is om 11 vijzelturbines de lucht in te heffen.

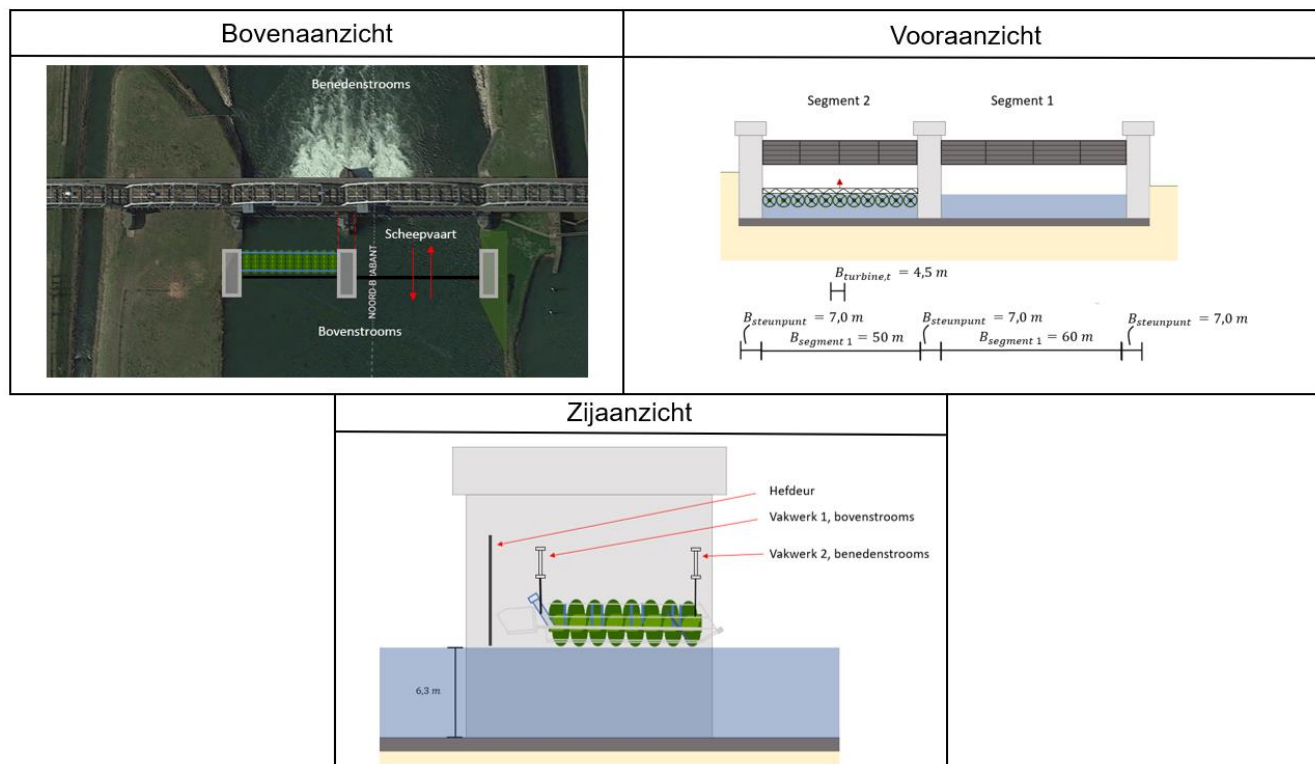
Het ontwerpresultaat uit bijlage D wordt getoond in Figuur 7.10. Het is dus mogelijk om door middel van twee vakwerkconstructies, een aan de bovenstroomse kant en een aan de benedenstroomse kant van de vijzelturbines, een realistisch ontwerp voor de ophangconstructie te ontwikkelen. Hierbij wordt gekozen voor twee vakwerken waarin de krachten van de vijzelturbines aangrijpen in de knooppunten. Een gedetailleerder ontwerp inclusief profielinformatie wordt beschreven in bijlage D. Het is belangrijk om op te merken dat er relatief zware profielen gekozen moesten worden om te voldoen aan de sterkte-, stabiliteits- en doorbuigingseisen. Desalniettemin is de conclusie dat het constructief haalbaar is om 11 vijzelturbines de lucht in te heffen. Na optimalisatie van het ontwerp kunnen mogelijk lichtere en minder stijve profielen worden gekozen, bijvoorbeeld door de vakwerken ruimtelijk uit te voeren in plaats van vlak.



Figuur 7.10: Resultaat van de constructieve ontwerplus voor de ophangconstructie; een vakwerk.

7. Presentatie van het functionele ontwerp voor het verbeterde ontwerpconcept waarin de vijzelturbines uitneembaar zijn (A.1)

In deze paragraaf is vastgesteld dat een variant met 11 vijzelturbines gelegen in de linker stuwopening, segment 2, optimaal is voor ontwerpconcept A.1 uitneembare vijzelturbines. In Figuur 7.11 wordt deze variant nogmaals weergegeven. De vijzelturbines worden net boven de waterlijn geheven waardoor scheepvaart niet langer door segment 1 kan varen. Het is voor scheepvaart wel mogelijk om de stuw door segment 1 te passeren.



Figuur 7.11: Ontwerptekeningen van optimale variant voor ontwerpconcept A.1, met 11 vijzelturbines. LINKS BOVEN: bovenaanzicht. RECHTS BOVEN: vooraanzicht. ONDER: Zijaanzicht.

7.2.2 Functionele uitwerking ontwerpconcept A.2 (vijzelturbines in de uiterwaarde)

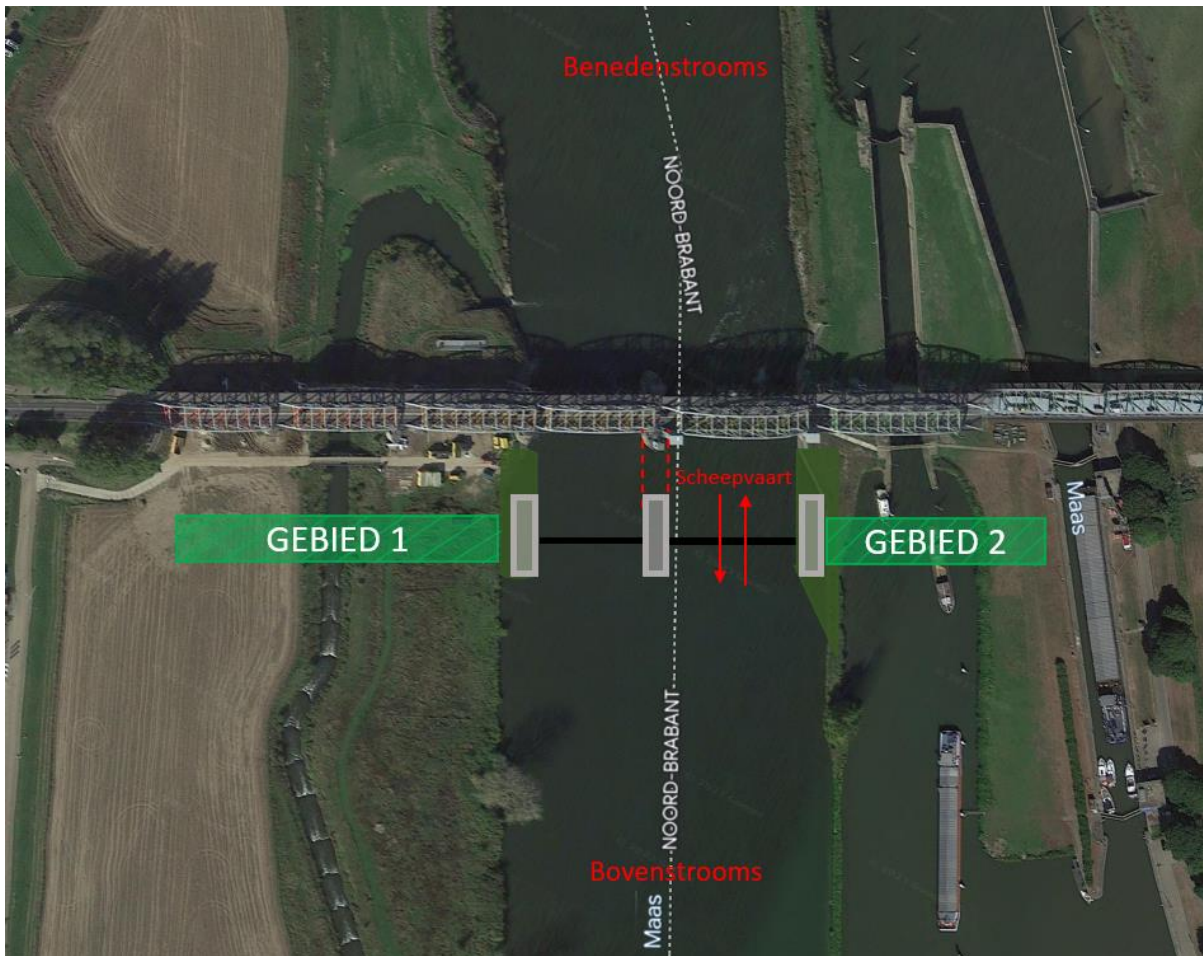
Door de rivier ter plaatsen van de stuw te verbreden, zal de plaatsing van vijzelturbines geen vermindering van de afvoercapaciteit tot gevolg hebben ten opzichte van de huidige situatie. Hierdoor wordt er netto geen additionele weerstand aan het systeem toegevoegd.

Tot nu toe is er alleen een ontwerpconcept gecreëerd. Een geschikte uitwerking hiervan ontbreekt nog. In deze paragraaf worden een aantal afwegingen gemaakt en wordt gezocht naar de optimale variant.

In het huidige ontwerpconcept wordt afstand genomen van de uitneembare vijzelturbines die worden gebruikt in ontwerpconcept A.1. De vijzelturbines worden opnieuw uitgevoerd zoals ze zijn gepresenteerd in paragraaf 6.5. Het ontwerp van de stuwdeur voor de vijzelturbines wordt op een vergelijkbare manier uitgevoerd als de stuwopening waar geen scheepvaart doorheen hoeft.

1. Locatiekeuze

De eerste stap is het bepalen van de geschikte locaties rond de stuw om vijzelturbines te implementeren. Dit wordt voornamelijk bepaald door de ruimtelijke eisen en randvoorwaarde. In Figuur 7.12 worden twee potentieel geschikte locaties aangegeven om de stuw te verbreden, i.e. in de uiterwaarde of op de plek van de oude sluiskolk die buiten gebruik is.



Figuur 7.12 Overzicht van de verschillende opties om de waterweg te verbreden en daarin turbines te plaatsen.

In paragraaf 5.5 is geconcludeerd dat het belangrijk is om gebied 2 te reserveren voor de toekomstige aanleg van een nieuwe sluiscolk. Daarom is het niet opportuun om ontwerpvarianten te creëren die vijzelturbines op deze locatie hebben. Gebied 1 is daarentegen wel geschikt. Op het eerste oog zijn er namelijk geen ruimtelijke beperkingen die de implementatie van een waterkrachtcentrale op deze locatie in de weg staan. Op een dergelijke locatie kan de stuw verbreed worden, of er kan gekozen worden voor een nevengeul. Er is namelijk voldoende ruimte beneden- en bovenstrooms om geleidelijk de rivier te verbreden waardoor geen hydraulische problemen ontstaan. Een verbreding van de stuw kan afhankelijk van de uitwerking van het ontwerp ook als nevengeul worden aangelegd.

Voordelen van het aanleggen van een nevengeul zijn:

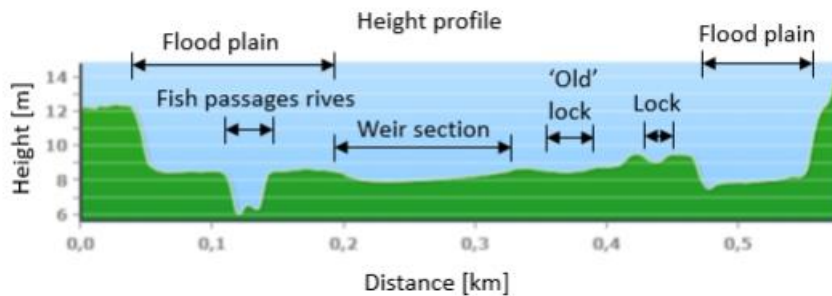
- De vijzelturbines worden hierdoor verminderd blootgesteld aan het risico op beschadigingen ten gevolge van ijs, drijfvuil en botsingen.
- Door een zandvanger bij de ingang te plaatsen kunnen de turbines en het betreffende gedeelte van de rivier beschermd worden tegen de consequenties van sediment transport.

Naast de genoemde voordelen zijn er ook enkele aandachtspunten. Er moet bijvoorbeeld duidelijke bewegwijzering en geleidingswerk worden geconstrueerd om te voorkomen dat schepen de nevengeul invaren. Tevens is het belangrijk om rekening te houden met het mogelijk moeten uitkopen van boeren in deze variant. In deze ontwerpfase wordt aangenomen dat er op dit gebied geen problemen gaan zullen optreden. De verwachting is dat het noodzakelijk is om dit stuk land te gebruiken voor de constructie van

de toekomstige stuw. Dus dit stuk grond dient al in bezit te zijn, te worden opgekocht of gehuurd. Andere voor- en nadelen zullen worden behandeld in de evaluatie.

De volgende stap is preciezer selecteren van het geschikte gebied op basis van randvoorwaarde en uitgangspunten:

- Op basis van Figuur 7.13 kan worden geconcludeerd dat de uiterwaarde een breedte van 165 m heeft ter plaatste van de basisstuw.



Figuur 7.13: Het rivierprofiel ter plaatse van de gekozen nieuwe stuwlocatie, met daarin de constructie-elementen van de huidige stuw. Afkomstig van <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/> (Geraadpleegd op 7-1-2021) (bewerkt)

- In Figuur 7.14 worden 2 randvoorwaarde weergegeven waarmee rekening moet worden gehouden bij de aanleg van een nevengeul. De eerste randvoorwaarde is het blauw gearceerde gebied, dat de stad Grave en het nabijgelegen bedrijventerrein aangeeft. Dit maakt het onmogelijk om de uiterwaarde ter plaatse van de basisstuw te verbreden. Het tweede en derde aspect hebben betrekking tot de benedenstroomse randvoorwaarden. Benedenstrooms van de brug moet de nevengeul uitmonden in de hoofdstroom. In het oranje gearceerde gebied in Figuur 7.14 bevindt zich de beek "Graafse raam", het bijbehorende gemaal van Sasse en het Graafs Kazemattenmuseum. Het museum heeft monumentale status, waardoor het verboden is om het museum te verwijderen en daar een nevengeul aan te leggen. Vanwege de combinatie van randvoorwaarden is besloten om de nevengeul niet ver om te leiden, maar deze tussen deze randvoorwaarden en de hoofdstroom van de rivier te realiseren.

Verder moet er aandacht worden besteed aan de oeverbescherming benedenstrooms van de brug. Het belang hiervan en de functioneren ervan moeten worden onderzocht in een volgende ontwerpfase. Voorlopig wordt gesteld dat deze oeverbescherming verwijderd en/of aangepast mag worden, zodat de nevengeul hier kan uitmonden in de hoofdstroom. Het is dan wel belangrijk dat in een volgende ontwerpfase grondig onderzoek wordt uitgevoerd naar de consequenties hiervan en er een oplossing wordt gevonden als dit een probleem veroorzaakt.



Figuur 7.14: Luchtfoto van het gebied rond de stuw met daarin aangegeven randvoorwaarden.

- De dijken moeten behouden blijven. De nevengeul mag geen verandering in de geometrie of het ruimtegebruik van de dijken veroorzaken. Het is belangrijk om een stuk land te reserveren voor een mogelijke dijkversterking in de toekomst. Er kan verwacht worden dat de dijken in de toekomst verhoogd moeten worden. Als gevolg van een dijkverhoging of versterking zal ook de breedte toe moeten nemen om de stabiliteit te waarborgen. In deze ontwerpfase wordt rekening gehouden met een mogelijke verbreding van de dijk met ongeveer 25 m.
- Het toekomstige stuwontwerp moet een vismigratie rivier hebben. In de toekomst zal de vismigratie rivier wederom aan de zijde van Grave worden geplaatst. Dit komt doordat deze dicht bij de hoofdstroom moet liggen om haar functie uit te voeren. Vissen zoeken namelijk de weg van de minste weerstand (Ghodrati, 2021). In deze ontwerpfase wordt aangenomen dat de vismigratie rivier een vergelijkbare breedte heeft als de huidige ($B_{vis} \approx 10 \text{ m}$).

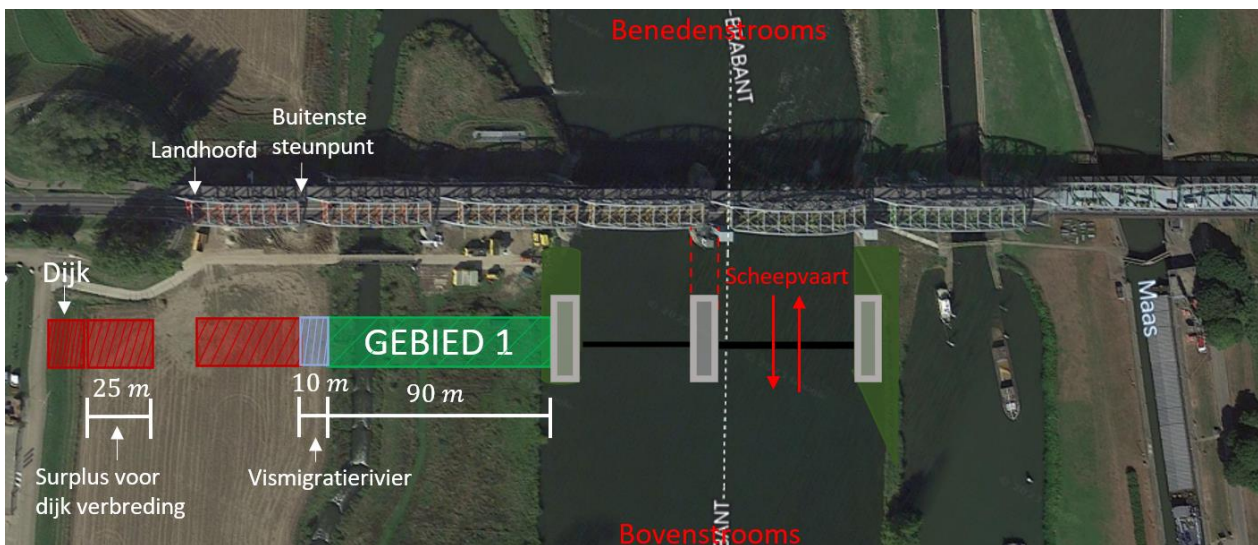
De vismigratie rivier kan tussen de nevengeul en de basisstuw worden geplaatst of om de nevengeul heen aan de zijde van Grave. De optimale locatie voor de vismigratie-rivier moet worden bepaald door uitgebreid onderzoek door een ecooloog. Dit valt buiten de scope van dit onderzoek. Voorlopig is aangenomen de vismigratie rivier buiten de nevengeul om komt te liggen. Dus naast de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde dient een breedte van 10 m te worden gereserveerd voor een vismigratierivier. De ruimtelijke indeling kan echter nog eenvoudig worden aangepast als blijkt dat het gunstig is om de vismigratierivier tussen de nevengeul en de hoofdstroom in te leggen.

- In de lengterichting van de rivier moet de rivier enigszins worden aangepast om lokale opstuwing te voorkomen (de 2D-hydraulische situatie). Om een goede wateraanvoer, zonder ingewikkeld stroompatroon, te bereiken, moet de verbreding van de waterweg geleidelijk verlopen. Als dit abrupt gebeurt, kunnen er ongewenste stromingspatronen ontstaan, zoals het optreden van neren en/of lokale opstuwing. Met betrekking tot deze randvoorwaarde is het belangrijk om rekening te houden met de jachthaven bovenstrooms.
- De nevengeul mag niet te dicht langs het landhoofd van de monumentale brug komen omdat dit gevaar kan opleveren voor de stabiliteit van de brugconstructie. Het ernstig verstoren van de bodemopbouw hier kan leiden tot afschuiving of een vermindering van het draagvermogen

waardoor de brug zou kunnen bezwijken. Dit dient in een vervolgstudie nader te worden. Voorlopig is echter besloten om de nevengeul niet te tussen het landhoofd en het buitenste steunpunt van de brug aan te leggen.

- De “nevengeul” en de hoofdstroom komen pas samen achter de oude brug.

De bovenstaande randvoorwaarden en uitgangspunten hebben het geschikte gebied beperkt tot het gebied dat is weergegeven in Figuur 7.15. Dit resulteert er in dan een breedte van 85 in de uiterwaarde direct naast de hoofdstroom het meest geschikt is om vijzelturbines te plaatsen.

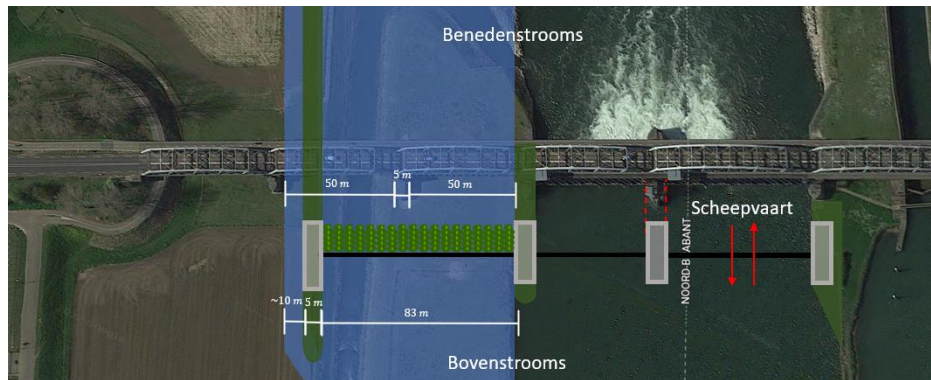


Figuur 7.15: Een bovenaanzicht van de basisstuw incl. naast gelegen uiterwaarde met daarin de geschikt en ongeschikte gebieden voor het plaatsen van vijzelturbines in de uiterwaarde aangegeven. In het groen gearceerde gebied kunnen vijzelturbines worden geplaatst.

2. Creëren van varianten

Nu de geschikte ruimte bekend is kunnen varianten op het verbeterde ontwerpconcept A.2 worden gecreëerd.

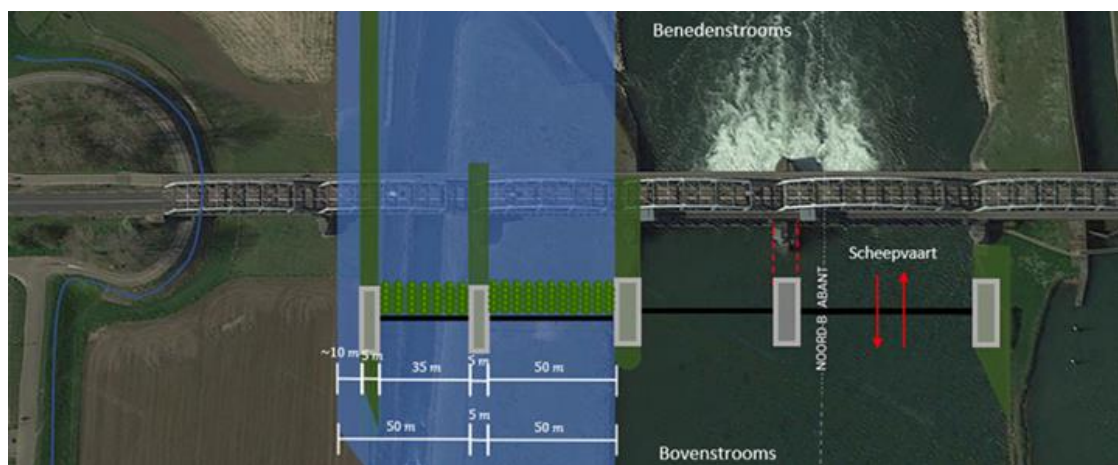
In de eerste variant wordt de geschikte ruimte volledig bezet met vijzelturbines. Er is een ruimte van 83 m beschikbaar aangezien aan de kant van Grave nog een steunpunt met een breedte van 7 m geconstrueerd moet worden. Dezelfde breedte van de vijzelturbines als in ontwerpconcept A.1 worden gebruikt (4,5 m). Dit betekent dat er ruimte is voor maximaal 18 vijzelturbines. In Figuur 7.16 wordt de variant met 20 vijzelturbines getoond.



Figuur 7.16: Ontwerptekening, bovenaanzicht, van ontwerpconcept A.2 met 20 vijzelturbines.

Ook in het huidige ontwerpconcept moet er nog een hefdeur bovenstrooms van de vijzelturbines worden toegepast om de afvoer naar nul te brengen. Dit vormt een obstakel voor de variant getoond in Figuur 7.16. Gebruikelijk worden dergelijk grote hefdeuren niet toegepast. In paragraaf 5.1.4 wordt gesteld dat de maximale overspanning van een hefdeur ongeveer 50 a 60 m bedraagt. Bovendien is het economisch optimaal om bij een grotere breedte een extra steunpunt te realiseren en twee stuwdeuren toe te passen (van der Kreeke, 2022). Het ontwerp getoond in Figuur 7.16 wordt dus als onrealistisch beschouwd en dus niet overwogen als optimale variant voor ontwerpconcept A.2. Het is zaak om een extra steunpunt toe te voegen. Varianten met minder dan 11 vijzelturbines hebben slechts een extra steunpunt nodig, terwijl met meer dan 11 vijzelturbines dus twee extra steunpunten nodig omdat de overspanning anders te groot wordt.

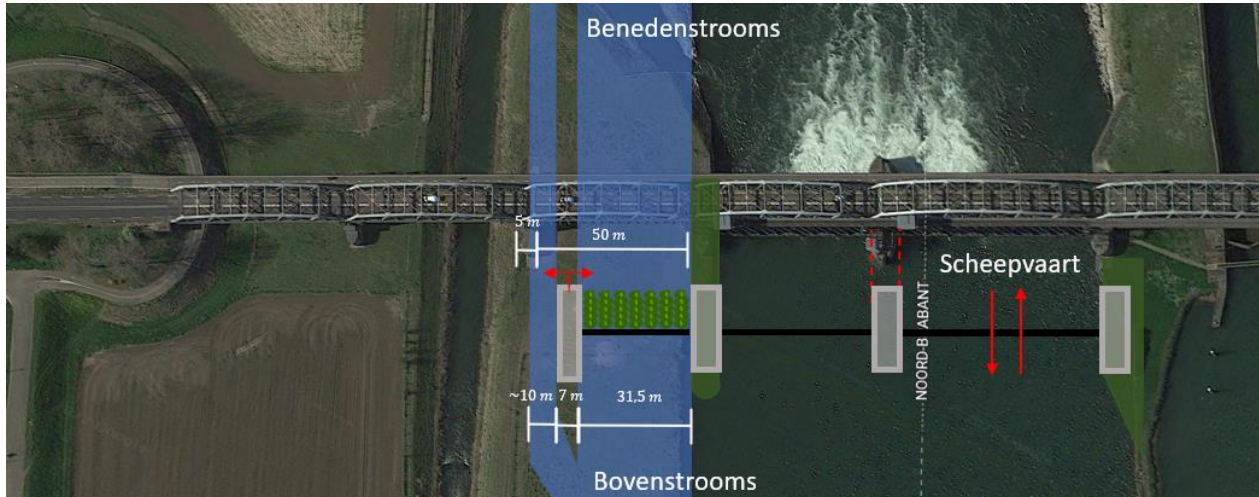
De aanwezigheid van de monumentale brug beïnvloedt de gewenste locatie van het extra steunpunt. Het wordt als ideaal/opportuun beschouwd om het extra steunpunt, net als in de hoofdstroom het geval is, op te lijnen met die van de brug. Op het eerste oog lijkt dit voordelig voor de stabiliteit van het steunpunt van de brug. Het direct bovenstrooms plaatsen van een vijzelturbine kan mogelijk leiden tot een stromingspatroon, een neer of een lokale stroomversnelling, waardoor de stabiliteit van het steunpunt in gevaar komt. Een variant met een extra steunpunt wordt weergegeven in Figuur 7.17. Dit is wederom de maximale bezetting. Hierin worden 18 vijzelturbines toegepast. Met betrekking tot de uniformiteit van het ontwerp zijn dezelfde dimensies voor het steunpunt gebruikt als de originele steunpunten.



Figuur 7.17: Ontwerptekening, bovenaanzicht, ontwerpvariant A.2.18; een variant van ontwerpconcept A.2 met 18 vijzelturbines.

Net als voor ontwerpconcept A.1 worden varianten ontwikkeld enkel op basis van het aantal vijzelturbines. Er kunnen ook minder vijzelturbines worden geïmplementeerd. Een voorbeeld van een dergelijk ontwerp

wordt weergegeven in Figuur 7.18. In totaal zijn er 18 varianten mogelijk op het huidige ontwerpconcept waarin het aantal vijzelturbines varieert van 1 t/m 18.



Figuur 7.18: Ontwerptekening, bovenaanzicht, ontwerpvariant A.2.6; een variant van ontwerpconcept A.2 met 6 vijzelturbines. Met de rode pijlen bij het steunpunt wordt aangegeven dat deze verplaatst kan worden afhankelijk van het aantal turbines van de variant.

3. Bepalen van de optimale variant

Voor het huidige ontwerpconcept geldt hetzelfde als voor ontwerpconcept A.1: het is onpraktisch om alle 16 varianten mee te nemen in de evaluatie tussen de verbeterde ontwerpconcepten (A.1, A.2 en A.3). Net als voor ontwerpconcept A.1 zijn er al enkele waardevolle conclusies die voorafgaand aan de evaluatie kunnen worden getrokken. Opnieuw wordt het optimale aantal vijzelturbines als economisch optimaal beschouwd in de huidige ontwerpfase. Dit wordt bepaald aan de hand van een analyse die uit vier delen bestaat: het vaststellen van de financiële opbrengst, een globale kostenraming, het vergelijken van de kosten en baten door de netto contante waarde te berekenen, en het bepalen van het projectrendement. De optimale variant wordt uiteindelijk vastgesteld in de laatste twee delen van deze analyse. De huidige analyse om de optimale variant te bepalen komt grotendeels overeen met die van ontwerpconcept A.2. Het voornaamste verschil zit in de kostenraming.

Deel 1 – Bepalen van de totale financiële-opbrengst:

Bij de berekening van de financiële opbrengst is er geen noodzaak om onderscheid te maken tussen ontwerpconcept A.1 en A.2. Er wordt aangenomen dat het rendement van de vijzelturbines in beide ontwerpconcepten gelijk is. Dit betekent dat hetzelfde vermogen kan worden gebruikt als voor ontwerpconcept A.1, namelijk 152 kW. Bovendien heeft het ontwerpconcept geen invloed op het aantal vollasturen. Het aantal vollasturen wordt met name bepaald door de variant, het aantal vijzelturbines. Dus voor de berekening van de energieopbrengst en daarmee ook de financiële opbrengst wordt voor ontwerpconcept A.2 gebruik gemaakt van exact hetzelfde model als voor ontwerpconcept A.1. Het enige verschil is dat voor ontwerpconcept A.2 meer varianten moeten worden berekend, in plaats 11 varianten moeten er nu 18 varianten worden berekend.

De financiële opbrengst per variant wordt dus op dezelfde manier bepaald als in ontwerpconcept A.1. Voor een gedetailleerde uitleg van deze methode wordt verwezen naar paragraaf 7.2.1.

Deel 2 – Globale kostenraming:

In deze stap wordt een globale kostenraming gemaakt op basis van kentallen en referentieprojecten. Een pythonscript is opgesteld om parametrisch de kosten voor alle varianten te berekenen. De voornaamste

invoervariabele in dit model is het aantal vijzelturbines dat in de uiterwaarde komt te liggen. Onderstaand wordt uitgelegd waaruit de globale kostenraming is opgebouwd.

De kostencomponenten die opgenomen worden in de kostenramingen zijn hetzelfde als voor ontwerpconcept A.1:

- De materiaalkosten. Alleen die kosten die uitsluitend kunnen worden toegeschreven aan de waterkrachtcentrale en de ondersteunende constructie. Wat er onder materiaalkosten valt hangt specifiek af van de ontwerpconcepten. Verderop volgt een opsomming van de specifieke kostencomponenten voor ontwerpconcept A.2.
- De operationele kosten worden als percentage van de investeringskosten betrokken. Jaarlijks wordt 5% van de investeringskosten in rekening gebracht als operationele kosten.

Kosten die buiten de bepaalde netto contante waarde vallen zijn de aanvullende onderzoeks- en ontwikkelingskosten die nog nodig zijn, de bouwkosten, personeelskosten, transportkosten en kosten die voortkomen uit de impact op de faalkansverdeling en daarmee het verdere constructieve ontwerp van de basisstuw. Met deze aspecten worden ook bijvoorbeeld de indirecte kosten van een waterkrachtcentrale op die van bodembescherming bedoeld. Daarnaast moeten andere constructie-componenten mogelijk robuuster worden uitgevoerd door de impact op de faalkansverdeling. En daarom duurder worden. In de huidige conceptuele ontwerpfase was het lastig om al deze kostenaspecten te betrekken. Met name omdat onduidelijk en onzeker is aan welke kostenpost deze aspecten worden toegeschreven.

De investeringskosten worden zoals hierboven op basis van materiaalgebruik berekend. De extra materiaalkosten om een waterkrachtcentrale in de uiterwaarde te realiseren die worden opgenomen in de huidige kostenraming zijn opgebouwd uit de volgende kostenposten:

- De vijzelturbines;
- Additionele steunpunten ten opzichte van het basisstuw ontwerp;
- De toename in de dimensies van de fundering; in de uiterwaarde dient een fundering aangelegd te worden;
- Extra hefdeuren;
- Grondverzet;

De volgende stap is het parametrisch uitwerken van de kosten afhankelijk van het aantal vijzelturbines.

De vijzelturbines:

Voor de kosten van de vijzelturbines wordt dezelfde schatting gebruikt als in ontwerpconcept A.1:

- 1 vijzelturbine kost €341.000,- (de aanvullende civiele kosten voor een waterkrachtcentrale zoals de waterafdichting vallen hier buiten);
- De staffel van vijzelturbines is als volgt: wanneer 20 vijzelturbines worden aangeschaft is de prijs per vijzelturbine 20% lager dan de prijs als 1 vijzelturbine wordt aangeschaft. Een exponentiele functie is opgesteld om de korting te berekenen afhankelijk van het aantal vijzelturbines;

Additionele steunpunten ten opzichte van het basisstuw ontwerp:

De extra steunpunten worden vergelijkbaar uitgevoerd als de andere steunpunten. Daarom kan de kostenraming van het steunpunt dat is ontworpen voor ontwerpconcept A.1, paragraaf 7.2.1, ook worden gebruikt voor dit ontwerpconcept. Uit deze kostenraming volgt dat een extra steunpunt 239.168 euro kost.

Een variant met minder dan 11 vijzelturbines heeft een extra steunpunt nodig. Varianten met meer dan 11 vijzelturbines hebben twee extra steunpunten nodig omdat de overspanning anders te groot wordt.

De toename in de dimensies van de fundering:

Onder de waterkrachtcentrale moet een gedegen fundering worden ontworpen. Voor het ontwerp van deze fundering wordt in deze eerste haalbaarheid studie dezelfde dimensies gebruikt als die gebruikt zijn in de basisstuw (paragraaf 5.1.4):

Tabel 7.4: Overzicht van de eigenschappen van de fundering.

Eigenschappen van de fundering:			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h	2	m
Breedte (b)	b	Afhankelijk van het aantal turbines	m
Lengte (L)	L	60	m
Wapeningsratio	ρ_{totaal}	1	%

In een later ontwerpfase dient het ontwerp voor de fundering geoptimaliseerd te worden.

Dezelfde kentallen voor de kostenraming als voor ontwerpconcept A.1 worden gebruikt, deze worden weergegeven in Tabel 7.5. Constructie kosten zijn buitenbeschouwing gelaten aangezien deze ernstig gereduceerd worden omdat al het materieel en materiaal al aanwezig is omdat er al een fundering voor de basisstuw geconstrueerd moeten worden.

Tabel 7.5: De kosten per eenheid van het materiaal. Afkomstig van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.)

Kostenpost	Kosten indicator	Kosten per eenheid	Eenheid
Beton	Inhoud	€ 158,-	per m^3
Wapenings-staal	Gewicht	€ 2,20,-	per kg

De kosten van de fundering afhankelijk van het aantal vijzelturbines ($C_{fundering}(n)$) wordt in het model berekend met de volgende vergelijking:

$$C_{fundering}(n) = I_{beton} \cdot f_{beton} + \left(\frac{\rho_{totaal}}{100} \right) \cdot I_{beton} \cdot \rho_s \cdot f_{staal} \quad (\text{vgl. 7.1})$$

Waarin:

I_{beton} = de totale inhoud van het benodigde beton [kg]

f_{beton} = de eenheidsprijs van beton [€/m³]

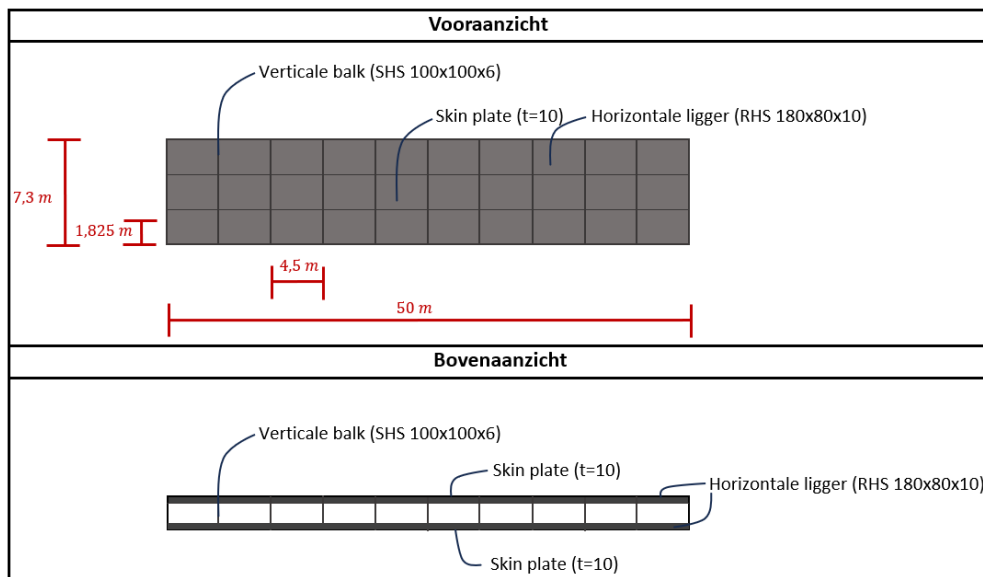
ρ_s = de dichtheid van staal = 7850 $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Vergelijking 7.1 kan afhankelijk van het aantal vijzelturbines worden uitgedrukt. De breedte van de fundering neemt per vijzelturbine met 4,5 m toe. Daarnaast hebben de extra steunpunten ook een fundering nodig. Per extra steunpunt neemt de breedte van de fundering met een extra strook van 5 m toe.

Extra hefdeuren:

In deze paragraaf wordt een grof ontwerp voor de hefdeuren ontwikkeld om vervolgens de kosten te berekenen op basis van het materiaalgebruik. In de huidige conceptfase wordt het gecreëerde ontwerp niet constructief geverifieerd/ontworpen. Dit ontwerp heeft enkel het doel om een globaal idee te krijgen van het materiaalgebruik zodat een redelijke inschatting van de kosten kan worden gemaakt.

Figuur 7.19 wordt gebruikt om de kosten van een deur per strekkende meter in te schatten. Dit is een hefdeur die met maximale overspanning wordt ontworpen voor de uiterwaarde. Dit is een enigszins conservatieve benadering. Hierdoor kunnen de resultaten uiteindelijk mee vallen waardoor het gunstiger wordt voor Rijkswaterstaat en de investeerder gunstig uit kan vallen. In deze eerste benadering is gekozen om met kokerprofielen te werken. In de constructieve ontwerpplus kan dit nog worden aangepast.



Figuur 7.19: Ontwerptekening van de (extra) hefdeuren die nodig zijn voor ontwerpconcept A.2.

De eerste stap is het berekenen van het materiaalgebruik van een stuwdeur van 50 m, de maximale overspanning. Vervolgens wordt dit door de overspanning, 50 m, gedeeld om het materiaalgebruik per strekkende meter te bepalen. Deze waarde wordt in het parametrische model voor de kosten berekening gebruikt. In Tabel 7.6 wordt het totale materiaalgebruik van een deur met 50 m overspanning berekend zoals deze is weergegeven in Figuur 7.19.

Tabel 7.6: berekening van het materiaalgebruik van een stuwdeur met een overspanning van 50 m.

Element	Lengte	Breedte	Hoogte	Dikte	Inhoud
Skin plate (2x)	50 [m]	-	7,3 [m]	10 [mm]	7,30 [m ³]
Horizontale ligger (4x)	50 [m]	180 [mm]	80 [mm]	10 [mm]	0,96 [m ³]
Verticale balk (11x)	100 [mm]	100 [mm]	7,3 [mm]	6 [mm]	0,18 [m ³]
Totaal:					8,44 [m ³]

Het materiaalgebruik van de ontworpen hefdeur met een overspanning van 50 m betreft dus 8,44 m³. Dit komt neer op een gewicht van 66263 kg. Wanneer het kengetal gegeven in Tabel 7.4 (2,2 €/kg) gebruikt wordt resulteert dit in een totale kosten van 145.778 euro. Dit kan uitgedrukt worden per strekkende meter door het te delen door de overspanning. Hieruit volgt een kosten per strekkende meter van 2.915,6 euro. Deze waarde wordt gebruikt in het parametrische model.

Grondverzet:

Voor deze kostenpost wordt hetzelfde kengetal gebruikt als voor ontwerpconcept A.1. Hierin is bepaald dat het droog afgraven 5 euro per kubieke meter bedraagt.

De volgende stap is het bepalen van het volume grond dat moet worden afgegraven. Op basis van Figuur 5.12 wordt geconstateerd dat het maaiveld van de uiterwaarde op NAP+8,3 m ligt. Aangezien er geen extra weerstand aan het systeem mag worden toegevoegd en de vijzelturbines de hoogte van de waterkolom hebben moet de uiterwaarde worden uitgegraven tot dezelfde diepte als de onderkant van de fundering van de basisstuw. Uit Figuur 5.12 blijkt dat de onderkant van de fundering op NAP-0,35 m komt te liggen. De uit te graven diepte komt uit op 8,65 m.

De breedte die per turbine uitgegraven moet worden bedraagt de breedte van de turbines (4,5 m) plus de extra benodigde steunpunten (7 m). Als er minder dan 11 vijzelturbines worden toegepast hoeft er maar

een steunpunt geconstrueerd te worden. Worden er meer vijzelturbines nodig zijn dan is een tweede steunpunt nodig. Daarnaast dient de vismigratie rivier verplaatst te worden. In deze studie is aangenomen dat enkel grondverzettingswerkzaamheden hiervoor nodig zijn en dat deze overal even diep wordt uitgegraven. In de praktijk moet er echter nog nadere studie naar gedaan worden; gebruikelijk verloopt dit als een trap.

De laatste parameter die bepaald moet worden is de lengte van de nevengeul. In deze ontwerpstudie wordt een lengte van 600 m aangenomen. Dit is relatief groot aangezien verwacht wordt dat de rivier geleidelijk breder te worden om hydraulische problemen te voorkomen.

Een overzicht van het volume dat uitgegraven moet worden afhankelijk van het aantal turbines wordt gegeven in Tabel 7.7.

Tabel 7.7: Overzicht van het volume grond dat moet worden uitgegraven.

Elementen	Breedte	Diepte [m]	Lengte [m]
Turbines	4,5 [m per turbine]	8,65	600
Vismigratierivier	10 [m]	8,65	600
Steunpunten	7[m]	8,65	600

Bij de berekening van het volume moet onderscheid worden gemaakt tussen de varianten die minder en meer dan 11 vijzelturbines bevatten. In de tweede varianten moet namelijk een extra steunpunt worden gerealiseerd waardoor nog eens een strook met een breedte van 7 m extra moet worden uitgegraven.

Het totale volume afhankelijk van het aantal vijzelturbine ($V(n)$) voor minder dan 11 turbines kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$V_1(n) = B_{turbine} \cdot d \cdot L \cdot n + B_{vismigratie} \cdot d \cdot Lengte + B_{steunpunt} \cdot d \cdot Lengte$$

De waardes uit Tabel 7.7 invullen in de bovenstaande vergelijking geeft de volgende vergelijking:

$$\begin{aligned} V_1(n) &= 4,5 \cdot 8,65 \cdot 600 \cdot n + 10 \cdot 8,65 \cdot 600 + 7 \cdot 8,65 \cdot 600 \\ V_1(n) &= 23355 \cdot n + 88230 \end{aligned}$$

Voor een variant met meer dan 11 vijzelturbines moet een extra steunpunt worden geconstrueerd. Voor deze varianten wordt het volume grond dat uitgegraven moet worden als volgt bepaald:

$$\begin{aligned} V_2(n) &= B_{turbine} \cdot d \cdot L \cdot n + B_{vismigratie} \cdot d \cdot Lengte + 2 \cdot B_{steunpunt} \cdot d \cdot Lengte \\ V_2(n) &= 23355 \cdot n + 124560 \end{aligned}$$

De totale kosten hiervan wordt bepaald door dit volume te vermenigvuldigen met het aangenomen kengetal voor de prijs per kubieke meter ($f_{grond} = 5 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$):

$$C_{grond} = V \cdot f_{grond}$$

Het volume voor de varianten kan als volgt worden bepaald:

Situatie	Parametrische formule
Minder dan 11 turbines:	$C_{grond,1} = (23355 \cdot n + 88230) \cdot 5$
Meer dan 11 turbines:	$C_{grond,1} = (23355 \cdot n + 124560) \cdot 5$

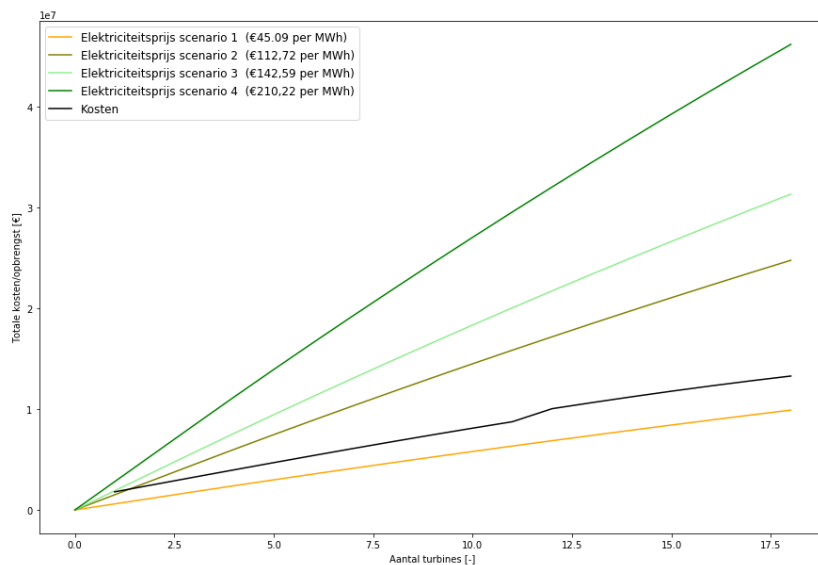
Op basis van de bovenstaande uitleg van de kostenraming wordt met behulp van het ontwikkelde python-script voor alle varianten een kostenraming gemaakt.

Deel 3 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.2 op basis van de netto contante waarden van de winst:

Zoals eerder vermeld, wordt de netto contante waarde van de winst gebruikt om de varianten te beoordelen en daarmee het economisch optimale aantal vijzelturbines te bepalen. De methode om dit voor elke variant te berekenen wordt uitvoerig beschreven in Bijlage B, getiteld 'Structuur van het financieel model'. In het kort wordt in het financiële model een geldstroomdiagram (in het Engels: Cash flow diagram) opgesteld, waarin zowel de opbrengsten zoals berekend in Deel 1 als alle kosten zoals berekend in Deel 2 worden opgenomen. Uiteindelijk worden de netto contante waarde van alle opbrengst en kosten van elkaar afgetrokken, wat resulteert in een netto contante waarde van de winst.

De manier waarop dit bepaald is op basis van de gevonden waarden in Deel 1 en Deel 2 is exact hetzelfde als voor ontwerpconcept A.1 (paragraaf 7.2.1). In de huidige paragraaf wordt de methode achter het python-script niet nogmaals uitgelegd maar worden direct de resultaten getoond.

Op basis van Figuur 7.20 worden de varianten beoordeeld door de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen te vergelijken met de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn.



Figuur 7.20: Een grafische representatie van de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen tegenover de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn met variërend aantal vijzelturbines (Ontwerpconcept A.2).

Op basis van de grafiek getoond in Figuur 7.20 worden vergelijkbare conclusies getrokken als voor ontwerpconcept A.1; de trend van de lijnen ten opzichte van elkaar is vergelijkbaar. De volgende conclusies met betrekking tot ontwerpconcept A.2 worden op basis van deze grafiek getrokken:

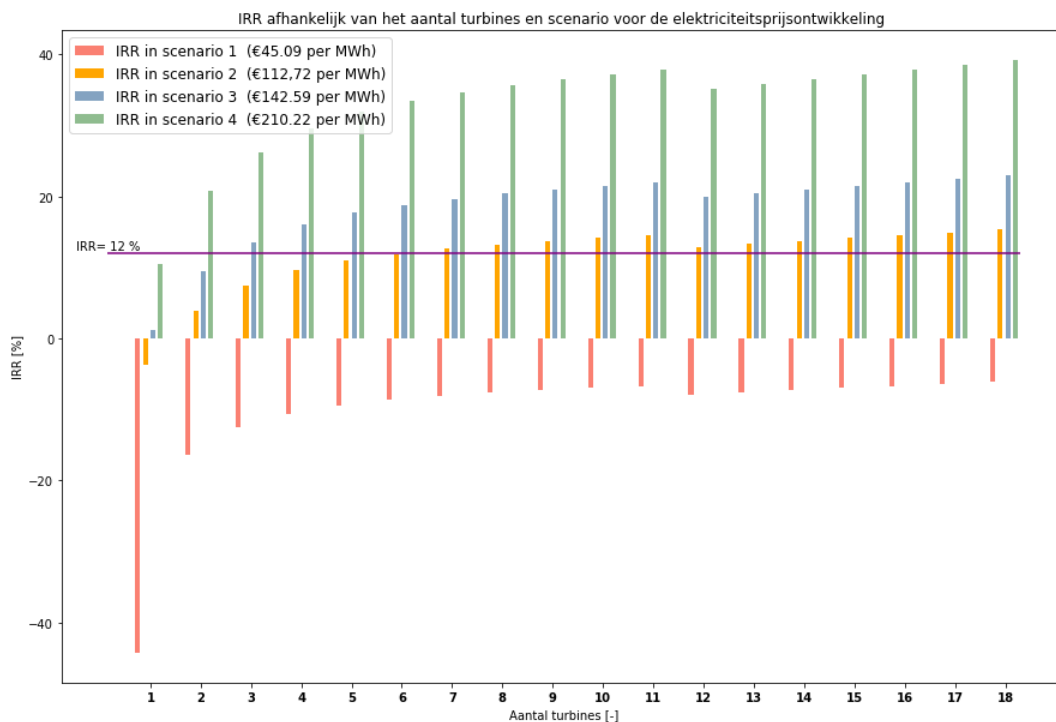
- **Knik in de kostengrafiek:** De knik in de kostengrafiek tussen de varianten met 11 en 12 vijzelturbines wordt veroorzaakt door de noodzaak van een extra steunpunt in de varianten met meer dan 11 vijzelturbines.
- **Scenario 1 voor de elektriciteitsprijs:** Als in de toekomst scenario 1 voor de elektriciteitsprijs wordt gehandhaafd, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert. In dit ontwerpconcept is het verschil tussen de kosten en de opbrengst in dit scenario groter dan voor

ontwerpconcept A.1. Dit betekent echter niet dat er geen haalbare businesscase kan worden gerealiseerd, maar dat dit wederom afhankelijk is van de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs en subsidieregelingen.

- **Elektriciteitsprijzen in de buurt van scenario's 2, 3 of 4:** Als de toekomstige elektriciteitsprijs in de buurt ligt van een van de scenario's 2, 3 of 4, dan is er een winstgevende businesscase mogelijk. Het is echter belangrijk op te merken dat de economische haalbaarheid afhangt van de financiële doelstellingen van de exploitant. De economische haalbaarheid kan nog niet worden ingeschat op basis van deze grafiek. Het projectrendement moet hiervoor worden geanalyseerd.
- **De invloed van de elektriciteitsprijs en subsidies:** Scenario 1 toont aan dat voor een winstgevende businesscase het noodzakelijk is om gebruik te kunnen maken van subsidies of dat de elektriciteitsprijs op zichzelf moet stijgen in vergelijking met de periode van 2008 tot en met 2015. De laatste optie lijkt redelijk aannemelijk en realistisch, gezien de structurele veranderingen sinds die periode. Voor verdere toelichting wordt verwezen naar Bijlage B.3. Daarom wordt aangenomen dat het waarschijnlijk is dat dit ontwerpconcept winstgevend is.
- **Variant met 18 vijzelturbines (variant A.2.18):** De variant met 18 vijzelturbines lijkt economisch optimaal. Voor deze variant is het verschil tussen opbrengsten en kosten het grootst. Dit geldt voor elk scenario van de elektriciteitsprijs. In tegenstelling tot ontwerpconcept A.1 is het echter niet zo duidelijk dat dit de optimale variant is voor ontwerpconcept A.2 vanwege de knik in de kostengrafiek. Een nadere analyse, analyse van het projectrendement, is vereist om de economisch optimale variant te selecteren.

Deel 4 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.2 op basis van het projectrendement:

Ook voor dit ontwerpconcept moeten de varianten worden vergeleken op basis van het projectrendement om de economisch optimale variant te selecteren. Figuur 7.21 toont een overzicht van de projectrendementen voor de varianten van ontwerpconcept A.2 bij variërende elektriciteitsprijzen.



Figuur 7.21: overzicht van de projectrendementen van de varianten op ontwerpconcept A.2, met daarin variërende elektriciteitsprijzen.

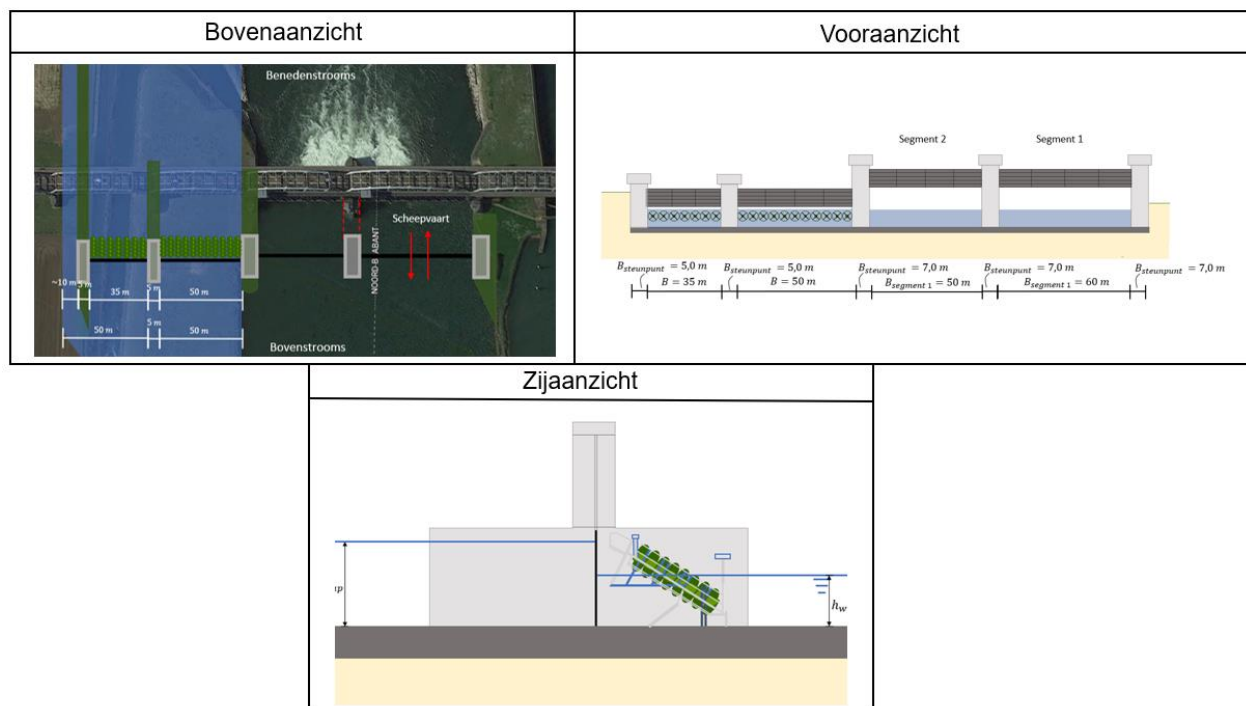
Uit Figuur 7.21 kunnen waardevolle conclusies worden getrokken:

- In het geval dat de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs in de toekomst verloopt volgens scenario 1, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert. De projectrendementen zijn zelfs allemaal negatief voor dit ontwerpconcept.
- Om de optimale variant te vinden, moet worden gekeken naar een variant die in minimaal drie verschillende prijsscenario's het gewenste projectrendement behaalt. Uit Figuur 7.21 blijkt dat dit het geval is voor varianten met minimaal 6 vijzelturbines. Naarmate het aantal vijzelturbines toeneemt, blijft dit het geval.
- Als er meer dan 11 vijzelturbines worden toegepast, is er eerst een daling in het projectrendement waarneembaar. Dit komt door de noodzaak van een extra steunpunt, waardoor de kosten met betrekking tot de fundering en het grondverzet stijgen terwijl de opbrengsten geleidelijk toenemen.
- Voor twee varianten wordt het hoogste projectrendement gevonden. Dit zijn, ongeacht het scenario voor de elektriciteitsprijs, de varianten met 11 of 18 vijzelturbines. Het projectrendement van beide varianten ligt rond de 38%. Het verschil is dusdanig klein dat op basis van deze analyse geen onderscheid kan worden gemaakt in de mate van economische optimaliteit.

Een nadere analyse is nodig om de economisch optimale variant tussen de varianten A.2.11 en A.2.18 te selecteren. Op basis van de huidige analyse is er geen onderscheid vast te stellen. Daarom wordt in deze studie gekozen voor de variant die de meeste duurzame energie opwekt, namelijk de variant met 18 vijzelturbines. Deze variant wordt meegenomen in de evaluatie tussen de ontwerpconcepten.

4. Presenteren van de gekozen ontwerp variant:

In deze paragraaf is vastgesteld dat een variant met 18 vijzelturbines als optimaal wordt beschouwd voor ontwerpconcept A.2. In Figuur 7.22 wordt deze variant nogmaals weergegeven.



Figuur 7.22: Ontwerptekeningen van de optimale variant voor ontwerpconcept A.2, met 18 vijzelturbines. LINKS BOVEN: bovenaanzicht. RECHTS BOVEN: vooraanzicht. ONDER: Zijaanzicht.

7.2.3 Functionele uitwerking ontwerpconcept A.3 (vijzelturbines in de steunpunten)

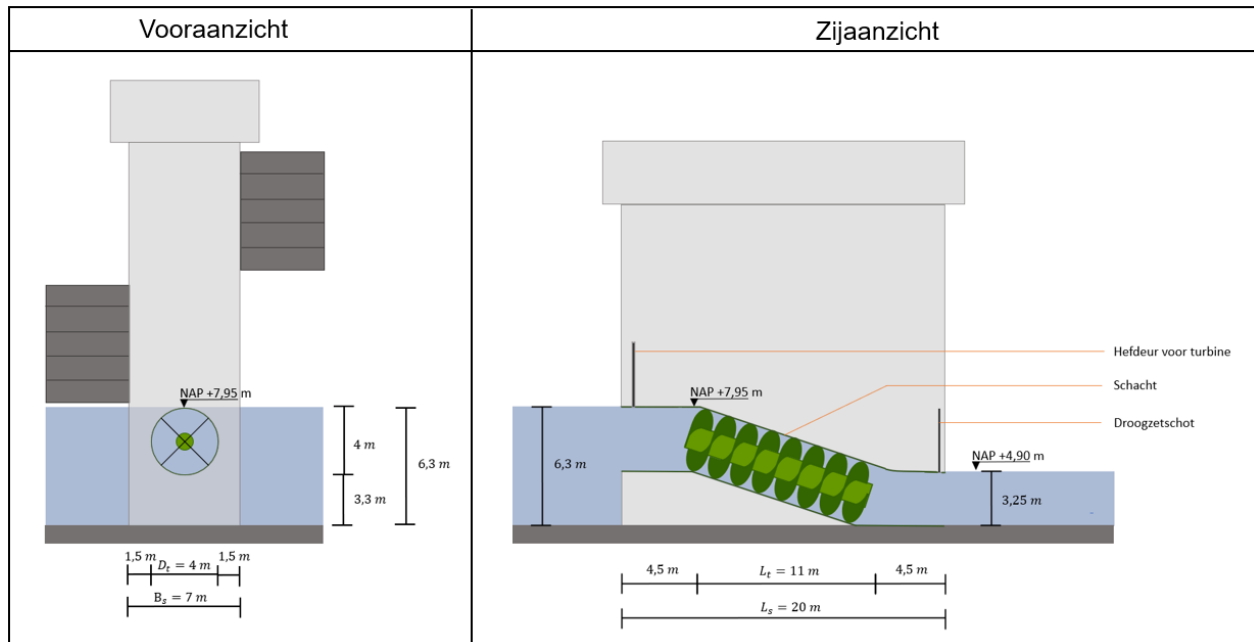
Door de vijzelturbines in de steunpunten van de basisstuw te integreren, zal de plaatsing van vijzelturbines geen vermindering van de afvoercapaciteit tot gevolg hebben. Hierdoor wordt er netto geen additionele weerstand aan het systeem toegevoegd. Het tegenovergestelde is zelfs het geval; een gedeelte van de weerstand wordt zelfs weg genomen. Het oppervlak dat bezet wordt door de steunpunten laat geen water door. Echter door een vijzelturbine hierin te integreren neemt de afvoercapaciteit toe met 8 m³/s. De breedte van de waterweg wordt dan niet gereduceerd door de bezetting van vijzelturbines maar het vergoet juist de afvoercapaciteit. Een compenserende maatregel is in dit verbeterde ontwerpconcept dus niet eens nodig.

Tot nu toe is er enkel een impressieschets van het ontwerpconcept getoond. Een geschikte uitwerking ontbreekt nog. In de huidige paragraaf worden variant gecreëerd en de optimale variant bepaald. De economisch optimale variant wordt meegenomen in de evaluatie tussen de verbeterde ontwerpconcepten, paragraaf 7.3.

1. Uitwerking van het steunpunt:

Bij de verdere uitwerking moet rekening worden gehouden met de volgende aspecten:

- De cirkelvormige openingen in de steunpunten moeten exact dezelfde diameter hebben als de binnendiameter van de vijzelturbines (4 m).
- De steunpunt van de basisstuw hebben een breedte van 7 m, wat betekent dat er één vijzelturbine met een breedte van 4 m geïnstalleerd kan worden.
- In het steunpunt moet een schacht worden aangebracht tussen de opening aan bovenstroomse zijde en benedenstroomse zijde, waarin de vijzelturbines worden geplaatst. Deze dient zodanig ontworpen te worden dat onderhoud aan de vijzelturbines nog wel mogelijk is.
- Bovenstrooms moet een afsluiting worden gerealiseerd die de afvoer door de stuw naar nul kan brengen tijdens droge periodes. Deze afsluiting maakt het ook mogelijk om de vijzelturbines droog te zetten voor onderhoud. In de huidige conceptfase is ervoor gekozen om een hefdeur te gebruiken zoals weergegeven in Figuur 7.23. De exacte en optimale uitwerking van dit afsluitmiddel moet in een later ontwerpstadium onderzocht worden.
- Benedenstrooms moet een droogzetschot kunnen worden geplaatst om onderhoud mogelijk te maken. Dit schot hoeft alleen te functioneren gedurende het onderhoudsproces. Tijdens droge periodes, wanneer de afvoer naar nul moet, hoeft het schot niet geplaatst te worden. Dit zal slechts een marginaal en acceptabel waterverlies veroorzaken.
- Het vervangen van de vijzelturbines zal een complex proces zijn. Daarom is het zaak dat bepaalde elementen van de vijzelturbines, zoals de elektrische installaties, gemakkelijk bereikbaar, onderhoudbaar en vervangbaar zijn.



Figuur 7.23: Verdere uitwerking van ontwerpconcept A.3, vijzelturbines in een steunpunt. LINKS: een vooraanzicht, RECHTS: een zijaanzicht.

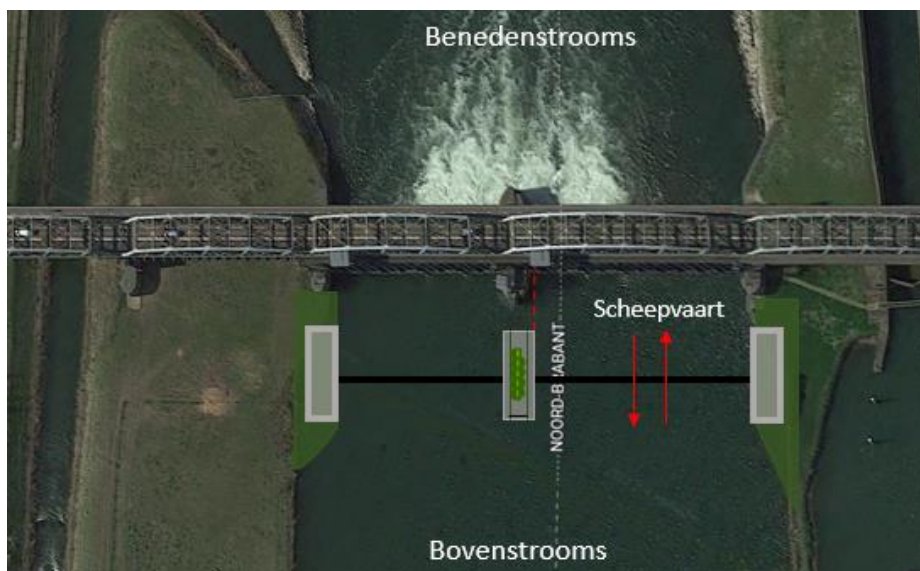
Een aantal opmerkelijke aspecten aan het bovenstaande ontwerp en aannames moeten worden geconcludeerd:

- De installatie vijzelturbines op de bovenstaande manier in de steunpunten resulteert in een verlies aan rendement. Zoals vermeld in paragraaf 6.1.3 kan het rendement geoptimaliseerd worden door de hellingshoek van de vijzelturbines aan te passen aan de benedenstroomse waterstand. In dit ontwerp kan hellingshoek van de vijzelturbines niet meer worden aangepast aan de benedenstroomse waterstand. Deze is namelijk vast gemonteerd in de schacht en kan dus niet worden aangepast hierdoor. Het exacte verlies in rendement is lastig in te schatten. Hiervoor is een vervolgstudie van de leverancier en/of een werktuigbouwkundig-ingenieur voor nodig.
- In deze ontwerplus wordt ervan uitgegaan dat een opening van 4 m in een steunpunt van de basisstuw constructief mogelijk is. Er wordt verondersteld dat in de constructieve ontwerplus het percentage wapening kan worden verhoogt en/of de wanden dikker uitgevoerd kunnen worden, zodat het steunpunt niet bezwijkt onder de toegenomen spanningen.
- De dimensies van de vijzelturbines worden niet aangepast aan de beschikbare ruimte in het steunpunt. Het steunpunt heeft een lengte van 20 m, terwijl de vijzelturbine zoals die is gepresenteerd in paragraaf 6.2.2 slechts een lengte van 11 m heeft. De lengte van de vijzelturbines is variabel en kan worden vergroot. Mogelijk kan ook de diameter worden vergroot. Beide aanpassingen kunnen leiden tot een verhoging van het rendement. Een grotere diameter en/of lengte zorgt ervoor dat er meer water in de turbines zit. Meer water betekent dat er meer gravitatiekracht wordt geleverd die omgezet kan worden in elektriciteit. Of dit daadwerkelijk resulteert tot in een verhoging van het rendement moet blijken uit een vervolgonderzoek.

Het eerste en laatste aspect kunnen mogelijk elkaar compenseren. Omdat de exacte impact van beide aspecten op het rendement op dit moment niet kan worden vastgesteld, is verder onderzoek vereist. Deze aspecten moeten worden geanalyseerd en geoptimaliseerd door een leverancier en/of iemand met een achtergrond in werktuigbouwkunde.

2. Creëren van varianten:

De volgende stap is het creëren van varianten op ontwerpconcept A.3. In het huidige ontwerp van de 'basisstuw' staat er slechts een steunpunt in de waterweg, waardoor er maar één vijzelturbine kan worden geplaatst. Deze variant, ontwerpalternatief A.3.1, wordt weergegeven in Figuur 7.24.



Figuur 7.24: Ontwerpconcept A.3 variant 1, één vijzelturbines in het middelste steunpunt geplaatst.

Als er aanpassingen aan de basisstuw worden gemaakt kunnen er varianties op het bovenstaande ontwerp worden gecreëerd. Twee realistische aanpassingen aan het basisstuw ontwerp zijn denkbaar:

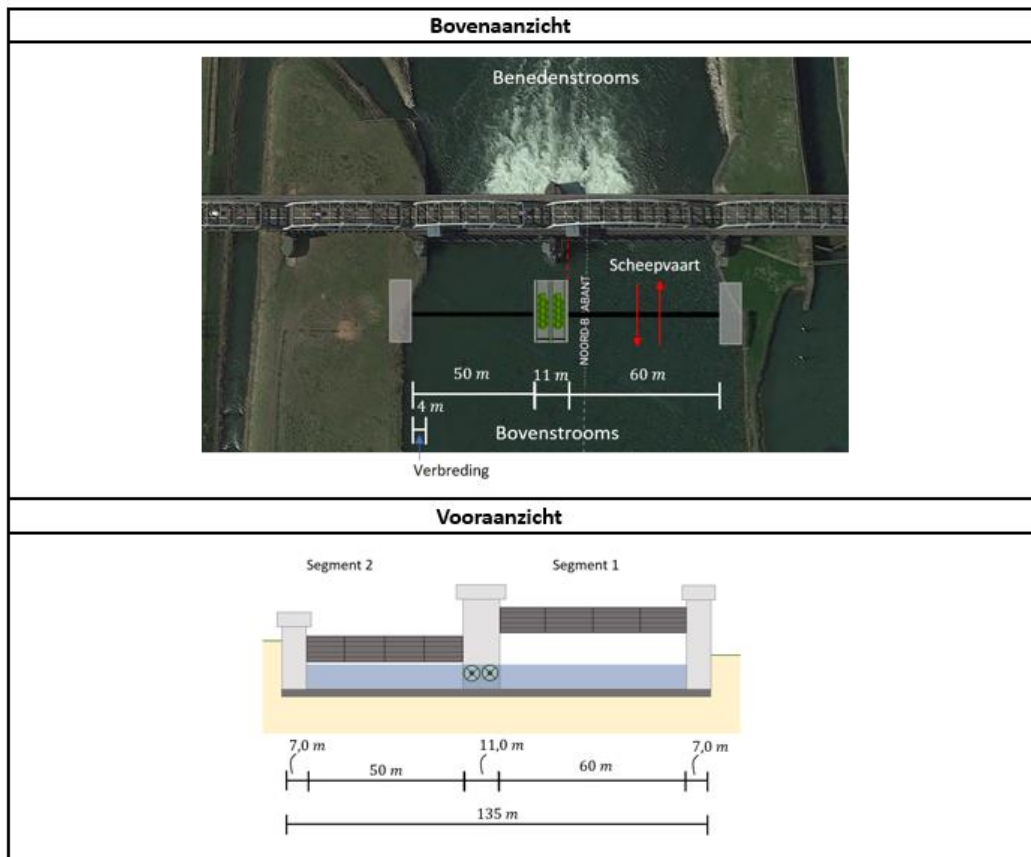
- Of er kan een aanpassing aan het steunpunt worden gemaakt, een verbreding van het steunpunt, zodat er twee vijzelturbines per steunpunt kunnen worden geplaatst. Een dergelijke aanpassing wordt gemaakt in ontwerpalternatief A.3.2.
- Aanpassing van de positionering van de buitenste steunpunten (de landhoofden). Deze kunnen, zoals weergegeven in Figuur 7.24, en op de ondergrond van de uiterwaarde worden geplaatst. Een andere optie is om deze in waterweg te plaatsen door de fundering te verbreden. Een dergelijke aanpassing wordt gemaakt in ontwerpalternatief A.3.3.

Combinaties van beide aanpassingen worden tevens overwogen.

Aanpassing 1 – Verbreden van de steunpunten (ontwerpalternatief A.3.1):

De eerste aanpassing betreft het verbreden van de steunpunten. Momenteel hebben de steunpunten een breedte van 7 m, waardoor er slechts ruimte is voor één vijzelturbine. Door de steunpunten te verbreden kunnen er echter 2 vijzelturbines in één steunpunt worden geplaatst.

Twee vijzelturbines hebben een totale breedte van 8,5 m. Daarnaast moet bij de verbreding rekening worden gehouden dat de betonnen wanden ongeveer 0,5 m dik zullen worden. Verder moet er voldoende ruimte zijn voor overige installaties, onderhoudswerkzaamheden en 0,5 m ruimte tussen de vijzelturbines. Hierdoor komt de totale breedte uit op 11 m. In Figuur 7.25 wordt de variant weergegeven waarin het middelste steunpunt is verbreed.



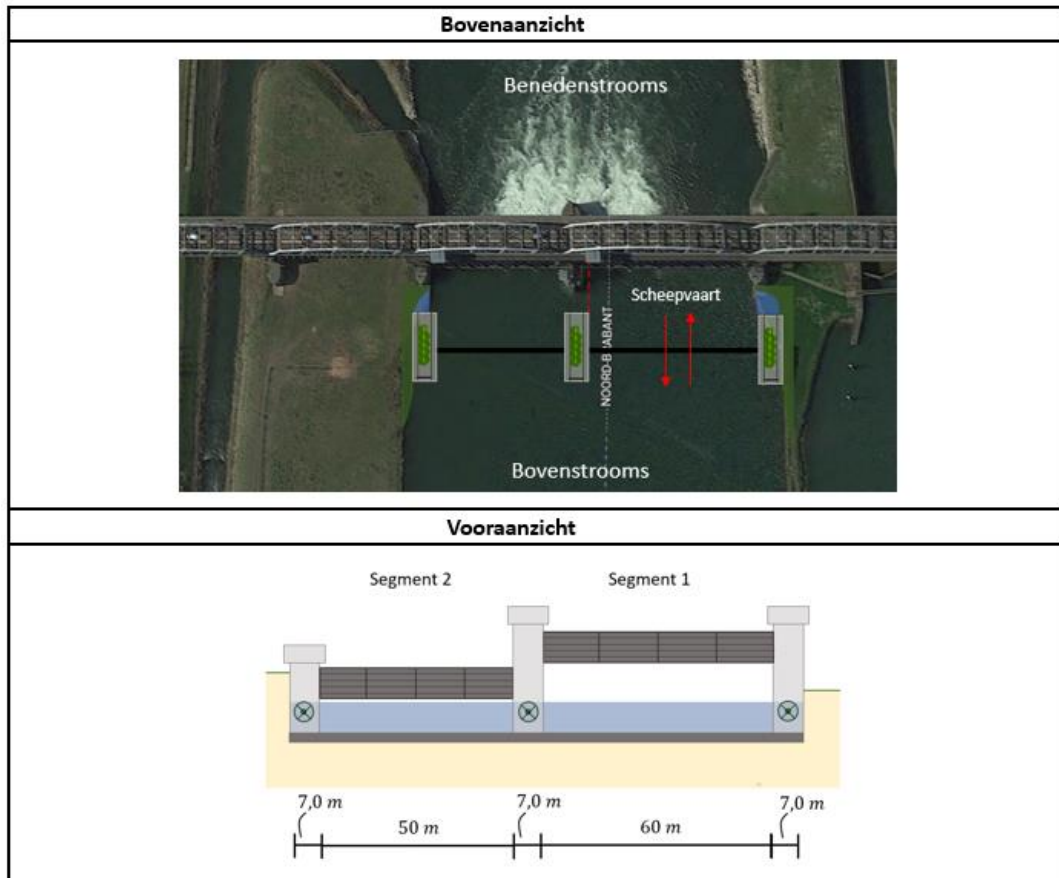
Figuur 7.25: Ontwerpproject A.3 variant 2, waarin het middelste steunpunt is verbreed waardoor er 2 vijzelturbines geplaatst kunnen worden.

Het verbreden van het steunpunt voegt een extra weerstand toe aan het systeem. Dit kan opstuwung veroorzaken. Tegenover deze toename in weerstand staat echter de toename in afvoercapaciteit door de turbines zelf, dit zorgt voor een toename van $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit kan mogelijk voldoende compensatie zijn voor de toegevoegde weerstand door de verbreding van het steunpunt. In een vervolgstudie moet een uitvoerig hydraulische analyse worden uitgevoerd om te bepalen of er daadwerkelijk opstuwung optreedt. Het detailniveau vereist voor deze analyse valt buiten de scope van dit onderzoek

In de huidige ontwerpfase wordt aangenomen dat er te veel opstuwung ontstaat. Ten gevolge hiervan dient de basisstuw verbreed te worden. Dit dient als compenserende maatregel; het netto doorstroom oppervlak blijft namelijk behouden. De basisstuw wordt met 4 m verbreed aan de kant van Grave. Het is namelijk belangrijk dat de doorvaartopening, segment 1, minimaal 60 m breed is en dat er geen complexe vaarroute ontstaat in dit gedeelte. Daarom is de zijde van het steunpunt aan de kant van sluizen uitgelijnd met dezelfde zijde van het middelste steunpunt van de brug.

Aanpassing 2 - Positionering van buitenste steunpunten: (ontwerpalternatief A.3.3)

Door de steunpunten te positioneren zoals weergegeven in Figuur 7.26, in de rivier, kunnen ook in de buitenste steunpunten vijzelturbines worden geplaatst.



Figuur 7.26: boven- en vooraanzicht van ontwerpconcept A.3 variant 3, vizelturbines in alle steunpunten.

Bij deze aanpassing moeten enkele aspecten in een vervolgstudie worden onderzocht:

- De stabiliteit van de grond rondom het steunpunt;
Achterloopsheid kan ontstaan. Mogelijke gevolgen hiervan zijn waterverlies, instabiliteit van de constructie en instabiliteit van de dijk. Dit kan worden opgelost door kwelschermen toe te passen
- Erosie achter de steunpunten.
De gevolgen van een vizelturbine kort bovenstrooms van de steunpunten van de oude brug. Turbulente stromingen kunnen ontstaan die mogelijk leiden tot erosie en daarmee het draagvermogen van de grond aantasten en/of de stabiliteit van het steunpunt in gevaar brengen.

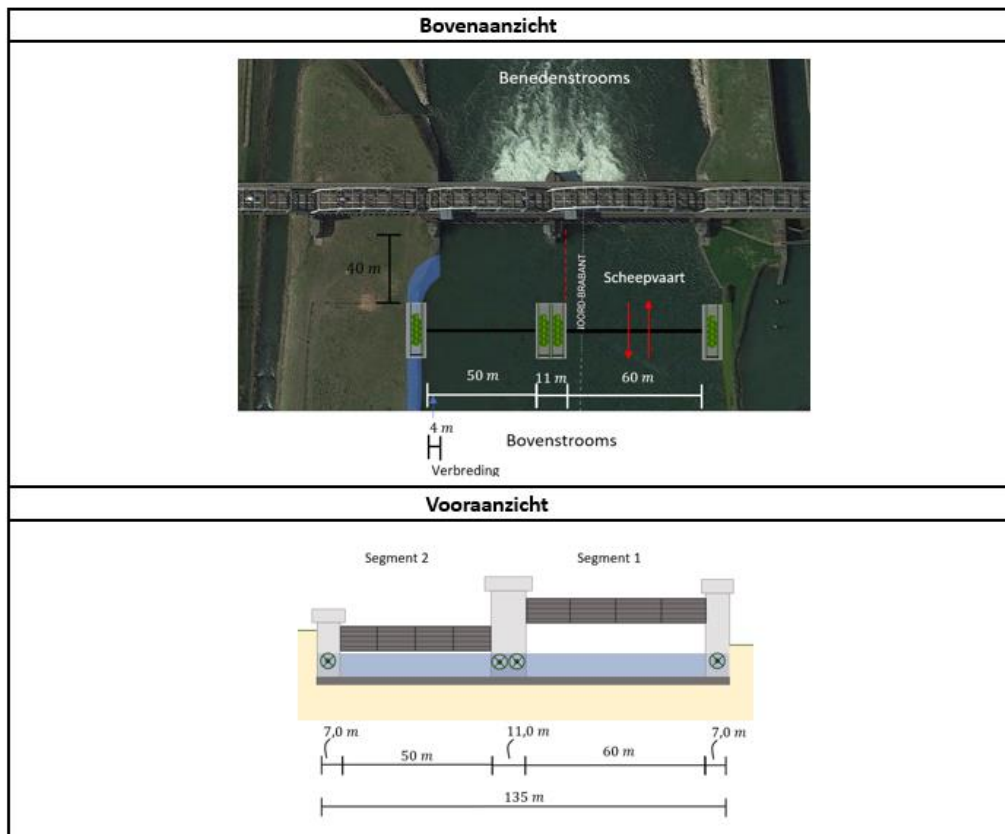
In de huidige conceptfase wordt aangenomen dat een oeverbescherming of een grondverbeteringstechniek kan worden toegepast, waardoor de stabiliteit van de steunpunten uiteindelijk niet in gevaar komt.

Combinatie varianten waarin beide aanpassingen terugkomen (ontwerpalternatief A.3.4 en A.3.5):

Naast de bovenstaande varianten kunnen er ook varianten worden gecreëerd op basis van een combinatie van de aanpassingen. In Figuur 7.27 wordt een variant weergegeven waarin zowel het middelste steunpunt wordt verbreed als dat de buitenste steunpunten in de waterweg worden geplaatst (ontwerpalternatief A.3.4). Daarnaast is een variant denkbaar waarin de buitenste steunpunten in de waterweg worden geplaatst en alle drie de steunpunten worden verbreed (ontwerpalternatief A.3.5). Dit ontwerp wordt getoond in Figuur 7.28.

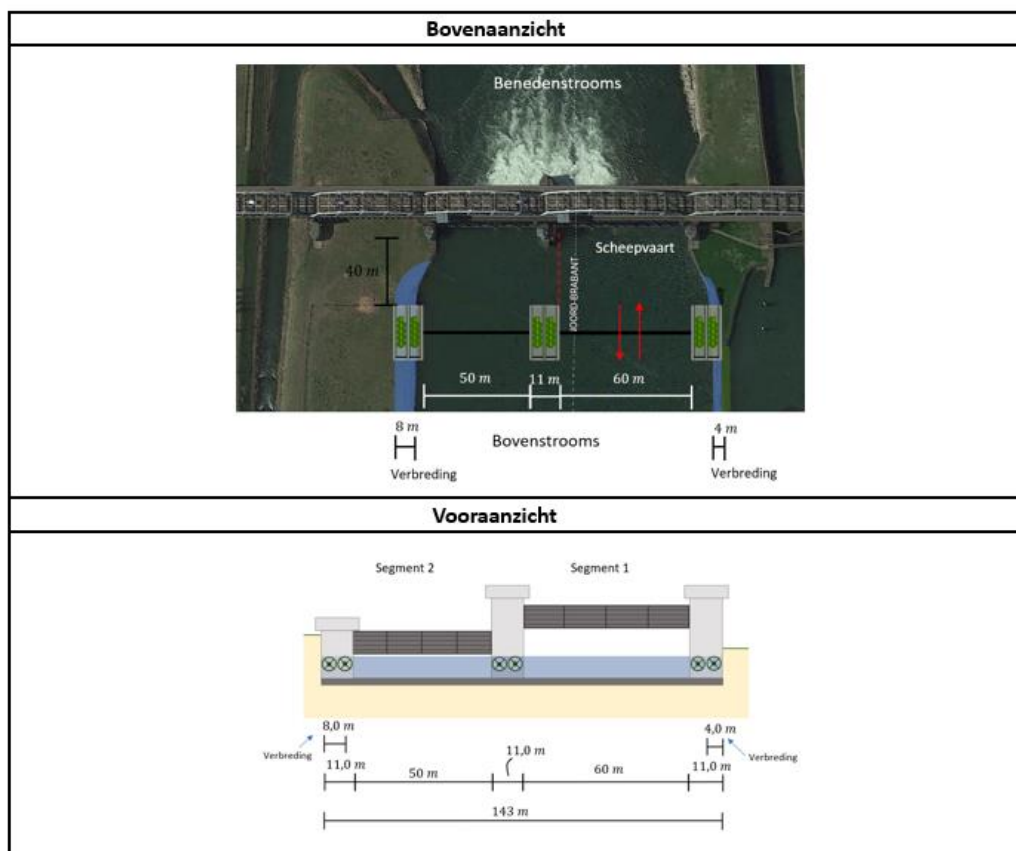
De aspecten van aandacht die bij de bovenstaande varianten worden genoemd gelden natuurlijk ook voor de combinatie varianten.

In ontwerpalternatief A.3.4 wordt het middelste steunpunt hetzelfde uitgewerkt als in ontwerpalternatief A.3.3. Wederom wordt de toegevoegde weerstand gecompenseerd door de stuw aan de kant van Grave te verbreden en wordt het steunpunt dusdanig uitgelijnd dat de doorvaartopening geen nadelige effecten ondervindt van deze aanpassing.



Figuur 7.27: Ontwerpalternatief A.3 variant 4, met in het middelste steunpunt 2 vijzelturbines en in de buitenste steunpunten 1 vijzelturbine die in de waterweg gelegen zijn.

Het belangrijkste om in ontwerpalternatief A.3.5 rekening mee te houden is dat de breedte van de doorvaartopening, segment 1, niet aangetast wordt. Zoals in Figuur 7.28 te zien is worden het steunpunt aan de kant van grave en het middelste steunpunt gecompenseerd worden door de basisstuw te verbreden in de uiterwaarde aan de kant van Grave. De toename van de breedte van het steunpunt gelegen bij de sluizen wordt gecompenseerd door de stuw enigszins lokaal te verbreden ten kosten van een deel van het naastgelegen eiland .



Figuur 7.28: Ontwerpalternatief A.3 variant 5, met de buitenste steunpunten gelegen in waterweg met 2 vijzelturbines in elk steunpunt.

3. Bepalen van de optimale variant:

wordt het optimale aantal vijzelturbines als economisch optimaal beschouwd in de huidige ontwerpfase. Dit wordt bepaald aan de hand van een analyse die uit vier delen bestaat: het vaststellen van de financiële opbrengst, een globale kostenraming, het vergelijken van de kosten en baten door de netto contante waarde te berekenen, en het bepalen van het projectrendement. De optimale variant wordt uiteindelijk vastgesteld in de laatste twee delen van deze analyse. De huidige analyse om de optimale variant te bepalen komt grotendeels overeen met die van ontwerpconcept A.2. Het voornaamste verschil zit in de kostenraming.

Deel 1 – Bepalen van totale financiële-opbrengst:

De financiële-opbrengst per variant wordt op gelijke wijze bepaald als in ontwerpconcepten A.1 en A.2. Een aspect moet echter worden besproken voor dit ontwerpconcept: het vermogen van de vijzelturbines.

Zoals in paragraaf 6.1.3 wordt gesteld wordt het rendement van de vijzelturbines geoptimaliseerd door de hellingshoek aan te passen aan de benedenstroomse waterstand. In dit ontwerpconcept is dat echter niet mogelijk omdat de turbines star zijn opgehangen tussen de openingen in het steunpunt. Dit verlies in rendement leidt mogelijk in een verlies in vermogen wat kan resulteren in een verlies aan energieopbrengst, en uiteindelijk dus in een verlies aan financiële opbrengst. Tegenover dit verlies staat echter een mogelijk winst doordat het ontwerp van de vijzelturbines kan worden aangepast, langer worden gemaakt en de diameter kan toenemen, waardoor meer gravitatiekracht van het water omgezet kan worden in elektriciteit. Zoals eerder vermeld moet de leverancier naar beide aspecten meer onderzoek doen. In deze thesis wordt gesteld dat met hetzelfde vermogen mag worden gerekend. Om dit vermogen

te bepalen is namelijk een ordergrootte schatting gedaan naar het rendement van de vijzelturbines. Er wordt aangenomen dat het rendement ongeacht de aanpassingen van een vergelijkbare orde zal zijn. De verwachte impact wordt verondersteld niet significant te zijn. Ook voor dit ontwerpconcept wordt de energieopbrengst dus berekend met een vermogen van 152 kW.

Voor de berekening van de energieopbrengst en daarmee ook de financiële opbrengst wordt voor ontwerpconcept A.3 gebruik gemaakt van exact hetzelfde model als voor ontwerpconcept A.1 en A.2. Het verschil is dat voor ontwerpconcept A.3 minder varianten berekend hoeven te worden: A.3.1 t/m A.3.5.

De financiële opbrengst per variant wordt dus op dezelfde manier bepaald als in ontwerpconcept A.1 en A.2. Voor een gedetailleerde uitleg van deze methode wordt verwezen naar paragraaf 7.2.1.

Deel 2 – Globale kostenraming:

In deze stap wordt een globale kostenraming gemaakt op basis van kentallen en referentieprojecten. Een pythonscript is opgesteld om parametrisch de kosten voor alle varianten te berekenen. De voornaamste invoervariabele in dit model is het aantal vijzelturbines. Onderstaand wordt uitgelegd waaruit de globale kostenraming is opgebouwd. De kosten die buiten de kostenraming vallen zijn voor dit ontwerpconcept hetzelfde als voor ontwerpconcept A.1 en A.2.

De investeringskosten worden zoals in de andere concepten berekend op basis van materiaalgebruik. De extra materiaalkosten om vijzelturbines in de steunpunten te implementeren ten opzichte van het basisstuw ontwerp die in de huidige kostenraming worden opgenomen zijn:

- De vijzelturbines;
- Constructieve aanpassingen aan de steunpunten om de toegenomen spanning ten gevolge van de openingen voor de vijzelturbine op te nemen;
- Afhankelijk van de variant, de verbreding van de steunpunten;
- Afhankelijk van de variant, het extra grondverzet ten gevolge van de verbreding van de steunpunten en/of de positionering van de buitenste steunpunten;
- Afhankelijk van de variant, de toename in de dimensies van de fundering door de verbreding van het steunpunt;

De volgende stap is het parametrisch uitwerken van de kosten afhankelijk van het aantal vijzelturbines.

De vijzelturbines:

Voor de kosten van de vijzelturbines wordt dezelfde schatting gebruikt als in ontwerpconcept A.1:

- 1 vijzelturbine kost €341.000,- (de aanvullende civiele kosten voor een waterkrachtcentrale zoals de waterafdichting vallen hier buiten);
- De staffel van vijzelturbines is als volgt: wanneer 20 vijzelturbines worden aangeschaft is de prijs per vijzelturbine 20% lager dan de prijs als 1 vijzelturbine wordt aangeschaft. Een exponentiele functie is opgesteld om de korting te berekenen afhankelijk van het aantal vijzelturbines;

Constructieve aanpassingen aan de steunpunten:

Zoals hierboven uitgelegd, nemen de spanning in de betonnen wanden toe door de openingen in de wand. Daar is tevens uitgelegd dat de steunpunt-constructie niet hoeft te bezwijken hierdoor. De dikte kan toenemen en/of er kan meer wapening worden toegepast om het steunpunt te versterken. Dit aspect moet echter wel worden meegenomen in de kosten. Aangezien dit een aspect is wat afwijkt van het ontwerp van de basisstuw moet deze kosten worden toegeschreven aan de kosten van de waterkrachtcentrale.

Aangezien in dit onderzoek geen constructief ontwerp wordt gemaakt moet een aanname worden gemaakt voor de kosten van dit aspect. Voor nu wordt aangenomen dat de dikte van de muur met 25 % toeneemt. De extra kosten worden dus ingeschat door 25% van de kosten van het al ontworpen steunpunt in acht te nemen. In de kostenraming van ontwerpconcepten A.1 is bepaald dat de kosten van een

steunpunt 239.168 euro bedraagt. Dus de kosten van het versterken van het steunpunt worden ingeschat op 59.792 euro.

De verbreding van de steunpunten:

Deze kostenpost is afhankelijk van de variant. Wanneer aanpassing 2 wordt toegepast, twee vijzelturbines in een steunpunt, moeten de steunpunten ten opzicht van het basisstuw-ontwerp verbreed worden. Deze kosten wordt toegeschreven aan de waterkrachtcentrale. De enige varianten waarin deze kosten niet terugkomt zijn de ontwerpalternatief A.3.1 en A.3.2. In deze varianten wordt enkel aanpassing 1 toegepast en vereisen dus geen verbreding van de steunpunten.

Zoals hierboven beschreven is een verbreding van 4 m van het steunpunt nodig om twee vijzelturbines in het steunpunt te realiseren. Dus in totaal komen worden twee wanden, aan de voor- en achterkant, verbreed. De kosten van deze wanden wordt hetzelfde bepaald als de kosten van een extra steunpunt in ontwerpconcept A.1. Om de kosten te berekenen moet de inhoud van het extra beton en het gewicht van het wapeningsstaal worden berekend. In Tabel 7.8 wordt dit berekend:

Tabel 7.8: Extra materiaalgebruik door verbreding van het steunpunt.

Verbreding van het steunpunt:			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h	15	m
Breedte (b)	b	4	m
Muurdikte (t)	t	0,5	m
Wapeningsratio	ρ_{totaal}	1	%
<u>Dichtheid:</u>			
Beton	ρ_b	2400	kg/m ³
Wapeningsstaal	ρ_s	7850	kg/m ³

De bovenstaande eigenschappen resulteren in een extra beton bondigheid voor een wand van 30 m³. De totale beton inhoud per steunpunt komt daarmee op 60 m³. Net als voor ontwerpconcept A.1 wordt geschat dat 1% van deze inhoud wapeningsstaal is. Naast het materiaalgebruik beton en staal moet de kosten van een bekisting worden mee genomen. Om dit te berekenen moet het extra oppervlak bekisting worden berekend. In totaal komt dit uit op 176 m². De kosten worden als volgt globaal ingeschat:

Tabel 7.9: kosten indicatie van de verbreding van een steunpunt, op basis van materiaalgebruik. De kosten per eenheid zijn afkomstig van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.)

Kostenpost	Kosten indicator	Waarde	Kosten per eenheid	Eenheid	Kosten
Beton	Inhoud	60 m ³	€ 158,-	per m ³	€ 9.480
Wapenings- staal	Gewicht	4710 kg	€ 2,20,-	per kg	€ 10.362
Bekisting	Oppervlak	176 m ²	€ 89,50,-	per m ²	€ 15.752
Totale directe kosten					€ 35.594

Het bovenstaande bedrag is het bedrag per steunpunt dat verbreedt moet worden. Voor de varianten betekend dit de volgende aanvullende kosten:

Tabel 7.10: Aanvullende kosten per variant ten gevolge van verbreding van het steunpunt.

Varianten	Kosten verbreding steunpunt [€]
A.3.1	-
A.3.2	-
A.3.3	35.594,-
A.3.4	35.594,-
A.3.5	106.782,-

Het extra grondverzet:

Ten gevolge van de verbreding van de steunpunten en/of de positionering van de buitenste steunpunten veranderd de lay-out van de basisstuw ook enigszins. Als gevolg hiervan moet een extra volume grond worden ontgraven. In Tabel 7.11 wordt het volume grond dat verzet moet worden per variant gegeven. De uit te graven diepte bedraagt voor elke variant 8,65 m. De lengtes verschillen enigszins.

In ontwerpalternatief A.3.2 moeten achter de buitenste steunpunten een volume van 40 m bij 7 m bij 8,65 m worden uitgegraven. In ontwerpalternatief A.3.3 hoeft slechts de lengte van het steunpunt worden uitgegraven, terwijl in de andere varianten, ontwerpalternatief A.3.4 en A.3.5, net als in ontwerpalternatief A.2 moet een strook met een lengte van 600 m worden uitgegraven. De breedte is afhankelijk van de variant. Vervolgens wordt de inhoud vermenigvuldigd met het kengetal (5 €/m³) dat ook gebruikt is in ontwerpalternatief A.2 om de kosten te berekenen.

Tabel 7.11: Overzicht van het volume grondverzet en bijbehorende kosten per variant op ontwerpconcept A.3.

Varianten	Totale volume dat uitgegraven moet worden [m ³]	Kosten grondverzet [€]
A.3.1	-	-
A.3.2	2.422	12.110,-
A.3.3	692	3.460,-
A.3.4	20.760	103.800,-
A.3.5	62.280	311.400,-

Het extra materiaalgebruik met betrekking tot de fundering:

Deze kostenpost komt wederom alleen terug voor de varianten waarin de steunpunt verbreedt worden om twee vijzelturbines te plaatsen. Ten gevolge van de verbreding van de steunpunten moet de totale breedte van de fundering ook met deze breedte toenemen.

Het materiaalgebruik van deze verbreding worden berekend in Tabel 7.12. Voor het bepalen van deze kostenpost worden de kengetallen voor de eenheidsprijs van beton en staal gebruikt die bovenstaand bepaald zijn. De verbreding van de fundering geldt voor de volledige lengte van de fundering, 60 m, omdat anders een de kans op onderloopsheid (In het Engels: piping) groot is. De verbreding heeft dezelfde dikte als wordt aangenomen voor de fundering, 2 m. Afhankelijk van de verbreding kan nu het extra materiaalgebruik en daarmee de kosten worden bepaald.

Tabel 7.12: Kosten berekening van de benodigde verbreding van de fundering per variant.

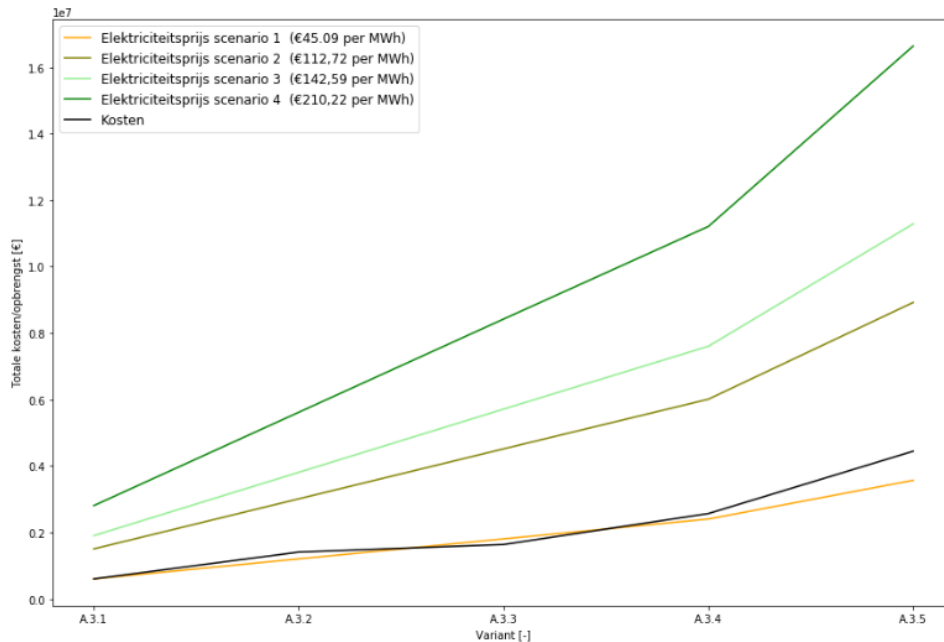
Varianten	Extra breedte [m]	Extra volume beton [m ³]	Kosten van het beton [€]	Gewicht Wapeningsstaal [kg]	Kosten wapeningsstaal [€]
A.3.1	-	-	-	-	-
A.3.2	-	-	-	-	-
A.3.3	4,0	480,0	75.840,-	37.680	82.896,-
A.3.4	4,0	480,0	75.840,-	37.680	82.896,-
A.3.5	12,0	1.440,0	227.520,-	113.040	248.688,-

Deel 3 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.3 op basis van de netto contante waarden van de winst:

Zoals eerder vermeld, wordt de netto contante waarde van de winst gebruikt om de varianten te beoordelen en daarmee het economisch optimale aantal vijzelturbines te bepalen. De methode om dit voor elke variant te berekenen wordt uitvoerig beschreven in Bijlage B. In het kort wordt in het financiële model een geldstroomdiagram opgesteld, waarin zowel de opbrengsten zoals berekend in Deel 1 als alle kosten zoals berekend in Deel 2 worden opgenomen. Uiteindelijk worden de netto contante waarde van alle opbrengst en kosten van elkaar afgetrokken, wat resulteert in een netto contante waarde van de winst.

In de huidige paragraaf wordt niet beschreven hoe het geldstroomdiagram exact is opgebouwd maar worden de resultaten van het model getoond. Voor een uitvoerige uitleg van het geldstroomdiagram wordt naar paragraaf 7.2.1 en bijlage B verwezen.

Op basis van Figuur 7.29 worden de varianten beoordeeld door de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen te vergelijken met de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn.



Figuur 7.29: Een overzicht van de opbrengsten afhankelijk van het scenario voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs en kosten, zwarte lijn, in een grafiek geplot.

Op basis van de grafiek getoond in Figuur 7.29 worden de volgende conclusies met betrekking tot ontwerpconcept A.3 getrokken:

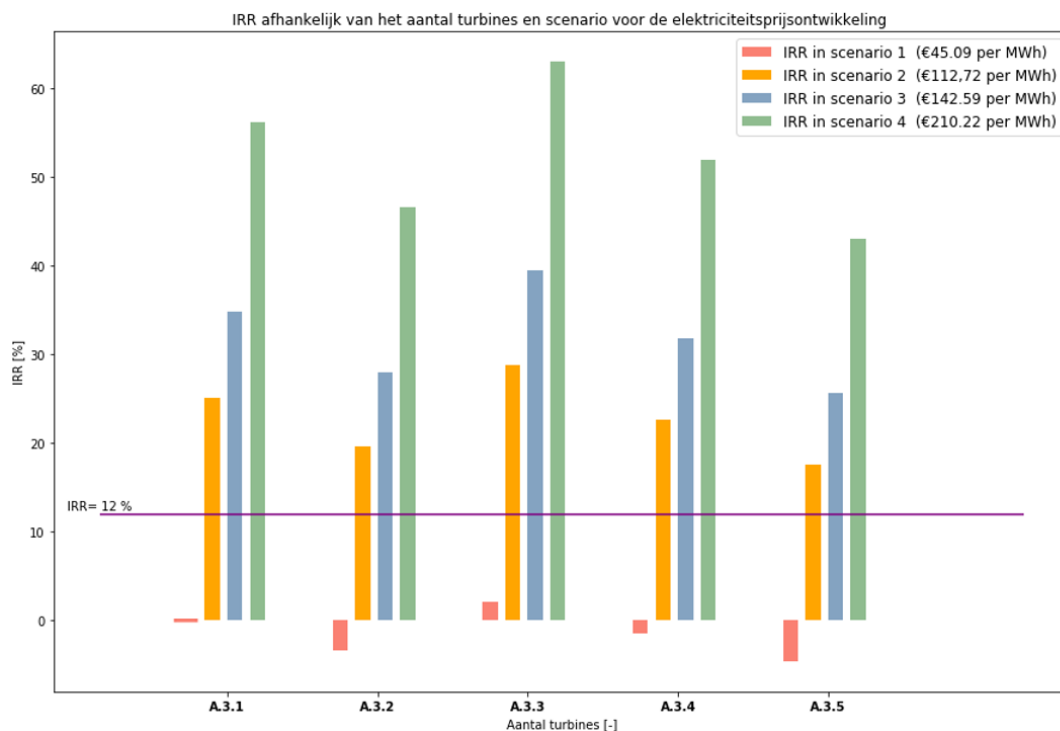
- **Meerdere Knikken in de kostengrafiek:** Voor dit ontwerpconcept zijn geen eenduidige parametrische vergelijkingen op te stellen om de kosten te ramen; voor elke variant is apart de kosten berekend. Dit komt doordat de verschillende aanpassingen variërende kosten hebben. Geen enkele variant is door de (combinatie aan) aanpassingen hetzelfde.
- **Knik in de opbrengstengrafiek:** Ongeacht het scenario voor de elektriciteitsprijs treedt er na ontwerpvariant A.3.4 een knik op in de opbrengstengrafiek. De oorzaak hiervan is dat er met de aanpassingen geen variant met 5 vijzelturbines ontwikkeld kan worden. Het aantal vijzelturbines springt tussen variant A.3.4 en A.3.5 van 4 naar 6 vijzelturbines.
- **Scenario 1 voor de elektriciteitsprijs:** In tegenstelling tot de andere ontwerpconcepten is voor dit ontwerpconcept wel één variant te vinden die winstgevend lijkt te zijn in alle scenario's voor de elektriciteitsprijs, namelijk variant A.3.3. Dit betekent echter nog steeds niet dat de variant economisch haalbaar is. Dit dient beoordeeld te worden op basis van het projectrendement.
- **Electriciteitsprijzen in de buurt van scenario's 2, 3 of 4:** Als de toekomstige elektriciteitsprijs in de buurt ligt van een van de scenario's 2, 3 of 4, dan is er een winstgevende businesscase mogelijk.
- **De invloed van de elektriciteitsprijs en subsidies:** Scenario 1 toont aan dat voor een winstgevende businesscase het noodzakelijk is om gebruik te kunnen maken van subsidies of dat de elektriciteitsprijs op zichzelf moet stijgen in vergelijking met de periode van 2008 tot en met

2015. De laatste optie lijkt redelijk aannemelijk en realistisch, gezien de structurele veranderingen sinds die periode. Ondanks dat variant A.3.3 winstgevend lijkt te zijn, liggen opbrengsten in scenario's 1 van alle varianten onder of op de kosten lijn. Op basis hiervan kan al worden verwacht dat het gewenste project rendement niet behaald wordt. Voor verdere toelichting wordt verwezen naar Bijlage B.3. Daarom wordt aangenomen dat het waarschijnlijk is dat dit ontwerpconcept winstgevend is.

- **Variant met 3 vijzelturbines (variant A.3.3):** De variant met 3 vijzelturbines lijkt economisch optimaal. Voor deze variant is het verschil tussen opbrengsten en kosten het grootst. Dit geldt voor elk scenario van de elektriciteitsprijs.

Deel 4 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.3 op basis van het projectrendement:

Ook voor dit ontwerpconcept moeten de varianten worden vergeleken op basis van het projectrendement om de economisch optimale variant te selecteren. Figuur 7.30 toont een overzicht van de projectrendementen voor de varianten van ontwerpconcept A.3 bij variërende elektriciteitsprijzen.



Figuur 7.30: staafdiagram van het project rendement per variant bij verschillende scenario's voor de elektriciteitsprijs ontwikkeling.

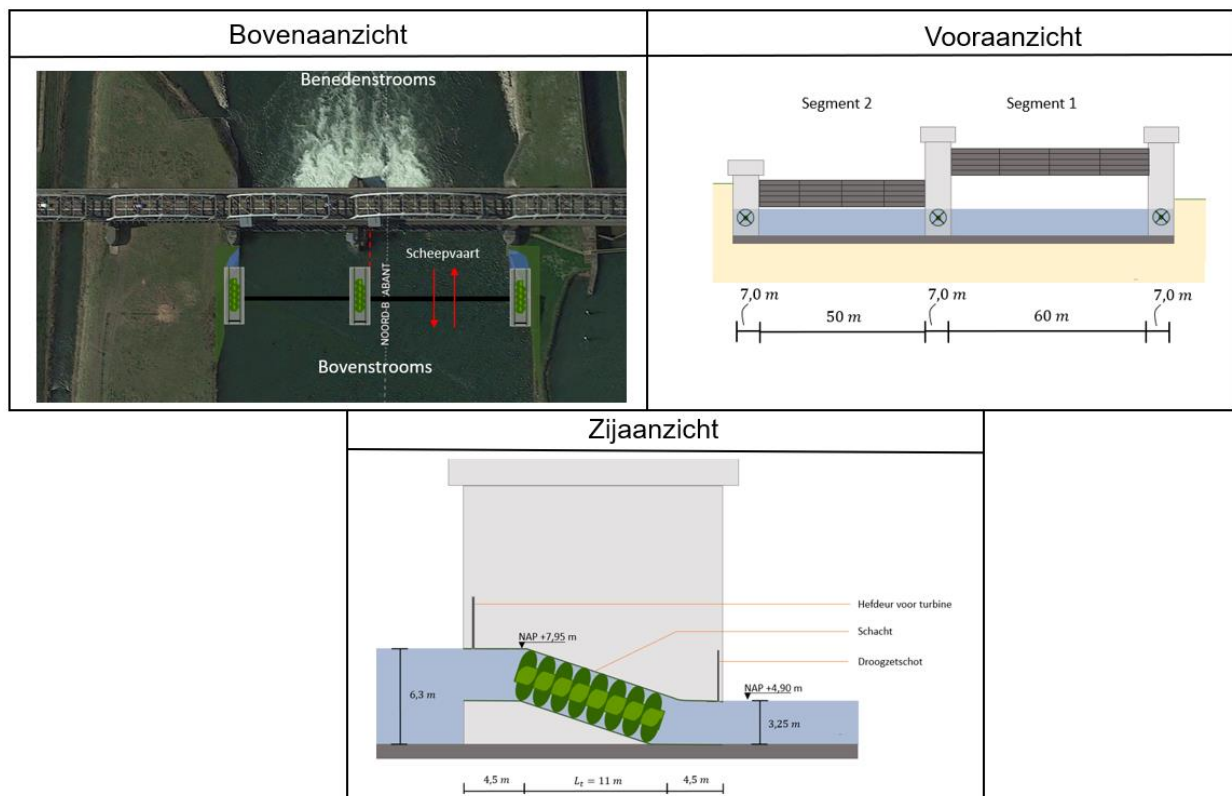
Uit Figuur 7.21 kunnen waardevolle conclusies worden getrokken:

- Om de optimale variant te vinden, moet worden gekeken naar een variant die in minimaal drie verschillende prijsscenario's het gewenste projectrendement behaalt. Uit de bovenstaande grafiek blijkt dat dit voor elke variant wordt behaald. De economisch meest optimale variant is variant A.3.3. Deze variant genereert het hoogste project rendement.
- Tegenstelling tot de voorgaande ontwerpconcepten is in ontwerpconcept A.3 niet de variant met de meeste turbines optimaal. Voor het huidige ontwerpconcept heeft de variant met 3 vijzelturbines (A.3.3) ongeacht het scenario van de elektriciteitsprijs het hoogste project rendement.
- Zoals in de analyse van deel 3 al werd verondersteld wordt ondanks dat variant A.3.3 een winstgevende businesscase heeft in scenario 1 van de elektriciteitsprijs, het gewenste projectrendement nog steeds niet gehaald.

- Het is van essentieel belang om op te merken dat de gevonden projectrendementen relatief hoog zijn. Een projectrendement van 60% is onrealistisch. Er dient daarom opgemerkt te worden dat in de bovenstaande grafiek terug te zien is dat niet alle kosten, bijvoorbeeld de indirecte kosten, zijn meegenomen in het financieel model. Desalniettemin kan de grafiek wel uitstekend gebruikt worden om de varianten met elkaar te vergelijken.

4. Presenteren van de optimale variant:

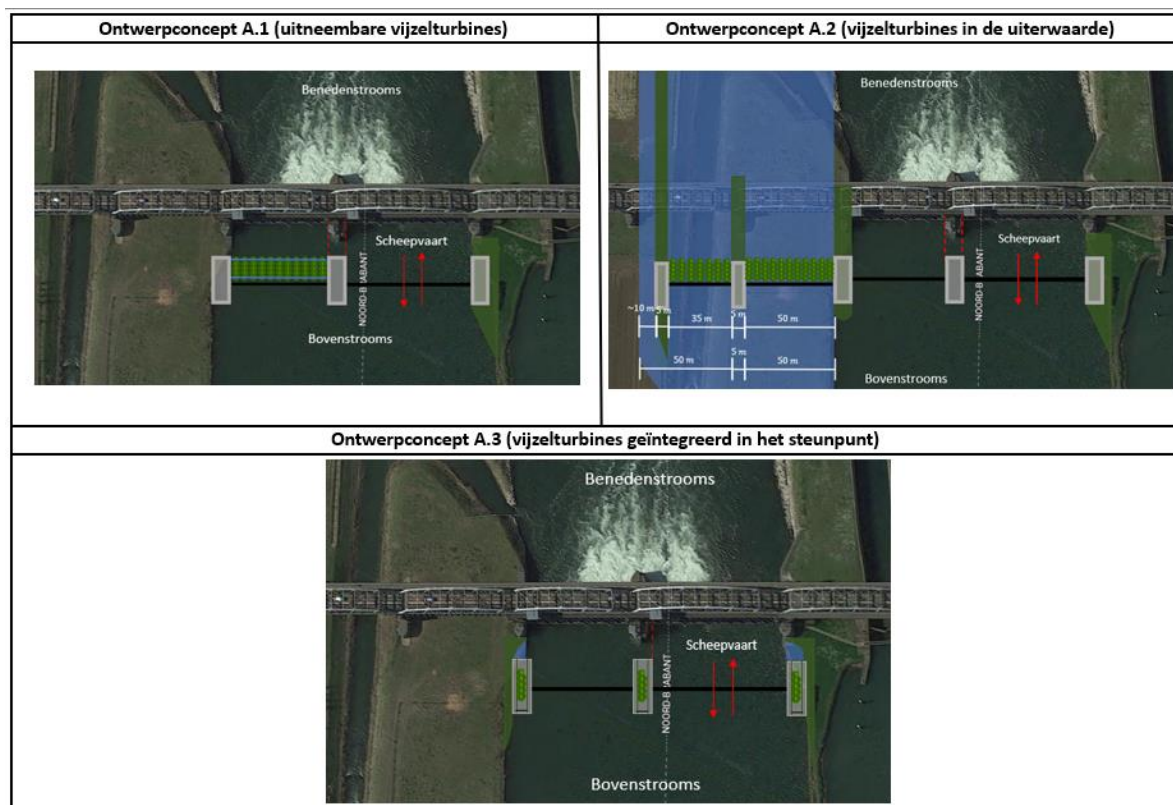
In Figuur 7.32 worden de schetsontwerpen van de economische optimale variant voor ontwerpconcept A.3 gepresenteerd.



Figuur 7.31: Ontwerptekeningen van de optimale variant voor ontwerpconcept A.3, met 3 vijzelturbines (ontwerpvariant A.3.3).
LINKS BOVEN: bovenaanzicht. RECHTS BOVEN: vooraanzicht. ONDER: Zij aanzicht.

7.3 Evalueren van de verbeterde ontwerpconcepten

In deze paragraaf worden de ontwerpconcepten geëvalueerd om de optimale manier te bepalen om een waterkrachtcentrale te implementeren in de toekomstige stuw bij Grave. Per ontwerpconcept is in de vorige paragraaf één optimale variant geselecteerd op basis van de economische waarde. De ontwerpalternatieven die in deze analyse worden meegenomen zijn A.1.11 (uitneembare vijzelturbines), A.2.18 (vijzelturbines in de uiterwaarde) en A.3.3 (vijzelturbines geïntegreerd in het steunpunt). De resulterende economisch optimale ontwerpalternatieven per ontwerpconcept die worden meegenomen in de evaluatie, zijn overzichtelijk weergegeven in Figuur 7.32. Door middel van Multicriteria-analyse worden ontwerpconcepten met elkaar vergeleken om de optimale oplossing te bepalen.



Figuur 7.32: Resultierende ontwerpconcepten die meegenomen worden in Multicriteria-analyse. LINKS BOVEN: ontwerpalternatief A.1.11, waarin 11 vijzelturbines zijn geïntegreerd volgens ontwerpoplossing A.1. RECHTS BOVEN: ontwerpalternatief A.2.18, waarin 18 vijzelturbines zijn geïntegreerd volgens ontwerpoplossing A.2. MIDDEN ONDER: ontwerpalternatief A.3.3, waarin 3 vijzelturbines zijn geïntegreerd volgens ontwerpoplossing A.3.

7.3.1 Opzet van het evaluatieproces

Het optimale ontwerpconcept voor de integratie van een waterkrachtcentrale in de basisstuw wordt vastgesteld met een grondige Multicriteria-analyse. Binnen deze analyse worden de ontwerpconcepten beoordeeld aan de hand van de evaluatiecriteria die zijn vastgelegd in de basis van het ontwerp (paragraaf 3.4). Vervolgens worden de netto contante waarden van de ontwerpconcepten bepaald. Daarna worden de totale waarden van de evaluatiecriteria afgezet tegen de netto contante waarde om de ontwerpconcepten met elkaar te vergelijken.

Het primaire doel van deze evaluatie is om de optimale manier te identificeren om de waterkrachtcentrale in te passen in de basisstuw. Het dient benadrukt te worden dat deze evaluatie niet tracht te bepalen of een waterkrachtcentrale op zichzelf wenselijk is, noch om de voorkeur vast te stellen tussen een toekomstige stuw met of zonder waterkrachtcentrale. Deze bredere vraagstukken liggen buiten de scope van dit onderzoek. Dergelijke vragen moeten neergelegd worden bij de beleidsmakers.

Om deze reden is bewust besloten om de ontwerpconcepten niet direct te vergelijken met het ontwerp van de basisstuw. Een dergelijke vergelijking zou kunnen impliceren dat dit onderzoek ook een oordeel velt over de wenselijkheid van een waterkrachtcentrale. Voor een oordeel over de wenselijkheid is een bredere en diepgaandere evaluatie vereist, ondersteund door aanvullende analyses. Suggesties voor de aspecten die in een dergelijke evaluatie behandeld moeten worden, worden uiteengezet in de aanbevelingen (paragraaf 9.2).

De eerste stap in het evaluatieproces is het beoordelen van de relevantie van de evaluatiecriteria. De evaluatiecriteria zijn gewogen in de Multicriteria-analyse met scores variërend van 0 tot 5. De toekenning van wegen aan de evaluatiecriteria is als volgt:

- **Milieu impact:** Gewicht van 3. Dit criterium heeft een aanzienlijk belang in de huidige ontwerplus, maar is niet doorslaggevend. Het is relatief belangrijk omdat verstoring van de ecologie en natuur zo veel mogelijk voorkomen moet worden. Het inpassen van een nieuwe stuw brengt onvermijdelijke concessies met zich mee, waardoor het in deze ontwerplus minder doorslaggevend is. De extra impact ten gevolge van de waterkrachtcentrale is relatief klein. Niettemin blijft het voorkomen van extra impact door de waterkrachtcentrale van betekenis.
- **Beheer & onderhoud:** Gewicht van 5. Dit criterium neemt een essentiële positie in, omdat het beheer en onderhoud van cruciaal belang zijn om het systeem optimaal te laten functioneren. Bijzondere aandacht gaat uit naar onderhoud, waar tijdige detectie en herstel van systeemdefecten een directe invloed hebben op betrouwbaarheid en operationele beschikbaarheid. Het is cruciaal dat eventuele defecten aan het systeem snel gedetecteerd en gerepareerd kunnen worden. Een slechte timing van falen en langdurige reparatiewerkzaamheden kunnen ertoe leiden dat op kritische momenten opstuwing wordt veroorzaakt waardoor de waterveiligheid in gevaar komt.
- **Duurzaamheid:** Gewicht van 5. Duurzaamheid is door het hele ontwerpproces al een cruciaal thema en criterium. Het doel van deze thesis is namelijk gericht op de bijdrage aan de verduurzaming van Nederland. Door in een vroeg ontwerpstadium nadrukkelijk rekening te houden met duurzaamheid kan tijdig milieuschade worden geminimaliseerd. Aangezien sommige ontwerpconcepten meer duurzame energie opwekken dan andere, is het zeer relevant voor het behalen van het doel van dit onderzoek om een criterium op te nemen waarin de mate van bijdrage aan duurzaamheid adequaat wordt betrokken.
- **Aanpasbaarheid:** Gewicht van 3. Dit is een relatief belangrijk criterium maar niet doorslaggevend. Het is relatief belangrijk omdat nog onbekend is op welk moment Rijkswaterstaat de waterkrachtcentrale in het stuwcomplex wil inpassen, waardoor het kiezen van een relatief flexibel ontwerp voordelen heeft. Het is echter niet doorslaggevend aangezien er nog genoeg tijd is tot de bouw van de constructie start om een gedegen afweging en keuze te maken.
- **Beïnvloeding van het stromingspatroon:** Gewicht van 2. Hoewel de meest essentiële hydraulische uitdagingen in eerdere ontwerpfasen zijn aangepakt, blijft dit criterium nog steeds relevant. Aangezien alle ontwerpconcepten hetzelfde basisprincipe voor de waterkrachtcentrale delen, is het onderscheidend vermogen op dit detailniveau verminderd, wat heeft geleid tot een gewicht van 2.
- **Additionele veiligheid van scheepvaart:** Gewicht van 1. Dit criterium wordt als niet doorslaggevend beschouwd, omdat alle ontwerpalternatieven al voldoen aan alle gestelde scheepvaartseisen. De scheepvaart kan hierdoor in alle ontwerpconcepten veilig de stuw passeren.
- **Complexiteit van het bouwen:** Gewicht van 1. In de huidige ontwerpfase wordt dit criterium niet als doorslag beschouwd, gezien het al complexe constructieproces van een nieuwe stuw en de inherente verstoring voor de omgeving. De veronderstelde marginale impact van de waterkrachtcentrale op deze complexiteit heeft geleid tot een gewicht van 1.

7.3.2 Waardebepaling:

De scores van de Multicriteria-analyse worden weergegeven in Tabel 7.13. Voor de beoordeling van de criteria wordt een schaal van 1 tot 10 gehanteerd. Een score van 5 is neutraal; dit betekent dat de prestaties van de basisstuw op het betreffende criterium niet significant verbeteren of verslechteren door de manier van inpassing van de waterkrachtcentrale. Als een ontwerpconcept, oftewel de manier waarop de waterkrachtcentrale wordt geïntegreerd, de prestaties van de basisstuw op het criterium verbetert, wordt een score hoger dan 5 toegekend. Als daarentegen de wijze van implementatie van de waterkrachtcentrale een negatieve impact heeft op de criteria in vergelijking met de basisstuw, wordt een

score lager dan 5 toegekend. De toegewezen score varieert naar gelang de mate van impact op het criterium. Een score van 10 duidt op aanzienlijke bevordering van de prestaties, bijvoorbeeld als een ontwerp aanzienlijke energieopwekking mogelijk maakt, wat de duurzaamheid van de stuw versterkt. Aan de andere kant suggereert een score van 1 een aanzienlijk nadelig effect op het criterium. Als voorbeeld kan een ontwerpconcept dat de ecologie ernstig aantast ten opzichte van het basisstuw-ontwerp een score van 1 krijgen voor het criterium milieu-impact.

Het hanteren van deze absolute scores verzekert een nauwkeurige beoordeling en geeft tegelijkertijd enig inzicht in de effecten van de integratie van een waterkrachtcentrale op de evaluatiecriteria ten opzichte van de basisstuw. Hierdoor kunnen de impact van de diverse ontwerpconcepten objectiever worden geëvalueerd.

Tabel 7.13: Relatieve beoordeling van de ontwerpconcepten (MCA)

Evaluatiecriteria	Weging	A.1 (Uitneembare vijzelturbines)	A.2 (WKC in uiterwaarde)	A.3 (Vijzelturbines in de steunpunten)
Milieu impact	3	3	2	4
Beheer & onderhoud	5	3	4	2
Duurzaamheid	5	9	10	7
Aanpasbaarheid	3	5	4	4
Beïnvloeding van het stromingspatroon	2	4	5	5
Additionele veiligheid van scheepvaart	1	3	4	5
Complexiteit van het bouwen	2	4	6	3
Totale gewogen score	-	103	114	90

In de waardebepaling wordt uitsluitend gekeken naar de impact op het criterium veroorzaakt door de waterkrachtcentrale. De impact van de basisstuw is hierin buiten beschouwing gelaten. De bovenstaande scores worden als volgt onderbouwd:

Milieu impact:

De waarden van de ontwerpconcepten op dit criterium worden bepaald door kwalitatief de impact op de natuur en ecologie in te schatten.

Er wordt verwacht dat Ontwerpconcept A.1 een negatieve impact op het milieu heeft. Dit wordt met name veroorzaakt door de impact op vismigratie. Een redelijk groot aantal vijzelturbines is namelijk aanwezig. Hoewel dit een voorlopige beoordeling is die verder onderzoek vereist, suggereert het hoge aantal vijzelturbines een grotere kans op vissterfte. Bovendien kan verwacht worden dat de hoofdstroom regelmatig door de vijzelturbines gaat, wat ook nadelig kan zijn voor vismigratie. Dit kan ook voor een hogere vissterfte zorgen. In het Toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren (RWS Water, verkeer en leefomgeving, 2014) wordt bijvoorbeeld aangegeven dat zalm voornamelijk door de hoofdstroom migreert. De daadwerkelijke impact van het aantal vijzelturbines en de positionering hiervan vereist uitvoerig onderzoek. In de huidige ontwerpfase wordt aangenomen dat dit enigszins nadelig is, maar dat er nog wel voldaan kan worden aan de gestelde eisen met betrekking tot de vismigratie. Dat het nog wel voldoet aan de norm wordt gesteld op basis van het feit dat de waterkrachtcentraletechnologie bewezen visvriendelijk is (paragraaf 6.1.3).

Wat betreft de natuur is de impact van de waterkrachtcentrales gering. Er wordt geen nieuwe natuur verstoord door de aanleg van een waterkrachtcentrale. Op basis van de verwachte nadelen voor vismigratie en daarmee mogelijk de vissterfte wordt ontwerpconcept A.1 een score van 3 toegekend.

Ontwerpconcept A.2 scoort ten opzichte van A.1 slechter op dit criterium. Ontwerpconcept A.2 heeft namelijk negatieve effecten op zowel de natuur als de ecologie. In dit ontwerpconcept komt er een aanzienlijk deel van de stuw in de uiterwaarde te liggen. Het plaatsen van de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde gaat in tegen de trend om juist hier de natuur en ecologie haar gang te laten gaan. In plaats daarvan introduceert dit ontwerpconcept een grote constructie in de uiterwaarde. Bovendien herbergt dit concept het grootste aantal vijzelturbines, wat potentieel kan leiden tot de hoogste vissterfte. Net als voor ontwerpconcept A.1 geldt echter wederom dat nader onderzoek nodig is om de ernst van de impact op de vissterfte te bepalen. Concluderend scoort ontwerpconcept A.2 slechter op het evaluatiecriterium 'milieu impact' dan ontwerpconcept A.1 doordat het zowel nadelen heeft voor de natuur als voor ecologie. Dit resulteert in een score van 2; het tast het milieu aanzienlijk aan ten opzichte van het basisstuw ontwerp zonder waterkrachtcentrale.

Ontwerpconcept A.3 scoort het hoogst op dit criterium omdat het implementeren van de vijzelturbines op deze manier niet leidt tot een extra verstoring van de natuur dan die al door de aanleg van de stuw gebeurt. Er wordt verwacht dat dit concept het geringste effect heeft op de vismigratie. De reden hiervoor is dat het aantal vijzelturbines klein is en deze zelden in de hoofdstroom liggen. Verder wordt de ecologische en natuurlijke balans in het uiterwaardgebied nagenoeg niet aangetast. Op basis van deze redenen mag worden verwacht dat de impact op het milieu ten opzicht van basisstuw gering is. Doordat het toch enig effect op vismigratie heeft doordat er toch een aantal vijzelturbines aanwezig zijn wordt dit ontwerpconcept beoordeeld met een 4.

Beheer & onderhoud:

In de beoordeling van dit criterium worden het beheer en onderhoud gescheiden. Er kan direct gesteld worden dat het beheer en onderhoud ten opzichte van dat voor de basisstuw enigszins ingewikkelder wordt doordat er een extra constructie-component, de waterkrachtcentrale, aan het systeem wordt toegevoegd. Vandaar de scores lager dan een 5. In deze beoordeling wordt verder de mate van deze impact van de ontwerpconcepten relatief ten opzichte van elkaar bepaald.

Op het gebied van beheer ontlopen de ontwerpconcepten elkaar niet veel. De operationele plannen van de concepten zijn namelijk vergelijkbaar. Daarnaast wordt in dit ontwerpproces aangenomen dat alle concepten gebruik maken van dezelfde beheersystemen, zoals de besturing en aandrijving van de beweegbare mechanismes.

Ontwerpconcept A.1 heeft echter wel een aantal nadelen op het gebied van beheer. Hiervoor zijn twee redenen. De eerste reden is dat er beheerproblemen kunnen ontstaan wanneer een calamiteit optreedt of onderhoud nodig is. Stel dat de vijzelturbines niet kunnen worden geheven door een calamiteit of dat ze onderhouden worden. Dan ben je de helft van het regelbereik van de stuw kwijt. Zo lang de afvoer laag is geeft dit geen probleem in het beheer. Echter als de afvoer hoog is, dan kan het beheer van het waterpeil lastig worden. Voordat de maatgevende afvoer optreedt kan dan al overstroming optreden die beheer problemen voor het stuwcomplex veroorzaken. De sluis kan bijvoorbeeld overstromen waardoor die niet meer functioneert. De tweede reden is dat het hefsysteem van de vijzelturbines ten opzichte van de andere ontwerpconcepten enigszins ingewikkelder beheer vergt, er wordt namelijk een extra procedure stap voor het personeel toegevoegd. Daarnaast moet de waterafdichtingen rond de vijzelturbines elke keer goed sluiten om lekverlies te voorkomen.

Ontwerpconcept A.2 en A.3 hebben beide de gunstige eigenschap voor het beheer dat de afvoercapaciteit toeneemt, waardoor minder snel problemen optreden in het beheer van het streefpeil bij een calamiteit of onderhoud. De impact hiervan is echter gering omdat het gaat over een toename in het debiet van respectievelijk 144 en 24 m³/s. Hierdoor komt dit aspect minder tot uiting in de beoordeling van het criterium.

Ontwerpconcept A.3 heeft echter een nadeel op het gebied van het beheer. Dit heeft geen betrekking op het functioneren van de stuw maar specifiek op de prestatie van de waterkrachtcentrale. Een verlies in rendement van de waterkrachtcentrale treedt op omdat de vijzelturbines vast zijn opgehangen. Zoals in paragraaf 6.1.3 beschreven kan de hoek van de vijzelturbines aangepast worden aan de benedenstroomse waterstand om het rendement te optimaliseren. In tegenstelling tot de andere concepten kan de hellingshoek van de vijzelturbines bij ontwerpconcept A.3 niet worden aangepast waardoor een verlies in rendement optreedt.

Voordat de ontwerpconcepten worden beoordeeld op het gebied van onderhoud, dienen de uitgangspunten met betrekking tot de onderhoudsstrategieën te worden beschreven. Voor ontwerpconcepten A.1 en A.2 gelden dat de waterkrachtcentrales onderhouden gaan worden door de vijzelturbines tijdelijk uit de centrale te halen en extern te repareren. In de tussentijd worden reserve turbines geïnstalleerd om het rendementsverlies te beperken.

Bij ontwerpconcept A.3 is het echter erg lastig zo niet onmogelijk om de vijzelturbines uit de constructie te nemen. Voor dit concept wordt aangenomen dat onderhoud in-situ plaats moet vinden: de vijzelturbine wordt uitgeschakeld en het steunpunt wordt afgesloten met de hefdeur en een droogzetschot, vervolgens wordt het steunpunt drooggezet om onderhoud ter plekke uit te voeren.

De vijzelturbines in ontwerpconcepten A.1 en A.2 zijn aanzienlijk beter en gemakkelijker te onderhouden dan in ontwerpconcept A.3. Zowel de kwaliteit van het onderhoud als de bereikbaarheid van alle onderdelen is beter als op een externe droge locatie onderhoud kan worden gedaan. Daarnaast kunnen de vijzelturbines in ontwerpconcept A.3 niet (tijdelijk) vervangen worden voor reserves waardoor er verlies in rendement optreedt. Verder wordt er onder het waterpeil niveau gewerkt en is er minder ruimte waardoor de kans op ongelukken groter is dan voor de andere ontwerpconcepten. Het laatste aspect dat nadelig is voor ontwerpconcept A.3 met betrekking tot onderhoud, is dat wanneer deze vervangen moet worden een ingewikkelde procedure nodig is. Op basis van al deze aspecten scoort ontwerpconcept A.3 significant slechter dan de andere ontwerpconcepten.

De onderhoudsstrategieën van ontwerpconcept A.1 en A.2 zijn zeer vergelijkbaar waardoor deze concepten elkaar amper ontlopen in de beoordeling van dit criterium. Ontwerpconcept A.1 heeft mogelijk een voordeel. Klein onderhoud kan mogelijk uitgevoerd worden vanaf een boot of ponton wanneer de vijzelturbines uit het water zijn genomen. Of dit praktisch mogelijk is moet in een vervolgstudie worden onderzocht. In de huidige ontwerpplus wordt deze mogelijkheid niet meegenomen in de beoordeling van het criterium 'beheer en onderhoud'.

Wanneer alle voor- en nadelen van zowel beheer als onderhoud tegen elkaar worden afgewogen wordt ontwerpconcept A.3 als slecht beoordeeld. De nadelen met betrekking tot onderhoud wegen zwaar. Daarnaast is het wenselijk om het verlies in rendement te beperken. Wanneer ontwerpconcept A.1 en A.2 worden vergeleken scoort A.1 een punt slechter door de nadelen met betrekking tot het beheer. Aangezien alle concepten het beheer enigszins lastiger maken dan wanneer geen vijzelturbines zouden worden toegepast is er voor gekozen om ontwerpconcept A.2 een score van 4 toe te kennen; dit concept presteert het best op het gebied van beheer en onderhoud. Ontwerpconcepten A.1 en A.3 zijn vervolgens

beoordeelt met respectievelijk een score van 3 en 2 om de mate van de impact terug te laten komen in de evaluatie.

Duurzaamheid:

Een aantal aspecten van duurzaamheid is in de beoordeling buiten beschouwing gelaten aangezien deze al meegenomen worden in andere criteria. Een voorbeeld hiervan is de impact op de ecologie en biodiversiteit. In het huidige criterium wordt met name gekeken naar de mate waarin het ontwerpconcept bijdraagt aan het verduurzamen van Nederland.

Om de mate waarin de ontwerpconcepten bijdragen aan de verduurzaming van Nederland uit te drukken in een (tastbaar/voelbaar/beeldvorming) getal wordt voor elke ontwerpconcept bepaald hoeveel huishoudens zij kunnen voorzien van stroom. In de benadering wordt uitgegaan van de gemiddelde elektriciteitsopwekking en het gemiddelde elektriciteitsverbruik van een huishouden in een jaar. Volgens het Compendium voor de Leefomgeving (2021) bedroeg het elektriciteitsverbruik per huishouden in Nederland in 2019 ruim 2730 kWh in een jaar. Op basis hiervan wordt per ontwerpconcept berekend hoeveel huishoudens er gemiddeld kunnen worden voorzien van elektriciteit. De resultaten per ontwerpconcept worden getoond in Tabel 7.14. De waarden voor de opwekking van elektriciteit in een gemiddeld jaar zijn afkomstig uit paragraaf 7.2.

Tabel 7.14: Berekening voor het aantal huishoudens dat kan worden voorzien van elektriciteit afhankelijk van het ontwerpconcept. Een gemiddeld elektriciteitsverbruik per huishouden van 2730 kWh wordt voor deze berekening gebruikt (Compendium voor de Leefomgeving, 2021)

Parameter	A.1 (uitneembare vijzelturbines)	A.2 (WKC in uiterwaarde)	A.3 (vijzelturbines in de steunpunten)
Elektriciteit opwekking in een gemiddeld jaar [MWh/j]	14.021	21.905	3.991
Aantal huishoudens voorzien van elektriciteit:	5.135	8.023	1.461

Op basis van de waarden in Tabel 7.14, wordt geconcludeerd dat ontwerpconcept A.2 de grootste bijdrage levert aan de verduurzaming van Nederland. Dit is de reden dat ontwerpconcept A.2 de hoogste beoordeling krijgt op het evaluatiecriterium 'duurzaamheid'. De meerwaarde met betrekking tot duurzaamheid is dusdanig veel hoger dan die van de basisstuw zonder waterkrachtcentrale, deze levert geen bijdrage, dat een score van 10 wordt toegekend. Het bevordert de duurzaamheid aanzienlijk. Ontwerpconcept A.1 produceert ook relatief veel elektriciteit. Hierdoor wordt aan dit ontwerpconcept een score van 9 toegekend aan het criterium 'duurzaamheid'. Ontwerpconcept A.3 levert relatief gezien een kleinere bijdrage aan de verduurzaming van Nederland. Op basis van deze waarde zou een score van 8 toegekend moeten worden. Echter heeft dit ontwerpconcept nog een nadeel met betrekking tot duurzaamheid ten opzichte van de andere ontwerpconcepten waardoor het slechts een 7 scoort.

Het additionele nadeel van ontwerpconcept A.3 ten opzichte van A.1 en A.2 betreft adaptief vermogen. In de ontwerpconcepten A.1 en A.2 kunnen de vijzelturbines relatief gemakkelijk vervangen worden door een nieuwe verbeterde technologie wanneer deze op de markt komt. Hierdoor kan in de toekomst een hoger rendement behaald worden wat het ontwerp nog duurzamer maakt.

Aanpasbaarheid:

De aanpasbaarheid wordt in deze ontwerpplus beoordeeld door elk ontwerpconcept op drie scenario's te analyseren die aanpassingsvermogen van de constructie vergen. Uiteindelijk zijn de kwalitatieve inschattingen van de situatie bij elkaar genomen om de aanpasbaarheid van het concept te beoordelen. De volgende scenario's worden besproken:

1. Het vervangen van de vijzelturbines;
De vijzelturbines worden gedurende de levensduur van de stuw mogelijk vervangen omdat er betere technologieën beschikbaar zijn. Redenen hiervoor kunnen bijvoorbeeld zijn het verhogen van het rendement of een minder schadelijke technologie voor vissen.
2. Het verwijderen van de vijzelturbines;
Mogelijk moeten de vijzelturbines gedurende de levensduur van de stuw verwijderd worden omdat achteraf is gebleken dat de schade aan de vispopulatie groter is dan werd verwacht of dat de waterkrachtcentrale in de toekomst zeer nadelig is voor de waterveiligheid door klimaat ontwikkelingen waardoor bijvoorbeeld opstuwing te snel ontstaat.
3. De vijzelturbines kunnen pas later in de gebruiksfase worden geïmplementeerd.
Het derde scenario kan voorkomen wanneer er bijvoorbeeld tijdens de bouwfase nog geen zekerheid is dat een derde partij de waterkrachtcentrale gaat exploiteren. Een andere reden is dat voordat de bouwfase begint het benodigde vooronderzoek nog niet is afgerond. Het is ook mogelijk dat Rijkswaterstaat eerst wil zien hoe de stuw zonder waterkrachtcentrale functioneert om daarna pas te onderzoeken of er een waterkrachtcentrale in past. Een andere reden zou kunnen zijn dat de waterkrachtcentrale pas geïmplementeerd mag worden als de huidige waterkrachtcentrales in de Maas-stuwen verwijderd zijn omdat dan eenvoudiger aan de vissterftenorm kan worden voldaan.

In het geval scenario 1 werkelijkheid wordt, presteert met name ontwerpconcept A.3 slecht. Zoals beschreven in het criterium beheer en onderhoud, zijn de vijzelturbines wanneer deze op een dergelijke manier worden geïnstalleerd lastig te vervangen. De andere twee ontwerpconcepten zijn zeer geschikt om de vijzelturbines na verloop van tijd te vervangen voor een andere technologie. Bij ontwerpconcept A.2 moet je enkel rekening houden met de ruimtelijke indeling. Voor ontwerpconcept A.1 is het de vraag of het vakwerk en hefsysteem nog gebruikt kunnen worden. Daarnaast moet natuurlijk voor elk concept onderzocht worden of de fundering en bodembescherming nog voldoen en de hydraulisch en morfologische impact zou onderzocht moeten worden.

In scenario 2 presteert ontwerpconcept A.1 het best. De vijzelturbines en ondersteunende constructie zijn eenvoudig te demonteren. Er blijven amper constructie onderdelen achter. Het implementeren van de vijzelturbines op deze manier beïnvloedt het functioneren van het stuwsysteem niet meer na verwijdering. Ontwerpconcept A.3 scoort matig in dit scenario. De vijzelturbines kunnen lastig verwijderd worden en blijven waarschijnlijk de rest van de levensduur van de stuw liggen. Echter hoeven de gevolgen hiervan niet nadelig te zijn. Door de hefdeur te sluiten en het droogzetschot door een constructie-element te vervangen die het constructief aankan ondervindt de stuw geen nadelige hydraulische, morfologische of ecologische gevolgen. Ontwerpconcept A.2 scoort relatief gezien het slechtst in dit scenario. De reden hiervoor is dat na het verwijderen van de waterkrachtcentrale een grote constructie in de uiterwaarde achterblijft. Dit is esthetisch niet fraai. Deze constructie zou verwijderd kunnen worden en de uiterwaarde opnieuw kunnen worden ingericht. Dit is echter geen duurzame oplossing. Tenzij er rekening wordt gehouden met een ander scenario waarin de waterkrachtcentrale verwijderd moet worden om meer afvoercapaciteit te bereiken. Dan kunnen de extra stuwopeningen juist goed gebruikt worden.

Scenario 3 is een opvallend en plausibel scenario. Voor dit scenario is ontwerpconcept A.3 ongeschikt. In het ontwerpen van de steunpunten wordt in eerste instantie in dit scenario geen rekening gehouden met de implementatie van een waterkrachtcentrale, het zou namelijk apart zijn om hier van tevoren rekening mee te houden maar de vijzelturbines zelf nog niet te implementeren. Het steunpunt aanpassen voor vijzelturbines en deze installeren gedurende de ontwerpfase is een ingewikkeld proces. Bovendien, kan dit constructief mogelijk niet; het toepassen van extra fundering of verdikking van de muren is onmogelijk.

Ontwerpconcepten A.1 en A.2 zijn beide geschikt voor dit scenario. Ontwerpconcept A.2 is uitermate geschikt. Op deze manier kan de waterkrachtcentrale naast de stuw worden geconstrueerd terwijl deze operationeel is. De werkzaamheden zijn daardoor ook relatief eenvoudig. In principe is het met ontwerpconcept A.3 ook mogelijk om de vijzelturbines te installeren. Dit is echter wel een lastiger constructieproces. Grote constructie-elementen moeten over water worden getransporteerd en een deel van de stuw moet worden drooggezet om het systeem te installeren. Bovendien moet op een vernuftige manier het hefsysteem worden opgehangen aan de steunpunten. Deze drie aspecten maken ontwerpconcept A.1 in dit scenario iets ongeschikter.

Welk scenario het meest reëel is bepaalt de beoordeling van dit criterium. Het inschatten van de kans op een bepaald scenario's valt buiten de scope van dit onderzoek en wordt overgelaten aan beleidsbepalers. Dit kan echter wel degelijk de uitkomst beïnvloeden. In deze ontweplus wordt het criterium beoordeeld door te stellen dat elk scenario even aannemelijk is. Op basis hiervan kan gesteld worden dat ontwerpconcept A.1 twee keer goed en een keer matig geschikt wordt geacht, ontwerpconcept scoort A.2 scoort twee keer goed en keer matig en ontwerpconcept A.3 scoort op elke vorm van aanpassing slecht. Uiteindelijk scoort ontwerpconcept A.3 dus het slechtst. De voordelen van ontwerpconcepten A.1, dat er na verwijdering geen constructie blijft staan, en ontwerpconcept A.2, het feit dat deze beter is in scenario 3, worden tegen elkaar weggestreept.

Concluderend, heeft ontwerpconcept A.1 helemaal geen impact op de aanpasbaarheid van de basisstuw. Afhankelijk van het scenario kan er altijd een aanpassing worden gemaakt waardoor voldaan wordt aan de eisen en wensen van het toekomst scenario. Een score van 5 wordt dan ook toegepast. Ontwerpconcept A.2 heeft in scenario 1 en 3 geen impact op de aanpasbaarheid van de stuw. Echter, is dit wel het geval in scenario 2. Alhoewel, dit ook een positieve bijdrage kan hebben als bijvoorbeeld meer afvoercapaciteit gecreëerd moet worden. Het beetje flexibiliteit wat wordt ingeleverd betekent daarom niet dat er niet aangepast kan worden aan de toekomstige situatie. De waarschijnlijkheid van de scenario's bepaald mede de score. Op dit moment wordt een score van 4 toegekend aan dit ontwerpconcept omdat het toch afbreuk kan doen aan de aanpasbaarheid. Ontwerpconcept A.3 scoort een 4 op aanpasbaarheid. Let op, deze beoordeling ligt voornamelijk in de aanpasbaarheid van de waterkrachtcentrale niet in die van de basisstuw. De aanpasbaarheid van de basisstuw wordt eigenlijk amper aangetast. Er is nog voldoende ruimte om aanpassingen te maken aan de stuw zelf zoals uitbereiding van de stuw in de uiterwaarde. Er zouden eventueel zelfs extra vijzelturbines hiertoe kunnen worden gevoegd als dat gewenst is.

Beïnvloeding van het stromingspatroon:

Zoals in paragraaf 3.4 beschreven, wordt de beïnvloeding van het stromingspatroon kwalitatief beoordeeld. Vier aspecten worden kwalitatief voor elk ontwerpconcept ingeschat: verstoring van het stromingspatroon zelf, mogelijke gevolgen voor scheepvaart, mogelijke gevolgen voor de bodembescherming en verlies in rendement van de waterkrachtcentrale. In de huidige analyse wordt opstuwing niet meegenomen aangezien elk ontwerpconcept al is geverifieerd op dit gebied.

Ontwerpconcept A.1 kan mogelijk ongemakkelijkheden in het stromingspatroon veroorzaken. Doordat de helft van de stuw bezet is met vijzelturbines die relatief weinig afvoer doorlaten bij middelbare en hoge afvoeren, zal er bij deze afvoersituaties een stroomversnelling door de stuwopening zonder vijzelturbines plaats vinden. Een dergelijke versnelling heeft gevolgen voor de bodembescherming, met name in het geval van langdurige blootstelling. De waterkrachtcentrale zal robuuster moeten worden ontworpen. Een andere impact die dit ontwerpconcept op het stromingspatroon kan hebben is dat het dwarsstroming en/of turbulentie kan veroorzaken. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in stroomsnelheid achter de stuwopeningen. Dit kan ook de stabiliteit van de bodembescherming in gevaar brengen. Zowel de stroomversnelling als de turbulentie en dwarsstroming worden aangenomen geen verlies in rendement te

veroorzaken aangezien verwacht wordt dat alle drie de aspecten pas merkbaar zijn achter de waterkrachtcentrale. Daarnaast wordt aangenomen dat drie mogelijke veranderingen in het stromingspatroon geen problemen veroorzaken voor scheepvaart. De ongemakkelijkheden in het stromingspatroon liggen ver genoeg van de sluis waardoor de gevolgen hiervan niet nadrukkelijk merkbaar zijn voor scheepvaart bij de sluis. In de andere situatie, hoogwater, waarin scheepvaart door de rechter stuwopening vaart ondervindt scheepvaart ook geen nadelen. Op dat moment zijn de vijzelturbines namelijk uit de waterweg geheven waardoor er noch een stroomversnelling noch dwarsstroming noch turbulentie optreedt. Al met al valt de impact op van het stromingspatroon mee. Alleen de bodembescherming dient robuuster uitgevoerd te worden om erosie problemen te voorkomen. Daarom is een score van 4 toegekend aan dit ontwerpconcept voor het criterium 'Beïnvloeding van het stromingspatroon'.

Bij ontwerpconcept A.2 treedt er ook een stroomversnelling op en kan door het verschil in stroomsnelheden ook turbulentie en dwarsstroming ontstaan. De mate waarin deze aspecten optreden en de gevolgen voor scheepvaart en bodembescherming verschillen echter wel van ontwerpconcept A.1. De stroomversnelling zal kleiner zijn omdat de versnelling plaatsvindt over een grotere breedte, dus minder versnelt. De stuw heeft nog steeds een breedte van 110 m. Dus ten opzichte van het ontwerp van de basisstuw is er geen versnelling. Dit heeft dus geen impact op de scheepvaart en bodembescherming. Een verschil in stroomsnelheid achter de waterkrachtcentrale en de andere stuwopeningen kan echter wel optreden. Het kan dus zijn dat er dwarsstroming en/of turbulentie optreedt. De bodembescherming dient hierop ontworpen te worden. Tevens kan dit problemen met zich meebrengen voor scheepvaart. Dwarsstroming kan problemen veroorzaken voor scheepvaart. In de huidige conceptuele ontwerpfase wordt aangenomen dat de plek waar dwarsstroming optreedt, rond de uitwisselingen van waterstromingen achter de vijzelturbines en de hoofdstroom, niet leidt tot problemen voor scheepvaart omdat de turbines helemaal links in het complex gelegen zijn terwijl de scheepvaartopening juist rechts ligt. Waar de scheepvaart de stuw passeert wordt verwacht dat de dwarsstroming niet te groot is voor de scheepvaart. Om na te gaan of dit daadwerkelijk het geval is moet een 2- of zelfs 3-dimensionale hydraulische analyse worden uitgevoerd met variërende afvoeren. Wat betreft een mogelijk verlies in rendement van de waterkrachtcentrale door een ongunstige hydraulische situatie, is op dit moment geen indicatie dat het bij dit ontwerpconcept het geval is. Dit ontwerpconcept wordt een score van 5 toegekend. Het is de verwachting dat de stroomversnelling in vergelijking met die optreedt in een basisstuw gering is en dat de dwarsstroming en turbulentie die mogelijk optreden niet tot problemen leiden.

Ontwerpconcept A.3 verstoort het stromingspatroon het minst omdat dit simpelweg het kleinste aantal vijzelturbines huisvest en deze verspreid zijn over de breedte van de stuw. Omdat er weinig verandering in het stromingspatroon wordt verwacht zullen de consequenties ook marginaal zijn. Daarom is dit ontwerpconcept beoordeelt met een 5, er zijn weinig veranderingen merkbaar ten opzichte van de situatie van de basisstuw.

Veranderingen in het stromingspatroon hoeven er overigens niet voor te zorgen dat de ontwerpconcepten ongeschikt zijn, in bepaalde mate is dit namelijk acceptabel en zijn er ontwerpmaatregelen denkbaar. Wat de invloed van de inpassing van waterkrachtcentrales op het stromingspatroon daadwerkelijk is, wat de gevolgen hiervan zijn en of dit problematisch is moet in een vervolgstudie met een 3-Dimensionale hydraulische analyse worden uitgezocht. De bovenstaande bewering moet gezien worden als een eerste inschatting om enig oordeel te vellen op het gebied van deze waarde.

Additionele veiligheid van scheepvaart:

In dit criterium in de huidige ontwerpplus wordt geen groot verschil tussen de ontwerpconcepten verwacht. Alle ontwerpconcepten voldoen namelijk aan de gestelde eisen in de basis van het ontwerp. Hierdoor wordt verondersteld dat in alle ontwerpen scheepvaart veilig het stuwcomplex kan passeren. De gevolgen

van een aanvaring zijn buiten beschouwing gelaten omdat verwacht wordt dat de gevolgen van een botsing in elk ontwerpconcept nagenoeg dezelfde zijn. De exacte kans op een aanvaring is ook buiten beschouwing gelaten omdat hier uitvoerig onderzoek voor nodig is. Door de complexiteit te bepalen worden de ontwerpconcepten kwalitatief ten opzichte van elkaar vergeleken, waardoor de kans op een botsing enigszins wordt uitgedrukt in de evaluatie.

Ontwerpconcept A.1 scoort relatief ongunstig op dit criterium. Wanneer schippers niet de goede doorvaartopeningen pakken kunnen in dit ontwerpconcept aanzienlijke problemen ontstaan. De scheepvaart botst dan op de waterkrachtcentrale die net boven de waterlijn hangt. In de basisstuw en de andere ontwerpconcepten kan het nemen van de verkeerde doorvaartopening nog goed aflopen ondanks dat afmetingen niet geschikt zijn voor scheepvaart in twee richtingen. Het is in dit geval belangrijk dat geleidingswerken en bewegwijzering worden aangelegd. Alleen bewegwijzering is niet voldoende. In 2016 is er namelijk ondanks dergelijke maatregelen een schip op de stuw gebotst. In het onderzoeksrapport *Stuwaanvaring door Benzeentanker bij Grave* (De Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2018) wordt aangegeven dat de barrières door de mist niet zichtbaar waren of niet het beoogde effect hadden. Dus voor dit ontwerpconcept moet nog veel aandacht worden besteed aan dergelijke maatregelen of moet het hefsysteem toch dusdanig hoog worden geheven dat schepen eronderdoor kunnen varen. Dus het inpassen van een waterkrachtcentrale volgens ontwerpconcept A.1 in hoofdstroom maakt het voor scheepvaart een enigszins minder veilig stuwcomplex dan dat van de basisstuw. Daarom is ontwerpconcept A.1 beoordeeld met een score van 3.

De complexiteit die een botsing van een schip met de waterkrachtcentrale kan veroorzaken is bij ontwerpconcept A.2 significant kleiner dan bij ontwerpconcept A.1. Er wordt verondersteld dat een waterkrachtcentrale in de uiterwaarde zichtbaarder is. Daarnaast wordt aangenomen dat schepen de waterweg volgen waardoor ze niet in de buurt komen van de waterkrachtcentrale. Hierdoor kan een onoplettende schipper niet zomaar op een vijzelturbine botsen. Verder wordt verwacht dat er in dit ontwerpconcept betere veiligheidsmaatregelen in de vorm van een barrière kunnen worden genomen. Een langer geleidingswerk dat de waterweg en uiterwaarde van elkaar scheiden kan bijvoorbeeld worden ontworpen. De bovenstaande 3 aspecten maken dit ontwerpconcept een stuk minder complex voor scheepvaart dan ontwerpconcept A.1. Het is echter wel enigszins complexer dan een basisstuw zonder waterkrachtcentrale, vandaar dat ontwerpconcept A.2 een 4 scoort op dit evaluatiecriterium.

De veiligheid van scheepvaart wordt niet aangetast door de inpassing van een waterkrachtcentrale volgens ontwerpconcept A.3. Daarom scoort dit ontwerpconcept een 5 op dit criterium.

De complexiteit van het bouwen:

In de beoordeling van dit criterium wordt de extra bouwtijd voor de aanleg van de waterkrachtcentrale buiten beschouwing gelaten.

Op het huidige detailniveau waarin nog geen constructieproces is vastgesteld, ontlopen de varianten elkaar niet veel. Er wordt aangenomen dat de extra werkzaamheden die nodig zijn om de vijzelturbines uitneembaar te maken een marginale impact hebben op de complexiteit van het gehele constructieproces (als wordt aangenomen dat de stuw in een bouwkuip wordt geconstrueerd). Echter, is dit voornamelijk afhankelijk van de constructiemethodes die gebruikt gaan worden en de volgorde van het constructieproces. Uitvoerig onderzoek is nodig om dit optimaal te krijgen. In deze conceptuele ontwerpfase wordt aangenomen dat ontwerpconcept A.1 het bouwproces nauwelijks complexer maakt ten opzichte van de basisstuw. De vijzelturbines kunnen op het einde in de bouwkuip worden geïnstalleerd en staan verder het constructieproces van de basisstuw niet in de weg. Aangezien er wel een extra stap nodig is scoort dit ontwerpconcept een 4 op het criterium 'De complexiteit van het bouwen'.

Mogelijk kan de implementatie van een waterkrachtcentrale een positieve bijdrage leveren aan het ontwerpproces. Ervan uitgaande dat deze direct wordt aangelegd met de nieuwe stuw, kan ontwerpconcept A.2 mogelijk een meerwaarde hebben. Doordat er 2 extra stuwopeningen bijkomen kan de afvoer capaciteit tijdens de bouw geleidelijk vergroot worden. Door in meerdere fases te bouwen zal de stroomversnelling naast de bouwkuip kleiner zijn. Er is echter besloten om dit niet mee te nemen in deze evaluatie. De reden hiervoor is dat de daadwerkelijke bijdrage afhangt van het constructie proces, of dit überhaupt nodig is en een meerwaarde heeft. Kortom het detailniveau van het constructieproces is nog te vaag om dit aspect als in een meerwaarde voor het ontwerpconcept te beschouwen. Dus ten opzichte van de basisstuw zonder waterkrachtcentrale heeft ontwerpconcept A.2 zelfs meerwaarde. Hierdoor scoort dit ontwerpconcept een 6 op het huidige criterium.

Het enige concrete dat geconcludeerd kan worden is dat de manier hoe turbines zijn toegepast in ontwerpconcept A.3 het proces iets ingewikkelder maakt. Een dergelijke integratie van een vijzelturbine in een steunpunt vergt meer aandacht. Dit is de reden dat ontwerpconcept A.3 iets slechter scoort. Dit beïnvloedt het constructieproces van de basisstuw nadelig. Daarom is dit ontwerpconcept een score van 3 toegekend op het huidige criterium.

7.3.3 Netto contante waarde:

De netto contante waarde van de waterkrachtcentrale moet in de evaluatie gebruikt worden om de ontwerpconcepten te vergelijken. In de evaluatie worden de scores op de evaluatiecriteria vergeleken met de netto contante waarde van het waterkrachtcentrale project.

De netto contante waarde omvat de financiële opbrengst van het opwekken van duurzame elektriciteit over de terugverdienperiode minus de investeringskosten en operationele kosten die gemaakt worden over de terugverdienperiode.

Gebruikelijk wordt in een Multicriteria-analyse de waarde op basis van de evaluatiecriteria vergeleken met de kosten. In dit onderzoek is er gekozen om de waarde te vergelijken met de netto contante waarde. De reden om de netto contante waarde te gebruiken is dat een waterkrachtcentrale geen geld kost maar juist oplevert wanneer een goede businesscase wordt neergezet. Dit is het geval aangezien een doel van dit ontwerp onderzoek is om een gunstig investeringsvoorstel voor een derde partij te realiseren. In paragraaf 7.2 zijn op basis hiervan varianten geselecteerd voor de ontwerpconcepten. Door de netto contante waarde te gebruiken kan in een grafiek de waarde op de evaluatiecriteria en de financiële waarde inzichtelijk worden waardoor een betere keuze kan worden gemaakt.

De netto contante waarden van de ontwerpconcepten A.1, A.2 en A.3 die gebruikt worden in de evaluatie zijn afkomstig uit respectievelijk paragraaf 7.2.1, 7.2.2 en 7.2.3. De methode waarmee deze waarden zijn bepaald worden bondig in deze paragrafen beschreven en uitgebreider in de bijlage.

Ook in de evaluatie worden de vier scenario's voor de elektriciteitsprijsontwikkeling gebruikt. Het is namelijk onzeker hoe de elektriciteitsprijs in de toekomst zich ontwikkelt. Door verschillende scenario's in de evaluatie te betrekken wordt inzichtelijk bij welk scenario welke manier van waterkrachtcentrale implementatie optimaal is.

Om de netto contante waarde en de grafieken die in de evaluatie, paragraaf 7.3.4, worden gebruikt goed te kunnen interpreteren wordt nog een bondig overzicht gegeven welke kosten betrokken zijn.

Voordat het overzicht van de betrokken kosten wordt gegeven, wordt bondig de financiële opbrengst van de waterkrachtcentrale besproken. De financiële opbrengst van de waterkrachtcentrale is bepaald door de netto contante waarde van de financiële jaaropbrengsten over de terugverdientijd bij elkaar op te tellen.

Voor de berekening van de financiële jaaropbrengst is de gemiddelde jaarwaarde van de opgewekte elektriciteit gebruikt. Over de terugverdientijd, die op 15 jaar is gesteld, is de gemiddelde jaarwaarde een correcte representatie. In deze periode wordt namelijk zowel goede (natte), als slechte (droge) jaren verondersteld te zitten.

De kosten die opgenomen zijn in de netto contante waarde zijn:

- De materiaalkosten. Alleen die kosten die uitsluitend kunnen worden toegeschreven aan de waterkrachtcentrale en de ondersteunende constructie. Wat er onder materiaalkosten valt hangt specifiek af van de ontwerpconcepten. Hiervoor wordt naar deze specifieke berekening verwezen.
- De operationele kosten als percentage van de investeringskosten. Jaarlijks wordt 5% van de investeringskosten in rekening gebracht als operationele kosten.

Kosten die buiten de bepaalde netto contante waarde vallen zijn de aanvullende onderzoeks- en ontwikkelingskosten die nog nodig zijn, de bouwkosten, personeelskosten, transportkosten en kosten die voortkomen uit de impact op de faalkansverdeling en daarmee het verdere constructieve ontwerp van de basisstuw. Met deze aspecten worden ook bijvoorbeeld de indirecte kosten van een waterkrachtcentrale op die van bodembescherming bedoeld. Daarnaast moeten andere constructie-componenten mogelijk robuuster worden uitgevoerd door de impact op de faalkansverdeling. En daarom duurder worden. In de huidige conceptuele ontwerpfase was het lastig om al deze kostenaspecten te betrekken. Met name omdat onduidelijk en onzeker is aan welke kostenpost deze aspecten worden toegeschreven. Een relevante vraag hierbij is: of alle kosten in rekening worden gebracht bij de opdrachtgever van de waterkrachtcentrale. Of hebben de bouw- en personeelskosten een marginale impact op het totaal budget omdat er toch al een nieuwe stuw neergelegd moet worden.

De netto contante waarde van elk ontwerpconcept dat bepaald is in paragraaf 7.2 wordt herhaald in Tabel 7.15.

Tabel 7.15: een overzicht van de netto contante waarde van elk ontwerpconcept per scenario voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs.

Parameter	A.1 (uitneembare vijzelturbines)	A.2 (WKC in uiterwaarde)	A.3 (vijzelturbines in de steunpunten)
Elektriciteit opwekking in een gemiddeld jaar [MWh/j]	14.021	21.905	3.991
Netto contante waarde voor scenario 1 [€]	1.052.004	−3.381.143	169.315
Netto contante waarde voor scenario 2 [€]	10.569.828	11.489.043	2.878.213
Netto contante waarde voor scenario 3 [€]	14.773.545	18.056.726	4.074.646
Netto contante waarde voor scenario 4 [€]	24.291.368	32.926.913	6.783.543

7.3.4 De eindevaluatie

Het doel van deze evaluatie is het bepalen van de optimale manier om een waterkrachtcentrale te implementeren in de basisstuw.

Op basis van het opgestelde programma van eisen en de verificaties hiervan die in de verschillende ontwerpplussen van dit ontwerp onderzoek zijn uitgevoerd voldoen de conceptontwerpen A.1, A.2 en A.3. Dit betekent dat het ontwerp als haalbaar wordt beschouwd. De aangedragen ontwerp oplossingen in dit hoofdstuk maken de inpassing hydraulisch haalbaar. De uitwerking van de concepten in paragraaf 7.2

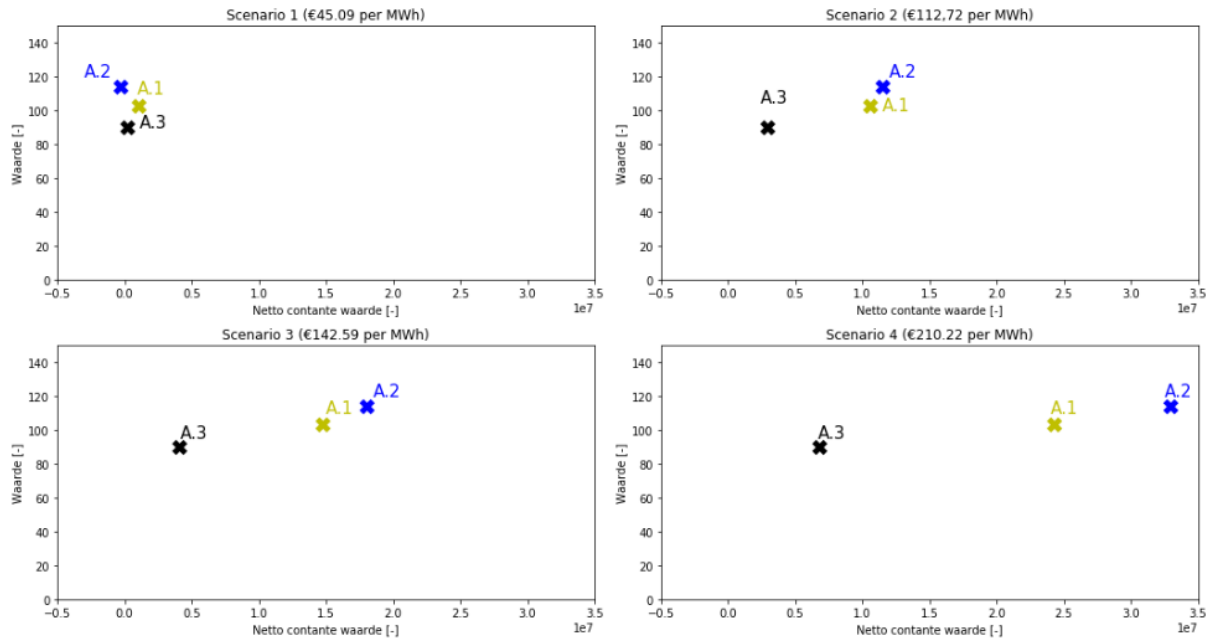
doet vermoeden dat het ook financieel haalbaar is. Al is dit voor bepaalde ontwerpconcepten wel afhankelijk van het scenario voor de elektriciteitsprijsontwikkeling. Het is echter wel van belang om aan te geven dat dit een eerste haalbaarheidsstudie betreft. Op basis van de onderzoeken uitgevoerd in deze ontwerpstudie lijkt een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave haalbaar. Desalniettemin wordt gaandeweg dit onderzoek ook geconcludeerd dat een definitieve keuze uitgebreidere analyses en verificaties vereisen. Met betrekking tot nadere analyse en verificatie worden in paragraaf 9.2 aanbevelingen gedaan. De huidige evaluatie is geen middel om de haalbaarheid verder te toetsen, maar om een keuze te maken tussen de manier van implementatie van een waterkrachtcentrale. Er wordt geadviseerd om het optimale ontwerpconcept als eerst verder te onderzoeken en uit te werken.

Het is van belang om nog een paar belangrijke beperkingen van deze evaluatie te benadrukken. Deze evaluatie heeft niet als doel om de wenselijkheid van een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave te bepalen. Zoals eerder aangegeven liggen deze bredere vraagstukken buiten de scope van dit onderzoek. Dergelijke vragen moeten neergelegd worden bij de beleidsmakers. In paragraaf 9.2 wordt een aantal aanbevelingen gedaan voor ondersteunend vervolgonderzoek voor het maken van een grondige beslissing met betrekking tot de wenselijkheid van een waterkrachtcentrale, op de gekozen manier.

Verder is het van belang om aan te geven dat geadviseerd wordt om niet op basis van de resultaten van de huidige evaluatie een investeringsbeslissing te nemen. Voor een dergelijke beslissing ontbreken nog te veel kostenaspecten in de netto contante waarde bepaling van het project. Daarnaast wordt geadviseerd om een risico-afweging van de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs gemaakt door een expert hierin mee te nemen.

Als methode om het optimale ontwerpconcept te selecteren worden in deze evaluatie de ontwerpconcepten met elkaar vergeleken op basis van twee analyses: de Multicriteria-analyse, waarin de concepten vergeleken zijn op basis van de impact op de evaluatiecriteria, en de netto contante waarde. Om een evenwichtige afweging tussen de ontwerpconcepten te maken, worden beide waarden uitgedrukt in één grafiek. Hiermee kan een evenwichtige afweging worden gemaakt tussen de belangen van de opdrachtgever van de stuw, Rijkswaterstaat, en een derde partij die investering en utiliteit van de waterkrachtcentrale op zich neemt.

In Figuur 7.33 worden vier grafieken weergegeven. Per scenario voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs is een grafiek weergegeven waarin de waarde uit de Multicriteria-analyse, x-as, afgezet zijn tegen de netto contante waarde, y-as, van de ontwerpconcepten.



Figuur 7.33: Grafische representatie van de eindevaluatie, waarin op de x-as de netto contante waarde in euro's staat en op de y-as de waarde uit de Multicriteria-analyse. Het scenario voor de elektriciteitsprijsontwikkeling varieert tussen de grafieken.

Belangrijke conclusies: (omvat ook conclusies uit par 7.3.2 en 7.3.3)

- A.2 scoort op basis van evaluatiecriteria de hoogste waarde. Wat betekent dat het de minste impact heeft op de basisstuw op de criteria. Het heeft zelfs een meerwaarde ten opzichte van een basisstuw zonder waterkrachtcentrale. Dit betreft de productie van duurzame energie.
- Met uitzondering van scenario 1 voor de elektriciteitsprijsontwikkeling, heeft ontwerpconcept A.2 ook de hoogste netto contante waarde.
- Het verschil in netto contante waarde tussen de ontwerpconcepten neemt toe met de scenario's. Dus als een nauwkeurigere verwachting van de elektriciteitsprijsontwikkeling gemaakt kan worden dan kunnen de ontwerpconcepten beter met elkaar vergeleken worden omdat dan de waarde van duurzame energie beter afgewogen kan worden.
- A.3 scoort op zowel de Multicriteria-analyse als de netto contante waarde doorgaans het slechts.

De eindconclusie is dat er wordt geadviseerd om verder te werken met ontwerpconcept A.2 omdat deze zowel op basis van de Multicriteria-analyse als op de netto contante waarde in de meeste scenario's het hoogst scoort. Met uitzondering van de netto contante waarde in scenario 1 voor de elektriciteitsprijs. Scenario 1 is een pessimistisch scenario moet daarbij worden opgemerkt.

7.4 Presentatie van het geselecteerde ontwerpalternatief

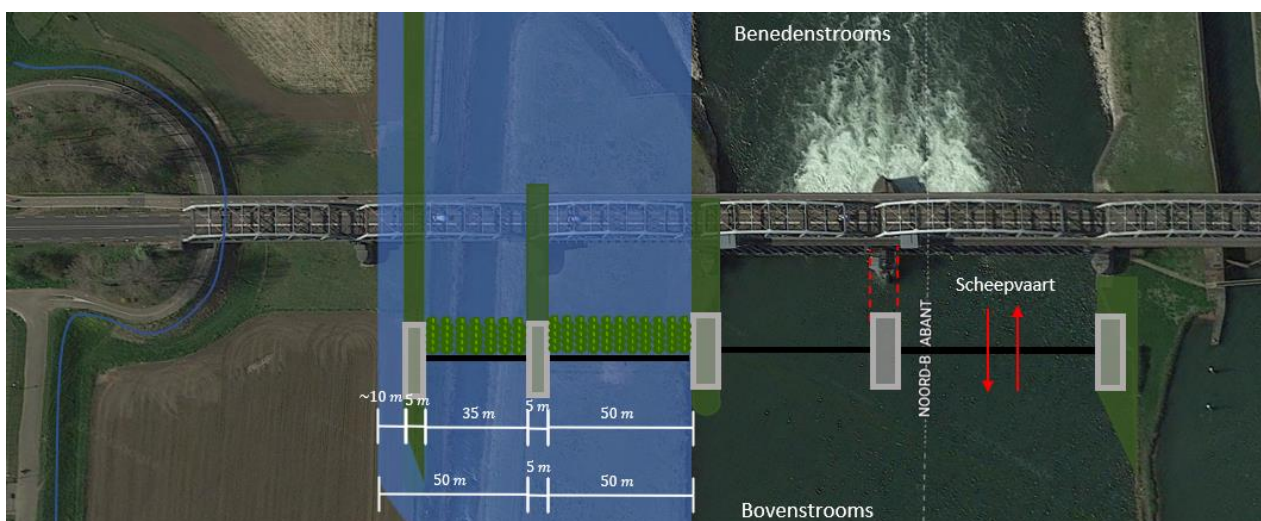
Uit de evaluatie in paragraaf 7.3 blijkt dat ontwerpconcept A.2 als de meest optimale wordt beschouwd. De optimale manier om een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave te implementeren, is dus door de vijzelturbines in de uiterwaarde te plaatsen.

De technische ontwerptekening van het resulterende waterkrachtcentraalontwerp, bekend als ontwerpalternatief A.2.18, worden weergegeven in Figuur 7.34 tot en met Figuur 7.36. In paragraaf 7.3.2 is vastgesteld dat deze waterkrachtcentrale, met 18 vijzelturbines met elk een vermogen van 152 kW, naar schatting ongeveer 8.000 huishoudens per jaar van elektriciteit kan voorzien.

Een bijkomend voordeel van dit ontwerpalternatief is dat het mogelijk maakt om beide stuwopeningen van de basisstuw bevaarbaar te maken voor scheepvaart. Dit draagt bij aan de haalbaarheid van de waterkrachtcentrale met betrekking tot de scheepvaart.

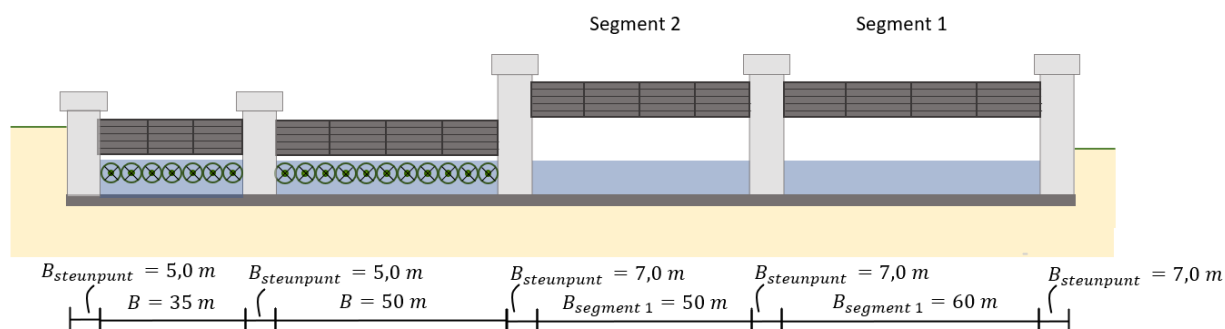
Als laatste stap om de economische haalbaarheid te beoordelen, is een extra stap toegevoegd aan het financieel model: voor ontwerpalternatief A.2.18 wordt de minimale elektriciteitsprijs berekend waarmee het gewenste projectrendement van 12% wordt gehaald. Deze berekening is iteratief uitgevoerd in het Python-script. Uit het Python-script volgt dat een minimale elektriciteitsprijs van 100 EUR/MWh vereist is. Als de elektriciteitsprijs hoger is dan deze waarde, wordt met het gekozen ontwerpalternatief een projectrendement van 12% behaald, en is de implementatie van de waterkrachtcentrale dus economisch haalbaar. Het is belangrijk op te merken dat aan deze waarde voor het projectrendement geen definitieve investeringsbeslissing door de exploiterende partij moet worden gekoppeld, aangezien bepaalde kostencomponenten nog niet zijn opgenomen in de kostenraming. Dit is slechts een eerste schatting om een indicatie te geven. Desalniettemin biedt deze waarde enig inzicht in de benodigde elektriciteitsprijs om het gewenste projectrendement te bereiken wanneer een commerciële partij de exploitatie op zich neemt. Bij een elektriciteitsprijs rond deze waarde kan met enige zekerheid worden verwacht dat de waterkrachtcentrale economisch haalbaar is."

Bovenaanzicht:



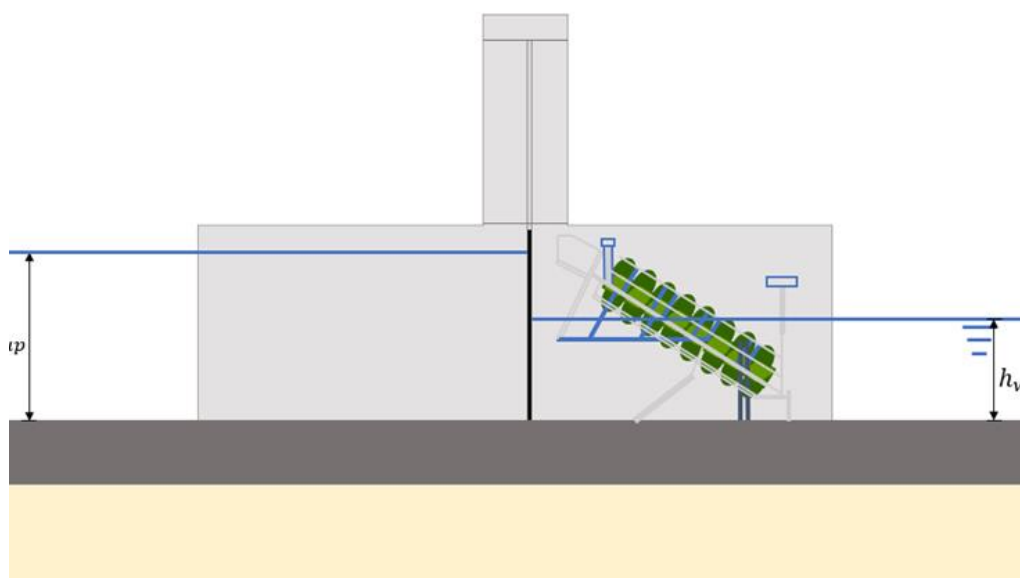
Figuur 7.34: Bovenaanzicht van Ontwerpconcept A.2., welke als het optimale ontwerp voor de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw wordt beschouwd.

Vooraanzicht:



Figuur 7.35: Vooraanzicht van Ontwerpconcept A.2., welke als het optimale ontwerp voor de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw wordt beschouwd.

Langsdoorsnede van de waterkrachtcentrale:



Figuur 7.36: Langsdoorsnede van de waterkrachtcentrale in Ontwerpconcept A.2., welke als het optimale ontwerp voor de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw wordt beschouwd.

Specifieke resultaten van het financieel model voor de huidige business case worden getoond in Tabel 7.16.

Tabel 7.16: Resultaten van het financiële model voor ontwerpalternatief A.2.18.

*1 Voor het verbruik van een gemiddeld huishouden wordt een gemiddeld elektriciteitsverbruik per huishouden van 2730 aangehouden. (Compendium voor de Leefomgeving, 2021).

Parameter	Waarde/grootheid	Eenheid
Elektriciteit opwekking in een gemiddeld jaar	~22.000	[MWh/j]
Hoeveelheid Huishoudens die voorzien worden van elektriciteit	~8.000	[huishoudens/j]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 1	$-3,3 \cdot 10^6$	[€]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 2	$11,5 \cdot 10^6$	[€]

Netto contante waarde van de winst bij scenario 3	$18,0 \cdot 10^6$	[€]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 4	$32,9 \cdot 10^6$	[€]
Project rendement bij scenario 1	-6	[%]
Project rendement bij scenario 2	15	[%]
Project rendement bij scenario 3	23	[%]
Project rendement bij scenario 4	39	[%]

7.5 Analyseren van de bredere toepasbaarheid van het geselecteerde ontwerp

7.5.1 Schaalbaarheid

In de doelstelling is gesteld dat er gericht wordt op grootschalige waterkrachtcentrale implementatie in nieuw te ontwerpen stuwen in Nederland. Dit houdt in dat ook onderzocht moet worden of het haalbaar is om het geselecteerde ontwerp breder toe te passen in het kader van de vervanging van stuwen, met specifieke aandacht voor de Maas-stuwen. Zoals eerder aangegeven zijn deze namelijk in de komende 10 jaar aan vervanging toe. In de huidige paragraaf wordt daarom een doorkijk gegeven naar de mogelijkheid om het optimale ontwerp voor de implementatie van een waterkrachtcentrale in de stuw bij Grave ook toe te passen bij de vervanging van andere stuwen in Nederland.

In eerste instantie wordt gekeken of het ontwerp gepresenteerd in paragraaf 7.4 één-op-één kan worden toegepast bij de vervanging van de andere Maas-stuwen. Het gaat dan om zowel het basisstuwontwerp als een waterkrachtcentrale die 18 vijzelturbines huisvest.

Indien er beperkingen zijn op het gebied van beschikbare ruimte, kan ook overwogen worden om een kleinere waterkrachtcentrale te gebruiken. In dat geval wordt gebruik gemaakt van hetzelfde ontwerpprincipe, vijzelturbines in de uiterwaarden, maar worden er minder vijzelturbines toegepast. Het is echter van essentieel belang om voortdurend de haalbaarheid van de businesscase, met betrekking tot de financiële levensvatbaarheid van het project, te beoordelen in dergelijke scenario's.

Het onderzoek naar de bredere toepasbaarheid van het gekozen ontwerp omvat een vergelijking tussen de karakteristieke kenmerken van de huidige stuwen in de Maas en die van het ontwerp dat in deze studie is ontwikkeld. Verschillende belangrijke aspecten worden in overweging genomen voor de haalbaarheid op andere locaties, waaronder:

- Ruimtelijke indeling: Is er voldoende ruimte beschikbaar voor het voorgestelde ontwerp?
- Hydraulische haalbaarheid: Is de doorstroombreedte toereikend voor de beoogde toepassing?
- Economische haalbaarheid: Kan er ook op de andere locaties een haalbare businesscase worden gerealiseerd? Dit is afhankelijk van een combinatie van hydraulische omstandigheden, het verval en het debiet van strijken, en ruimtelijke voorwaarden, zoals het aantal vijzelturbines dat kan worden toegepast.

Wanneer de karakteristieke kenmerken overeenkomen of vergelijkbaar zijn dan kan een eerste positieve conclusie worden getrokken voor de bredere toepasbaarheid van het ontwikkelde stuwcomplex in deze studie.

In deze beoordeling wordt als uitgangspunt genomen dat de locaties voor de vervanging van stuwen hetzelfde zijn als die voor de stuw bij Grave. Dit houdt in dat wordt verondersteld dat elke stuw direct

stroomopwaarts van de huidige stuw wordt vervangen. Bovendien wordt aangenomen dat de waterdieptes bij alle stuwen vergelijkbaar zijn met die van het huidige ontwerp. Hierdoor kan in deze paragraaf een eerste inschatting worden gemaakt van de hydraulische haalbaarheid op basis van de doorstroombreedte. Dit wordt gedaan door de doorstroombreedte van de huidige stuw te vergelijken met die van het basisstuwontwerp. Als de huidige stuw aanzienlijk grotere doorstroombreedte heeft dan de stuw waardoor die wordt vervangen, dan is het aannemelijk dat er opstuwing kan optreden na vervanging. Dergelijke analyses op basis van de karakteristieke kenmerken zullen worden gebruikt om de bredere toepasbaarheid van het ontwerp te beoordelen.

7.5.2 Vergelijkbaarheid van stuwcomplexen in de Maas

Om te onderzoeken of het ontwikkelde ontwerp ook geschikt is voor de vervanging van andere stuwen in de Maas, worden diverse kenmerkende eigenschappen van deze stuwen geanalyseerd. In Tabel 7.17 worden de relevante kenmerken voor elke Maas-stuw gepresenteerd. Deze gegevens zijn grotendeels afkomstig uit het rapport "Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (VONK) Stuwen Maas" (de Jong, 2014). Alleen de waarden voor de parameter 'Moment van strijken' zijn afkomstig uit het symposium stuwen Maas (Schropp & Tuin, 2021). In de tweede kolom worden de kenmerken van de stuw bij Grave genoteerd als referentiepunt. Daaropvolgend worden de stuwen in stroomafwaartse volgorde weergegeven.

Tabel 7.17: Overzicht van kenmerkende eigenschappen die gebruikt worden om de bredere toepasbaarheid van het ontwerp in de toekomstige Maas-stuwen te beoordelen. De gegevens zijn grotendeels afkomstig uit het rapport "Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (VONK) Stuwen Maas" (de Jong, 2014). Alleen de waarden voor de parameter 'Moment van strijken' zijn afkomstig uit het symposium stuwen Maas (Schropp & Tuin, 2021).

*1: dit betreft de beschikbare ruimte in de uiterwaarden inclusief de ruimte die op dit moment bezet wordt door de waterkrachtcentrale

*2: op deze locatie is nog meer ruimte in de uiterwaarden beschikbaar dan wordt aangegeven. Echter wordt een waarde van 350 m weergegeven omdat een waterkrachtcentrale van grotere omvang niet realistisch wordt geacht.

*3: In deze stuwcomplexen zijn geen sluizen aanwezig; scheepvaart gaat hier door een naastgelegen kanaal.

Parameter	Grave	Borgharen	Linne	Roermond	Belfeld	Sambeek	Lith
Type stuw	Poirée	Schuif/klep	Poirée/ Stoney	Poirée/ Stoney	Poirée/ Stoney	Poirée/ Stoney	Schuif/ klep
Bouwjaar [j]	1926	1928	1921	1921	1924	1925	1936
Verwachte jaar voor vervanging	2030-2035	2025 - 2030	2035-2040	2030-2035	2030-2035	2030-2035	2035-2040
Totale Stuwbreedte [m]	124	123	130	122	141	140	140
Aantal steunpunten [-]	3	5	5	4	4	4	4
Breedte van stuwopeningen [m]	110	99	111	102	97	97	114
Beschikbare ruimte uiterwaarden [m]	110	80	180 ^{*1}	350	70	> 350 ^{*2}	> 350 ^{*1 *2}
Locatie sluis	Direct naast de stuw aan de oostzijde	In het naastgelegen Julianakanaal ^{*3}	In het naastgelegen Lateraalkanaal ^{*3}	Direct naast de stuw aan de westzijde	Direct naast de stuw aan de westzijde	Direct naast de stuw aan de zuidwestzijde	Direct naast de stuw aan de zuidzijde
Aanwezigheid Waterkrachtcentrale	-	-	Ja, vier Kaplan turbines	-	-	-	Ja, vier Kaplan turbines
Verval [m]	3.05	Ca. 5.10	4.0	2.7	3.05	3.15	Ca. 3.90
Moment van strijken	Ca. 1800	Ca. 1500	Ca. 1300	Ca. 1000	Ca. 800	Ca. 1100	Ca. 1300

Over het algemeen hebben de stuwen vergelijkbare kenmerken, met uitzondering van de stuw bij Borgharen. Dit wijst erop dat het ontwikkelde ontwerp geschikt is voor de meeste vervangingsprojecten.

Om weloverwogen conclusies te trekken over de bredere toepasbaarheid, worden zowel de belangrijkste kenmerken als uitzonderingen met betrekking tot de haalbaarheid besproken.

Hydraulische haalbaarheid:

Om de hydraulische haalbaarheid van het ontwerp op verschillende locaties te beoordelen, wordt de doorstroombreedte gebruikt. De vervangende stuw, de basisstuw, heeft een doorstroombreedte van 110 m. Als bij vervanging de doorstroombreedte toeneemt ten opzichte van de huidige situatie, is de afvoercapaciteit van het ontwerp toereikend en is de kans op opstuwing waarschijnlijk gering. Dit is het geval bijvoorbeeld in Belfeld, waar de doorstroombreedte van 97 m wordt vergroot naar 110 m.

Op basis van de doorstroombreedtes die gegeven zijn in Tabel 7.17, kan worden geconcludeerd dat in de meeste gevallen de doorstroombreedte toeneemt na vervanging. Dit betekent dat de afvoercapaciteit verbetert, waardoor het redelijk aannemelijk is dat opstuwingsprobleem worden voorkomen.

Een uitzondering hierop vormende stuwen bij Linne en Lith, waar de doorstroombreedte juist afneemt na vervanging. In de eenvoudige benadering betekent dit dat de weerstand toeneemt en de afvoercapaciteit afneemt, waardoor mogelijk opstuwing kan ontstaan. Ondanks deze ongunstige eigenschap, wordt niet verwacht dat hierdoor het stuw ontwerp ongeschikt is op deze locatie. De vermindering in doorstroombreedte is namelijk relatief klein is. Daarnaast neemt de afvoercapaciteit toe door de implementatie van de waterkrachtcentrale, en is de diepte mogelijk groter, waardoor er ondanks de afname in breedte geen concessies worden gedaan aan het natte oppervlak. Compenserende maatregelen zijn ook mogelijk, waardoor de afvoercapaciteit op kritieke momenten kan worden vergroot. Bovendien hoeft, in tegenstelling tot de stuw bij Grave, in niet elke vervangingsopgave rekening te worden gehouden met het behoud van een monumentale brug. Als er geen monumentale brug behouden hoeft te blijven, kan weerstand uit het riviersysteem worden gehaald door de steunpunten van de huidige stuw te verwijderen. Uiteindelijk wordt verwacht dat het stuw ontwerp ook geschikt is voor de locaties Linne en Lith.

Al met al lijkt het ontwerp van het stuwcomplex, zoals getoond in paragraaf 7.4, hydraulisch haalbaar voor alle stuwvervangingen in de Maas.

Ruimtelijke indeling:

Terwijl de doorstroombreedte geschikt lijkt te zijn, moet het ook ruimtelijk mogelijk zijn om het ontwikkelde ontwerp toe te passen. De volgende stap is het analyseren van het ruimtegebruik.

Inpassing van de basisstuw (exclusief waterkrachtcentrale):

In eerste instantie wordt onderzocht of het stuwontwerp zonder waterkrachtcentrale in de omgeving past. Hiervoor wordt de kenmerkende eigenschap 'totale stuwbreedte' gebruikt. Indien de breedte van het ontwikkelde ontwerp, zonder de waterkrachtcentrale (ongeveer 131 m), vergelijkbaar is met die van de huidige stuw kan worden geconcludeerd dat op die locatie de ruimtelijke inpassing van het ontwikkelde stuwontwerp zonder waterkrachtcentrale haalbaar is.

Hoewel het aannemelijk zou zijn dat de totale breedte van de stuw navenant toeneemt met de doorstroombreedte, blijkt dit niet het geval te zijn in de meeste vervangingsscenario's. Integendeel, in veel gevallen neemt de totale breedte juist af. In Tabel 7.17 is zichtbaar dat de totale breedte in veel gevallen juist afneemt; de meeste huidige stuwen hebben een breedte groter dan die van de ontworpen basisstuw (131 m). Dit impliceert dat er doorgaans voldoende ruimte is om ten minste de basisstuw zonder waterkrachtcentrale te plaatsen. Bovendien biedt deze ruimtebesparing extra mogelijkheden voor de integratie van een waterkrachtcentrale. Het verminderde ruimtegebruik is voornamelijk te danken aan het feit dat het nieuwe stuwontwerp minder steunpunten vereist, namelijk slechts drie in plaats van vier of vijf.

Er zijn echter twee uitzonderingen: de stuwen bij Borgharen en Roermond. Bij deze vervangingsprojecten neemt de toekomstige stuw juist meer ruimte in beslag. De gevolgen hiervan voor het ontwerp van de waterkrachtcentrale verschillen echter. Er is voldoende ruimte beschikbaar in de uiterwaarden, waardoor een deel van de basisstuw in de uiterwaarden kan worden geplaatst. Hier is zoveel extra ruimte beschikbaar dat deze aanpassing geen nadelige invloed heeft op de omvang van de waterkrachtcentrale; er is zowel voldoende ruimte voor de uitbreiding van de stuw als voor een waterkrachtcentrale met 18 vijzelturbines. Bij de vervanging van de stuw in Roermond is het geen probleem dat de totale breedte van de (basis)stuw enigszins toeneemt.

Voor de vervanging van de stuw bij Borgharen ligt de situatie anders. Op deze locatie is er onvoldoende ruimte beschikbaar in de uiterwaarden om zowel de verbreding van de stuw als de waterkrachtcentrale te herbergen. Een uitbreiding van de stuw gaat ten koste van de ruimte voor de waterkrachtcentrale. Een consequentie hiervan is dat de waterkrachtcentrale minder vijzelturbines kan huisvesten, wat resulteert in een verlies aan energieopbrengst. Dit kan de economische haalbaarheid in gevaar brengen en mogelijk de implementatie van het ontwerp op deze locatie belemmeren. De impact op de business case wordt later uitvoeriger besproken. Als de business case echter niet in gevaar komt, kan het ontwerpconcept voor de stuwvervanging bij Borgharen nog steeds worden toegepast, zij het met minder vijzelturbines.

In beknopte bewoordingen kan worden geconcludeerd dat, met uitzondering van de locatie bij Borgharen, er overal voldoende ruimte beschikbaar is om minstens de ontworpen basisstuw te realiseren.

Inpassing van de waterkrachtcentrale op de locaties:

De volgende stap omvat het onderzoeken naar de haalbaarheid van het realiseren van de ontworpen waterkrachtcentrale naast de basisstuw in de uiterwaarde. Dit vereist een evaluatie van de kenmerkende eigenschap 'beschikbare ruimte in de uiterwaarde'. Een locatie wordt als geschikt beschouwd als er voldoende ruimte beschikbaar is voor het plaatsen van een waterkrachtcentrale met 18 vijzelturbines, zoals weergegeven in paragraaf 7.4, waarbij de totale breedte 100 m bedraagt. Indien de beschikbare ruimte in de uiterwaarden gelijk is aan of groter is dan 100 m, kan de waterkrachtcentrale worden toegepast bij de vervanging.

Op basis van de eigenschap 'beschikbare ruimte in de uiterwaarden', zoals vermeld in Tabel 7.17, kan geconcludeerd worden dat er voldoende ruimte beschikbaar is om de waterkrachtcentrale uit het ontwerp één-op-één toe te passen bij de vervanging van de stuwen in Linne, Roermond, Sambeek en Lith. Sterker nog, op deze locaties is er zelfs meer ruimte beschikbaar dan strikt noodzakelijk, wat de mogelijkheid biedt om meer vijzelturbines te installeren en zo de energieopbrengst te vergroten. Deze mogelijkheid is nog niet onderzocht in de huidige analyse maar zou interessant kunnen zijn voor toekomstige studies, vooral als het doel is om duurzame energieopwekking te maximaliseren.

Voor de vervanging van de stuw bij Borgharen en Belfeld is de beschikbare ruimte in de uiterwaarden niet toereikend om het exacte ontwerp van de waterkrachtcentrale toe te passen. Op deze locaties bedraagt de beschikbare breedte in de uiterwaarden respectievelijk slechts 80 en 70 m. In het geval van Borgharen wordt deze ruimte verder beperkt doordat een deel van de nieuwe stuw in de uiterwaarden wordt geplaatst (ongeveer 8 m). Ondanks deze beperkingen kan hier mogelijk nog steeds een waterkrachtcentrale worden geïmplementeerd volgens het ontwerpconcept dat in deze studie is ontwikkeld. Het ontwerpconcept kan ook worden uitgevoerd met een verminderd aantal vijzelturbines. De haalbaarheid van het project komt echter wel ter discussie te staan, met name wat betreft economische levensvatbaarheid, aangezien een kleinere waterkrachtcentrale minder energie zal opwekken. Voor zowel Borgharen als Belfeld kan de implementatie van waterkrachtcentrales met 14 vijzelturbines worden overwogen.

Figuur 7.21 toont volgens het huidige financiële model voor haalbaarheidsbeoordeling dat er in drie van de vier scenario's voor de ontwikkeling van elektriciteitsprijzen een levensvatbare business case kan worden gerealiseerd voor een waterkrachtcentrale met 14 vijzelturbines. Deze resultaten verschillen nauwelijks van die voor een waterkrachtcentrale met 18 vijzelturbines. Het is echter van belang om op te merken dat deze benadering enkel dient als een eerste inschatting. Op de locaties Borgharen en Belfeld zijn namelijk andere hydraulische randvoorwaarden van toepassing. Op dit moment wordt nog geen rekening gehouden met de gewijzigde hydraulische omstandigheden in deze conclusie. Er wordt voor nu aangenomen dat ondanks de veranderde hydraulische randvoorwaarde de energieopbrengst in een jaar van dezelfde orde grote gaat zijn op deze locaties, waardoor het gerechtvaardigd is om een eerste inschatting naar de haalbaarheid van de business case te maken op basis van Figuur 7.21. In een later deel van deze paragraaf worden de hydraulische omstandigheden en de impact op de business case uitgebreider besproken.

Samenvattend kan gesteld worden dat er op de locaties Linne, Roermond, Sambeek en Lith bij de vervanging van de stuw genoeg ruimte beschikbaar lijkt om het exacte ontwerp van de waterkrachtcentrale met 18 vijzelturbines toe te passen. Voor Borgharen en Belfeld moet echter rekening worden gehouden met het feit dat omwille van de beschikbare ruimte het ontwerp van de waterkrachtcentrale aangepast moet worden.

Economische haalbaarheid:

Dit onderzoek beoordeelt over het algemeen de economische haalbaarheid door te onderzoeken of een winstgevende businesscase mogelijk is. Vanwege beperkte tijd en de focus van deze thesis was het niet mogelijk om gedetailleerde businesscases voor verschillende locaties te berekenen. Desondanks kan de impact van de locatie op de businesscase enigszins worden ingeschat door de kenmerkende eigenschappen te vergelijken.

De impact van de locatie op de economische haalbaarheid wordt geanalyseerd aan de hand van de kenmerkende eigenschappen 'Het verval' en 'Het moment van strijken'. In deze verkenning wordt aangenomen dat de kostencomponent in de businesscase niet wordt beïnvloed door de locatie. De grootste impact wordt verwacht in de financiële opbrengst, die rechtstreeks wordt bepaald door de jaarlijkse energieopbrengst. Deze energieopbrengst varieert afhankelijk van de hydraulische omstandigheden, met name het verval en het moment van strijken. Aan de hand van deze eigenschappen gaat de impact van de locatie op de economische haalbaarheid worden besproken.

Een belangrijke kanttekening hierbij is dat in deze bereddering er van wordt uitgegaan dat voor elke vervangingsopgave dezelfde elektriciteitsprijs en subsidies gelden, hoewel dit in de praktijk kan variëren afhankelijk van het moment van vervanging.

De impact op de energieopbrengst kan in grote lijnen worden ingeschat op basis van een combinatie van het verval en moment van strijken. Te beginnen met het verval, dat invloed heeft op het vermogen. De waarden in Tabel 7.17 geven het verval weer op basis van het streefpeil. Hiermee kan een eerste inschatting van het vermogen worden gedaan. Voor de omstandigheden bij Grave, waar het verval 3,05 m bedraagt, hebben de vijzelturbines een (ontwerp)vermogen van 152 kW. Op alle locaties ligt het verval in de buurt van dat van de stuw bij Grave, wat suggereert dat het vermogen van alle vijzelturbines van dezelfde orde van grootte is. Het invullen van de waarden uit Tabel 7.17 in vergelijking 2.1, waarmee het vermogen kan worden berekend, levert voor de locatie met het laagste verval, de stuw bij Roermond, een vermogen van 148 kW op, en voor de locatie met het grootste verval, de stuw bij Borgharen, een vermogen van 280 kW. De orde van grootte van het vermogen is dus vergelijkbaar. Dit betekent dat de verandering in verval geen significante impact lijkt te hebben op de energieopbrengst en dus op de

businesscase. Bovendien is het verval bij veel stuwen groter dan bij Grave, wat suggereert dat de businesscase zelfs gunstiger zou kunnen uitvallen. Grave kan worden beschouwd als een goede graadmeter omdat het in de buurt van het gemiddelde verval van alle stuwen ligt.

Op dit moment volstaat een analyse op basis van orde van grootte, aangezien dit een eerste verkenning betreft en er nog enige onzekerheden zijn in het financiële model. Een hogere precisie zou op dit moment weinig toevoegen aan de kwaliteit van de conclusie.

Het volgende aspect dat moet worden beoordeeld voor de economische haalbaarheid is de impact van het moment van strijken op de energieopbrengst. Het moment van strijken bepaald namelijk mede het aantal vollasturen van de waterkrachtcentrale op die locatie. In tegenstelling tot het verval is de stuw bij Grave een slechte representatie voor het moment van strijken, aangezien het moment van strijken voor deze stuw bij veruit het hoogste debiet ligt (1800 m³/s). Dit betekent dat het aantal vollasturen dat de waterkrachtcentrales kunnen draaien lager is voor andere Maas-stuwen. Een lager aantal vollasturen kan leiden tot een lagere energieopbrengst.

Op basis van logisch redeneren wordt ingeschat dat het aantal vollasturen voor alle stuw van een dezelfde orde grote is. Zoals eerder in het rapport vermeld, worden de stuwen in de Maas gemiddeld ongeveer 1 à 2 keer per jaar gestreken met een duur van 1 à 2 dagen gestreken. De variatie tussen stuwen wordt verwacht niet extreem te zijn, hoogstens 1 à 2 dagen. Stel dat een bepaalde stuw gedurende 2 extra dagen per jaar wordt gestreken in vergelijking met de stuw bij Grave, dan zou dit maximaal 864 vollasturen minder per jaar betekenen. Dit is relatief klein in vergelijking met het totaal aantal vollasturen (8760 uur). De orde van grootte van de energieopbrengst in een jaar lijkt daarom min of meer gelijk te zijn voor elke stuw.

Daarnaast wordt het lagere aantal vollasturen in een aantal stuwcomplexen indirect gecompenseerd door een toename in het verval, zoals bij de stuw bij Lith.

Kortom, de energieopbrengst lijkt min of meer in dezelfde orde van grootte te liggen voor elke stuw. Zelfs in het meest ongunstige geval, de stuw bij Roermond, lijkt het verlies in energieopbrengst slechts ongeveer 10 procent te zijn. De reden hiervoor is dat deze stuw een relatief klein verval heeft en de stuw wordt bij een relatief laag debiet wordt gestreken. Desalniettemin ligt de energieopbrengst nog wel in dezelfde orde.

Op basis van de huidige redenering wordt aangenomen dat de energieopbrengst onder alle hydraulische randvoorwaarde voor verschillende stuwen min of meer in dezelfde orde van grootte ligt als die van Grave. Dit betekent dat de financiële opbrengst met een gelijke elektriciteitsprijs ook in dezelfde orde van grootte is. De haalbaarheid van de business case wordt voornamelijk gedomineerd door de elektriciteitsprijs. Op basis van de inschatting dat in alle stuwen de energieopbrengst en dus de financiële opbrengst vergelijkbare potentie hebben en het feit dat de kosten voor de waterkrachtcentrale niet veranderen afhankelijk van de locatie wordt geconcludeerd dat op alle locaties potentie is om een economisch haalbare businesscase te realiseren voor een waterkrachtcentrale met 18 vijzelturbines.

Dus, als het mogelijk is om 18 vijzelturbines te installeren, lijkt de businesscase sterk op die van het geselecteerde ontwerpconcept. Dit betekent dat er in ieder geval op de locaties Linne, Roermond, Sambeek en Lith een haalbare businesscase kan worden gerealiseerd.

Zoals hierboven beschreven, kunnen bij de vervanging van de stuwen bij Borgharen en Belfeld door ruimtelijke beperkingen slechts waterkrachtcentrales met 14 vijzelturbines worden gerealiseerd. Aangezien de orde van grootte van het aantal vollasturen en het vermogen vergelijkbaar is met dat van de

casestudie bij Grave, kan Figuur 7.21 worden gebruikt om de haalbaarheid van een dergelijke waterkrachtcentrale in te schatten. In Figuur 7.21 is zichtbaar dat de projectrendementen van een waterkrachtcentrale met 14 vijzelturbines volgens ontwerpconcept A.2 vergelijkbaar zijn met die van 18 vijzelturbines, ongeacht het scenario voor de elektriciteitsprijs. Ook een waterkrachtcentrale met 14 vijzelturbines levert in drie van de vier scenario's een haalbare businesscase op.

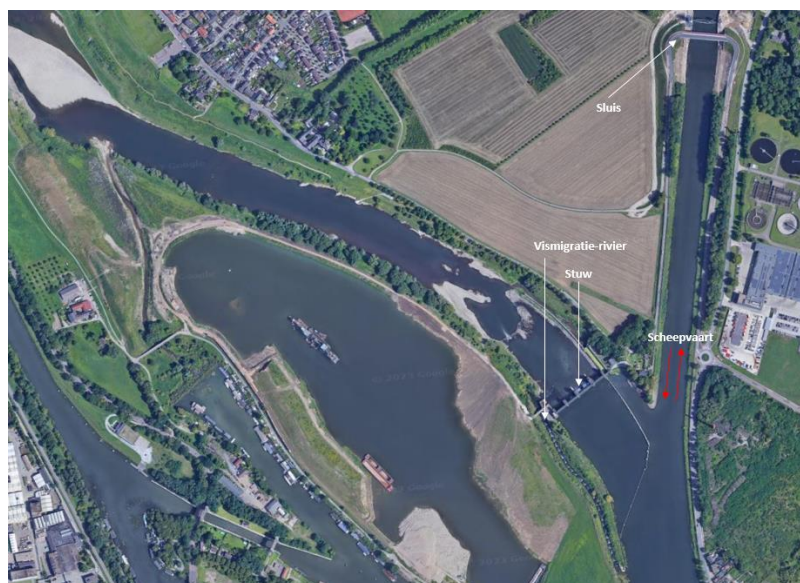
Het is belangrijk op te merken dat de huidige analyse een eerste verkenning is van de bredere toepasbaarheid van het ontwerp. Voor een gedetailleerde beoordeling van de locatie gebonden impact op de businesscase moet het financiële model nauwkeurig worden doorgerekend, inclusief het gebruik van locatie specifieke gegevens en data.

Bijzonderheden:

Voordat een definitieve conclusie met betrekking tot de bredere toepasbaarheid getrokken kan worden moeten een enkele bijzonderheden geïdentificeerd worden, die de implementatie van een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuwen in de weg kunnen zitten. Bijzondere aandacht moet worden besteed aan de stuwen bij Borgharen, Lith en Linne.

Te beginnen met de stuwen bij Lith en Linne. Op deze locaties zijn momenteel al waterkrachtcentrales aanwezig in de bestaande stuwcomplexen. Als Rijkswaterstaat besluit om deze bestaande waterkrachtcentrales te behouden, kan dit de situatie aanzienlijk compliceren. Het wordt dan moeilijk om het ontworpen waterkrachtconcept uit deze studie exact toe te passen. Dit geldt vooral voor aspecten zoals ruimtelijke indeling en vismigratie. De implementatie van de waterkrachtcentrale op deze locaties zal dus afhangen van de beslissing van Rijkswaterstaat. Het lijkt echter wenselijk om de bestaande waterkrachtcentrales in deze stuwen te vervangen, aangezien er sinds hun bouw technologische vooruitgang is geboekt. Er wordt verwacht dat zowel het rendement hoger is als dat de vissterfte minder is.

In tegenstelling tot de kwestie bij Lith en Linne, zijn de uitdagingen bij Borgharen voornamelijk gerelateerd aan ruimtelijke inpassing. Dit stuwcomplex verschilt aanzienlijk van de andere complexen, die over het algemeen vergelijkbaar zijn. In Figuur 7.37 wordt een luchtfoto van de stuw bij Grave getoond, waarin alle componenten van de stuw worden weergegeven.



Figuur 7.37: Luchtfoto van de stuw bij Borgharen, met daarin een aantal onderdelen aangegeven. Afkomstig van <https://earth.google.com/web/> (bewerkt).

Er zijn drie opvallende bijzonderheden aan het huidige stuwcomplex bij Borgharen, waardoor het moeilijk wordt om het ontworpen stuwconcept inclusief waterkrachtcentrale direct stroomopwaarts van de stuw toe te passen. Allereerst, in tegenstelling tot de andere stuwen, bevinden de stuw en sluis zich niet in één complex bij Borgharen. De keersluis bevindt zich in het naastgelegen Julianakanaal. Ten tweede is er onvoldoende ruimte om stroomopwaarts van de stuw een nieuwe stuw te plaatsen zonder dat deze in de splitsing tussen de rivier en het kanaal terechtkomt. Dit zou zowel problemen opleveren voor de scheepvaart als voor de hydraulische randvoorwaarden. Het derde aspect betreft de beperkte beschikbare ruimte om een waterkrachtcentrale te installeren en tegelijkertijd de huidige indeling van het gebied te behouden. De combinatie van deze drie aspecten maakt het onwaarschijnlijk dat het ontwerp uit deze studie op deze locatie exact kan worden toegepast. Dit kan echter veranderen als het ontwerp zonder problemen stroomafwaarts van de stuw kan worden toegepast.

7.5.3 Mogelijkheden grootschalige toepassing

Op basis van de analyse in paragraaf 7.5.2 kunnen enkele conclusies met betrekking tot de mogelijkheden van grootschalige toepassing van het ontwikkelde ontwerp worden getrokken. Na deze eerste verkenning lijkt het op de meeste locaties, met uitzondering van Borgharen, mogelijk om het ontwerpconcept toe te passen.

Bij alle stuwvervangingen, met uitzondering van Borgharen, wordt potentie gezien om het ontwikkelde ontwerpconcept uit deze studie toe te passen.

Op twee locaties kan het ontwerp zonder problemen worden toegepast. In de vervanging van Roermond en Sambeek kan het ontwerp één-op-één worden geïmplementeerd. De doorstroombreedte is voldoende, waardoor hydraulisch geen problemen worden verwacht. Daarnaast is er voldoende ruimte beschikbaar, en de businesscase lijkt niet in gevaar te komen op deze locaties. De geschatte opbrengst en kosten zijn namelijk van vergelijkbare orde als bij Grave het geval is.

Wanneer de waterkrachtcentrale bij Lith en Linne worden verwijderd, staat ook in deze vervangingsopgave niets meer in de weg om het ontwerp van de casestudie Grave één-op-één toe te passen.

De kenmerkende eigenschappen van de stuw bij Belfeld wijken af van de zojuist genoemde stuwen. In dit stuwcomplex is onvoldoende ruimte beschikbaar om een waterkrachtcentrale die 18 vijzelturbines huisvest te realiseren. Op deze locatie lijkt het echter wel mogelijk om het ontwerpconcept, een integrale oplossing van de stuw en de waterkrachtcentrale, te gebruiken, maar dan in een kleinere uitvoering met 14 vijzelturbines. te gebruiken maar kleiner uit te voeren. Ruimtelijk gezien is dit haalbaar, en er wordt verwacht dat dit nog steeds een rendabele businesscase oplevert.

Het toepassen van het ontwerpconcept in de vervangingsopdracht van de stuw bij Borgharen is complexer. Voor Borgharen wordt ook potentie gezien, maar er zijn bijzonderheden die mogelijk aanpassingen aan het ontwerp of de omgeving vereisen om in de toekomst een waterkrachtcentrale te realiseren. Een integrale oplossing waarin de stuw en de waterkrachtcentrale in één complex zitten, lijkt ook hier de oplossing te zijn. Echter, het moet mogelijk zijn om de stuw benedenstrooms te vervangen of aanpassingen aan de omgeving door te voeren. De gevolgen van deze aanpassingen in de buurt van de splitsing van de rivier en het kanaal moeten nader worden onderzocht.

In paragraaf 7.3.2 is bepaald dat ontwerpconcept A.2 bij Grave in staat is om ongeveer 8.000 huishoudens van duurzame energie te voorzien. Voorlopig wordt aangenomen dat de energieopbrengst in

alle stuwen van vergelijkbare omvang is, zoals geanalyseerd in bovenstaande sectie op basis van de orde grote. Na de vervanging van de stuwen in Roermond, Sambeek, Lith en Linne door het ontwerpconcept met een waterkrachtcentrale van 18 vijzelturbines, kunnen deze naar schatting gezamenlijk ongeveer 32.000 huishoudens van duurzame energie voorzien. Als het ontwerpconcept ook kan worden toegepast bij de vervanging van de stuw in Belfeld, maar dan met een kleinere waterkrachtcentrale, kunnen nog eens ongeveer 6.000 huishoudens van duurzame energie worden voorzien. Uiteindelijk zou de toepassing van het ontwerpconcept in de Maas op deze manier ongeveer 38.000 huishoudens van duurzame energie kunnen voorzien, met mogelijkheden voor meer als er ook een oplossing wordt gevonden voor de stuw in Borgharen.

8 Validatie

In dit hoofdstuk wordt stap 7 van de gebruikelijke civieltechnische ontwerpmethode uitgevoerd: validatie. In dit onderzoek wordt een validatie toegepast, waarbij alle ontwerplussen samenkomen. De validatie wordt dus niet voor iedere ontwerpluss apart uitgevoerd. De validatie in dit hoofdstuk beslaat elk aspect, variërend van de locatie tot de inpassing van de waterkrachtcentrale. Het resultaat van deze ontwerpstudie, zoals gepresenteerd in paragraaf 7.4, wordt gevalideerd.

8.1 Het doel van de validatie

Validatie is de bevestiging, verkregen door middel van objectief bewijs, dat het systeem zijn beoogde functie zal vervullen. Dit betekent dat de validatie fungeert als een controle om vast te stellen of het juiste systeem is ontworpen (Molenaar & Voorendt, 2023).

Een bijkomende waarde van deze validatie is dat het kan bijdragen aan het creëren van draagvlak voor een waterkrachtcentrale inpassing in de toekomstige Maas-stuwen bij de opdrachtgever van de vervangingsopgave van de stuwen. Bovendien maakt de validatie het mogelijk om eventuele discrepanties tussen het ontwikkelde ontwerp en de ideeën van de opdrachtgever te identificeren. De ontwerper kan mogelijk in een tunnelvisie hebben gezeten. Hierdoor kan ook inzichtelijk worden gemaakt wat er na afloop van dit ontwerpproces nog moet veranderen en worden bepaald of vervolgonderzoek nodig is.

8.2 Opzet van de Validatie

Het ontwerp werd gevalideerd door een deskundigenoverleg met een expert/specialist/deskundige van Rijkswaterstaat. De expert van Rijkswaterstaat heeft specifieke expertise op het gebied van morfologie, met een focus op de rivier de Maas. Dit overleg werd georganiseerd om de bevindingen en resultaten van deze ontwerpstudie te valideren. De functie van betrokken deskundige binnen Rijkswaterstaat is die van 'senior adviseur overstromingsrisicobeheer'. De deskundige houdt zich de laatste jaren met name bezig met de vervangingsopgave van de stuwen in de Maas. Deze aanpak zorgt ervoor dat objectief bewijs wordt verkregen of het ontworpen systeem in lijn is met het beoogde functioneren van de toekomstige Maas-stuwen.

Het is van belang om op te merken dat Rijkswaterstaat geen opdrachtgever is voor een waterkrachtcentrale in de grote rivieren. Hoewel het initiatief en de exploitatie zoals eerder aangegeven van een derde partij moet komen, blijft de validatie door Rijkswaterstaat van groot belang. Het kan zelfs als het belangrijker, interessanter en relevanter worden beschouwd doordat zij uiteindelijk een vergunning moeten verlenen, wat afhankelijk is van het voldoen aan haar specifieke voorwaarden aan de toekomstige maas-stuwen. Rijkswaterstaat fungeert als opdrachtgever voor de toekomstige stuw. Deze validatie is dan ook gericht om af te stemmen of een waterkrachtcentrale bij de ideeën en visie van de opdrachtgever van de stuw passen. De deskundige heeft eveneens beoordeeld of het ontwerp realistisch wordt geacht voor toepassing in de toekomstige Maas-stuwen.

Voor de opdrachtgever van de waterkrachtcentrale zelf, bijvoorbeeld een derde partij zoals een energiemaatschappij of burgercollectief, is het voornamelijk van belang en relevanter om de haalbaarheid van de business case te valideren. Hierin zouden de aannames die gemaakt zijn voor de berekening van het project rendement en de netto contante waarde moeten worden gecontroleerd. Dit valt buiten de scope van dit rapport.

De sessie met de deskundige werd digital gehouden en besloeg ongeveer anderhalf uur. Deze sessies was opgedeeld in vier fases, waarin er voortdurend ruimte was voor discussie en het stellen van vragen:

- Introductie;
- Presentatie van het ontwerpproces, waarbij ontwerpkeuzes en (tussentijdse) ontwerpresultaten werden besproken;
- Presentatie van het voorkeursalternatief;
- Discussie.

Er is bewust gekozen om de sessie met de deskundige niet te leiden aan de hand van vooraf gedefinieerde vragen maar juist een open discussie opgang te brengen. Hierdoor werd getracht meer en bredere inzichten te verkrijgen.

8.3 Resultaten van de validatie

Voor de beschrijving van de validatie worden de ontwerpplussen aangehouden: de locatiekeuze, het ontwerp van de basisstuw en de inpassing van de waterkrachtcentrale.

Gedurende dit onderzoek heeft Rijkswaterstaat tevens aanvullend onderzoek verricht naar de toekomstige Maas-stuwen. Hoewel deze studies voornamelijk gericht waren op de vervanging van de stuw bij Sambeek, zijn de bevindingen en conclusie van deze studies bijzonder relevant voor de validatie. De deskundige van Rijkswaterstaat refereert hier herhaaldelijk naar. Op het moment van de validatie heeft Rijkswaterstaat dus een beter idee hoe de toekomstige Maas-stuwen eruit moeten komen te zien dan tijdens het opstellen van de basis van het ontwerp.

De locatie:

De deskundige gaf aan dat Rijkswaterstaat momenteel alleen naar verplaatsing van de stuw stroomopwaarts wordt gekeken. In dit opzicht komt het ontwerpproces overeen met de visie van Rijkswaterstaat.

De uiteindelijk gekozen locatie voldoet aan de wensen van Rijkswaterstaat. Het streven om de stuw zo dicht mogelijk bij de oorspronkelijke locatie te plaatsen, wordt door de deskundige als gunstig beschouwd omdat dit de systeemsprong minimaliseert.

De opdrachtgever waardeerde dat het historische stuwcomplex, een rijksmonument, grotendeels behouden blijft bij de voorgestelde locatie en het ontwerp van de basisstuw. Het aanzicht op de oude stuw zou echter ook opgenomen zijn in de monumentale status. De gekozen stuwlocatie beïnvloedt het aanzicht wel degelijk. De mate van impact dient te worden beoordeeld in samenspraak met de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Volgens de expert zijn zij nog niet definitief tot een standpunt gekomen.

De basisstuw:

De volgende stap is het valideren van het basisstuw ontwerp.

Het eerste onderwerp dat besproken kwam, is de stand van zaken met betrekking tot scheepvaart tijdens hoogwatercondities. Op dit punt is nog geen duidelijkheid te zijn verkregen. Volgens de deskundige is dit nog steeds een open vraag. De definitieve beslissing ligt volgens de deskundige bij het ministerie, wat de validatie op dit punt bemoeilijkt. Het uitgangspunt dat schepen door de stuwopeningen moeten kunnen varen, wordt niet als foutief of onwaarschijnlijk gezien. Op dit moment stemt het ontwerp nog steeds overeen met de opvattingen van Rijkswaterstaat. Het is echter mogelijk dat dit verandert als het ministerie een andere keuze maakt.

Het volgende aspect dat gecontroleerd werd betreft het uitgangspunt met betrekking tot het type stuwdeur. Ook na de studie van Rijkswaterstaat naar de stuwvervanging bij Sambeek, blijft het uitgangspunt dat de toekomstige stuw een hefdeur of een segmentschuif moet hebben nog steeds geldig en van toepassing. Wat dit betreft komt het ontwerp overeen met de ideeën van Rijkswaterstaat. De deskundige benadrukt opnieuw dat de hefdeur de meest geschikte keuze lijkt als scheepvaart door de stuwopeningen noodzakelijk is. In het onderzoek voor de stuw bij Sambeek is nog de optie om een segmentdeur die naar boven draait, zodat scheepvaart er onder door kan, te gebruiken geanalyseerd. De uitkomst van dit onderzoek was dat dit als onrealistisch wordt beschouwd omdat de constructie te zwaar zou worden. Hierdoor heeft de hefdeur toch de voorkeur.

Het ontwerp van de basisstuw sluit aan bij de ideeën van Rijkswaterstaat na de eerste haalbaarheidsstudie. Rijkswaterstaat kwam op een vergelijkbare stuwconfiguratie uit. De deskundige bevestigt dat het juist is dat het middelste steunpunt van de toekomstige stuw op één lijn moet liggen met dat van de oude stuw. Echter, zijn er na deze haalbaarheidsstudie nog andere inzichten verworven. Hierdoor heeft de deskundige twijfels of het ontwerp volledig aansluit bij de huidige ideeën van Rijkswaterstaat. In de rest van de bespreking van de basisstuw worden punten genoemd die wellicht verder moeten worden onderzocht, heroverwogen of zelfs extra iteratieve ontwerpstappen vereisen.

De deskundige vraagt zich bijvoorbeeld af of het verstandig is om slechts één stuwopening geschikt te maken voor scheepvaart. Het is niet uitgesloten dat er wordt gekozen voor een vergelijkbaar systeem waarin scheepvaart in beide richtingen door één opening gaat waarbij verkeersregelingen worden toegepast. Dit kan een geschikte optie zijn, maar dit vereist verder onderzoek naar de haalbaarheid. Voor schepen die stroomafwaarts varen, kan dit echter uitdagend zijn, omdat ze hun anker moeten uitgooien tegen sterke stroming in. Dit vereist mogelijk onderzoek door MARIN om te bepalen of dit een passende oplossing is. Het huidige ontwerp van de basisstuw en het beoogde functioneren, slechts een opening openstellen voor scheepvaart, doet dus wel enige concessie aan scheepvaart tijdens hoogwater. Volgens de deskundige is tegenstelling tot eerdere aannames het mogelijk om de tweede stuwopening die een breedte heeft van 50 m ook bevaarbaar te maken in een richting. De preferentie afkomstig uit het richtlijnen vaarwegen voor een doorvaartopening klopt niet voor de Maas-stuwen. Let op, het openstellen van scheepvaart in beide stuwopeningen brengt problemen met zich mee voor de inpassing van de waterkrachtcentrale op de manier van ontwerpconcept A.1.

Verder moeten de exacte dimensies van de basisstuw worden gecontroleerd. Er bestaat enige discrepantie tussen de waarden die in deze thesis zijn bepaald en de waarden die Rijkswaterstaat heeft gebruikt in de eerste haalbaarheidsstudie. Met name de scheepvaarteisen die specifieke dimensionale criteria stellen, moeten nader worden onderzocht. Discrepancies tussen de waarden die in deze scriptie zijn vastgelegd en de waarden die Rijkswaterstaat hanteert in de eerste haalbaarheidsstudie moeten worden opgehelderd. Verder moet worden beoordeeld of de drempel van de huidige stuw in de toekomst kan worden verwijderd. Het weghalen van deze drempel zou extra ruimte creëren voor het toekomstige stuwontwerp om te voldoen aan eisen met betrekking tot opstuwing. Momenteel ligt de drempel op +2,7 m NAP, terwijl de bodem zich op ongeveer +0 NAP bevindt. Het verwijderen van deze drempel zou de weerstand verminderen.

Er wordt niet voldaan aan de wens van de Rijkswaterstaat om uniformiteit tussen alle maas-stuwen te creëren. Dit betekent echter niet dat dit het ontwerp niet valide maakt. Deze wens werd in een vroeg stadium van de vervangingsopgave van de stuwen opgesteld terwijl dit nog niet in de diepte is onderzocht of dit praktisch mogelijk is. De expert erkent dat het voldoen aan deze wens uitdagend kan zijn, vooral voor de stuw bij Grave. De ruimtelijke indeling op de gekozen locatie en de eisen met betrekking tot de monumentale status van het bestaande stuwcomplex maken dit complex. Wellicht is uniformiteit gemakkelijker te realiseren bij de stuwen in Sambeek, Belfeld, Linne en Roermond, die veel

overeenkomsten vertonen. In deze stuwen kan uniformiteit mogelijk zelfs worden doorgevoerd tot op het niveau van constructie-elementen, wat de onderlinge uitwisselbaarheid vergroot en daarmee het benodigd aantal reserveonderdelen vermindert.

Zoals eerder beschreven, heeft Rijkswaterstaat parallel aan dit onderzoek ook aanvullend onderzoek uitgevoerd naar de maas-stuwen, met name gericht op de vervanging van de stuw bij Sambeek. Volgens de deskundige is een van de resultaten van dit onderzoek de aanbeveling om in toekomstige stuwen drie stuwopeningen toe te passen. Dit is bedoeld om het beheer te vergemakkelijken. Als bijvoorbeeld een deur niet functioneert vanwege een calamiteit of onderhoud, kan de regelcapaciteit significant verminderd worden. Dit kan problemen opleveren, met name tijdens hoogwater, waarbij het stuwpeil niet meer gehandhaafd kan worden. De deskundige wijst erop dat deze situatie al problemen kan veroorzaken bij middelhoge afvoeren. Wanneer dit bijvoorbeeld gebeurt in de stuw bij Roermond, een stuw met twee openingen, dan ontstaat er al een opstuwing van ongeveer 80 cm. Een stuw met drie openingen zou minder gevoelig zijn voor dergelijke situaties. Naast de problemen in het beheer van het waterpeil, wordt de belasting op het stuwdeel wat wel openstaat hoger. Dit kan problemen veroorzaken voor de bodembescherming omdat het heviger belast wordt door een versnelling van het water. Ook kan een hevige spoeling van sediment ontstaan die leidt tot morfologische problemen. Wat dit betreft is het ontwerp niet valide en zou minimaal een iteratieve stap nodig zijn.

Hoewel het ontwerp van de basisstuw niet volledig in lijn lijkt te zijn met de recent bijgestelde ideeën van Rijkswaterstaat, betekent dit niet dat de bevindingen met betrekking tot mogelijke oplossingen voor de implementatie van een waterkrachtcentrale geen waarde hebben.

De inpassing van de waterkrachtcentrale in de basisstuw:

De laatste stap is het valideren van de ontwerpconcepten die zijn bedacht om een waterkrachtcentrale in de basisstuw te integreren.

De conclusie uit hoofdstuk 6, waarin werd gesteld dat het zonder ontwerpmaatregelen niet haalbaar is om vijzelturbines in de stuw te implementeren, is in lijn met de visie van de deskundige. De deskundige acht dit ook niet wenselijk en realistisch.

De deskundige vindt het terecht dat dit conceptuele ontwerpproces nog geen diepgaand morfologische onderzoek bevat. Desalniettemin wordt geadviseerd dit als een van de eerste aspecten aan te pakken in een vervolgstudie. De locatie en het aantal vijzelturbines kunnen namelijk morfologische consequenties hebben. Sediment moet voor de stuw blijven liggen, vandaar de aanwezigheid van een drempel. Echter, kan het zijn dat een waterkrachtcentrale sediment aanzuigt wat kan leiden tot ongewenst sedimenttransport. Dit moet worden onderzocht alvorens een definitief beslissing over de inpassing van een waterkrachtcentrale kan worden genomen.

In het volgende stuk worden de ontwerpconcepten gevalideerd, te beginnen met ontwerpconcept A.1: uitneembare vijzelturbines. De deskundige heeft aangegeven dat er een misvatting is in dit innovatieve ontwerp. Het uitgangspunt dat ongewenste opstuwing alleen ontstaat bij maatgevend hoog water is volgens de deskundige onjuist. Problemen doen zich al voor bij middelhoge afvoeren. Bij dit ontwerpconcept bezetten vijzelturbines de helft van de stuw, waardoor de afvoercapaciteit aanzienlijk afneemt. Dit brengt vergelijkbare problemen met zich mee als eerder beschreven met betrekking tot calamiteit of onderhoud bij een stuw met twee openingen. Als een stuw opening volledig met vijzelturbines wordt bezet, wordt de regelcapaciteit significant verminderd. Vermindering van regelcapaciteit kan leiden tot functionele problemen, bodembeschermingsproblemen en sedimenttransport. De deskundige veronderstelt dat de sluis en uiterwaarde al bij middelhoge afvoer kunnen overstromen. Hij acht het echter mogelijk om de uiterwaarde hierop in te richten en de bodembescherming aan te passen. Deze kosten

moeten worden meegerekend bij de inpassing van de waterkrachtcentrale. De voornaamste vraag bij ontwerpconcept A.1 is of het bezetten van een stuwopening met vijzelturbines al problemen kan opleveren voor de waterveiligheid bij middelbare afvoeren. Tegenwoordig wordt de waterveiligheid niet alleen gecontroleerd voor de maatgevende hoogwaterstand, maar over een bereik van afvoeren en bijbehorende faalmechanismen. Sinds 2017 is in Nederland de overstromings-risico-benadering van toepassing. Het uitgangspunt dat de oplossing die vijzelturbines tijdelijk uit de waterweg neemt tijdens maatgevend hoogwater is dus te beperkt voor een voldoende hydraulische verificatie van dit ontwerpconcept. Diepgaand hydraulisch onderzoek is hiervoor vereist.

Binnen ontwerpconcept A.1 zijn echter oplossingen mogelijk. Vijzelturbines kunnen bijvoorbeeld eerder uit worden uitgenomen. Dit gaat wel ten koste van het energierendement. Dit heeft gevolgen voor de haalbaarheid van een dergelijke waterkrachtcentrale voor derde partijen. De deskundige kan pas een gedegen uitspraak over dit ontwerpconcept wanneer de hydraulische verificatie volledig is afgerond. De gevoeligheid voor falen van het hefsysteem schat hij tevens hoog in. Momenteel acht de deskundige dit ontwerpconcept niet realistisch.

Met betrekking tot ontwerpconcept A.2 is de vraag aan de deskundige gesteld of en hoe ver er in de uiterwaarde mag worden gebouwd. Volgens de deskundig mag er in de uiterwaarde worden gebouwd. Er zijn al diverse waterkrachtcentrales in de uiterwaarde gerealiseerd in Nederland. De deskundige kon geen exacte uitspraak doen over hoe ver de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde mag reiken. Hier gaat het waterschap over, dat zoneringen langs de dijk hanteert. De deskundige benadrukt dat specifieke locatie-afhankelijke zoneringen van toepassing zijn. Hierbij moet het waterschap worden betrokken om uitspraken te kunnen doen. Verder beschouwt de deskundige dit ontwerp het kansrijk en realistisch. Er dient echter wel meer aandacht aan de vissterfte te worden gegeven.

Het laatste aspect dat voor ontwerpconcept A.2 moet worden geadresseerd, zijn de morfologische gevolgen. Het plaatsen van groot aantal vijzelturbines inde uiterwaarde kan het (lokale) sediment transport beïnvloeden. Volgens de deskundige kan dit mogelijk tot problemen leiden. Dit zou moeten worden onderzocht wanneer men dit wilt concept wilt toepassen. Als aan alle eisen wordt voldaan, inclusief vissterftenormen en morfologische aspecten, beschouwt de deskundige dit gebruik van vijzelturbines als realistisch, en in overeenstemming met de visie van Rijkswaterstaat voor grootschalige waterkrachtcentrales.

Ontwerpconcept A.3 wordt ook als realistisch beschouwd door de deskundige. Echter ziet de deskundige ook een aantal nadelen die inpassingen op deze manier kunnen bemoeilijken. De belangrijkste is het gebrek aan adaptiviteit.

De adaptiviteit van de ontwerpconcepten viel de deskundige meteen op. Met name de ontwerpconcepten A.1 en A.2 hebben op dit gebied voordelen. Vooral ontwerpconcept A.2 heeft veel voordelen wanneer de waterkrachcentrale pas wordt gerealiseerd in de gebruiksfase van de stuw. Dit laatste aspect vind deskundige met name belangrijk; de deskundige ziet dit als een plausibel scenario. De reden die ontwerpconcept A.1 en A.2 met name aantrekkelijk maken komen volgens de deskundige overeen met de redenen beschreven in paragraaf 7.3 bij het evaluatiecriterium 'aanpasbaarheid'. Ontwerpconcept A.3 kan lastig worden gerealiseerd wanneer niet in het initieel stuw-ontwerp direct rekening wordt gehouden met de implementatie van een waterkrachtcentrale. Ook in het andere scenario, dat de waterkrachtcentrale wel direct worden gerealiseerd, acht de deskundige ontwerpconcept A.3 niet opportuun. In dat geval zit men zowel voor de komende 100 jaar vast aan de waterkrachtcentrale en de benodigde aanpassingen aan het ontwerp van de basisstuw. Op basis van de mate van adaptiviteit komt ontwerpconcept A.3 dus niet overeen met de ideeën van Rijkswaterstaat.

Concluderend lijkt ontwerpconcept A.2 op dit moment het meest in lijn te zijn met de visie van Rijkswaterstaat. De deskundige beschouwt dit concept als veelbelovend en realistisch, hoewel verdere onderzoeken nodig zijn voor definitieve validatie.

De validatie heeft waardevolle inzichten opgeleverd over een ontwerpproces van deze omvang in de praktijk. Belangrijk is dat frequente afstemming met de opdrachtgever nodig is om volledig te voldoen aan de visie van de opdrachtgever tijdens het ontwerpproces.

9 Conclusies & Aanbevelingen

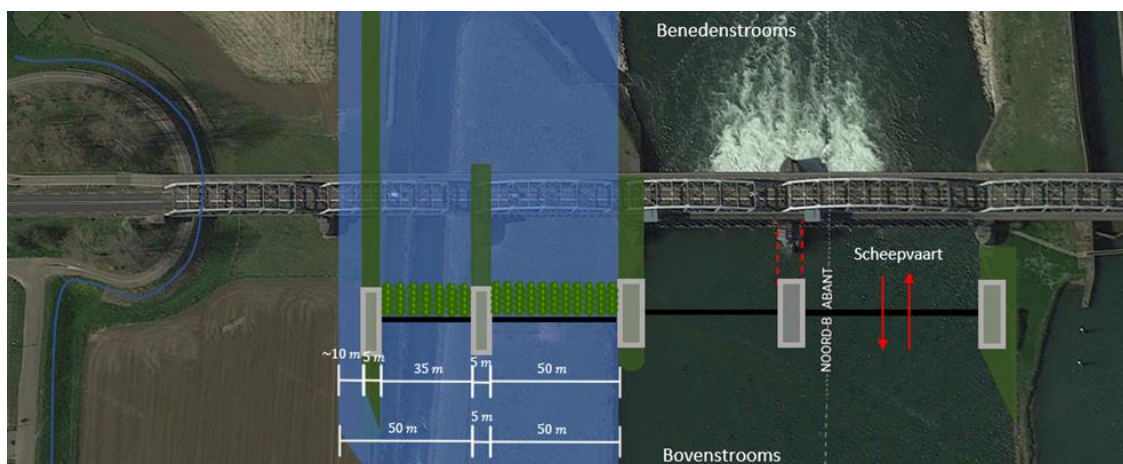
9.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was het uitvoeren van een eerste haalbaarheidsstudie naar implementatie van een grootschalige waterkrachtcentrale in de nieuw te ontwerpen stuw in de Maas.

Op basis van deze eerste haalbaarheidsstudie kan worden geconcludeerd dat het haalbaar is om een waterkrachtcentrale te implementeren in de toekomstige Maas-stuwen. Er wordt potentieel gezien voor het toepassen van het ontwikkelde ontwerpconcept in alle Maas-stuwen, met uitzondering van de stuw bij Borgharen, waar enkele belemmeringen zijn geïdentificeerd.

De haalbaarheid van de implementatie van een waterkrachtcentrale in de toekomstige Maas-stuwen is onderzocht door een casestudie naar de vervangingsopgave bij Grave uit te voeren en vervolgens naar de bredere toepasbaarheid te kijken. De haalbaarheid van de implementatie van een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave wordt beïnvloed door verschillende aspecten. Deze aspecten omvatten in de huidige conceptuele ontwerpfase onder andere hydraulische haalbaarheid, scheepvaart, vismigratie en de economische haalbaarheid. Voldoet het ontwerp op een van deze aspecten niet aan de eisen dan is het niet haalbaar om een waterkrachtcentrale te implementeren. Tijdens deze conceptuele ontwerpfase zijn deze aspecten grondig beoordeeld. Het is echter belangrijk op te merken dat deze beoordeling voorlopig is, omdat dit onderzoek een eerste haalbaarheidsstudie betreft. Er moet worden geconcludeerd dat een definitieve beoordeling van de haalbaarheid verder en uitgebreider onderzoek vereist. Aanbevelingen voor dit vervolgonderzoek worden uiteengezet in paragraaf 9.2.

Afgezien van het hoofddoel, namelijk het vaststellen van de haalbaarheid, heeft dit onderzoek ook gestreefd naar het bepalen van de meest optimale benadering voor de implementatie van een grootschalige waterkrachtcentrale. In Figuur 9.1 wordt het optimale ontwerp voor de inpassing van een waterkrachtcentrale in de basisstuw, zoals bepaald in dit onderzoek, weergegeven. Dit ontwerpconcept wordt als optimaal beschouwd vanwege de gunstige score in de Multicriteria-analyse en de hoogste netto contante waarde, wat de opbrengst na aftrek van kosten vertegenwoordigt over de terugverdientijd.



Figuur 9.1: Bovenaanzicht van Ontwerpconcept A.2., welke als het optimale ontwerp voor de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw wordt beschouwd.

De belangrijkste en relevante informatie van het ontwerp voor de conclusie wordt herhaald in Tabel 9.1.

Tabel 9.1: Herhaling van de relevante informatie die is opgedaan in het onderzoek voor ontwerpalternatief A.2.18.

*1 Voor het verbruik van een gemiddeld huishouden wordt een gemiddeld elektriciteitsverbruik per huishouden van 2730 aangehouden. (Compendium voor de Leefomgeving, 2021).

Parameter	Waarde/grootheid	Eenheid
Elektriciteit opwekking in een gemiddeld jaar	~22.000	[MWh/j]
Hoeveelheid Huishoudens die voorzien worden van elektriciteit	~8.000	[huishoudens/j]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 1	$-3,3 \cdot 10^6$	[€]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 2	$11,5 \cdot 10^6$	[€]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 3	$18,0 \cdot 10^6$	[€]
Netto contante waarde van de winst bij scenario 4	$32,9 \cdot 10^6$	[€]
Project rendement bij scenario 1	-6	[%]
Project rendement bij scenario 2	15	[%]
Project rendement bij scenario 3	23	[%]
Project rendement bij scenario 4	39	[%]

Onderstaand worden de conclusies met betrekking tot de haalbaarheid bondig samengevat. Deze conclusies richten zich op de eerdergenoemde aspecten die de haalbaarheid binnen deze eerste haalbaarheidsstudie bepalen:

- **De hydraulische haalbaarheid (of Overstromingspreventie):**

Het is gebleken dat het implementeren van een grootschalige waterkrachtcentrale in de basisstuw niet mogelijk is zonder adequate ontwerpmaatregelen. De bevindingen van dit onderzoek benadrukken dat de installatie van een waterkrachtcentrale met twee vijzelturbines al leidt tot een opstuwung die meer dan 1 cm bedraagt. In lijn met de vastgestelde eisen voor overstromingspreventie, wordt deze mate van opstuwung als onaanvaardbaar beschouwd. Vervolgens zijn ontwerpoplossingen ontwikkeld die gericht zijn op het (tijdelijk) verhogen van de afvoercapaciteit waardoor verwacht wordt dat geen kritische opstuwung zal ontstaan.

In Figuur 9.1 wordt het optimale ontwerp getoond dat het hydraulisch wel haalbaar maakt om een waterkrachtcentrale in te passen. In dit ontwerp is als oplossing de waterkrachtcentrale in de uiterwaarde geplaatst. Hierdoor wordt er geen extra weerstand aan het riviersysteem toegevoegd en kan het streefpeil daarom worden gehandhaafd waardoor er voldaan wordt aan de overstromingspreventie eisen. Dit toont aan dat met de juiste maatregelen een waterkrachtcentrale in de toekomstige stuw bij Grave hydraulisch haalbaar is.

- **De haalbaarheid met betrekking tot scheepvaart:**

Het optimale ontwerpconcept voldoet aan alle vooraf vastgestelde eisen om een veilig bevaarbare stuw te waarborgen. De manier waarop de waterkrachtcentrale is geïntegreerd in het ontwerp vormt geen belemmering voor scheepvaart. Op het gebied van scheepvaart kan het ontwerp als haalbaar worden beschouwd.

- **De haalbaarheid met betrekking tot vismigratie:**

Er kan niet eenduidig worden geconcludeerd dat aan alle eisen voor vismigratie wordt voldaan op basis van dit onderzoek. Ten opzichte van het programma van eisen zijn de ontwerpconcepten geverifieerd. De gekozen waterkrachtcentraletechnologie, de vijzelturbines, is de best beschikbare technologie en hiervoor is bewezen dat voldaan wordt aan de norm dat deze minder dan 0,1% vissterfte veroorzaakt. Op basis hiervan lijkt de ontworpen waterkrachtcentrale ook haalbaar met betrekking tot vismigratie. Echter, wordt in dit onderzoek ook geconcludeerd dat dit niet voldoende bewijs is om te kunnen zeggen dat het optimale ontwerp haalbaar is met betrekking tot vismigratie. Hiervoor moet de absolute vissterfte van het stuwcomplex worden onderzocht en geverifieerd. Ook moet de vissterfte in een breder perspectief worden beoordeeld, namelijk voor alle stuwen in de Maas samen. Het is zaak om uitvoerig onderzoek hiernaar te laten doen door een ecooloog. Aanbevelingen voor dergelijk onderzoek worden in paragraaf 9.2 gegeven. Concluderend, kan op basis van deze eerste haalbaarheidsstudie dus geen definitief oordeel worden geveld over de haalbaarheid op het gebied van vismigratie.

- **Economische haalbaarheid:**

Zoals reeds vermeld, is het uitgangspunt van Rijkswaterstaat dat zij de waterkrachtcentrale niet zelf gaan exploiteren. Het is daarom van essentieel belang om een haalbare business case te ontwikkelen. Op basis van de huidige berekening van het projectrendement kan geconcludeerd worden dat het optimale ontwerp, zoals weergegeven in Figuur 9.1, potentieel een haalbare business case kan opleveren. Echter, deze haalbaarheid is gevoelig voor fluctuaties in de elektriciteitsprijzen en eventuele subsidies voor duurzame energie van de overheid. Niettemin blijkt uit dit onderzoek tevens dat het definitieve oordeel over de haalbaarheid nog niet kan worden geveld op basis van de waarden weergegeven in Tabel 9.1. Het is noodzakelijk om nauwkeurig vast te stellen welke kosten toegewezen moeten worden aan de realisatie van de waterkrachtcentrale en welke kosten toegeschreven dienen te worden aan de constructie van de stuw. Dit onderscheid is cruciaal voor een nauwkeurige evaluatie van de economische haalbaarheid. Voordat een volledig beeld kan worden gevormd over de financiële haalbaarheid, moet een gedetailleerde analyse worden uitgevoerd om de kostenstructuur van beide elementen grondig te begrijpen en toe te wijzen. Hierdoor kunnen weloverwogen beslissingen worden genomen over de economische haalbaarheid van het project als geheel.

De eindconclusie van dit onderzoek is dat het optimale ontwerp, gebaseerd op de eisen en criteria van de eerste haalbaarheidsstudie, haalbaar lijkt te zijn voor de casestudie. Niettemin moet worden benadrukt dat, ondanks deze positieve indicatie, een definitief oordeel over de haalbaarheid nog niet kan worden geveld op basis van deze studie alleen. De complexiteit en veelzijdigheid van de factoren die de haalbaarheid beïnvloeden, vereisen aanvullend en verdiepend onderzoek. In paragraaf 9.2 worden aanbevelingen gepresenteerd voor verder onderzoek. Daarbij moeten ook veranderingen ten opzichte van het huidige (initiële) programma van eisen worden meegenomen.

Wat betreft de vervangingsopgave van de andere stuwen in de Maas, lijken deze, met uitzondering van de stuw bij Borgharen, sterk op de casestudie. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het ontwerpconcept breder toepasbaar lijkt te zijn, namelijk bij alle vervangingsopgaves van de Maas-stuwen.

9.2 Aanbevelingen:

Dit ontwerponderzoek vertegenwoordigt slechts een initiële haalbaarheidsstudie, wat ook wel gezien kan worden als een verkenning, naar implementatie van een waterkrachtcentrale in de nieuw te ontwerpen Maas-stuwen. In deze paragraaf worden aanbevelingen gepresenteerd voor het vervolgtraject, gericht op grootschalige inpassing van waterkrachtcentrales in de toekomstige Maas-stuwen.

De aanbevelingen zijn onderverdeeld in twee categorieën:

1. Aanbevelingen voor het beoordelen van de definitieve haalbaarheid om waterkrachtcentrales in de toekomstige Maas-stuwen in te passen;
2. Aanbevelingen met betrekking tot nader onderzoek ten aanzien van het verder ontwikkelen van het waterkrachtcentrale-ontwerp.

In deze paragraaf worden de aanbevelingen per categorie gepresenteerd. Een aantal aanbevelingen overlappen tussen de categorieën. Voor het verder ontwikkelen van het ontwerp moet namelijk ook rekening worden gehouden met de aanbevelingen uit de eerste categorie. Bovendien kunnen ontwikkelingen in het ontwerp mogelijk de haalbaarheid beïnvloeden.

1. Aanbevelingen om de definitieve haalbaarheid voor de inpassing van een waterkrachtcentrales in de toekomstige Maas-stuwen te beoordelen:

De aanbevelingen voor de definitieve beoordeling van de haalbaarheid zijn opgesplitst in twee delen. Het eerste deel bevat aanbevelingen per haalbaarheids criterium dat in dit onderzoek is gebruikt. Het tweede deel biedt aanbevelingen voor aanvullend onderzoek buiten de huidige scope van de vier haalbaarheidsaspecten die nodig zijn voor de definitieve haalbaarheidsbeoordeling. Naast de haalbaarheids criteria die in deze studie zijn behandeld, moeten nog enkele criteria worden onderzocht voordat een definitieve conclusie over de haalbaarheid kan worden getrokken.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek met betrekking tot de haalbaarheids criteria gehanteerd in dit onderzoek:

- **Hydraulische haalbaarheid:**

Met betrekking tot de hydraulische haalbaarheid is het met name cruciaal om twee aanvullende onderzoeken uit te voeren voor de definitieve haalbaarheidsbeoordeling.

Aanbeveling 1.1:

Uit de validatie, hoofdstuk 8, volgt dat de huidige beoordeling van de waterveiligheid nog niet volstaat voor een definitieve beoordeling van de haalbaarheid van het ontwerp. In dit onderzoek is de haalbaarheid beoordeeld door alleen een maatgevende hoogwatersituatie te analyseren. Hoewel dit voldoende is voor een eerste inschatting van de haalbaarheid, is het onvoldoende voor een definitieve haalbaarheidsbeoordeling. Voor een definitieve haalbaarheidsbeoordeling is tegenwoordig een overstromings-risico-benadering vereist. Dit houdt in dat een reeks afvoeren en bijbehorende faalmechanismen moet worden geverifieerd.

Aanbeveling 1.2:

Een 2-dimensionale of zelfs 3-dimensionale hydraulische analyse moet worden uitgevoerd, bijvoorbeeld met behulp van SOBEK of WAQUA, om de overstromings-risico-benadering te ondersteunen. Bovendien moet de stuw worden geëvalueerd op lokale opstuwing en/of stroomsnelheden die de waterveiligheid in gevaar kunnen brengen. Deze analyse is ook van belang voor andere haalbaarheids criteria, zoals het beoordelen van de veilige doorvaart voor

scheepvaart.

- **Haalbaarheid met betrekking tot scheepvaart:**

Aanbeveling 2.1:

Voor de definitieve haalbaarheidsbeoordeling is het van essentieel belang dat Rijkswaterstaat een beslissing neemt met betrekking tot scheepvaart tijdens hoogwater. Indien nodig moet het ontwerp worden aangepast om hiermee rekening te houden.

Aanbeveling 2.2:

Ook voor het beoordelen van de haalbaarheid met betrekking tot scheepvaart is een 2-dimensionale en/of 3-dimensionale hydraulische analyse nodig om de dwarsstroming te bepalen en te verifiëren. Te hoge dwarsstroming kan namelijk gevaarlijk zijn voor scheepvaart.

Aanbeveling 2.3:

Voor de definitieve haalbaarheidsbeoordeling moeten scheepvaartsimulaties worden uitgevoerd om zowel de veiligheid als het mogelijke oponthoud te onderzoeken.

- **Haalbaarheid met betrekking tot vismigratie:**

Aanbeveling 3.1:

Voor de definitieve bepaling van haalbaarheid moet uitgebreider onderzoek naar de vismigratie van het stuwcomplex worden uitgevoerd. De absolute vissterfte van het stuwcomplex moet nog worden onderzocht en beoordeeld. Ook dient het toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren (RWS Water, verkeer en leefomgeving, 2016) volledig worden doorlopen. Een mogelijk middel dat hierbij van pas komt is de Analysetool Vispasseerbaarheid Stuwcomplexen van Deltares (De Jong et al., 2021) te gebruiken. Voor vervolgonderzoek wordt aangeraden om twee toekomstscenario's te overwegen en voor beide de absolute vissterfte te onderzoeken. Het eerste toekomstscenario betreft de huidige situatie in het maas-systeem, waarin de maximale toegestane cumulatieve vissterfte wordt bereikt door de op dit moment aanwezig waterkrachtcentrales in de Maas. Hierdoor mag het nieuwe stuwcomplex slechts 0,1% vissterfte veroorzaken. Dit kan problematisch zijn voor de implementatie van een grootschalige waterkrachtcentrale. Het tweede toekomstscenario betreft een mogelijke situatie waarin de waterkrachtcentrale pas in de basisstuw wordt geïmplementeerd als de huidige waterkrachtcentrales in het Maas-systeem verwijderd zijn. Hierdoor komt de cumulatieve vissterfte door waterkrachtcentrales in de maas onder de 10% te liggen waardoor meer ruimte is voor implementatie van nieuwe waterkrachtcentrale. Mogelijk komt de norm van maximale vissterfte van 0,1% te vervallen. Beide toekomstscenario's worden realistisch geacht.

Aanbeveling 3.2:

Ook voor de definitieve beoordeling van de vismigratie wordt aanbevolen om een 2-dimensionale of 3-dimensionale hydraulische analyse uit te voeren. Zoals eerder in het rapport vermeld, zoeken bepaalde vissoorten de hoofdstroom van de rivier op om te migreren. Om de absolute vissterfte in te schatten moet onder verschillende omstandigheden worden bepaald hoeveel debiet er door welk deel van de stuw gaat.

- **Economische haalbaarheid:**

Om een nauwkeurige beoordeling van de economische haalbaarheid te kunnen maken en een investeringsbeslissing te ondersteunen, wordt aanbevolen om de volgende aanvullende onderzoeken te overwegen:

Aanbeveling 4.1:

Het is raadzaam om eerst de kosten te identificeren die specifiek toe te schrijven zijn aan de integratie van de waterkrachtcentrale in dit project. Deze kosten moeten vervolgens worden geïntegreerd in het financiële model om een preciezere inschatting te maken van het werkelijke projectrendement. Voorbeelden van aanvullende kosten die niet zijn opgenomen in de huidige businesscase zijn onderzoeks- en ontwikkelingskosten, bouwkosten, personeelskosten en transportkosten.

Aanbeveling 4.2:

Een tweede aanbeveling is gericht op de investerende partij. Voor een investeringsbeslissing is het aanbevolen om een financiële risicoanalyse uit te voeren. Dit vereist nader onderzoek naar de ontwikkeling van de elektriciteitsprijzen, mogelijke subsidieaanvragen en een gedetailleerdere berekening van de energieopbrengst. Het wordt sterk aanbevolen om de financiële risicoanalyse in samenwerking met een expert op dit gebied uit te voeren.

Aanbeveling 4.3:

Het is ook raadzaam om het aspect van wie de waterkrachtcentrale gaat exploiteren, opnieuw te overwegen. Dit kan een aanzienlijke invloed hebben op de economische haalbaarheid. Rijkswaterstaat kan bijvoorbeeld overwegen om de waterkrachtcentrale zelf te exploiteren, waarbij het streven naar winst misschien niet de primaire doelstelling is, maar eerder de maximalisatie van duurzame energieopwekking. Een andere optie is om het ontwerp van de waterkrachtcentrale te commercialiseren en toe te passen op andere locaties, mogelijk zelfs in het buitenland. In dit geval ben je per stuw minder geld kwijt aan de ontwikkelingskosten. Ook kan financiering via een burgercollectief worden overwogen. Al deze opties zullen de financiële doelstellingen van het project beïnvloeden en daarmee de beoordeling van de economische haalbaarheid.

Aanbeveling 4.4:

Overweeg om de waarde van duurzame energieopwekking opnieuw te evalueren en hoe dit wordt gewaardeerd, met inachtneming van beleidsfactoren. Het opwekken van duurzame energie kan mogelijk meer waard zijn dan alleen de 'directe economische waarde' die in het financiële model wordt weergegeven. De vraag die hieraan gekoppeld moet worden: is hoe dit tot uiting kan komen in de businesscase en uiteindelijk ook in het selecteren van de optimale variant. Dit zijn twee aspecten waarover nagedacht kan worden die het economische haalbaarheids criterium kunnen beïnvloeden.

Aanbeveling 4.5:

Voor een grondiger beoordeling van de economische haalbaarheid wordt aanbevolen om een diepgaande 2-dimensionale of 3-dimensionale hydraulische analyse uit te voeren. Dit zal een nauwkeurigere berekening van de energieopbrengst en daarmee de financiële opbrengst mogelijk maken. Lokale hydraulische omstandigheden kunnen ook van invloed zijn op het vermogen en kosten, zoals die voor bodembescherming. Daarnaast wordt aanbevolen om aanvullend hydraulisch onderzoek uit te voeren en een gevoeligheidsanalyse uit te voeren voor droge en natte jaren.

Aanbevelingen 4.6:

Het wordt geadviseerd om na een constructieve ontwerplus de businesscase opnieuw door te rekenen. Na de constructieve ontwerplus kunnen de kosten nauwkeuriger worden ingeschat. De kosten van het realiseren van een waterkrachtcentrale kunnen namelijk indirect terug te zien zijn in het ontwerp van andere stuw-elementen. Wanneer de waterkrachtcentrale een grote bijdrage levert aan de faalkans dan dient een ander deel robuuster uitgevoerd te worden. De stuw inclusief waterkrachtcentrale wordt namelijk ontworpen op basis van een faalkans. De exacte verdeling

van deze faalkans over verschillende faalmechanismes kan door de ontwerper mee worden geschoven. Het is van belang om op te merken dat deze aanbeveling gecombineerd moet worden met aanbeveling 4.1.

Aanvullende Haalbaarheidscriteria voor Definitieve Beoordeling:

Naast het aanvullend onderzoek voor de haalbaarheidscriteria die in dit onderzoek zijn behandeld, moeten ook aanvullende criteria worden onderzocht die buiten de scope van dit onderzoek vallen. De belangrijkste aanbevolen criteria die moeten worden onderzocht zijn:

- Voor de uitbreiding van de stuw in de uiterwaarde, zoals voorgesteld in het optimale ontwerpconcept, wordt aanbevolen om bij het waterschap te verifiëren of het ontwerp in overeenstemming is met de zonering die van toepassing is rond de locatie van de toekomstige stuw.
- Ook moet in een vervolgstudie een constructieve ontwerpplus worden doorlopen om de haalbaarheid volledig te kunnen beoordelen. Dit houdt in dat wordt onderzocht of de voorgestelde waterkrachtcentrale daadwerkelijk kan worden gebouwd. Daarnaast moet dit worden verwerkt in de kostenramin. Bovendien moet de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van de waterkrachtcentrale worden onderzocht.
- Om de haalbaarheid volledig te kunnen inschatten, moet de impact van de implementatie van een waterkrachtcentrale op het sedimenttransport en de morfologie van het riviersysteem worden onderzocht. Hierbij moet speciale aandacht worden besteed aan de aanzuigende werking van een waterkrachtcentrale op sediment. Het functioneren van de drempel en het toekomstige ontwerp ervan moeten ook worden meegenomen in deze analyse. Daarnaast is het belangrijk om het eerder genoemde probleem van bodemdaling in deze analyse op te nemen. Dit vereist een gecombineerde morfologische analyse en een nauwkeurigere hydraulische analyse. Het is van belang op te merken dat deze aanbeveling indirect invloed heeft op de kosten, afhankelijk van aanbeveling 4.1, waarin de kostencomponenten worden bepaald die zijn gerelateerd aan de realisatie van de waterkrachtcentrale.

2. Aanbevelingen met betrekking tot nader onderzoek ten aanzien van het verder ontwikkelen van het waterkrachtcentrale-ontwerp:

Naast aanbevelingen om de haalbaarheid van het ontwerp definitief te beoordelen, moeten er ook aanbevelingen worden gegeven ten aanzien van het verder ontwikkelen van het ontwerp:

- *Iteratie op basis van validatie:*
De aspecten die zijn geïdentificeerd in de validatie, zoals beschreven in hoofdstuk 8, moeten grondig worden geanalyseerd en geïntegreerd in het ontwerp. In een vervolgonderzoek moet op basis hiervan een iteratie voor het ontwerp worden uitgevoerd. In de validatie is bijvoorbeeld aangegeven dat het voor scheepvaart wenselijk is om zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts navigerende schepen door afzonderlijke stuwopeningen te laten varen. Het ontwerp dient hierop aangepast te worden door twee bevaarbare stuwopening te creëren.
- *Scheepvaart tijdens hoogwater:*
Het is aanbevolen om in een vroeg stadium te bepalen hoe om te gaan met scheepvaart tijdens hoogwatercondities. Om dit te bepalen wordt aanbevolen om een analyse uit te voeren en verschillende opties tegen elkaar af te wegen. Er wordt geadviseerd om de waarde van het behoud van deze functie te bepalen door middel van een economische analyse. Voer ook een stakeholdersanalyse uit en stem dit af met beleidsbepalers.

- *Uniformiteit in de toekomstige Maas-stuwen:*
Beleidsbepalers moeten ook beslissen in hoeverre zij de wens van uniformiteit willen laten doorvoeren in de toekomstige Maas-stuwen. Mochten ze van de wens voor uniformiteit een harde eis maken dan wordt aanbevolen om de ontwerplus nogmaals iteratief te doorlopen.
- *Bevordering van de vismigratie:*
Met betrekking tot vismigratie wordt aangeraden om potentiële maatregelen die vismigratie bevorderen te onderzoeken. Op dit moment wordt enkel een vismigratierivier toegepast. Mogelijke zijn er andere maatregelen (ook) toepasbaar. Een voorbeeld van een maatregel die de vismigratie kan bevorderen is een vissluis zoals wordt aangedragen in het onderzoek Waterkrachtcentrale Grave (Heereveld et al., 2020). Daarnaast wordt aangeraden om de werking van een vismigratierivier te onderzoeken en het ontwerp hiervan mogelijk aan te passen. .
- *Optimalisatie van prestaties van de vijzelturbines:*
In afstemming met een ontwikkelaar van de waterkrachtcentraletechnologie, moet het exacte vermogen en rendement van de vijzelturbines op deze locatie worden bepaald. Mogelijk kan het ontwerp van de vijzelturbine door (locatie) specifieke aanpassingen nog worden geoptimaliseerd.
- *Iteratieve stap uitvoeren binnen de ontwerpconcepten:*
Daarnaast zou het zinvol zijn om een iteratie in het keuzeprocess voor een optimale varianten binnen het ontwerpconcept uit te voeren. Momenteel wordt binnen het ontwerpconcept een selectie gemaakt op basis van economische optimaal, onder andere om te garanderen dat er een haalbare business case wordt gerealiseerd. Vervolgens is de gekozen variant per ontwerpconcept in een Multicriteria-analyse vergeleken om het optimale ontwerpconcept te bepalen op basis van de evaluatiecriteria. Echter, moet kritisch worden overwogen of deze werkwijze daadwerkelijk resulteert in selectie van de meest optimale variant van alle ontwerpconcepten. Wat men zich moet afvragen is of op deze manier uiteindelijk wel de meest optimale variant wordt geselecteerd; wellicht is een enigszins minder winstgevende variant wel optimaler op basis van de score op de evaluatiecriteria. Het is mogelijk dat een iets minder winstgevende variant toch optimaler blijkt te zijn op basis van de evaluatiecriteria. De vraag die hierbij gesteld moet worden is of het noodzakelijk is om de business case te maximaliseren. In dit onderzoek is bewust gekozen voor de huidige methode, gezien het een verkennende studie betreft waarin snel inzicht wordt verkregen in de optimale manier om waterkrachtcentrales in de basisstuw te integreren. Dus als iteratieve stap wordt aanbevolen om binnen het gekozen ontwerpconcept een aanvullende Multicriteria-analyse uit te voeren. Een alternatieve optie is om de eindevaluatie te herhalen, maar deze keer met meer varianten per ontwerpconcept. Door deze aanvullende stap wordt de kans vergroot dat het uiteindelijk geselecteerde ontwerpconcept daadwerkelijk in lijn is met een breder scala aan evaluatiecriteria, waardoor een beter afgeronde en geïnformeerde beslissing kan worden genomen.
- *Locatie van de waterkrachtcentrale in dwarsrichting van de rivier als variabele:*
Verder moet om het daadwerkelijk optimale ontwerp te vinden, ook gevarieerd worden met de locatie van de waterkrachtcentrale. Het plaatsen van de waterkrachtcentrale op de meest strategische locatie kan invloed hebben op zowel de technische haalbaarheid als op de scores van de Multicriteria-analyse. Door deze variabele in het ontwerp op te nemen, wordt de mogelijkheid geboden om het ontwerp nog verder te optimaliseren.
- *Heroverweging van positie vijzelturbines ten opzichte van de basisstuw:*
Voor ontwerpconcept A.2 is het mogelijk realistisch om het ontwerpconcept te optimaliseren door de positionering van de vijzelturbines ten opzichte van de basisstuw te heroverwegen. Mogelijk is

ontwerpalternatief C uit hoofdstuk 6 geschikt voor toepassing in de uiterwaarde. De voordelen van dit ontwerpalternatief moeten overwogen worden, zoals het gunstig beïnvloeden van het stromingspatroon en mogelijke kostenbesparingen. Mogelijk neemt het rendement van de vijzelturbines toe doordat de afvoer geleidelijk aanstroomt. Of dit daadwerkelijk gunstig werkt op de prestaties van de vijzelturbines zou door een specialist onderzocht moeten worden. Naast het voordeel met betrekking tot het rendement kan een additionele staalconstructie leiden mogelijk tot een koste reductie. De deuren kunnen minder robuust worden uitgevoerd. Tegenover deze koste reductie staat echter de aanleg van de additionele staalconstructie. Een aanvullend voordeel van de gereduceerde stuwdeurhoogte is dat lokaal, ter plaatse van de waterkrachtcentrale, de steunpunten lager uitgevoerd kunnen worden. Dit komt de ruimtelijke kwaliteit ten goede.

- *Integratie van pompfunctie van vijzelturbines:*

De wenselijkheid van een waterkrachtcentrale kan veranderen wanneer er extra waarde wordt gecreëerd. In het onderzoek 'River Meuse utilizing hydropower- and energy storage potential' (Lambach, 2021) worden de vijzelturbines ook voor andere doeleinden gebruikt. Bijvoorbeeld, in perioden van ernstige droogte is de waterafvoer in de Maas te laag om de waterverliezen bij de stuwen en sluizen te compenseren, wat problemen veroorzaakt voor de scheepvaart. Het uitrusten van een waterkrachtinstallatie met vijzelturbines die ook water kunnen pompen, kan de bevaarbaarheid dienen. Schutwater kan dan stroomopwaarts worden teruggepompt. Bovendien kunnen pomp-turbines worden ingezet voor energieopslag door water op te pompen tijdens uren van lage elektriciteitsvraag, wat vervolgens via de turbines kan worden vrijgegeven tijdens uren van hoge vraag. Een dergelijk innovatief idee kan mogelijk worden geïntegreerd met het gevonden optimale ontwerp in deze studie, waardoor extra waarde aan de waterkrachtcentrale wordt toegevoegd. Dit kan de wenselijkheid ervan beïnvloeden. Er wordt aangeraden om een dit idee verder te onderzoeken.

- *Optimalisatie van de fundering:*

Een aanbeveling voor een vervolgonderzoek is om de funderingsdiepte van de toekomstige stuw te onderzoeken. Als deze dieper komt te liggen kunnen er mogelijk meer vijzelturbines worden geïmplementeerd zonder ontwerp oplossing tegen opstuwing.

- *Veiligheidsmaatregelen voor Scheepvaart:*

Er wordt aangeraden om aanvullende veiligheidsmaatregelen te ontwerpen die moeten voorkomen dat scheepvaart op de waterkrachtcentrales kan botsen.

- *Heroverweging van Ontwerp- en Onderzoek aanpak:*

Het is raadzaam om na te gaan of het handig is om, zoals in de huidige aanpak, de basisstuw te ontwerpen en daarna pas de inpassing van de waterkrachtcentrale hierin te onderzoeken. Mogelijk werkt het beter om vanaf het begin direct rekening te houden met de integratie van de waterkrachtcentrale. Mogelijk leidt dit tot een ander basisstuw ontwerp. Dit kan ten goede komen aan de functie waterkrachtenergie opwekken, zonder dat het concessies doet aan andere functies.

- *Uitbreiding van Validatie:*

Voor toekomstige studies wordt aanbevolen om de opzet van de validatie aan te passen. In dit onderzoek is één deskundige van de opdrachtgever van de toekomstige stuw geïnterviewd. Het is wenselijk om dit uit te breiden naar een interview met een panel van experts met diverse achtergronden en expertise. Een dergelijk expertpanel kan waardevolle inzichten bieden vanuit verschillende perspectieven en daarmee een meer gedegen validatie van het ontwerp en de besluitvorming ondersteunen.

- *Rekening houden met mogelijk toch hergebruiken van de huidige stuw:*
In de validatie werd aangegeven dat Rijkswaterstaat mogelijk toch overweegt om de huidige stuw van de casestudie te hergebruiken. Dit betekent dat de stuw op de huidige locatie wordt vervangen in plaats van het construeren van een nieuwe stuw direct bovenstrooms. Dit zou van grote invloed zijn op het huidige onderzoek. Er wordt aangeraden om rekening te houden met de mogelijkheid van hergebruik. Het is daarom zaak om te onderzoeken of het ontwerpconcept A.2 ook in dit geval toegepast kan worden.

Bijlage A - Methode voor het bepalen van de energieopbrengst

In deze bijlage wordt de methode beschreven waarmee een globale indicatie van de energieopbrengst kan worden bepaald. Dit is nodig voor fase 5 van de aanpak (hoofdstuk 7). Op basis hiervan wordt uiteindelijk het optimaal aantal vijzelturbines per verbeterd ontwerpconcept bepaald. Dit betreft een economische afweging. Voor het berekenen van de financiële opbrengst van een waterkrachtcentrale is de energieopbrengst in een jaar nodig.

Bijlage A.1 - Algemene beschrijving van de methode:

De energieopbrengst wordt bepaald met een parametrisch model dat is ontwikkeld in Python. Dit model maakt gebruik van historische data om de totale energieopbrengst voor een heel jaar te berekenen.

De energieopbrengst zoals bepaald in dit rapport betreft geen exacte waarde. Naast de invloed van natuurlijke omstandigheden, zijn er verschillende aannames gemaakt om een eerste schatting te kunnen maken. Dit rapport biedt dus een globale indicatie van de te verwachten energieopbrengst; de exacte waarden kunnen variëren vanwege verschillende factoren die buiten het model vallen.

De aannames zijn met name er op gericht dat geen onderscheid wordt gemaakt tussen de verbeterde ontwerpconcepten (A.1, A.2 en A.3):

- De ontwerpmaatregelen hebben geen invloed op het rendement van de vijzelturbines;
- Het operationeel plan is hetzelfde opgebouwd voor elk ontwerpconcept, wat betekent dat de waterstanden, debieten en de (mogelijke) relatie tussen deze parameters niet variëren tussen de ontwerpconcepten;
- De locatie van de waterkrachtcentrale, een variabele tussen de ontwerpconcepten, heeft geen impact op de berekening van de energieopbrengst.
- De ontwerpconcepten waarin extra afvoercapaciteit wordt gecreëerd, veranderen het moment van strijken niet, in elke verbeterd ontwerpconcept blijft dit 1800 m³/s.
- In deze eerste berekening van de jaarlijkse energieopbrengst wordt naar de gemiddelde opbrengst gekeken door een dataset van 20 jaar te analyseren. De impact van een nat en droog jaar worden voor deze berekening buiten beschouwing gelaten.
* in principe kan met de huidige methode ook voor deze jaren een energieopbrengst worden berekend. In dat geval moet enkel een dataset van een nat of droog jaar als invoerdata gebruikt worden. Dit is in de conceptuele ontwerpfase buiten beschouwing gelaten. Het is op dit moment van belang om het gemiddelde te berekenen aangezien de financiële opbrengst over een periode van 15 jaar wordt berekend. In dat geval is een gemiddelde een goede representatie.

Gedurende de uitleg van de methode zullen nog aanvullende aannames worden gegeven.

De energieopbrengst van een vijzelturbine voor een jaar kan berekend worden met vergelijking A.1:

$$E = P \cdot t \quad (\text{vgl. A.1})$$

Waarin:

$$P = \text{vermogen [kW]}$$

$$t = \text{vollasturen in een jaar}$$

In de verbeterde ontwerpconcepten bestaan de varianten vaak uit meer dan één vijzelturbine. Daarom is de volgende sommatie opgesteld om de totale energieopbrengst in een jaar te berekenen (E_t):

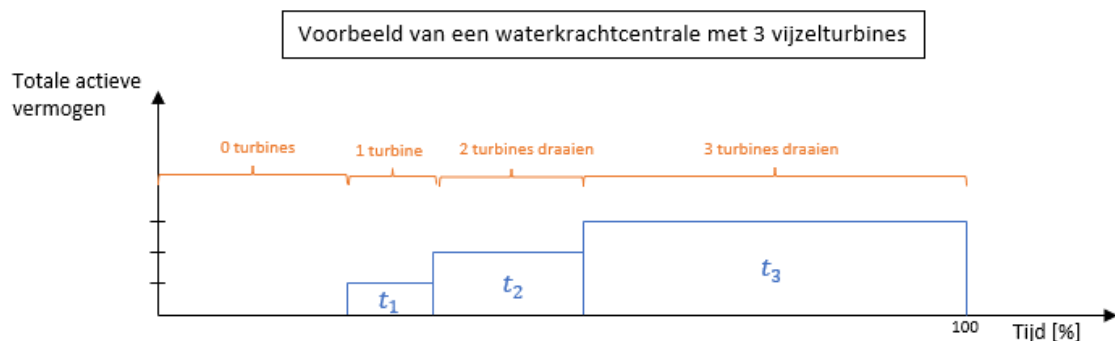
$$E_t = \sum_{i=1}^{i_{\max}} (P \cdot t_i \cdot i) \quad (\text{vgl. A.2})$$

Waarin:

$$P = \text{vermogen [kW]}$$

t_i = vollasturen in een jaar dat i aantal turbines draaien [u]
 i = aantal draaiende turbines
 i_{max} = het maximaal aantal turbines

De bovenstaande sommatie niet de energieopbrengst per vijzelturbine optelt, maar de energieopbrengst van verschillende operationele modi bij elkaar optelt. Dit betekent dat de energieopbrengst wordt berekend per aantal ingeschakelde vijzelturbines. Figuur A.1 geeft dit principe grafisch weer. Dit is nodig aangezien de vijzelturbines geleidelijk worden ingeschakeld; niet alle vijzelturbines zijn te allen tijden operationeel. De energieopbrengst voor een variant met 3 turbines wordt dus berekend door de energieopbrengsten van situaties waarin 1, 2 en 3 turbines draaien bij elkaar op te tellen.



Figuur A.1: Grafische representatie van de manier waarop de totale energieopbrengst wordt berekend, met hierin aangegeven de verschillende operationele modi van het aantal ingeschakelde vijzelturbines.

De volgende stappen zijn het bepalen van het aantal vollasturen per operationele modi en het vermogen.

Bijlage A.2 - Bepalen van de vollasturen (stap 1.1):

De parameter vollasturen geeft de totale tijd aan dat de vijzelturbines op volle capaciteit energie opwekken in een jaar. Door middel van een data-analyse wordt het aantal vollasturen bepaald. Het operationeel plan in combinatie met historisch optredende afvoergegevens worden gebruikt om een schatting te maken van de tijd dat een bepaald aantal turbines gedurende het jaar draaien.

Zoals eerder beschreven moeten de vollasturen niet per vijzelturbine worden bepaald maar per operationele modi van de waterkrachtcentrale. Het aantal vollasturen per operationele modi (t_i) kan worden bepaald met vergelijking A.3:

$$t_i = (f_i/100) \cdot 365 \cdot 24 \quad (\text{vgl. A.3})$$

Waarin:

$$f_i = \text{Gedeelte van de tijd waarin } i \text{ turbines gelijktijdig draaien } [\%]$$

De volgende stap is het bepalen van de gedeelte van de tijd dat bepaalde operationele modi voorkomen (f_i). Dit wordt bepaald door het operationeel plan naast de historische afvoer data te leggen. Op basis van het operationeel plan kan voor elk datapunt bepaald worden hoeveel vijzelturbines er destijds ingeschakeld zouden zijn. Hieruit kan door middel van het pythonscript vervolgens het gedeelte van de tijd dat een bepaalde de operationele modi voorkomt worden bepaald. Dit is het percentage van de tijd dat een bepaald aantal vijzelturbines zou kunnen draaien op gegeven meetmomenten gedurende een gedefinieerde periode van 20 jaar.

De over een periode van 20 jaar vastgestelde percentages worden in deze studie beschouwd als realistische waarden die terugkomen in een gemiddeld jaar. Hiermee valt dus een redelijk realistische inschatting van het aantal vollasturen te maken.

Om het aantal vollasturen te bepalen moet in de volgende stap het operationeel plan worden opgesteld en daarna moet een omschrijving van de data worden gegeven.

De volgende aanvullende aanname is gemaakt in het bepalen van het aantal vollasturen:

- Er worden geen vollasturen berekend voor de periode waarin een vijzelturbine wordt opgeschakeld van 2 naar 8 m³/s. De verwachting is dat het opschakelen snel plaatsvindt waardoor het verlies dat dit niet meegenomen wordt als nihil en dus verwaarloosbaar wordt beschouwd. Verwacht wordt dat de vijzelturbines meestal op volle capaciteit draaien; de periode dat ze niet voldraaien is klein. Het kleine verlies in nauwkeurigheid zal uiteindelijk niet bepalen of de businesscase haalbaar is.

Bijlage A.3 - Opstellen van het operationeel plan om het aantal vollasturen te bepalen (stap 1.2)

De volgende stap is het vaststellen van de operationele modi, waarin wordt gedefinieerd hoeveel vijzelturbines er energie kunnen opwekken bij verschillende debieten. Vervolgens wordt op basis hiervan bepaald hoeveel vijzelturbines er per datapunt hadden kunnen draaien.

In paragraaf 6.2.1 wordt beschreven hoe de basisstuw en de vijzelturbines samenwerken in ontwerpalternatieven zonder ontwerpoplossing voor het waterveiligheidsprobleem. In de onderstaande opsomming worden aanpassingen en aanvullingen op het operationeel plan gegeven voor de verbeterde ontwerpconcepten.

Het operationeel plan definieert de werking tussen de waterkrachtcentrale en de basisstuw. In het onderstaande overzicht wordt de verdeling van het debiet tussen de vijzelturbines en andere stuwopeningen onder verschillende afvoersituaties vastgelegd. Na interviews met Rijkswaterstaat en een data-analyse zijn de volgende principes voor het operationeel plan opgesteld:

- De waterkrachtcentrale maakt deel uit van het afvoerregulatiesysteem en draagt daarmee bij aan de waarborging van het streefpeil;
- Het afvoerregelregime van de huidige stuw bij Grave blijft behouden, aangezien meerdere stakeholders hiervan afhankelijk zijn. Het doel is om een streefpeil van NAP+7,95 m +/- 5 cm te handhaven;
- In de droge periodes, wanneer de afvoer naar nul moet, worden de hefdeur gesloten.
- Er moet voldoende water beschikbaar zijn lekverlies (de eerste 2 m³/s van de afvoer) en de vispassage (4 m³/s). Dit betekent dat de eerste 6 m³/s vrij afstroomt zonder energieopwekking.
- De vijzelturbines regelen de lagere afvoeren.
- De vijzelturbines worden geleidelijk ingeschakeld vanaf een debiet van 6 m³/s, terwijl de andere stuwopeningen gesloten blijven totdat het debiet groter is dan wat de vijzelturbines aankunnen.
- Het debiet door één turbine kan geregeld worden tussen 2 en 8 m³/s met een stapgrootte van 1 m³/s.
- Bij een afvoer kleiner dan de totale capaciteit van alle vijzelturbines samen worden een aantal vijzelturbines uitgeschakeld, terwijl de rest op volle capaciteit draait.
- Bij een afvoer groter dan 1800 m³/s worden de vijzelturbines uitgeschakeld omdat de stuw wordt gestreken. Na deze afvoer worden de vijzelturbines in ontwerpconcept A.1 pas uit de waterweg geheven. Deze ontwerpoplossing resulteert dus niet in energieverlies waardoor de huidige bepaling van de energieopbrengst ook voor dit ontwerpconcept geldig blijft.

Voor de bovenstaande beschrijving van het operationeel plan wordt een regelschema opgesteld. Een voorbeeld van een dergelijke regelschema voor een waterkrachtcentrale met 5 vijzelturbines wordt getoond in tabel A.1.

Tabel A.1: Een voorbeeld van een operationeel plan waarin de waterkrachtcentrale 5 vijzelturbines huisvest.

*1: Dit is een schatting naar de nauwkeurigheid waarmee hefdeuren de afvoer regelen. In een latere ontwerpfase dient dit accuraat onderzocht te worden. De exacte waarde is op dit moment niet relevant voor het conceptuele ontwerp.

Conditie	Afvoerbereik [m ³ /s]	Status	Aantal draaiende vijzelturbines [-]	Nauwkeurigheid afvoerregulatie [m ³ /s]
Verliezen	$0 \leq Q \leq 4$	Debiet door vispassage	Geen	n.v.t.
	$4 \leq Q \leq 6$	Lekverlies	Geen	n.v.t.
Laagwater	$6 \leq Q \leq 14$	1 ^{ste} turbine wordt ingeschakeld	1	1
	$14 \leq Q \leq 22$	2 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	2	1
	$22 \leq Q \leq 30$	3 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	3	1
	$30 \leq Q \leq 38$	4 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	4	1
	$38 \leq Q \leq 46$	5 ^{de} turbine wordt ingeschakeld	5	1
Normale afvoer	$46 \leq Q \leq 1800$	Alle vijzelturbines operationeel en hefdeuren regelen afvoer	5	5 a 10 ^{*1}
Hoogwater	$Q > 1800$	Stuw is gestreken alle vijzelturbines zijn uitgeschakeld	Geen	n.v.t.

Bijlage A.4 - Beschrijving van de invoerdata voor de bepaling van het aantal vollasturen (stap 1.3):

In de huidige analyse wordt gebruik gemaakt van het door RHDHV aangeleverde data bestand. De data van Royal HaskoningDHV is afkomstig van het waterinfo portaal voor de periode 1 Januari 2000 t/m 1 Januari 2019. De volgende gegevens zijn per dag opgehaald:

- De afvoer bij Venlo
- Waterstand bij Venlo
- De waterstand bij Grave bovenstrooms
- De waterstand bij Grave benedenstrooms.

Een gedeelte van de data is weergegeven in Figuur A.2.

Datum	Tijd	Afvoer venlo (m ³ /s)	Waterstand venlo (cm)	Waterstand Grave boven (cm)	Waterstand Grave beneden (cm)	Verval Grave (cm)
1-1-2000	0:00	899,0	1526,0	857,0	818,0	20,0
2-1-2000	0:00	899,0	1367,0	749,0	619,0	21,0
3-1-2000	0:00	707,6	1284,0	745,0	599,0	23,0
4-1-2000	0:00	472,8	1181,0	764,0	528,0	23,0
5-1-2000	0:00	399,5	1139,0	763,0	509,0	24,0
6-1-2000	0:00	133,9	1102,0	769,0	495,0	28,0
7-1-2000	0:00	110,9	1097,0	771,0	493,0	31,0
8-1-2000	0:00	295,7	1185,0	757,0	528,0	31,0
9-1-2000	0:00	88,0	1104,0	771,0	493,0	32,0
10-1-2000	0:00	91,4	1096,0	775,0	489,0	33,0
11-1-2000	0:00	219,2	1128,0	766,0	503,0	33,4
12-1-2000	0:00	609,5	1268,0	741,0	578,0	34,0
13-1-2000	0:00	605,8	1257,1	739,0	560,4	34,0
14-1-2000	0:00	633,5	1267,8	741,6	570,3	34,0
15-1-2000	0:00	661,1	1278,6	744,1	580,3	34,0
16-1-2000	0:00	688,8	1289,3	746,6	590,2	35,0
17-1-2000	0:00	716,4	1300,0	749,1	600,1	36,0
18-1-2000	0:00	744,1	1310,8	751,7	610,0	36,0

Figuur A.2: Een deel van het databestand dat gebruikt is voor het pythonscript om de energieopbrengst te bepalen.

Voor elk datapunt kan aan de hand van het operationeel plan worden bepaald hoeveel vijzelturbines hadden kunnen draaien. Op basis hiervan kan uiteindelijk de voorkomstfrequentie per operationele situatie worden bepaald. Met deze waarden kunnen vervolgens het aantal vollasturen van de situaties in een gemiddeld jaar worden berekend, vergelijking A.3.

Bijlage A.5 - Bepaling van het vermogen (stap 2):

De tweede stap om de totale energieopbrengst in een jaar te bepalen met vergelijking A.2 is het vaststellen van het vermogen van de vijzelturbines.

In de fase waarin dit onderzoek zich bevind kan het vermogen op drie manieren worden bepaald. Deze methode hebben lopen uiteen wat betreft de nauwkeurigheid, complexiteit en de berekeningssnelheid.

- Optie 1: Het aannemen van waarde voor het vermogen op basis van literatuur onderzoek.
- Optie 2: Het vaststellen van een ontwerpvermogen op basis van een data-analyse.
- Optie 3: Het vermogen laten variëren afhankelijk van het aanwezige verval.

Alle drie de opties worden uitgewerkt. Achteraf zal worden geconcludeerd welke optie verder wordt gebruikt in dit onderzoek.

Optie 1 - Het aannemen van waarde voor het vermogen op basis van literatuur onderzoek:

De eerste optie is het vaststellen van een waarde voor het vermogen op basis van een literatuuronderzoek. Hierbij wordt gebruik gemaakt van referentieprojecten en informatie van de leverancier van de vijzelturbines.

Een onderzoek van Royal HaskoningDHV (Van Heereveld et al., 2020) maakt gebruik van vergelijkbare vijzelturbines als in deze studie. Dit maakt het referentieproject representatief voor het bepalen van het

vermogen. Naast het gebruik van dezelfde vijzelturbines is dit project representatief aangezien het betrekking heeft op hetzelfde riviersysteem. In deze thesis wordt aangenomen dat de condities van de toekomstige stuw niet veranderen ten opzichte van de oude; een vergelijkbaar operationele plan blijft actief. Dit rechtvaardigt het gebruik van het vermogen uit het referentieproject.

Het onderzoek van Royal HaskoningDHV neemt op basis van informatie van de leverancier een ontwerpvermogen (P) van 200 kW aan. Er wordt in het rapport echter wel opgemerkt dat de uiteindelijke elektriciteitsopbrengst zal volgen uit het detailontwerp en dat de genoemde getallen slechts achtergrondinformatie zijn.

Optie 2 en 3 hebben een hoger detailniveau en worden daarom mogelijk als betere opties beschouwd.

Opties 2 – Het vaststellen van een ontwerpvermogen op basis van een data-analyse:

Een tweede manier om het ontwerpvermogen vast te stellen is door gebruik te maken van vergelijking A.4 in combinatie met een data-analyse. Uit de data-analyse volgen waarden voor de invoerparameters om het vermogen te bepalen.

Het vermogen kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \quad (\text{vgl. A.4})$$

Waarin:

$$\eta = \text{rendement} \approx 0.7 [-]$$

$$\rho = \text{dichtheid} = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$g = \text{valversnelling} = 9.81 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$h = \text{verval} [\text{m}]$$

$$Q = \text{afvoer door een turbine} = 8 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ per turbine} \right]$$

De meeste parameters hebben een constante waarde. Het rendement van een vijzelturbine ligt tussen de 70 en 80 procent (Van Den Noortgaete et al., 2016). Voor de huidige berekening wordt een conservatieve aanname gebruikt, gebaseerd op een studie van Royal HaskoningDHV (Van de Visch & Van Heereveld, 2015) naar de initiële haalbaarheid WKC Junne en Marienberg, waarin vergelijkbare vijzelturbines worden gebruikt. Hierin wordt aangenomen dat het rendement 70% bedraagt. De resterende onbekende voor de berekening van het vermogen is het verval.

Volgens de volgende vuistregel kan het ontwerpvermogen worden bepaald door: het gemiddelde van het maximale vermogen en het gemiddelde vermogen te nemen (Van de Visch & Van Heereveld, 2015). Het maximale en gemiddelde vermogen moeten worden bepaald door het gemiddelde en maximale beschikbare verval in vergelijking A.4 in te vullen. Beide karakteristieke vervallen, het maximale en gemiddeld, worden bepaald door een data-analyse van de gegeven invoerdata, bijlage A.3.

Het gemiddelde verval dat is bepaald met een data-analyse is 230 cm. Invullen van vergelijking A.4 geeft een gemiddeld vermogen van 126 kW. Het maximale verval dat aanwezig is in de data bedraagt 323 cm. Invulling van deze waarde in vergelijking A.4 resulteert in een vermogen van 177 kW. Het gemiddelde van deze twee waarden is het ontwerpvermogen, namelijk 152 kW.

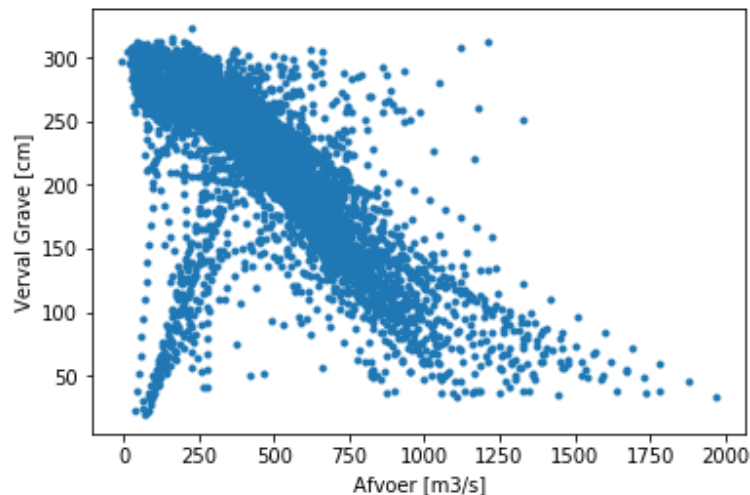
Optie 3 – Het vermogen laten variëren afhankelijk van het aanwezige verval:

Deze berekening van het vermogen met optie 2 kan verfijnd worden. In vergelijking A.4 is zichtbaar dat het vermogen afhankelijk is van het verval. Het verval van de stuw is echter niet constant in de tijd.

Mogelijk kan er een relatie worden gevonden tussen het debiet en het verval. Regelmatig neemt het verval geleidelijk af naarmate de afvoer toeneemt. Dit zou betekenen dat de vijzelturbines meer energie opwekken onder lage afvoercondities. Als er een duidelijke relatie aanwezig is, kan het detailniveau van de energieopbrengst-berekening worden verhoogd door het vermogen te variëren afhankelijk van de operationele situatie.

Wanneer een concrete relatie tussen het verval en het debiet aanwezig is, wordt het aangeraden om het vermogen aan deze relatie te koppelen. Hierdoor kan de inschatting van de energieopbrengst nog accurater worden. Een dergelijke relatie kan eenvoudig in de berekening worden opgenomen, aangezien de energieopbrengst wordt berekend met behulp van een pythonscript.

Figuur A.3 geeft de grafiek van deze relatie weer. Uit deze grafiek blijkt dat er geen significante relatie tussen de afvoer en het verval bij Grave is. Deze afwezigheid van een relatie wordt bevestigd door de bewering in het rapport van Royal HaskoningDHV (Van Heereveld et al., 2020) dat er geen relatie is, mede doordat er regelmatig wordt gewerkt met een constant peil.



Figuur A.3: afvoer data Grave, grafiek met op de x-as het debiet en op de y-as het verval over de stuw bij Grave.

Conclusie:

De verwachte relatie tussen het debiet en het verval is niet significant, waardoor deze niet kan worden gebruikt voor het schatten van het vermogen in verschillende operationele fases. Er wordt gekozen om verder te werken met optie 2 aangezien dit het beste aansluit bij de gewenste nauwkeurigheid en de berekening niet onnodig complex maakt. In dit rapport wordt daarom verder gewerkt met een constant vermogen van 152 kW voor elke vijzelturbine. Deze benadering is redelijk conservatief, in vergelijking met de 200 kW uit optie 1, en kan gunstig uitvallen voor investeerders.

Bijlage A.6 - Laatste stap in het bepalen van de energieopbrengst (stap 3)

Nu een waarde voor het vermogen en de vollasturen per operationele fase bekend zijn kan met vergelijking A.2 de totale energieopbrengst in een jaar berekend worden.

Bijlage B – Structuur van het financieel model

In deze bijlage wordt de methode achter het financieel model beschreven. Dit is nodig voor fase 5 van de aanpak (hoofdstuk 7). Op basis van het financieel model wordt uiteindelijk bepaald welke variant op een ontwerpconcept economisch optimaal is; hoeveel vijzelturbines voor een ontwerpconcept economisch optimaal is.

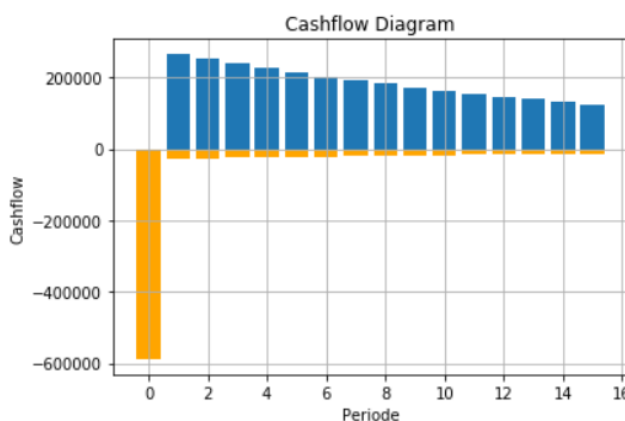
Bijlage B.1 – Algemene beschrijving van het model:

In het huidige model worden twee belangrijke aspecten berekend om de varianten per ontwerpconcept te evalueren: de netto contante waarde van de winst en het project rendement. Beide aspecten worden berekend op basis van geldstroomdiagram (in het Engels: cash flow diagram).

De eerste stap is dus het opstellen van een geldstroomdiagram. Een voorbeeld van een dergelijk geldstroomschema wordt weergegeven in Figuur B.1, dit betreft een willekeurig voorbeeld van een businesscase van een van de varianten. Dit geldstroomdiagram is opgebouwd uit de volgende componenten:

- De financiële opbrengst (boven de nullijn; opbrengst).
- De investeringskosten (onder de nullijn; kosten).
Dit wordt berekend door de globale kostenraming van elk ontwerpconcept.
- De operationele kosten (onder de nullijn; kosten).
De operationele kosten worden als percentage van de investeringskosten betrokken. Jaarlijks wordt 5% van de investeringskosten in rekening gebracht als operationele kosten. Voor de huidige ontwerpfase, een conceptueel ontwerp, volstaat een benadering van deze kosten door een percentage van de investeringskosten te nemen. In het rapport “Duurzame energie locatie Panheel” (Pronk et al., 2017) wordt beschreven dat verwacht mag worden dat de onderhoudskosten in de orde van 5 procent van de investeringskosten zullen liggen. Er wordt aangenomen dat dit percentage onafhankelijk is van het aantal vijzelturbines.

Van zowel de kosten als de opbrengst moet de netto contante waarde (in het Engels: Net Present Value) worden berekend. Deze worden vervolgens in de geldstroomdiagram tegen elkaar uitgezet. De periode van het geldstroom diagram betreft de terugverdientijd van het project. Het doel dat geformuleerd is voor de casestudie bij Grave is dat de investerende partij binnen 15 jaar haar investering plus en het gewenste project rendement terugverdient wilt hebben. Daarna kan de waterkrachtcentrale verkocht worden of vervangen worden voor een verbeterde techniek. Dit is een realistische aanname gebaseerd op een vergelijkbaar project, het waterkrachtcentraleproject dat beschreven staat in het rapport “Duurzame energie locatie Panheel” (Pronk et al., 2017).



Figuur B.1: Voorbeeld van een geldstroomdiagram, een willekeurig voorbeeld van een businesscase van een ontwerpvariant.

Een pythonscript is opgesteld voor het genereren van geldstroomdiagram. Door middel van dit pythonscript worden op basis van het geldstroomdiagram tevens de netto contante waarde van de winst en het project rendement berekend. De invoerparameters voor dit script zijn:

- Het ontwerpconcept;
- Het aantal vijzelturbines (hiermee wordt automatisch de energieopbrengst in een jaar berekend en de investeringskosten);
- Het scenario voor de elektriciteitsprijs.

Enkele aspecten worden in de rest van deze bijlage nader toegelicht. Met name de verschillende scenario's voor de elektriciteitsprijs vereisen uitleg.

Bijlage B.2 – Berekening van de financiële jaaropbrengst (stap 1):

De financiële jaaropbrengst (S) wordt berekend op basis van de energieopbrengst van een jaar. De methode om de energieopbrengst in jaar te bereken wordt beschreven in Bijlage A. De financiële jaaropbrengst wordt vervolgens berekend met de volgende vergelijking:

$$S = f_{\text{elektriciteit}} \cdot E_i \quad (\text{vgl. B.1})$$

Waarin:

$$S = \text{financiële jaaropbrengst} \left[\frac{\text{EUR}}{\text{jaar}} \right]$$

$$f_{\text{elektriciteit}} = \text{Elektriciteitsprijs} \left[\frac{\text{EUR}}{\text{MWh}} \right]$$

$$E = \text{Gemiddelde energieopbrengst in een jaar} \left[\frac{\text{MWh}}{\text{jaar}} \right]$$

Zoals in de hoofdttekst beschreven, moet de financiële opbrengst worden bepaald voor verschillende elektriciteitsprijzen. De volgende stap is het bepalen van de elektriciteitsprijs waarmee de netto contante waarde van de winst en het project rendement berekend moeten worden.

Bijlage B.3 – Bepaling van de scenario's voor de elektriciteitsprijs (stap 1.1):

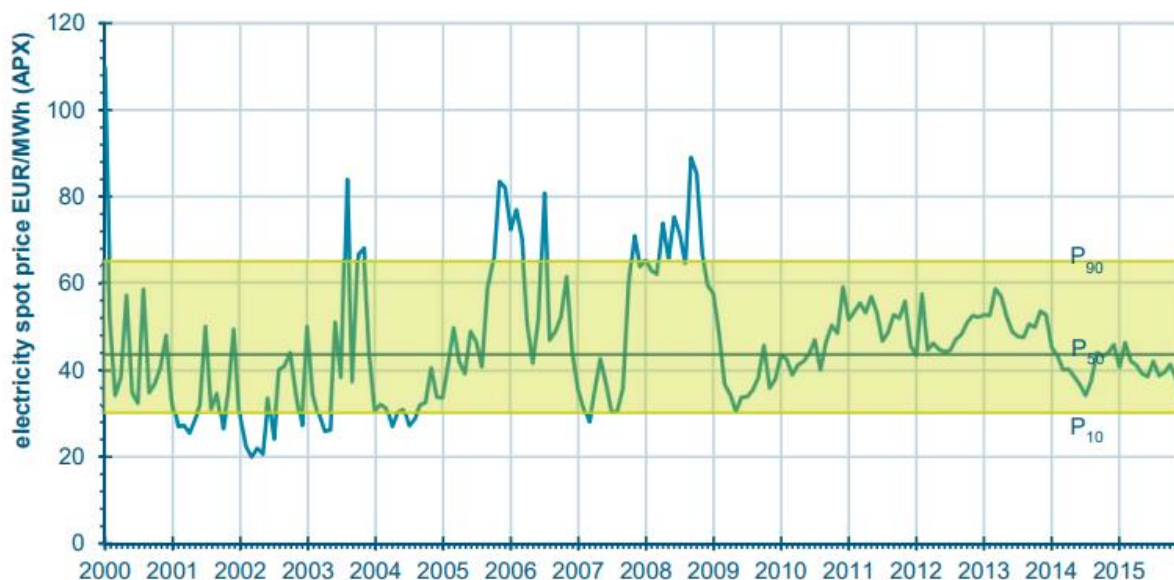
De bovenstaande berekening wordt uitgevoerd met verschillende scenario's voor de elektriciteitsprijsontwikkeling. Naast de prijsontwikkeling zijn ook verschillende scenario's aangehouden voor subsidies. De reden om verschillende scenario's aan te houden is om te onderzoeken binnen welke condities en scenario's een haalbare business case te realiseren valt.

De analyse waarmee de elektriciteitsprijs voor verschillende scenario's worden bepaald bestaat uit drie delen. In het eerste deel wordt data analyse van de APX spot markt voor elektriciteitsprijzen uitgevoerd om een representatieve prijs voor elektriciteit vast te stellen. Vervolgens worden in deel 2, potentiële subsidies en de invloed hiervan op de prijs onderzocht. Bedrijven die duurzame energie produceren kunnen op dit moment gebruik maken van de subsidieregeling SDE++, oftewel Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023). Dit is van toepassing op dit project, en wordt dus meegenomen in de berekening van de financiële opbrengst. Uiteindelijk worden in deel 3 de analyses gebruikt om voor vier scenario's voor de elektriciteitsprijs op te stellen.

Deel 1 – Data analyse om de elektriciteitsprijs zonder subsidies te bepalen:

Energieprijzen fluctueren over de tijd. De APX is de spot markt waar elektriciteit wordt verhandeld voor een groot aantal landen in Europa. Vrijwel iedere leverancier van elektriciteit koopt in op deze beurs. Figuur B.2 toont een grafiek voor de periode 2000 – 2015 de maandelijkse gemiddelde waarde van de

elektriciteitsprijzen (exclusief BTW en belastingen). De grafiek is afkomstig uit het volgende rapport 'Duurzame energie locatie Panheel' (Pronk et al., 2017).



Figuur B.2: APX maandelijks gemiddelde spotprijzen elektriciteit 2000 – 2015. Afkomstig van: Pronk et al. (2017).

In de bovenstaande grafiek is zichtbaar dat de elektriciteitsprijs sinds de economische crisis van 2008 gedaald is. Daarnaast is te zien dat er aannemelijk minder uitschieters (anomalie) aanwezig zijn na deze crisis. In het rapport 'Duurzame energie locatie Panheel' (Pronk et al., 2017) worden drie percentiele (P10, P50 en P90) bepaald om de elektriciteitsprijs in te schatten. Op deze manier kunnen drie scenario's worden vastgesteld. In het eerste scenario gaat de elektriciteitsprijs naar het laagste percentiel toe. Het tweede scenario is een gemiddeld scenario. En in het derde scenario, scenario hoog, ontwikkelt de elektriciteitsprijs zich naar het 90^{ste} percentiel van de data. In het rapport wordt ook Tabel B.1 gepresenteerd. Hierin is onderscheid gemaakt tussen de percentiele berekend over de gehele periode (van 2000 – 2015) en zijn ze berekend voor een gereduceerde periode die alleen data punten na 2008 meenemen. Dit is gedaan om de representativiteit van de waarden in te schatten.

Tabel B.1: Percentielen APX prijzen van 2000 – 2015 ten opzichte van de periode 2008 – 2015 in EUR/MWh. Afkomstig van: Pronk et al. (2017) (aangepast).

Percentiel	APX prijs [EUR/MWh]		Verschil
	2000 - 2015	2008 - 2016	
Max (P ₁₀₀)	109,68	59,01	-46%
P₉₀ (hoog)	64,81	53,46	-18%
P₅₀ (gemiddeld)	43,69	45,09	+3%
P₁₀ (laag)	30,49	36,86	+21%
Min (P ₀)	19,99	30,74	+54%

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** B.1 is te zien dat het gemiddelde weinig is veranderd sinds de crisis. Daarentegen is de bandbreedte wel significant afgenomen. Op basis van deze data is geconcludeerd dat de elektriciteitsprijzen op de korte en middellange termijn niet in belangrijke maten

gaan stijgen. Als deze data, welke van een tijd terug zijn, representatief zijn voor de huidige tijd dan kan in dit rapport worden gewerkt met de gemiddelde prijs. Dit blijkt echter niet het geval te zijn.

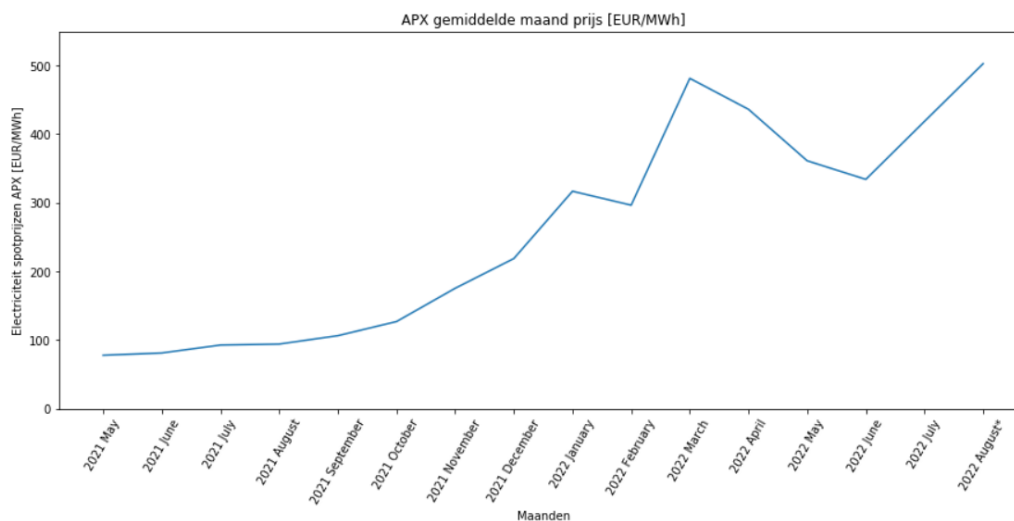
De lengte van de geanalyseerde periode (2008-2015) is in principe lang genoeg om een representatieve waarde te vinden. De vraag is echter of de data actueel genoeg is. Na 2015 zijn er namelijk nog verschillende gebeurtenissen geweest die de elektriciteitsprijs significant hebben beïnvloed. Denk hierbij aan het feit dat Nederland gestopt is met het opwekken van aardgas in Groningen. Verder neemt de vraag naar elektriciteit steeds meer toe doordat steeds vaker uitgeweken wordt naar een alternatief voor fossiele brandstoffen. Een voorbeeld hiervan is dat steeds meer auto's elektrisch worden. Daarnaast, is recentelijk de elektriciteitsprijs aan het stijgen ten gevolge van het feit dat Rusland de gaskraan dicht heeft gedraaid in verband met de invasie in Oekraïne. Het dichtdraaien heeft tevens een invloed gehad op de elektriciteitsprijs. De volgende stap is het analyseren van de impact van deze gebeurtenissen. Hiervoor is recentere data van de APX markt gebruikt, een grafiek van deze data wordt getoond in Figuur B.3 (EnergieMarktInformatie.nl, 2022). Figuur B.3 toont de grafiek van de dag vooruit spotprijzen voor de periode van 2015 – 2022.



Figuur B.3: APX dag vooruit spotprijzen elektriciteit 2015-2022. Afkomstig van EnergieMarktInformatie.nl (2022)

In de bovenstaande grafiek is zichtbaar dat de elektriciteitsprijs tussen 2015 en maart 2021 constant is. De waarde gedurende deze periode ligt rond de 40 EUR/MWh. Voor deze periode is de referentie waarde (gemiddelde waarde: 45,09) uit het rapport 'Duurzame energie locatie Panheel' (Pronk et al., 2017) nog een representatieve waarde. Echter verandert de trend na maart 2021 significant. Hierna begint de elektriciteitsprijs hevig te stijgen. De vermoedelijke oorzaak van deze stijging van de energierekening komt met name door hogere leveringstarieven van gas (Centraal Bureau voor de Statistiek *1, 2022). Tussen januari 2021 en januari 2022 komt de stijging van de elektriciteitsprijs zelfs neer op een stijging van 275 procent.

Vanaf Februari 2022 is een nieuwe trend zichtbaar. In deze maand begint de Russische invasie in Oekraïne. Als gevolg hiervan wordt de gaskraan vanuit Rusland dicht gedraaid. De invloed hiervan wordt inzichtelijk gemaakt in Figuur B.4. Hiervoor wordt de gemiddelde maandprijs gebruikt. Een data analyse gericht op de periode Mei 2021 – Augustus 2022 is uitgevoerd om dit verder te onderzoeken. De data hiervoor is afkomstig van het Centraal Bureau voor de Statistiek (*2, 2022).



Figuur B.4: Grafiek van de gemiddelde maandprijs van de elektriciteit sportprijzen voor een periode van April 2021 t/m Augustus 2022. Centraal Bureau voor de Statistiek (*2, 2022).

In Figuur B.4 is zichtbaar dat na januari 2022 de elektriciteitsprijzen nog verder toenemen; het stijgt naar een record hoogte. De toename ten opzicht van de periode 2015-2020 is ongeveer 1000 procent. De elektriciteitsprijs is vooral gestegen omdat die gedeeltelijk gekoppeld is aan de gas prijs. Hierdoor profiteren de energiemaatschappijen die duurzame energie opwekken mee (Koster, 2022). In dit project gaat het ook om duurzame energie. Het is de verwachting dat de EU en Nederland hier iets aan gaan doen in de vorm van een maximale winstmarge. Het is de verwachting dat dit de elektriciteitsprijs in de toekomst juist weer reduceert. Op het moment van schrijven is hier echter geen uitspraak over te doen. Op dit moment wordt aangenomen dat de waardes uit het rapport 'Duurzame energie locatie Panheel', tabel C.1, niet langer representatief zijn aangezien sinds 2015 de prijs met ongeveer 1000 procent is toegenomen.

De uiteindelijke conclusie voor dit onderzoek is dat de toekomstige elektriciteitsprijs lastig vast te stellen is. De prijs fluctueert hevig en is afhankelijk van gebeurtenissen in de tijd, zoals crises. Het is bijna een gegeven dat economische crises terug keren. Hierdoor is de verwachting dat de elektriciteitsprijs in de toekomst blijven fluctueren. In dit rapport is daarom rekening gehouden met twee scenario's. Dit zijn de volgende twee scenario's:

- Scenario 1:
Het eerste scenario is gebaseerd op de relatief constante elektriciteitsprijs tussen de twee crises in. In dit scenario is de verwachting dat de elektriciteitsprijs weer terug gaat naar het constante niveau. Dit is verwachting op basis van de marktwerking, welke bewezen heeft dat het voor een langere tijd, periode 2008 – 2015, deze prijs kan garanderen. Of dit komt door het ingrijpen van de overheid aan de hand van een prijsplafond of subsidies. Voor dit scenario worden de waardes afkomstig uit de data analyse van het rapport 'Duurzame energie locatie Panheel' gebruikt. Er is gekozen om met de gemiddelde waarde verder te werken. De periode tussen 2015 en 2020 heeft aangetoond dat dit een correcte representatie was. In scenario 1 is de elektriciteitsprijs daarom vastgesteld op 45,09 EUR/MWh.
- Scenario 2:
In het tweede scenario is rekening gehouden met een blijvende onzekere toekomst. Een toekomst voorspelling is lastig te geven aangezien de prijs ernstig afhankelijk is van crises. De prijs wordt dus beïnvloed door niet te voorspellen externe factoren. Om rekening te houden met dit scenario is er gekozen om de opbrengsten uit waterkracht tevens door te rekenen wanneer de energieprijzen blijvend hoog is gedurende de terugverdientijd, de komende 15 jaar. Dit is tevens een

waarschijnlijk scenario en belangrijk voor de investeerder om te weten aangezien dit tot andere investeringsbeslissingen kan leiden. Uiteindelijk is het aan de derde partij die de waterkrachtcentrale wilt exploiteren om hiervoor een risico afweging over te maken. Om dit scenario vorm te geven is er gekozen om een factor van 2,5 over de constante prijs te doen. Dit komt neer op een elektriciteitsprijs van 112,7 EUR/MWh.

In dit rapport wordt dus gerekend met twee scenario's. Het doel hiervan is om duidelijk te maken wat de invloed van de elektriciteitsprijs is op het genereren van een rendabele business case. Wat hiermee vervolgens gedaan wordt is aan de investeerder. Het ene ontwerpalternatief is mogelijk alleen rendabel met hoge energieprijzen terwijl de ander in beide situaties rendabel is. In dit rapport wordt een indicatie voor elke variant gegeven. Wanneer het investeringsvoorstel uiteindelijk beoordeeld wordt dient een uitvoerigere analyse uitgevoerd te worden. Het advies is om dan meerdere toekomst voorspellingen mee te nemen, de kans hierop te bepalen en iemand met specialistische kennis van de elektriciteit markt dit te laten onderzoeken. Er zal altijd een risico voor de investeerder zijn omdat een accurate toekomst voorspelling lastig te doen is, zoals ook uit bovenstaande analyse blijkt. Uiteindelijk is er gekozen om met een redelijke conservatieve, met name ten opzichte de ontwikkelingen na de Russische invasie in Oekraïne, te werken.

Deel 2 – Bepalen van de subsidies:

Bedrijven die duurzame energie produceren kunnen op dit moment gebruik maken van subsidieregeling SDE++ (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023). In dit rapport is nog gebruik gemaakt van de oude subsidie aanvraag SDE+ (2016). Dit wordt gedaan gebaseerd op basis van het rapport 'Duurzame energie locatie Panheel' (Pronk et al., 2017). In dit rapport is een subsidie aanvraag voor een waterkracht centrale bij locatie Panheel uitgezocht. Dit document wordt als leidend beschouwt voor de bepaling van de subsidie voor dit project. In een vervolg studie dient de nieuwste subsidie aanvraag (SDE++) worden gebruikt.

Met de subsidie stimuleert het ministerie van Economische Zaken de ontwikkeling van duurzame energievoorzieningen in Nederland. Hiermee zorgen ze dat de energietransitie in Nederland haalbaar en betaalbaar blijft.

De subsidie regeling heeft meerdere openstellingrondes. Hoe later in het jaar de subsidie aanvraag wordt ingediend des te hoger is de bijdrage. Echter is het geval dat het beschikbare budget over de tijd daalt waardoor het risico bestaat dat er weliswaar een hogere bijdrage per MWh wordt gerealiseerd maar dat het totaal uitgekeerde bedrag uiteindelijk lager uitvalt. In de subsidie regeling wordt verder onderscheid gemaakt tussen verschillende categorie energie. Het huidige onderzoek is louter gericht op het waterkracht gedeelte. In Figuur B.5 wordt een tabel weergegeven waarin de subsidie bedragen voor het project bij Panheel bepaald zijn. Let op, er is onderscheid gemaakt tussen een waterkrachtcentrale met een laag ($\Delta h < 0,50$) en hoog ($\Delta h > 0,50$) verval.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Basisprijs	Voorlopig correctiebedrag	Bijdrage SDE+ o.b.v. fase 1	Bijdrage SDE+ o.b.v. fase 4	Max vollasturen per jaar	Max looptijd subsidie (jaren)
WKC verval > 0,5 m	90	110	130	150	39	42	48	108	5.700	15
WKC verval < 0,5 m	90	110	130	150	39	42	48	108	3.700	15

Figuur B.5: SDE+ regeling 2016 naar hernieuwbare energiebron (bedragen in EUR/MWh). Afkomstig van Pronk et al. (2017)

Het subsidie bedrag voor waterkracht is relatief hoog. Dit heeft onder andere te maken met de moeilijkheidsgraad voor een toereikende business case. Waterkracht is van nature lastiger te realiseren in Nederland dan wind energie.

Wat betekenen de subsidies concreet voor de businesscase in dit onderzoek. In de waardes weergegeven in Figuur B.5 is een correctie opgenomen. Dit is voor het project van het huidige onderzoek niet van toepassing. De correctie dient van de bedragen afgehaald te worden. Dit resulteert in de subsidiebedragen zoals weergegeven in Tabel B.2.

Tabel B.2: relevante bedragen van de SDE+ regeling voor het project in deze thesis.

Fase SDE+ regeling [-]	SDE bijdrage [EUR/MWh]
Fase 1	48,00
Fase 2	68,00
Fase 3	88,00
Fase 4	108,00

Conclusie: In dit rapport wordt gewerkt met twee situaties. Het in acht nemen van al deze verschillende fases valt buiten de scope van dit rapport. Het detailniveau is te nauwkeurig aangezien we in een vroege haalbaarheidsstudie zitten; de subsidies worden nog lang niet aangevraagd. Bovendien is de keuze voor het aanvragen van de specifieke subsidie aan de investeerder. Daarnaast is de subsidie aanvraag vernieuwd waardoor de getoonde waardes niet meer volledig correct zijn en louter gezien kunnen worden als een indicatie. Het aanhouden van vier fases maakt het onnodig ingewikkeld om de doelstelling van deze thesis te bereiken.

De volgende stap is het bepalen van de situatie(s) die dan wel meegenomen moeten worden in het financieel model. Voor dit onderzoek gekozen om te werken met twee situaties: een situatie waarin één waarde voor de subsidie wordt meegenomen en een situatie waarin geen subsidie wordt meegenomen. De laatste wordt de zogeheten nul benadering genoemd. Uiteindelijk maakt het toepassen van subsidie het investeringsvoorstel corrupt. Er dient namelijk ook onderzocht te worden of er een rendabele business case te bereiken is zonder subsidies. In andere landen krijgt men mogelijk geen subsidie of is deze niet beschikbaar. Verder is er nog een kans dat de subsidies worden afgeschaft in de komende jaren. In dat geval is het relevant om te onderzoeken of er ook een rendabele businesscase gerealiseerd kan worden. Idealiter is de businesscase zonder subsidie al haalbaar. Het doel van dit rapport is namelijk breder dan de casestudie.

De tweede situatie is er waarin subsidie is betrokken. Het is de verwachting dat op de korte en middellange termijn een subsidie nog steeds nodig is. Daarnaast wordt voor deze studie aangenomen dat de hierboven beschreven subsidie regeling in die vorm gehandhaafd blijft. In eerste instantie wordt het gemiddelde subsidie bedrag van de vier fases genomen als basis waarde voor dit onderzoek gebruikt. Dit bedraagt 78,00 EUR/MWh. Vervolgens is hier een kleine additionele factor overheen gegooid. De reden hiervoor is dat waterkracht een additioneel voordeel heeft ten opzichte van andere duurzame energie bronnen zoals zonnen- en windenergie. Dit is het leveringsvoordeel wat waterkrachtenergie heeft ten opzichte van andere duurzame energiebronnen zoals zonne- en windenergie. Waterkrachtenergie kan geleverd worden op “gunstige” momenten. Mits er water aanbod is kan er namelijk permanent energie worden geleverd. Dus hiermee kan gunstig gestuurd worden op piek momenten in de afname van energie of momenten dat de andere energie bronnen een te kort hebben. Andere duurzame energiebronnen zijn

namelijk afhankelijk van de condities, bijvoorbeeld weersomstandigheden. Er is gekozen om over het gemiddelde subsidie bedrag een factor van 1,25 te gooien. Hierdoor komt de subsidie uit op 97,5 EUR/MWh. Voor de businesscase waarin subsidies voor duurzame energie terugkomen wordt dus een extra waarde aan de opgewekte elektriciteit toegekend van 97,5 EUR/MWh.

Deel 3 – Presentatie van de scenario's voor de elektriciteitsprijs:

Samenvattend is in dit onderzoek rekening gehouden met vier scenario's. Dit zijn de volgende cases:

- Case 1: Hierin is aangenomen dat prijs weer terug gaat naar de constante prijs van tussen 2008 en 2015. Verder is er geen gebruik gemaakt van de subsidies
[Gemiddelde prijs, geen subsidie]
- Case 2: Hierin is de verwachting dat de energieprijzen gedurende de terugverdienperiode hoog blijven. Verder is er geen gebruik gemaakt van de subsidies.
[Hoge prijsontwikkeling, geen subsidie]
- Case 3: Hierin is aangenomen dat prijs weer terug gaat naar de constante prijs van tussen 2008 en 2015. Verder is gebruik gemaakt van de subsidies
[Gemiddelde prijs, wel subsidie]
- Case 4: Hierin is de verwachting dat de energieprijzen gedurende de terugverdienperiode hoog blijven. Verder is er geen gebruik gemaakt van de subsidies.
[Hoge prijsontwikkeling, wel subsidie]

Dit leidt tot de volgende bedragen behorend per case:

Tabel B.3: Overzicht van de scenario's voor de elektriciteitsprijs die worden gebruikt in het financieel model, met daarin aangegeven waaruit deze prijs is opgebouwd.

Case nummer	Prijsontwikkeling	APX in EUR/MWh	Subsidie?	Subsidie bedrag [EUR/MWh]	Totaal [EUR/MWh]
1	Scenario 1 – constante prijs	45,09	Geen	0,0	45,09
2	Scenario 2 – toenemende prijs	112,72	Geen	0,0	112,72
3	Scenario 1 – constante prijs	45,09	Wel	97,5	142,59
4	Scenario 2 – toenemende prijs	112,72	Wel	97,5	210,22

De kanttekening die bij bovenstaande tabel en analyses gemaakt moet worden is dat de prijsontwikkeling van fossiele brandstoffen is ook relevant voor de prijs van elektriciteit. Bij lage prijzen is er weinig stimulans voor het ontwikkelen van duurzame energie. Immers de concurrentiekracht is dan beperkt. Bij toename van prijzen voor fossiele brandstof verandert dit. Duurzame energie kan dan gemakkelijker concurreren met fossiele brandstof. In dat geval is de haalbaarheid minder afhankelijk van de subsidieregeling. In dit rapport is hier nog geen rekening mee gehouden. Hierdoor kan de business case mogelijk nog gunstiger uitvallen dan die berekend worden met het huidige financiële model.

Bijlage B.4 – De netto contante waarde berekening van de geldstromen (stap 2):

Geld op dit moment is meer waard dan in de toekomst. Het is daarom zaak om de financiële opbrengst aan elektriciteit per jaar om te rekenen naar de netto contante waarde op dit moment om een goede investeringsafweging te maken. Naast de financiële opbrengst aan elektriciteit, moet ook de netto contante waarde van de operationele kosten worden berekend.

Met vergelijking B.2 kan van elke geldstroom de netto contante waarde worden berekend:

$$NPV = \frac{\text{financiële jaaropbrengst}}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^t} \quad (\text{vgl. B.2})$$

Waarin:

$$i = \text{discontovoet} = 5,5 \text{ [\%]}$$

$$t_i = \text{jaar van de terugverdientijd}$$

Voor de discontovoet is een realistische aanname gedaan op basis van andere waterkrachtcentrale gerelateerde projecten, namelijk 5,5%.

Bijlage B.5 – Opstellen van het geldstroomdiagram (stap 3):

De volgende stap is het opstellen van het geldstroomdiagram zoals weergegeven in Figuur B.1. Op basis van expert kennis wordt aangenomen dat het waarschijnlijk is dat het doel van de investerende partij is om binnen 15 jaar haar investering terug te verdienen plus het gewenste project rendement. Het geldstroomdiagram wordt daarom opgesteld voor een periode van 15 jaar. De opbrengst van de waterkrachtcentrale na deze periode wordt niet meegenomen in het financiële model. Hierdoor kan de businesscase in de praktijk nog gunstiger uitpakken. Het is echter ook aannemelijk dat de waterkrachtcentrale na 15 jaar wordt verkocht of vervangen voor een verbeterde techniek.

Per scenario voor de elektriciteitsprijs wordt een separaat geldstroomdiagram opgesteld.

De kostencomponenten die opgenomen zijn in het geldstroomdiagram zijn:

- De financiële opbrengst (boven de nullijn; opbrengst).
- De investeringskosten (onder de nullijn; kosten).
- De operationele kosten (onder de nullijn; kosten).

Zoals in bijlage B.4 beschreven moeten deze opbrengst en kosten omgerekend worden naar de netto contante waarde in het geldstroomdiagram. Dit wordt gedaan met vergelijking B.2.

Bijlage B.6 – Berekening van de netto contante waarde van de winst (stap 4):

De vierde stap is het berekenen van de netto contante waarde van de winst op basis van het geldstroomdiagram. Deze waarde wordt gebruikt voor de evaluatie tussen de ontwerpconcepten en voor het kiezen van de optimale variant binnen het ontwerpconcept (hoofdstuk 7).

De netto contante waarde van de winst wordt bepaald door de opbrengsten van elk jaar over de terugverdientijd bij elkaar op te tellen en vervolgens hiervan de investeringskosten en alle operationele kosten af te halen.

Bijlage B.7 – Berekening van het project rendement (stap 5):

De laatste stap is het berekenen van het project rendement. Deze waarde wordt naast de netto contante waarde van de winst gebruikt voor de evaluatie. Deze waarde wordt gebruikt voor de evaluatie tussen de ontwerpconcepten en voor het kiezen van de optimale variant binnen het ontwerpconcept (hoofdstuk 7).

De netto contante waarde van de winst geeft nog niet voldoende informatie of een haalbare business case gerealiseerd wordt. Aangezien een derde partij het project moet gaan exploiteren, is voor het inschatten van de economische haalbaarheid van belang dat een bepaald project rendement wordt behaald, ook wel de financiële doelstelling van de derde partij.

Het project rendement wordt berekend door de netto contante waarde van de volledige opbrengst te delen door alle kosten die worden gemaakt over de terugverdientijd.

Als financiële doelstelling is in dit financiële model gekozen voor een project rendement van 12%. Dit is een redelijk gebruikelijke aanname voor een project rendement dat een commerciële partij zal hanteren als minimale haalbaarheid voor een duurzaam energieproject. "Dit betreft een inschatting die mede afhankelijk is van de moeilijkheidsgraad van het te ontwikkelen project, zowel qua technisch als institutioneel risico". (Pronk et al., 2017)

Het is van belang om op te merken dat op dit moment wordt aangenomen dat een commerciële partij het project gaat exploiteren. Mogelijk veranderd de financiële doelstelling als Rijkswaterstaat het zelf gaat exploiteren of een burgercollectief dit gaat doen. Het kan dan verwacht worden dat de financiële doelstelling dan niet dusdanig scherp wordt gesteld.

Bijlage C - Functionele uitwerking ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)

Deze bijlage heeft betrekking op fase 5 van de aanpak, “Ontwerpen van de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw”, deel 2, de verbeterde ontwerpconcepten (Paragraaf 7.1.2). In deze bijlage wordt de volledige functionele uitwerking van ontwerpconcept A.1 beschreven.

Tot nog toe is alleen een ontwerpconcept ontwikkeld. Er ontbreekt nog een functioneel werkend ontwerp, laat staan een enigszins optimaal ontwerp. Om het ontwerp functioneel te maken moeten nog een aantal afwegingen worden gemaakt. De uitwerking van het concept kan namelijk nogal uiteenlopen. Er zijn verschillende variaties denkbaar voor het verbeterde ontwerpconcept A.1, uitneembare vijzelturbines.

Deze variaties liggen in de aspecten:

- De manieren om de turbines uitneembaar te maken (C.1)
- De hefhoogte (C.2)
- Type bewegingswerk (C.3)
- De locatie van de vijzelturbines (C.4)
- Het aantal vijzelturbines (C.5)

Bijlage C.1 - Keuze in de manier om vijzelturbines uitneembaar te maken

Een separate ontwerplus wordt doorlopen om het subsysteem te ontwerpen dat de vijzelturbines uitneembaar moet maken. Drie manieren worden serieus overwogen om de vijzelturbines uitneembaar te maken:

- Ontwerpalternatief A.1.a – Een verticaal hefsysteem omhoog;
- Ontwerpalternatief A.1.b – Een verticaal hefsysteem omlaag de fundering in;
- Ontwerpalternatief A.1.c – Een horizontaal rolsysteem de uiterwaarde in.

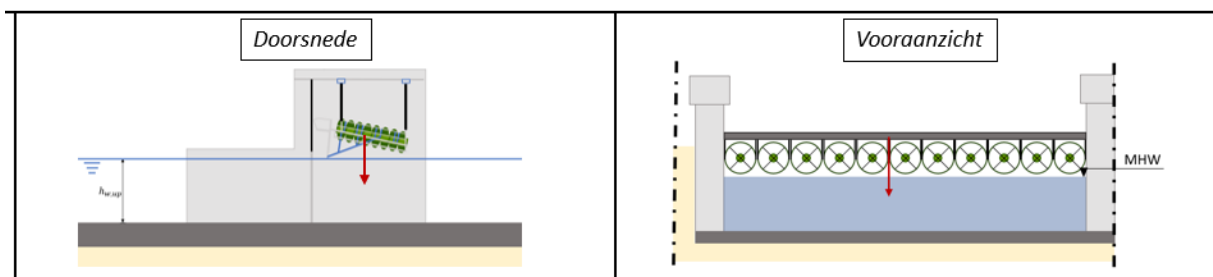
In de huidige ontwerplus worden niet alle eisen geverifieerd. Het uiteindelijk gekozen systeem moet namelijk nog op een hoger niveau worden geverifieerd. Bovendien wordt aangenomen dat er in een gedetailleerde ontwerpfase nog aanpassingen kunnen worden gemaakt om er voor te zorgen dat de ontwerpen alsnog aan de gestelde eisen voldoen.

• Stap 1 - Creëren en verifiëren van de ontwerpalternatieven

In de huidige paragraaf worden de drie ontwerpalternatieven uitgewerkt. Belangrijk om te vermelden is dat het operationeel plan niet verschilt tussen de varianten.

Ontwerpalternatief A.1.a – Een verticaal hefsysteem omhoog

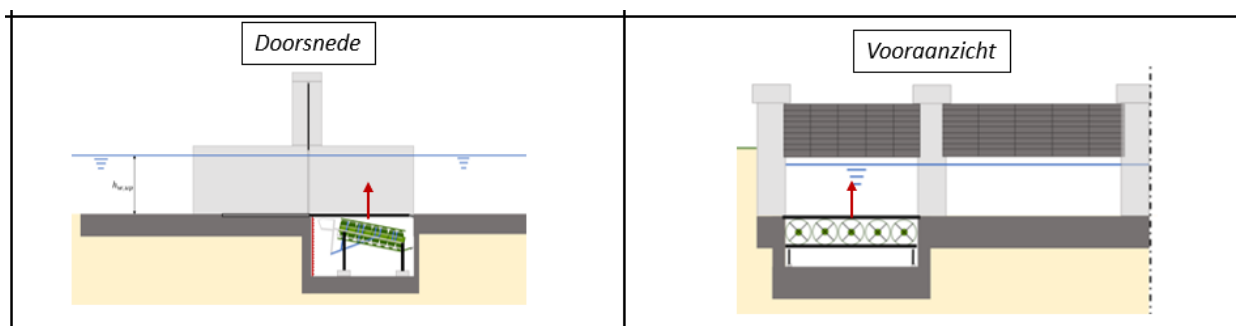
Dit betreft het hefsysteem dat ter conceptvorming wordt gepresenteerd in Figuur C.1. Het concept is dat tijdens hoogwater de vijzelturbines verticaal omhoog worden geheven. Hierdoor is de weerstand op het kritische moment voor opstuwing niet aanwezig in de rivier.



Figuur C.1: Ontwerptekeningen van ontwerpalternatief A.1.a, waarin de vijzelturbines verticaal omhoog uitneembaar zijn.

Ontwerpalternatief A.1.b – verticaal omlaag

Een nadeel van het verticaal omhoog heffen van de vijzelturbines is dat dit ten koste gaat van het omgevingsaanzicht. Een oplossing hiervoor is om de vijzelturbines uitneembaar te maken door ze tijdelijk in een compartiment in de fundering te plaatsen. Figuur C.2 toont een dergelijke oplossing.

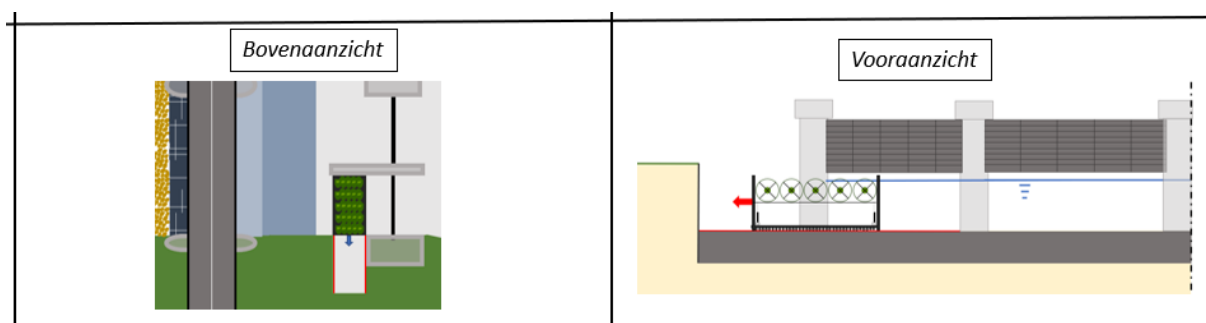


Figuur C.2: Ontwerptekeningen van ontwerpalternatief A.1.b, waarin de vijzelturbines verticaal omlaag uit de waterweg worden genomen.

Bij het huidige ontwerp is het belangrijk om een hoogwaardige waterafdichtingen te realiseren. Dit is met name van belang om droge periodes aan te kunnen en energieverlies te voorkomen. Ook moet er een afsluitingsmechanisme boven de kelder geplaatst worden om de vijzelturbines tijdens hoogwatercondities te beschermen. Deze afsluiting voorkomt schade aan de vijzelturbines ten gevolge van hevige stroming die kan voorkomen tijdens hoogwatercondities. Daarnaast kan deze afdichting mogelijk ook gebruikt worden voor onderhoud. De kelder kan dan worden drooggezet en worden betreden via een steunpunt. Het lijkt echter praktischer om de vijzelturbines voor onderhoud uit de waterweg te halen met een schip en reserve-turbines te gebruiken. Het onderhoud vindt dan plaats op een externe locatie.

Ontwerpalternatief A.1.c – Horizontaal rolsysteem

Een derde variant om de vijzelturbines uitneembaar te maken, is het gebruik van horizontaal rolsysteem. Dit idee is ontstaan als reactie op de problemen van een verticaal hefsysteem omhoog. Een dergelijk systeem vervuult de ruimtelijke kwaliteit namelijk nogal en vormt een obstakel voor het toestaan van scheepvaart over de volledige stuwbreedte. Een mogelijke oplossing voor deze problemen is een horizontaal rolsysteem die de vijzelturbines tijdelijk in de uiterwaarde plaatsen. Hierbij worden alle vijzelturbines op één beweegbaar platform geplaatst, dat als geheel naar de uiterwaarde wordt gerold. Dit vereist een solide bewegingsmechanisme en geleidingswerk. Figuur C.3 toont de variant van het verbeterde ontwerpconcept. Het huidige ontwerp is een eerste schetsontwerp, waarbij het aantal turbines, de configuratie en de afmetingen als initiële aannames dienen voor conceptvorming.



Figuur C.3: Ontwerptekeningen van ontwerpalternatief A.1.b, waarin de vijzelturbines door een horizontaal rolsysteem tijdelijk de uiterwaarde in worden verplaatst.

Bij het huidige ontwerpalternatief is het essentieel om aan beide zijden van het platform een waterdichte afdichting te realiseren om stroming tussen de uiterwaarde en de waterweg te voorkomen. Dit is essentieel voor de waterhuishouding van het riviersysteem. Tevens wordt de locatie in de uiterwaarde hierdoor geschikt gemaakt voor onderhoud.

Het ontwerpalternatief heeft echter ook onmiskenbare nadelen en onzekerheden, zoals de impact op de ecologie en natuur in de uiterwaarde, de relatief hoge kosten van grondverzetten en de uitdaging van het bewegen van het platform in haakse richting op de rivierstroming tijdens hoogwater.

- **Stap 2 – Evaluatie van de sub-alternatieven om de vijzelturbines uitneembaar te maken:**

De volgende stap is het evalueren van de varianten voor het subsysteem.

Opzet van het evaluatieproces:

De optimale variant wordt bepaald door middel van een Multicriteria-analyse. De volgende evaluatiecriteria uit de basis van het ontwerp worden in de Multicriteria-analyse gebruikt:

- Milieu impact
- Beheer & Onderhoud
- Duurzaamheid & circulariteit

- De complexiteit van het construeren
- De mate van hydraulische complexiteit

De evaluatiecriteria zijn gewogen in de Multicriteria-analyse met scores varieert van 0 tot 5. De toekenning van wegen aan de evaluatiecriteria is als volgt:

- **Milieu impact:** Gewicht van 3. Relatief belangrijk, maar niet doorslaggevend. Het is relatief belangrijk omdat verstoring van de ecologie en natuur voorkomen moet worden en de ruimtelijke kwaliteit belangrijk gevonden wordt. Het is niet doorslaggevend vanwege de concessies die al onoverkomelijk zijn door de gekozen locatie en het ontwerp van de basisstuw;
- **Beheer & onderhoud:** Gewicht van 5. Dit is een belangrijk criterium aangezien het beheer en onderhoud van essentieel belang zijn voor het optimaal functioneren van het systeem. Met name onderhoud speelt een belangrijke rol. Het is cruciaal dat eventuele defecten aan het systeem snel gedetecteerd en gerepareerd kunnen worden. Een slechte timing van falen en langdurige reparatiewerkzaamheden kunnen er toe leiden dat de vijzelturbines op het kritische moment nog in de rivier staan en daarmee opstuwung veroorzaken;
- **Duurzaamheid & circulariteit:** Gewicht van 5. Door in een vroeg ontwerpstadium nadrukkelijk rekening te houden met duurzaamheid en circulariteit kan tijdig milieuschade op worden geminimaliseerd. De manier om turbines uitneembaar te maken heeft hierop een aanzienlijke impact waardoor het een belangrijke rol speelt in deze evaluatie. Daarnaast heeft dit onderzoek als doel om bij te dragen aan de verduurzaming van Nederland. Duurzaamheid en circulariteit zijn tevens relevante en belangrijke thema's in de samenleving.
- **Complexiteit van het construeren:** Gewicht van 2. Dit criterium is niet doorslaggevend in de huidige ontwerpplus aangezien het constructieproces om een nieuwe stuw te bouwen al redelijk complex is. De mate dat het uitneembare systeem dit beïnvloed wordt als marginaal verondersteld.
- **De mate van hydraulische complexiteit:** Gewicht van 3. Dit wordt niet als het belangrijkste criterium gezien omdat aangenomen wordt dat het voor elke variant nog mogelijk is om in een later ontwerpstadium ontwerp oplossingen toe te passen.

Waardebepaling:

De scores van de Multicriteria-analyse worden weergegeven in Tabel C.1. De beoordelingen in deze evaluatie zijn relatief ten opzichte van elkaar. Alle criteria worden beoordeeld op een schaal van 0 tot 100. Een score van 100 geeft aan dat het desbetreffende alternatief zeer gunstig scoort ten opzicht van de andere alternatieven. Een score van 50 is neutraal, terwijl een score van 0 aangeeft dat het betreffende alternatief slecht presteert in vergelijking met de andere alternatieven.

Tabel C.1: Relatieve beoordeling van de ontwerpalternatieven (MCA)

Evaluatiecriteria	Weging	A.1.a (verticaal omhoog)	A.1.b (verticaal omlaag)	A.1.c (horizontaal rolsysteem)
Milieu impact	3	50	60	30
Beheer & onderhoud	5	100	50	80
Duurzaamheid & circulariteit	5	85	50	45
De complexiteit van het construeren	2	50	50	50
De mate van hydraulische complexiteit	3	50	40	30
Totale gewogen score	-	1325	900	905

Milieu impact:

Drie aspecten zijn van belang: natuur, ecologie en ruimtelijke kwaliteit. Ontwerpalternatief A.1.c scoort relatief slecht, voornamelijk vanwege de impact op de natuur en ecologie. In de uiterwaarde wordt deze namelijk nogal verstoord. Ontwerpalternatief A.1.b scoort relatief goed ten opzichte van A.1.a omdat de vijzelturbines niet de lucht in geheven maar worden weggeborgen in de fundering. Dit komt de ruimtelijke kwaliteit ten goede.

Beheer & onderhoud:

Ontwerpalternatief A.1.b scoort met name slecht op het gebied van beheer & onderhoud, voornamelijk vanwege de complexe onderhoudsprocedure. In deze ontwerpfasen wordt aangenomen dat de kelder afgesloten en drooggezet moet worden voor onderhoud. Dit wordt als een complexere en gevaarlijkere procedure beschouwd in vergelijking met de andere ontwerpalternatieven.

Daarnaast scoort ontwerpalternatief A.1.c relatief slecht ten opzichte van A.1.a vanwege de vereiste waterafdichting. Ondanks deze afdichtingen kan er mogelijk nog steeds water uitwisseling zijn tussen de hoofdstroom en de uiterwaarde, wat ongewenst is. Bovendien kunnen er in bepaalde beheerfasen, wanneer het platform in beweging is, aparte stromingspatronen ontstaan waardoor het functioneel niet kan werken.

Duurzaamheid & circulariteit:

Ontwerpalternatief A.1.a scoort aanzienlijk beter op de gebieden duurzaamheid en circulariteit. Dit alternatief is het meest duurzaam omdat het extra materiaalgebruik het minst is. Er is geen noodzaak voor afsluitingen, een platform en/of een kelder gerealiseerd te worden. Bovendien wordt het echte verschil gemaakt op het gebied circulariteit. Zoals beschreven in paragraaf 6.4.2 kan verwacht worden dat de vijzelturbines vervangen moeten worden voordat de levensduur van de stuw is bereikt. In dit geval biedt ontwerpalternatief A.1.a voordelen. Het is relatief eenvoudig om aanpassingen te maken aan de ophang- en hefconstructie, waardoor het mogelijk is om een nieuw type turbine te installeren. De ontwerprijheden en daarmee de adaptiviteit, het aanpassingsvermogen, van het ontwerp om in de toekomst een ander type waterkrachtcentrale te realiseren is een stuk groter dan in de andere alternatieven. Bovendien blijven er bij dit ontwerpalternatief geen overbodige constructie-elementen achter wanneer besloten wordt om de waterkrachtcentrale te verwijderen. In ontwerpalternatief A.1.b of A.1.c blijft dan respectievelijk een kelder in de fundering of een gedeeltelijk uitgegraven uiterwaarde achter.

De complexiteit van het construeren:

Er wordt op dit gebied geen onderscheid gemaakt tussen de ontwerpalternatieven omdat het bouwen van een nieuwe stuw in het algemeen al een complexe taak is. De extra werkzaamheden die nodig zijn om de vijzelturbines uitneembaar te maken hebben een marginale impact op de complexiteit van het gehele bouwproces.

De mate van hydraulische complexiteit:

Bij ontwerpalternatief A.1.b en A.1.c bestaat het risico dat complexe stromingspatronen (tijdelijk) optreden. Dit kan een gevaar zijn voor scheepvaart en erosie gerelateerde problemen veroorzaken.

In ontwerpalternatief A.1.b ontstaat een complex stromingspatroon wanneer het platform in- of uit de waterweg wordt verplaatst. Tijdens deze procedure kunnen twee problemen voorkomen: (te veel) wateruitwisseling tussen de hoofdstroom en de uiterwaarde en een hoge lokale stroomsnelheid kan ontstaan. Het laatste geval treedt op doordat de rivier dan gedeeltelijk geblokkeerd wordt door vijzelturbines en daardoor een stroomversnelling optreedt in het andere deel. Deze sterke stroming kan leiden tot erosie die gevaarlijk is voor de stabiliteit van de constructie. Bovendien is het de vraag of een dergelijke constructie in de uiterwaarde geplaatst mag worden met het oog op de "ruimte voor de rivieren" projecten.

In ontwerpalternatief A.1.c ligt de complexiteit van het stromingspatroon in een ander aspect. Zodra de kelder open gaat stroomt er direct water in. De kracht van het 'vallend' water op de vijzelturbines kan dan hoog worden waardoor het onmogelijk wordt om de turbines omhoog te heffen. De vijzelturbines en/of de ondersteunende constructie zouden zelfs kunnen bezwijken. Ook kunnen in dit alternatief neren onder de vijzelturbines ontstaan die gedeeltelijk in de kelder optreden. Dit leidt meestal in een verlies aan energie.

Globale Kostenraming

De kosten voor de ontwerpalternatieven zijn globaal ingeschat. Hiervoor zijn scores van 0 tot 200 gebruikt. Een score van 200 geeft aan dat een variant duurder is dan de variant met een score van 50. Het referentiepunt voor de scores is op 100 gezet. De beoordelingen van de ontwerpalternatieven zijn weergegeven in Tabel C.2.

Tabel C.2: Relatieve kostenraming

Parameter	A.1.a (verticaal omhoog)	A.1.b (verticaal omlaag)	A.1.c (horizontaal rolsysteem)
Kosten	75	175	175

Ontwerpalternatief A.1.a wordt als significant goedkoper beoordeelt omdat er geen grondverzettingswerkzaamheden nodig zijn. Bovendien is de civiele constructie om de turbines uitneembaar te maken het meest eenvoudig en daardoor het goedkoopst. Voor een rolsysteem, ontwerpalternatief A.1.c, moet bijvoorbeeld een platform met aan beide zijde waterafdichtingen worden aangelegd, rails worden aangelegd in de fundering en een inventief bewegingswerk nog worden ontworpen.

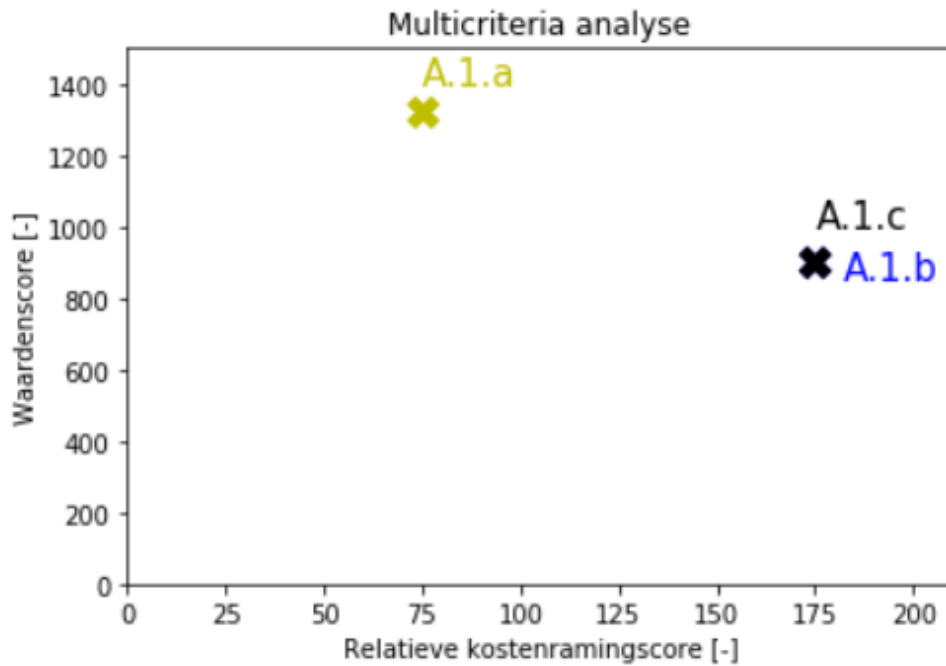
Een verticaal hefsysteem omlaag wordt als duur beschouwd vanwege de aanpassingen aan de fundering. Met name het bouwen in diepere grondlagen wordt als een dure kostenpost gezien.

Daarnaast is het onderhoud in ontwerpalternatieven A.1.a en A.1.b relatief duur vanwege de benodigde droogzetvoorziening en extra waterafdichtingen.

Het kostenverschil tussen ontwerpalternatief A.1.b en A.1.c wordt als marginaal beschouwd in de globale kostenraming. Beide variaties hebben aanvullende kostenposten die in dit ontwerpstadium min of meer tegen elkaar kunnen worden weggestreept.

Multicriteria-analyse (MCA):

De ontwerpalternatieven worden geëvalueerd door de toegekende waarden- en kostenscores uit te zetten in een grafiek.



Figuur C.4: Grafische representatie van de Multicriteria-analyse

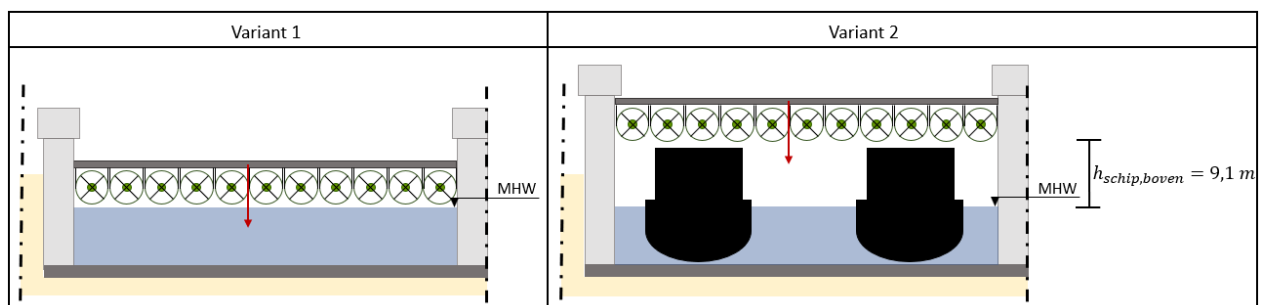
In Figuur C.4 is duidelijk zichtbaar dat ontwerpalternatief A.1.a het gunstigste ratio tussen de waarde en kosten heeft; dit ontwerpalternatief heeft de hoogste waarde tegenover de laagste kosten. Dit wordt dan ook gezien als het optimale ontwerpalternatief. Dus het ontwerp getoond in Figuur C.1, een verticaal hefsysteem omhoog, wordt verder uitgewerkt in het restant van deze bijlage.

Bijlage C.2 - Bepalen van de hefhoogte

Voor het bepalen van de hefhoogte zijn twee maatgevende eisen van belang:

1. De doorvaarthoogte tijdens de maatgevend hoogwaterstand moet minimaal 9,1 m bedragen (Deze eis is gebaseerd op de eisen S.8 en S.12 uit de basis van het).
2. De vijzelturbines moeten boven de maatgevend hoogwaterstand geheven kunnen worden omwille van de waterveiligheid (deze eis is gebaseerd op eis O.2 uit de basis van het ontwerp).

Figuur C.5 toont twee ontwerpen voor het hefsysteem, waarbij variant 1 enkel rekening houdt met de tweede eis en variant 2 voldoet aan beide eisen. In variant 1 worden de vijzelturbines net boven de waterlijn geheven, terwijl in variant 2 de vijzelturbines dusdanig hoog geheven worden dat er ook nog schepen onder door kunnen.



Figuur C.5: Links: variant 1 waarin de vijzelturbines net boven de rivier worden geheven. RECHTS: variant 2 waarin de vijzelturbines dusdanig hoog geheven worden dat scheepvaart door de doorvaartopening mogelijk is.

De keuze in hefhoogte heeft een grote impact op het ontwerp. Indirect bepaalt dit locatie en het maximaal aantal toe te passen. Dit zit als volgt:

- Variant 1: het hefsysteem is geschikt om over de volledige breedte van de basisstuw vijzelturbines te plaatsen. In dit geval zijn de doorvaartopening ondanks de aanwezigheid van vijzelturbines geschikt voor scheepvaart; de schepen kunnen tijdens hoogwater onder de turbines door varen.
- Variant 2: Het is in deze variant enkel mogelijk om vijzelturbines in de stuwopeningen die niet bevaarbaar zijn te implementeren. Het installeren van turbines op een dergelijke manier verbiedt dat schepen door de desbetreffende opening kunnen varen.

Het verschil in kosten tussen de varianten wordt als verwaarloosbaar aangenomen. De reden hiervoor is dat de hefhoogte geen significante invloed heeft op de kosten. De voornaamste factor die de kosten bepaald is het draagvermogen (Van der Kreeke, 2022). De hefhoogte heeft geen significante invloed op de belasting. De maatgevende situatie treedt namelijk op wanneer de vijzelturbines uit de rivier genomen zijn. Op dat moment is er geen opwaartse waterdruk dan gunstig werkt. In beide varianten komt deze situatie voor; de hefhoogte heeft vervolgens geen invloed op de belasting zelf. De keuze in de hefhoogte wordt dus niet gedreven door de kosten.

Uiteindelijk is de keuze gevallen op variant 1 vanwege de positieve invloed op de ruimtelijke kwaliteit en de robuustheid van het systeem. Het tweede en belangrijkste argument, behoeft enige uitweiding. De scheiding van de twee gebruiksfuncties, scheepvaart en energieopwekking, bevordert de robuustheid van het systeem, aangezien falen van de ene functie in deze variant geen invloed heeft op het ander functionele-aspect. Bijvoorbeeld, als de vijzelturbines niet op tijd of hoog genoeg uit de rivier worden geheven dan bestaat het risico op een botsing met een schip. De consequenties van een dergelijke

botsing zijn aanzienlijk en ongewenst aangezien de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van het stuwsysteem ernstig kunnen worden aangetast.

In Nederland worden bestaande stuwen de laatste jaren veiliger gemaakt als reactie op het incident bij Grave (De Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2018). De ernstige consequenties van dit incident benadrukken de noodzaak om dergelijke situaties in de toekomst te voorkomen. Maatregelen om dit te bereiken zijn onder andere het overzichtelijker maken van de stuw en het implementeren van redundante maatregelen. Het complexer maken van de nieuwe stuw zou hier juist tegen in gaan.

Tot slot, Rijkswaterstaat (Baijens & Schropp, 2021) heeft tevens aangegeven het niet opportuun te vinden om in de toekomstige stuwcomplexen nog meerdere gebruiksfuncties op een complexe manier te combineren. Het combineren van deze twee functies in een stuwopening zou tegen deze wens in gaan. Daarom is uiteindelijk besloten om verder te werken met variant 1.

Bijlage C.3 - Keuze in type bewegingswerk

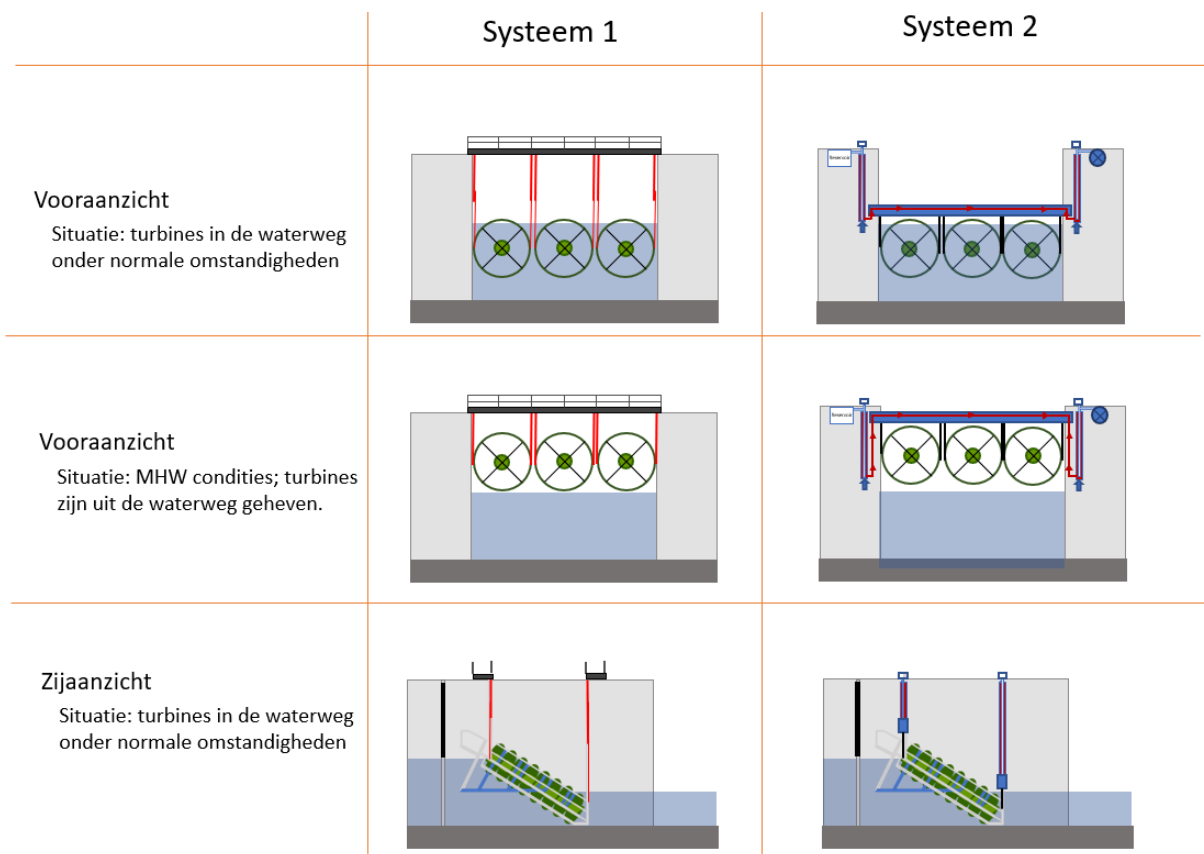
In deze paragraaf worden twee keuzes gemaakt:

- Keuze 1: Individueel heffen van de vijzelturbines of het heffen van een draagbalk met daaraan alle vijzelturbines?
- Keuze 2: Hydraulisch heffen of mechanisch heffen?

Keuze 1 - Individueel heffen of een draagbalk heffen:

Er worden twee kansrijke ontwerpen beschouwd voor het hefsysteem zoals die geïdentificeerd is in dit rapport. Figuur C.6 geeft schematische weergaves van beide opties.

Het eerste systeem maakt gebruik van vaste draagbalken, of loopbordessen, waar de vijzelturbines met hydraulische cilinders aan zijn opgehangen. Vier hydraulische cilinders per vijzelturbine zorgen voor het heffen, terwijl de draagbalk rigide op de steunpunten ligt. Bij de tweede optie hangen daarentegen juist alle vijzelturbine star aan een draagbalk en beweegt de draagbalk. Bewegingswerken in de steunpunten zorgen ervoor dat de draagbalk met de vijzelturbines als geheel verticaal kan bewegen. Een dergelijk bewegingswerk kan bestaan uit hydraulische cilinders of een mechanisch systeem met contragewichten. Een keuze hierin volgt na de huidige keuze.



Figuur C.6: Verscheidene aanzichten van twee hefsystemen. LINKS: systeem 1 waarbij de vijzelturbines apart van elkaar geheven kunnen worden. RECHTS: systeem 2 waarbij de vijzelturbines als geheel worden geheven door een draagbalk te heffen.

Beide opties worden als realistisch beschouwd. Referentieprojecten zijn beschikbaar die aantonen dat er bewegingswerken beschikbaar zijn die een vergelijkbaar gewicht omhoog kunnen heffen. Zelfs wanneer een stuwopening volledig bezet is met vijzelturbines, is dit haalbaar.

Voorafgaand aan de evaluatie moeten twee aspecten worden uitgelicht. In beide systemen moet het mogelijk zijn om de hellingshoek van de vijzelturbines te verstellen. Door de hellingshoek aan te passen aan de actuele benedenstroomse waterstand wordt het rendement namelijk geoptimaliseerd. Daarnaast moet aangegeven worden dat er in dit rapport wordt aangenomen dat er geen significant verschil in de kosten van de twee systemen zit. Volgens de heren van der Kreeke en van Heereveld (2022) zijn de kosten van een grote kwantiteit kleine hydraulische cilinders of een bewegingswerk bestaande uit een draagbalk en een klein aantal cilinders maar met een hoog draagvermogen vergelijkbaar.

Uiteindelijk is op basis van de volgende eisen gekozen voor systeem 2:

- **Energieopbrengst:** Er wordt verwacht dat de energieopbrengst van beide systemen min of meer gelijk is. Hoewel het met systeem 1 turbines geleidelijk geheven kunnen worden leidt dit niet tot een significante en dus waardevolle toename in energieopbrengst. De tijd tussen het moment waarop de vijzelturbines geheven moeten worden, maatgevend hoogwater ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$), en het moment waarop de stuw gestreken wordt ($1800 \text{ m}^3/\text{s}$), is dusdanig groot de turbines niet geleidelijk geheven hoeven worden.
- **Robuustheid:** Systeem 2 wordt beschouwd als beduidend robuuster. Het aandeel van het hefsysteem op de faalkans van de stuw is met systeem 1 groter dan met systeem 2.

Om dit uit te leggen wordt de topgebeurtenis gebruikt die leidt tot een overstroming. Het falen van het hefsysteem tijdens maatgevend hoogwater resulteert in opstuwing, wat op zijn beurt leidt tot overstromingen. Het wordt verwacht dat zelfs als één vijzelturbine in de rivier blijft hangen, er al een opstuwing optreedt die tot overstromingen leidt. Dit betekent dat het falen van één hydraulische cilinder in beide systemen al leidt tot de ongewenste topgebeurtenis. In een faalkansanalyse wordt een dergelijke faalomschrijving gemodelleerd als een 'of-poort', wat betekent dat de totale faalkans van het hefsysteem wordt berekend door de faalkansen van de individuele hydraulische cilinders bij elkaar op te tellen. Systeem 1 heeft aanzienlijk meer hydraulische cilinders die kunnen falen. Hierdoor is de faalkans van systeem 1 significant groter dan die van systeem 2. Merk op, dat bij deze redenering ervan wordt uitgegaan dat de hydraulische cilinders in beide systemen vergelijkbare faalkansen hebben.

Uiteindelijk betekent een verhoogde bijdrage aan de faalkans indirect dat andere constructie-elementen robuuster uitgevoerd moeten worden en dus meer geld gaan kosten.

- **Beheer en onderhoud:** Systeem 2 biedt voordelen op dit gebied. De bewegingselementen zijn namelijk geplaatst in een afgesloten ruimte waardoor ze minder vatbaar zijn voor corrosie, schade en externe belastingen zoals wind. Bovendien is het eenvoudiger reparatiewerkzaamheden uit te voeren omdat er toegang is tot het bewegingswerk vanuit de steunpunten. Deze aspecten dragen ook nog eens bij aan een lagere faalkans en versterkt daarmee de bovenstaande argumentatie dat systeem 2 robuuster is.
- **Ruimtelijke kwaliteit:** Systeem 2 wordt als gunst beschouwd voor de ruimtelijke kwaliteit. Dit systeem heeft de minst vervuulende werking op het omgevingsaanzicht. Met name in de situatie dat de vijzelturbines in de rivier hangen. In systeem 1 hangen dan nog draagbalken, of loopborden, en hydraulische cilinders (hoog) in de lucht.

Keuze 2 – hydraulisch of mechanisch heffen:

Er zijn twee potentiële bewegingswerken beschikbaar om het gekozen systeem te heffen. Dit betreft het hydraulische heffen met cilinders of het mechanisch heffen door middel van contragewicht. Uiteindelijk is

er op basis inschatting gemaakt door van der Kreeke (van der Kreeke & van Heereveld, 2021) op basis van zijn ervaring gekozen voor een mechanisch bewegingswerk. Volgens van der Kreeke is dit zonder meer mogelijk, er zijn voldoende referentieprojecten beschikbaar. Bovendien wordt voor een dergelijk zware hefconstructie doorgaans gebruik gemaakt van mechanisch heffen als er voldoende ruimte voor de installatie beschikbaar is.

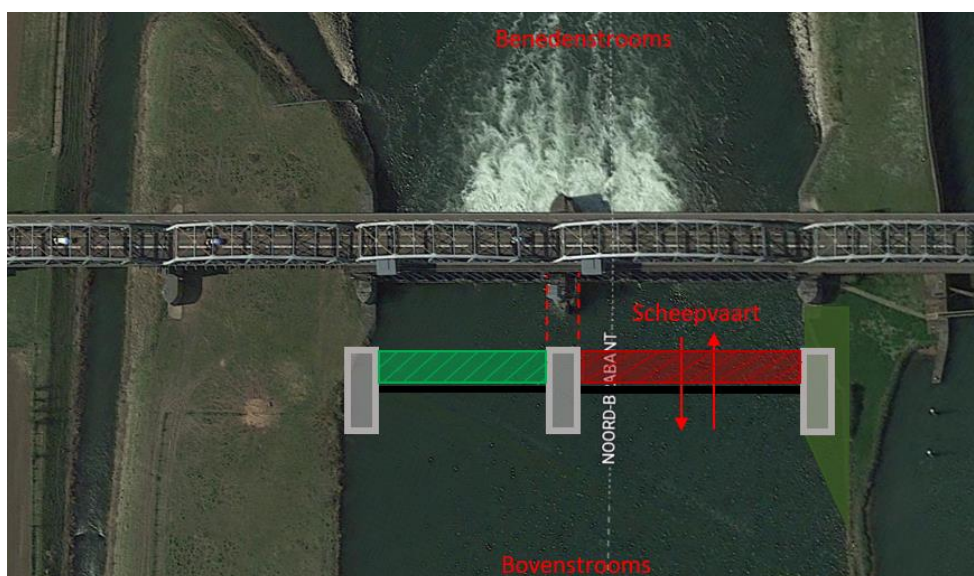
Bijlage C.4 – Locatiekeuze vijzelturbines

De volgende stap is het bepalen van geschikte locaties in de basisstuw om de uitneembare vijzelturbines te implementeren.

Doordat de vijzelturbines uitneembaar gemaakt zijn, wordt het maximaal aantal toepasbare vijzelturbines niet meer gelimiteerd door de overstromingspreventie-eisen. Hierdoor zou het in principe mogelijk zijn om vijzelturbines over de volledige breedte van de stuw te plaatsen. Echter, zijn er andere limiterende factoren.

De combinatie scheepvaart en de gekozen hefhoogte resulteert in het feit dat vijzelturbines niet over de volledige stuwbreedte kunnen worden geïmplementeerd. Zoals beschreven in paragraaf 2 is het wenselijk om gebruiksfuncties zoveel mogelijk te scheiden; het toestaan van scheepvaart en energieopwekking in een doorvaartopening wordt als niet opportuun beschouwd. Daarom mogen vijzelturbines niet worden geplaatst in de doorvaartopening die bestemd is voor scheepvaart, de rechter doorstroomopening.

Bovendien is de linker doorvaartopening eigenlijk ongeschikt voor scheepvaart vanwege de beperkte breedte. Rijkswaterstaat prefereert dat slechts een doorstroomopening gebruikt wordt voor scheepvaart, om het risico op aanvaring te verminderen. Aangezien de linker doorvaartopening niet geschikt is voor scheepvaart maakt dit de ideale locatie om uitneembare vijzelturbines te plaatsen volgens het huidige ontwerp van het hefsysteem. In Figuur C.7 wordt het geschikte gebied voor het plaatsen van uitneembare vijzelturbines weergegeven in het groen.



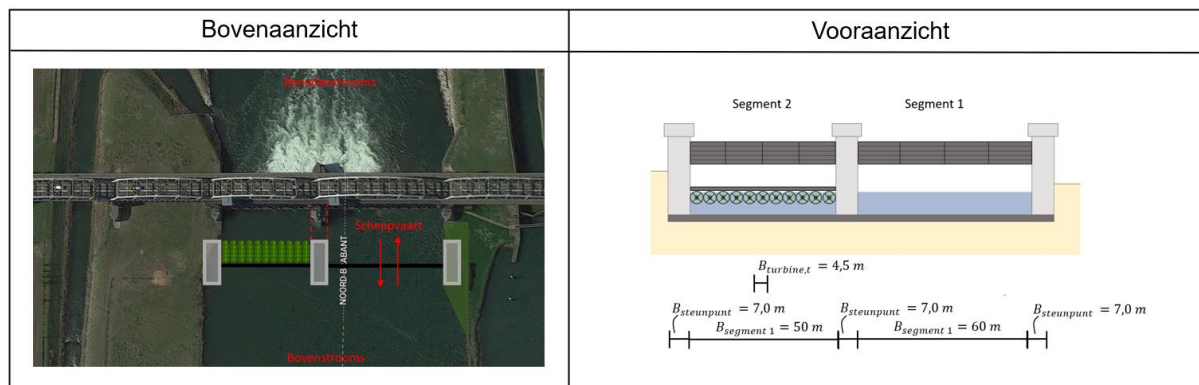
Figuur C.7: Een bovenaanzicht met daarin geschikte en ongeschikte gebieden voor het plaatsen van vijzelturbines in de basisstuw aangegeven. In het groen gearceerde gebied kunnen uitneembare vijzelturbines worden geplaatst.

Bijlage C.5 - Bepalen van het aantal vijzelturbines

Nu de geschikte ruimte bekend is, wordt in deze paragraaf het “optimaal” aantal vijzelturbines voor ontwerpconcept A.1 bepaald. Aangezien de eis van een haalbare business case belangrijk is, wordt in deze bijlage “optimaal” als economisch optimaal gezien.

- **Stap 1 – Creëren van varianten:**

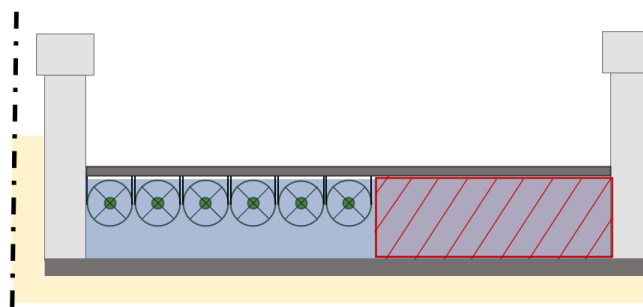
In Figuur C.8 wordt een ontwerpvariant getoond waarin de geschikte ruimte volledig bezet is met vijzelturbines. Er is in totaal een stuwbreedte van 50 m beschikbaar om uitneembare vijzelturbines te plaatsen. De vijzelturbines nemen per stuk 4,5 m ruimte in beslag, inclusief de diameter van de vijzelturbines (4,2 m) en een surplus aan ruimtegebruik voor de hefinstallatie (aannahme: 0,15 m aan elke zijde). De maximale bezettingsgraad komt daarmee uit op 11 uitneembare vijzelturbines.



Figuur C.8: Ontwerptekeningen ontwerpconcept A.1, met 11 uitneembare vijzelturbines. LINKS: een bovenaanzicht. RECHTS: een vooraanzicht.

De maximale bezettingsgraad hoeft echter niet per se te leiden tot de optimale variant voor ontwerpconcept A.1. Mogelijk is het gunstiger om minder vijzelturbines toe te passen. Om de economische optimale variant te vinden, wordt gevarieerd met het aantal vijzelturbines. Er zijn in totaal 11 varianten mogelijk, waarin enkel wordt gevarieerd met het aantal turbines van 1 tot 11 stuks. De exacte locatie(s) van de turbines wordt in de huidige conceptuele ontwerpfasen buiten beschouwing gelaten.

Het is van belang om op te merken dat wanneer er minder dan 11 vijzelturbines worden toegepast een functioneel en hydraulisch probleem kan ontstaan. Het is zaak om hier in het ontwerp door middel van een oplossing rekening mee te houden. Figuur xx toont een ontwerp waarin zonder ontwerpmaatregel een dergelijk probleem kan ontstaan. Ter illustratie wordt een variant met 6 vijzelturbines besproken. Een dergelijk probleem treedt op bij alle varianten waarin minder dan 11 turbines worden geïmplementeerd.

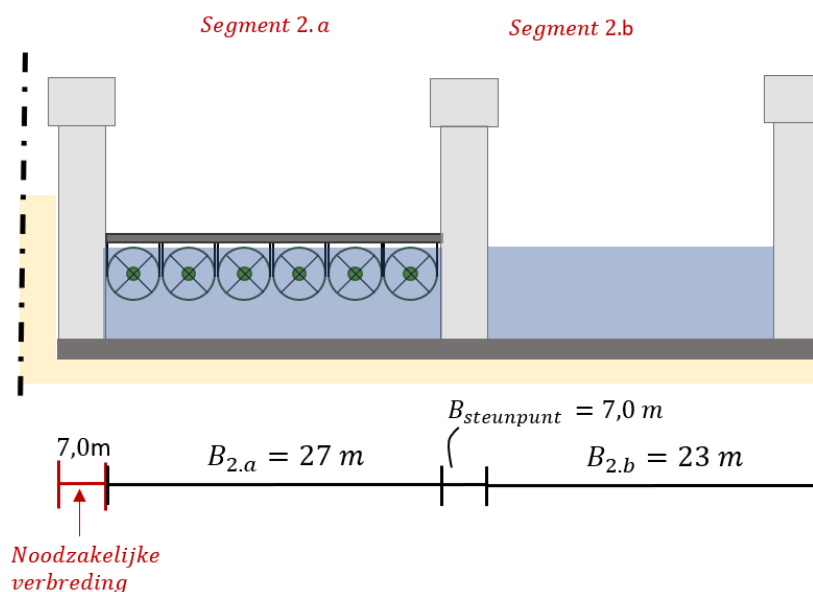


Figuur C.9: Ontwerptekening van de (linker) stuwopening waarin de uitneembare vijzelturbines worden geïmplementeerd, met in rood gearceerde de waterkolom wat voor problemen zorgt.

In het ontwerp van Figuur C.9 treden drie problemen op:

- Een mogelijke optie is om de hefdeuren volledig te openen en de vijzelturbines de waterpeil-regeling voor haar rekening te laten nemen. Dit leidt echter tot een hydraulisch probleem. Het grootste deel van het water zal namelijk vrij afstromen via het gedeelte waar geen vijzelturbines zijn geplaatst. Hierdoor treedt er geen of een gereduceerd verval op over de vijzelturbines, wat resulteert in een verlies van energieproductie. Bovendien is het twijfelachtig of de waterstand op deze manier goed gereld kan worden, vooral bij lage afvoer.
- Een andere keuze is om de waterstanden te regelen met de hefdeuren. In dit geval vindt er geen vrije afstroming plaats en wordt het streefpeil ten minste gegarandeerd. Echter, treedt het verval dan voornamelijk op over de hefdeuren. Hierdoor ontstaat een complex en riskant stromingspatroon tussen de hefdeuren en de vijzelturbines. Het eerste probleem is dat er geen of een verminderd verval over de vijzelturbines zal zijn waardoor potentiële energie verloren gaat. Daarnaast is er kans dat een neer ontstaan tussen de hefdeur en vijzelturbines. Dit kan tevens leiden tot een verlies in energieproductie. Bovendien, kan worden verwacht dat het water na de hefdeur nog steeds langs de vijzelturbines stroomt.
- Het ontwerp van de ophangconstructie en het hefsysteem wordt tevens complexer. Vanwege de onevenredige verdeelde belasting wordt de ene helft van de constructie onnodig robuust uitgevoerd. Dit is een onnodige kostenpost. Daarnaast vereist de onevenredig verdeelde belasting veel tijd en moeite bij het ontwikkelen van een adequaat beheerplan voor het hefsysteem.

Bovenstaande problemen kunnen worden opgelost door een extra steunpunt in de stuwopening te implementeren. Hierdoor wordt de waterkrachtcentrale en vrijafstroming van elkaar gescheiden. Ook worden in plaats van een stuw deur voor de hele stuwopening twee aparte stuwdeuren voor de waterkrachtcentrale en het vrij afstromende deel gemaakt. Hierdoor kan tijdens droge periodes de een dichtgezet worden waardoor er geen lekverlies optreedt. Een dergelijk ontwerp wordt weergegeven in Figuur C.10. Het implementeren van een extra steunpunt vereist echter wel een verbreding van de stuw om voldoende doorstroombreedte te behouden. Dit is noodzakelijk om aan de opgestelde hydraulische eisen te voldoen. In de kostenraming is het van belang om rekening te houden met de extra kosten van het implementeren van een extra steunpunt en het grondverzet.



Figuur C.10: Ontwerptekening van de oplossing om minder dan 11 vijzelturbines volgens ontwerpconcept A.1 toe te passen.

Als gevolg van het extra steunpunt moet de absolute breedte van de basisstuw toenemen om de toegevoegde weerstand, het extra steunpunt in de waterweg, te compenseren. Daarom moet er een oppervlak worden uitgegraven dat gelijk is aan dat van het steunpunt.

- **Stap 2 – Bepalen van de optimale variant:**

Door het extra steunpunt wordt het mogelijk om te variëren met het aantal vijzelturbines. varianten mee te nemen in de evaluatie tussen de verbeterde ontwerpconcepten (A.1, A.2 en A.3). Bovendien moeten naderhand nog meerdere ontwerplussen worden doorlopen voordat het definitieve en optimale ontwerp bereikt wordt. Als vastgesteld is welk van de drie ontwerpconcepten de beste oplossing is voor het waterveiligheidsprobleem, dan kan binnen dat ontwerp nogmaals gekeken worden of het ontwerp wat blijkt uit deze evaluatie ook daadwerkelijk de optimale is.

Het is mogelijk om a priori aan de eindevaluatie al een aantal waardevolle conclusies te trekken waardoor niet elke variant meegenomen hoeft te worden. Het optimaal aantal vijzelturbines wordt als economisch optimaal beschouwd in de huidige ontwerpfase. In de basis van het ontwerp wordt namelijk aangegeven dat het van essentieel belang is dat een rendabele businesscase wordt gerealiseerd. Door een variant te kiezen die hieraan voldoet wordt het ontwerpconcept als economisch haalbaar beschouwd. Voor het bepalen van de economische optimale variant wordt een analyse gebruikt die uit vier delen bestaat: bepalen van de financiële opbrengst, globale kostenraming, het vergelijken van de kosten en baten door de netto contante waarde te bepalen en het berekenen van het project rendement (in het Engels: Internal Rate of Return). In de laatste twee delen wordt de optimale variant bepaald.

Deel 1 – Bepalen van de financiële opbrengst:

Voor het bepalen van de financiële-opbrengst is een python-script ontwikkeld waarin het aantal turbines de invoervariabele is. Andere belangrijke invoerparameters zijn de terugverdientijd en het scenario voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs. De totale financiële-opbrengst wordt bepaald door de netto contante waarde (in het Engels: Net Present Value) van de energieopbrengst over de terugverdientijd te berekenen. Om dit te bepalen wordt de methode gebruikt die beschreven wordt in bijlage B, "Structuur van het financiële model".

In het kort, wordt de financiële opbrengst van de waterkrachcentrale bepaald door de netto contante waarde van de financiële jaaropbrengsten over de terugverdientijd bij elkaar op te tellen. Voor de terugverdientijd is aangenomen dat dit 15 jaar is.

Om de netto contante waarde van de financiële jaaropbrengst te bepalen moet de gemiddelde energieopbrengst over een jaar worden bepaald. De financiële jaaropbrengst wordt vervolgens bepaald door de gemiddelde energieopbrengst in een jaar te vermenigvuldigen met de elektriciteitsprijs.

Voor de berekening van de financiële jaaropbrengst is de gemiddelde jaarwaarde van de opgewekte elektriciteit gebruikt. Over de terugverdientijd, die op 15 jaar is gesteld, is de gemiddelde jaarwaarde een correcte representatie. In deze periode wordt namelijk zowel goede (natte), als slechte (droge) jaren verondersteld te zitten.

Aangezien de elektriciteitsprijs sterk fluctueert en er subsidies kunnen worden verkregen voor duurzame energie, is het belangrijk om rekening te houden met uiteenlopende scenario's voor de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs. Deze scenario's worden bepaald op basis van een data-analyse, zoals beschreven in bijlage B. De financiële opbrengst wordt dus vier keer berekend met variërende scenario's voor de elektriciteitsprijs. Door gebruik te maken van verschillende scenario's wordt het voor Rijkswaterstaat en een derde partij inzichtelijk wanneer het gunstig is om een investering te doen.

De methode om de gemiddelde energieopbrengst in een jaar te bepalen wordt beschreven in bijlage A, 'Methode voor het bepalen van de energieopbrengst'. Hierin staat uitgelegd hoe met een parametrisch model, dat in python is ontwikkeld, de gemiddelde energieopbrengst in een jaar wordt bepaald. Dit model maakt gebruik van historische data. Op basis van deze historische data worden het vermogen en het aantal vollasturen bepaald. De manier waarop beide parameters worden bepaald staat uitvoerig beschreven in bijlage A. Wanneer een waarde voor beide parameters gevonden is kan de gemiddelde energieopbrengst in jaar worden berekend. Deze methode staat volledig en uitvoerig beschreven in bijlage A. Het pythonscript dat volgens deze methode is ontwikkeld wordt voor elke variant uitgevoerd.

Nadat voor elke variant de gemiddelde energieopbrengst in een jaar bepaald is, worden deze waardes ingevoerd in het deel van het pythonscript waarmee de financiële opbrengst wordt berekend. De achterliggende methode voor dit deel van het pythonscript staat beschreven in bijlage B.

Deel 2 – Globale kostenraming:

Om uiteindelijk het optimaal aantal vijzelturbines te bepalen dient naast de impact op de opbrengst ook een inschatting van de impact van het aantal vijzelturbines op de kosten verkregen te worden. In gedeelte wordt de impact van het aantal vijzelturbines op de kosten onderzocht door een globale kostenraming te maken. De kosten worden berekend met een variërend aantal vijzelturbines van 1 t/m 11.

De kostenraming in dit onderzoek is gebaseerd op referentieprojecten en kentallen. De kosten van het gros van de constructie-elementen worden bepaald door kentallen voor de prijs te gebruiken die afkomstig zijn van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.). Door het volume van constructie-elementen te berekenen kunnen met de kentallen de kosten bepaald worden.

Uiteindelijk wordt de netto contante waarde van de investeringskosten en de operationeel kosten bepaald. Deze worden in het financiële model voor de netto contante waarde berekening meegenomen zoals wordt beschreven in Bijlage B.

De kosten die opgenomen zijn in de kostenramingen zijn:

- De materiaalkosten. Alleen die kosten die uitsluitend kunnen worden toegeschreven aan de waterkrachtcentrale en de ondersteunende constructie. Wat er onder materiaalkosten valt hangt specifiek af van de ontwerpconcepten. Verderop volgt een opsomming van de specifieke kostencomponenten voor ontwerpconcept A.2.
- De operationele kosten worden als percentage van de investeringskosten betrokken. Jaarlijks wordt 5% van de investeringskosten in rekening gebracht als operationele kosten. Voor de huidige ontwerpfase, een conceptueel ontwerp, volstaat een benadering van deze kosten door een percentage van de investeringskosten te nemen. In het rapport "Duurzame energie locatie Panheel" (Pronk et al., 2017) wordt beschreven dat verwacht mag worden dat de onderhoudskosten in de orde van 5 procent van de investeringskosten zullen liggen. Er wordt aangenomen dat dit percentage onafhankelijk is van het aantal vijzelturbines.

Kosten die buiten de scope vallen zijn de aanvullende onderzoeks- en ontwikkelingskosten die nog nodig zijn, de bouwkosten, personeelskosten, transportkosten en kosten die voortkomen uit de impact op de faalkansverdeling en daarmee het verdere constructieve ontwerp van de basisstuw. Met deze aspecten worden ook bijvoorbeeld de indirecte kosten van een waterkrachtcentrale op die van bodembescherming bedoeld. Daarnaast moeten andere constructie-componenten mogelijk robuuster worden uitgevoerd door de impact op de faalkansverdeling. En daarom duurder worden. In de huidige conceptuele ontwerpfase was het lastig om al deze kostenaspecten te betrekken. Met name omdat onduidelijk en onzeker is aan welke kostenpost deze aspecten worden toegeschreven.

De investeringskosten worden zoals hierboven op basis van materiaalgebruik berekend. De extra materiaalkosten om een waterkrachtcentrale in de uiterwaarde te realiseren die worden opgenomen in de huidige kostenraming zijn opgebouwd uit de volgende kostenposten:

- De vijzelturbines;
- Additionele steunpunten ten opzichte van het basisstuw ontwerp;
- Overige kostencomponenten die beïnvloed worden doordat een extra steunpunt nodig is;
- Grondverzettingswerk.

Voordat de kosten van de bovenstaande componenten worden berekend is noodzaak om nog een aantal aannames in de kostenraming te geven:

- Voor de staffel van vijzelturbines wordt aangenomen dat 20 vijzelturbines ongeveer 20% goedkoper zijn dan 1 vijzelturbines (van Heereveld, 2022). Dit percentage loopt exponentieel met het aantal vijzelturbines dat besteld wordt.
Het bovenstaande percentage is gebaseerd op de kennis van een expert met betrekking tot de markt van waterkrachtenergie.
- De financiële doelstelling, de verwachte winst voor een derde partij, wordt in de huidige berekening nog buiten beschouwing gelaten.

De volgende stap is het bepalen van parametrische uitdrukkingen voor de materiaalkosten.

Kosten van één vijzelturbine:

In het onderzoek “Duurzame energie locatie Panheel” (Pronk et al., 2017) is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor een vergelijkbare waterkrachtcentrale. Op basis dit referentieproject worden de CAPEX en OPEX van een vijzelturbine ingeschat.

De investeringskosten (CAPEX) voor een waterkrachtcentrale met één vijzelturbine bedraagt 341.000 euro exclusief BTW. Dit is opgebouwd uit de kosten van de vijzelturbine zelf (285.000 euro), elektrische voorzieningen (25.000 euro) en 10% onvoorziene kosten (31.000 euro). De kosten van de aanvullende civiele-werken, die dienen als draagconstructie van de vijzelturbine, vallen buiten dit bedrag. Deze dienen nog ontworpen te worden. (Pronk et al., 2017)

Identificeren van de kosten-impact van een extra steunpunt:

Zoals hierboven beschreven is het nodig om een extra steunpunt te realiseren wanneer minder dan het maximaal aantal vijzelturbines wordt toegepast. Een dergelijke situatie wordt weergegeven in figuur C.10.

In een variant op ontwerpconcept A.1 waarin minder dan 11 turbines worden geïnstalleerd, komen significante kosten kijken ten gevolge van het extra steunpunt. Deze extra kosten zitten in de volgende aspecten:

5. Het materiaalgebruik voor het extra steunpunt;
6. Grondverzettingswerk van de nodige verbreding van rivier.
7. Een verandering in het ontwerp van de deur(en);
8. Aanpassingen in het bewegingswerken van de hefdeuren.

2. Kostenpost: Aanvullend materiaalgebruik:

Als eerst wordt berekend hoeveel extra beton en staal er nodig is voor het extra steunpunt. Vervolgens worden deze volumes vermenigvuldigd met de kentallen voor de beton- en staalprijs.

Voor het steunpunt wordt het ontwerp van de steunpunten van de basisstuw gebruikt. De eigenschappen van het extra steunpunt worden opgesomd in Tabel C.3. Voor de muurdikte en het wapeningsratio zijn realistische aannames gedaan. Een ruwe aanname volstaat op dit moment omdat het gaat om een globale kostenraming. Het aangenomen wapeningsratio betreft zowel de wapening in langs- als in dwarsrichting.

Tabel C.3: Eigenschappen van het steunpunt

Eigenschappen van het steunpunt:			
Dimensies:			
Hoogte	h	15	m
Breedte (b)	b	7	m
Lengte (L)	L	20	m
Muurdikte (t)	t	0,5	m
Wapeningsratio	ρ_{totaal}	1	%
Dichtheid:			
Beton	ρ_b	2400	kg/m ³
Wapeningsstaal	ρ_s	7850	kg/m ³

De bovenstaande eigenschappen resulteren er in dat 504 m³ beton en 5,04 m³ staal nodig is. Naast deze hoeveelheid beton en staal moet een bekisting worden gebouwd om het steunpunt te construeren. De kosten hiervan wordt berekend door het oppervlak van de bekisting te bepalen. Voor het construeren van dit steunpunt moet een oppervlak van 810 m² bekist worden.

Met de bovenstaande waardes, en de kentallen van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.), kan een globale schatting van de extra kosten worden gemaakt. Dit wordt gepresenteerd in Tabel C.4.

Tabel C.4: Kosten indicatie van het toevoegen van een extra steunpunt, op basis van materiaalgebruik. De kosten per eenheid zijn afkomstig van GWWkosten.nl (Cobouw, n.d.)

Kostenpost	Kosten indicator	Waarde	Kosten per eenheid	Eenheid	Kosten
Beton	Inhoud	504 m ³	€ 158,-	per m ³	€ 79.632
Wapenings- staal	Gewicht	39564 kg	€ 2,20,-	per kg	€ 87.040
Bekisting	Oppervlak	810 m ²	€ 89,50,-	per m ²	€ 72.495
Totale directe kosten					€ 239.168

2. Kostenpost: extra grondverzet

Het volume van de uit te graven grond dient als eerst bepaald te worden. In Tabel C.5 worden de dimensies gegeven. De hoogte bedraagt het verschil tussen het maaiveld (NAP +8,5 m) en de onderkant van de fundering (NAP -0,35 m). De resterende dimensies corresponderen met die van het steunpunt.

Tabel C.5: Berekening van het volume grond dat uitgegraven moet worden.

Volume grondverzetting:			
Dimensies:			
Hoogte	h	8,85	m
Breedte (b)	b	7	m
Lengte (L)	L	20	m
Volume	V	1.239	m ³

Voor het kengetal van het grondverzettingswerkzaamheden is aangenomen dat er droog gegraven kan worden. Volgens de lecture notes van het vak 'Construction Technology of Civil Engineering Projects' bedraagt de kosten van deze werkzaamheden ongeveer 5 euro per kubieke meter (Van der Horst, 2018). Dit komt neer op een bedrag van 6.195 euro.

De enige kanttekening die bij deze kosten geplaatst moet worden is dat de kosten lager kunnen uitvallen omdat er toch al grondverzettingswerkzaamheden nodig zijn voor het construeren van de basisstuw. Er hoeft dus niet speciaal materieel worden geleverd. Dit reduceert de prijs enigszins.

3. Overige kostenposten die beïnvloed worden door het plaatsen van een extra steunpunt:

Naast de kosten ten gevolge van een extra steunpunt, resulteert het toevoegen van een steunpunt er ook in dat het ontwerp van andere constructie-elementen veranderen en daarmee ook impact op de kosten kunnen hebben.

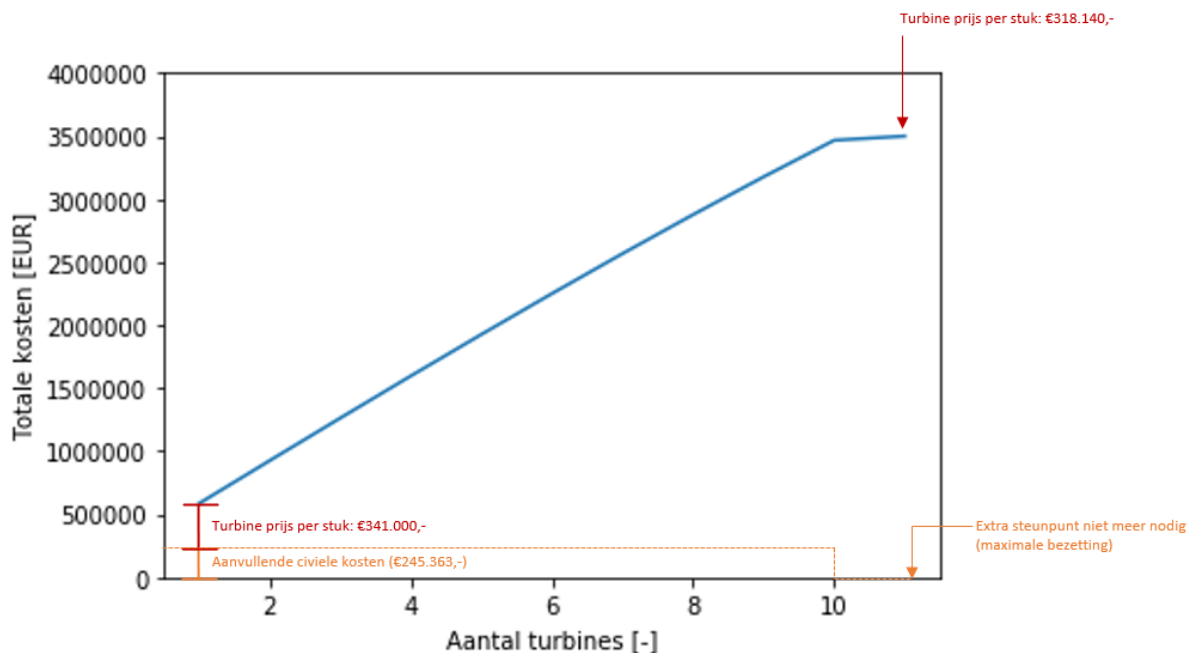
Het ontwerp van de stuwdeuren veranderd bijvoorbeeld. De stuwopening heeft in plaats van een deur twee hefdeuren nodig. Extra kosten worden gemaakt omdat een extra ontwerpstap nodig is. Daarnaast zijn twee keer zoveel bewegingswerken nodig. Daartegenover staat echter dat de deur minder robuust uitgevoerd hoeft te worden omdat de overspanning minder is. Het materiaalgebruik is daardoor minder. Dit resulteert er tevens in dat per bewegingswerk minder draagvermogen geheven hoeft te worden waardoor de bewegingswerken per stuk goedkoper zijn. Uiteindelijk is aangenomen dat al deze aspecten tegen elkaar weggezet kunnen worden in een globale kostenraming. Het is tevens de verwachting dat de impact van deze aanpassingen relatief klein is op de totale kostenraming.

4. Samenvattend:

De belangrijkste aspecten met betrekking tot de eerste globale kostenraming zijn als volgt:

- 1 vijzelturbine kost €341.000,- (de aanvullende civiele kosten voor een waterkrachtcentrale zoals de waterafdichting vallen hier buiten);
- De staffel van vijzelturbines bedraagt. Wanneer 20 vijzelturbines worden aangeschaft is de prijs per vijzelturbine 20% lager. Hiervoor is een exponentiële functie opgesteld om de korting te berekenen afhankelijk van het aantal vijzelturbines dat wordt afgenomen.
- Voor varianten waarin niet het maximaal aantal vijzelturbines (11) wordt toegepast is het noodzakelijk om een extra steunpunt te genereren. In deze bijlage is geschat dat een extra steunpunt in totaal €245.363,- kost.
- De impact van het aantal vijzelturbines op het ontwerp van de fundering, de bodembescherming, de stuwdeuren en het bewegingswerk worden buitenbeschouwing gelaten. Verwacht wordt dat deze kosten relatief klein zijn en/of elkaar balanceren.

Op basis van de bovenstaande karakteristieke van de kosten wordt een grafiek ontwikkeld die de relatie tussen het aantal vijzelturbines en de kosten globaal inzichtelijk maakt. Deze grafiek wordt getoond in Figuur C.11.



Figuur C.11: een grafische weergave van de globale kostenraming waarin de relatie tussen het aantal vijzelturbines en de kosten voor ontwerpconcept A.1 uit een wordt gezet.

Het is duidelijk zichtbaar dat wanneer 11 turbines worden toegepast de kosten van het extra steunpunt verdwijnen. Dit indiceert dat maximale bezetting het gunstigst is.

De methode om de kosten per variant te berekenen wordt betrokken in het financiële model beschreven in bijlage B. De volgende stap is het berekenen van de netto contante waarde van de winst en het project rendement. Op basis van deze twee parameters worden vervolgens de varianten op het ontwerpconcept geëvalueerd.

Deel 3 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.1 op basis van de netto contante waarden van de winst:

Zoals eerder vermeld, wordt de netto contante waarde van de winst gebruikt om de varianten te beoordelen en daarmee het economisch optimale aantal vijzelturbines te bepalen. De methode om dit voor elke variant te berekenen wordt uitvoerig beschreven in Bijlage B, getiteld 'Structuur van het financieel model'. In het kort wordt in het financiële model een geldstroomdiagram (in het Engels: Cash flow diagram) opgesteld, waarin zowel de opbrengsten zoals berekend in Deel 1 als alle kosten zoals berekend in Deel 2 worden opgenomen. Uiteindelijk worden de netto contante waarde van alle opbrengst en kosten van elkaar afgetrokken, wat resulteert in een netto contante waarde van de winst.

Voor het geldstroomdiagram wordt een terugverdientijd van 15 jaar gehanteerd. Het doel dat is geformuleerd voor de casestudie bij Grave is namelijk dat de investerende partij binnen 15 jaar haar investering plus en het gewenste projectrendement wil hebben terugverdient. Vervolgens kan de waterkrachtcentrale worden verkocht of worden vervangen door verbeterde technologie. Deze aanname is gebaseerd op een realistisch vergelijkbaar project, het waterkrachtcentraleproject beschreven in het rapport "Duurzame energie locatie Panheel" (Pronk et al., 2017).

Een python-script is ontwikkeld om een geldstroomdiagram te genereren en op basis daarvan de netto contante waarde van de winst te berekenen. Dit is gedaan volgens de structuur zoals beschreven in bijlage B. Met behulp van dit Python-script kan eenvoudig de winst worden berekend voor alle varianten. Voor elke variant wordt deze berekening vier keer uitgevoerd, waarbij de elektriciteitsprijs tussen de berekeningen varieert. De elektriciteitsprijs fluctueert namelijk sterk en is afhankelijk van subsidies. De reden om verschillende scenario's te hanteren is om te onderzoeken binnen welke omstandigheden een haalbare business case kan worden gerealiseerd.

In Bijlage B.3 wordt de methode beschreven om hoe op basis van twee analyses vier scenario's voor de elektriciteitsprijs worden ontwikkeld. De eerste analyse omvat een data analyse van de APX spotmarkt voor elektriciteitsprijzen om een representatieve prijs voor elektriciteit vast te stellen. In de tweede analyse worden subsidieregelingen onderzocht, aangezien bedrijven die duurzame energie produceren momenteel gebruik kunnen maken van subsidieregeling SDE++ (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023). Dit rapport maakt nog gebruik van de oudere SDE+-subsidieaanvraag (2016), zoals beschreven in het rapport "Duurzame energie locatie Panheel" (Pronk et al., 2017).

Het is essentieel om scenario's te hanteren waarin zowel met als zonder subsidie wordt geëvalueerd, aangezien het gebruik van subsidies de haalbaarheid van het investeringsvoorstel kan vertekenen, ook wel corrupt kan maken. Het is namelijk van belang te onderzoeken of een rendabele businesscase mogelijk is zonder subsidies, aangezien in sommige landen mogelijk geen subsidies worden verstrekt of deze niet beschikbaar zijn, wat de bredere toepasbaarheid kan beïnvloeden. Daarnaast bestaat het risico dat subsidies in de komende jaren worden stopgezet. In dat geval is het relevant om te onderzoeken of een rendabele businesscase kan worden gerealiseerd. Het doel van dit rapport strekt zich immers verder uit dan de specifieke casestudie.

Samengevat houdt dit onderzoek rekening met vier scenario's:

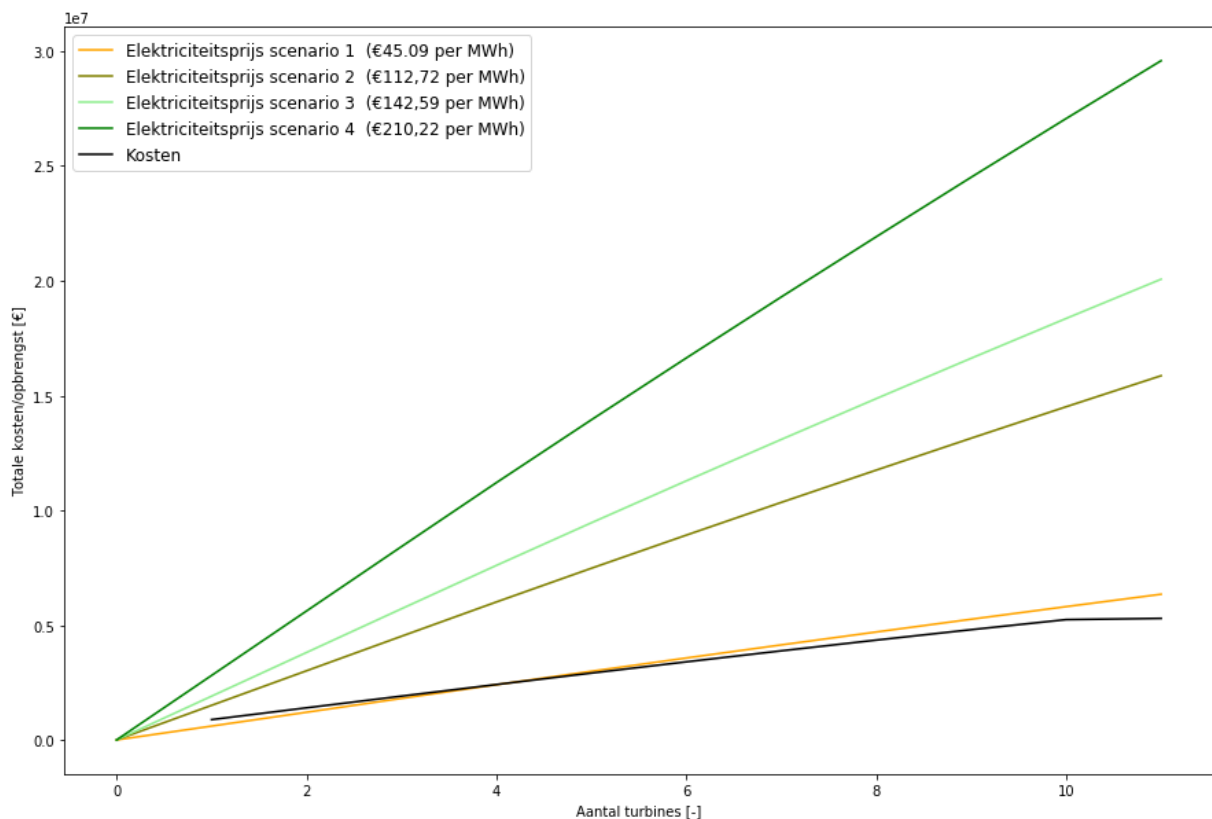
- Case 1: Hier wordt aangenomen dat de elektriciteitsprijs terugkeert naar het constante prijsniveau tussen 2008 en 2015. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor

deze case bedraagt 45,09 EUR/MWh.

[Gemiddelde prijs, geen subsidie]

- Case 2: Hier wordt verwacht dat de elektriciteitsprijs gedurende de terugverdienperiode hoog blijft. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 112,72 EUR/MWh.
[Hoge prijs, geen subsidie]
- Case 3: Hier wordt aangenomen dat de elektriciteitsprijs terugkeert naar het constante prijsniveau tussen 2008 en 2015. Er wordt gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 142,72 EUR/MWh.
[Gemiddelde prijs, wel subsidie]
- Case 4: Hier wordt verwacht dat de elektriciteitsprijs gedurende de terugverdienperiode hoog blijven. Er wordt geen gebruik gemaakt van subsidies. De elektriciteitsprijs voor deze case bedraagt 210,22 EUR/MWh
[Hoge prijs, wel subsidie]

De volgende stap omvat het berekenen van de netto contante waarde van de winst voor elke variant van ontwerpconcept A.1. Voor een gedetailleerde uitleg van deze berekeningen wordt verwezen naar Bijlage B. Op basis van Figuur 7.8 worden de varianten beoordeeld door de netto contante waarden van de opbrengsten bij variërende elektriciteitsprijzen te vergelijken met de netto contante waarden van de kosten, weergegeven als de zwarte lijn.



Figuur C.12: Een grafische representatie van de resultaten, de netto contante waarde van de winst, van het financieel model met variërend aantal vijzelturbines.

Op basis van de grafiek getoond in Figuur 7.8 worden waardevolle conclusies getrokken met betrekking tot de economisch optimale variant voor ontwerpconcept A.1:

- **Scenario 1 voor de elektriciteitsprijs:** In het geval dat in de toekomst scenario 1 voor de elektriciteitsprijs wordt gehandhaafd, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert.
- **Enigszins hogere elektriciteitsprijs:** Als de elektriciteitsprijs enigszins hoger ligt dan die in scenario 1, dan geldt voor elke variant dat de opbrengsten de kosten overstijgen, wat betekent dat het geen financiële last vormt om een waterkrachtcentrale te realiseren. Het is echter belangrijk op te merken dat dit nog niet noodzakelijkerwijs betekent dat de gewenste winst voor de derde partij wordt behaald en het dus een economisch haalbaar ontwerp is. Deze afweging is afhankelijk van het berekende projectrendement, zoals beschreven in Deel 4.
- **Electriciteitsprijzen in de buurt van scenario's 2, 3 of 4:** Als de toekomstige elektriciteitsprijs in de buurt ligt van een van de scenario's 2, 3 of 4, dan is er een winstgevende businesscase mogelijk. Het is echter belangrijk op te merken dat economische haalbaarheid afhangt van de financiële doelstellingen van de exploitant.
- **De invloed van de elektriciteitsprijs en subsidies:** Scenario 1 illustreert dat voor een winstgevende businesscase het noodzakelijk is om ofwel gebruik te kunnen maken van subsidies, of dat de elektriciteitsprijs op zichzelf moet stijgen in vergelijking met de periode van 2008 tot en met 2015. De laatste optie lijkt redelijk aannemelijk en realistisch, gezien de structurele veranderingen sinds die periode. Voor verdere toelichting wordt verwezen naar Bijlage B.3. Er wordt daarom aangenomen dat het waarschijnlijk is dat dit ontwerpconcept economisch haalbaar is.
- **Variant met 11 vijzelturbines (variant A.1.11):** Het grootste verschil tussen opbrengsten en kosten doet zich voor wanneer wordt gekozen voor een variant met 11 vijzelturbines. Dit geldt voor elk scenario van de elektriciteitsprijs. De oorzaak hiervan is dat aanzienlijk meer energie wordt opgewekt en dat de kostencomponent van een extra steunpunt komt te vervallen.

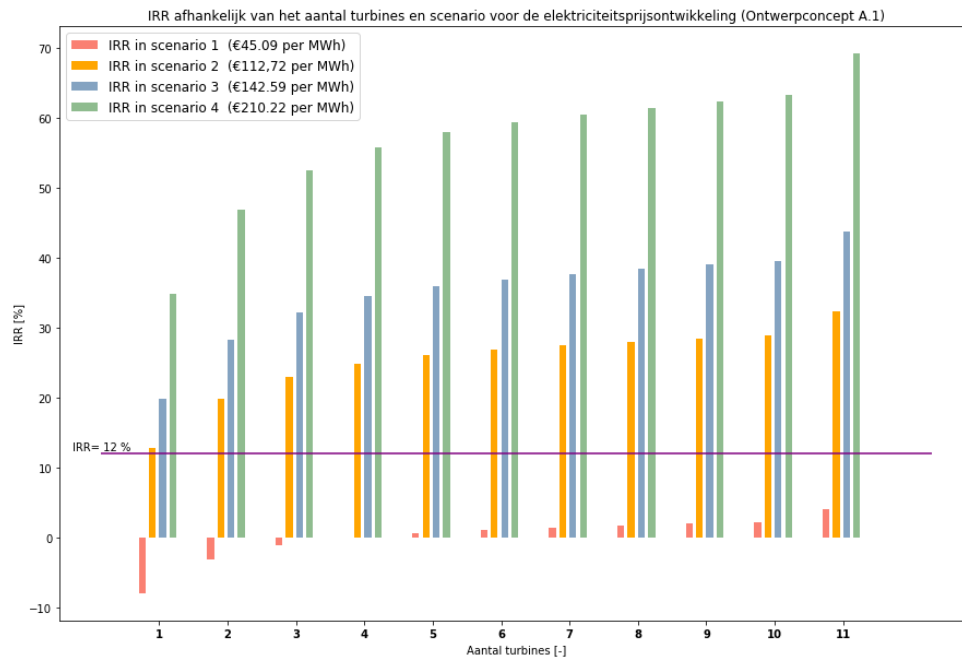
Deel 4 – Evaluatie van de varianten voor ontwerpconcept A.1 op basis van de project rendementen:

Zoals eerder opgemerkt, biedt de voorgaande analyse geen definitieve uitspraak over de economische haalbaarheid van de varianten, omdat het gewenste projectrendement nog niet is opgenomen in dit model. Zoals eerder beschreven, zal een derde commerciële partij de waterkrachtcentrale moeten exploiteren, omdat Rijkswaterstaat hier zelf geen interesse in heeft. Voor deze commerciële partij is het van cruciaal belang dat het project een bepaald rendement oplevert om aan hun financiële doelstellingen te voldoen.

Zoals uiteengezet in bijlage B.7, wordt het projectrendement berekend door de netto contante waarde van de opbrengsten te delen door alle kosten die gedurende de terugverdientijd worden gemaakt. In dit financiële model is een projectrendement van 12% aangenomen als financiële doelstelling. Deze aanname komt redelijk overeen met wat doorgaans wordt gehanteerd door commerciële partijen als minimale vereiste voor een haalbaar duurzaam energieproject. De daadwerkelijke financiële doelstelling kan echter variëren, afhankelijk van de complexiteit en het risico van het te ontwikkelen project, zowel technisch als institutioneel (Pronk et al., 2017).

Het is belangrijk op te merken dat in deze casestudie ervan uitgegaan wordt dat een commerciële partij het project zal exploiteren. Als Rijkswaterstaat besluit om zelf de exploitatie te verzorgen of als een burgercollectief deze taak op zich neemt, kan de financiële doelstelling mogelijk minder streng zijn.

Het projectrendement speelt een leidende rol bij het bepalen van de optimale variant en heeft voorrang boven de analyse in deel 3, die meer gedetailleerde inzichten verschaft. In Figuur C.13 wordt een grafisch overzicht gegeven van het projectrendement van de varianten onder verschillende scenario's voor de elektriciteitsprijs.



Figuur C.13: overzicht van de projectrendementen van de varianten op ontwerpconcept A.3, met daarin variërende elektriciteitsprijzen.

Uit Figuur C.13 kunnen waardevolle conclusies worden getrokken:

- In het geval dat de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs in de toekomst verloopt volgens scenario 1, blijkt dat geen van de varianten een haalbare businesscase oplevert. De projectrendementen van alle varianten liggen onder het gewenste project rendement van 12%.
- Om de optimale variant te vinden, moet worden gekeken naar een variant die in minimaal drie verschillende prijsscenario's het gewenste projectrendement behaalt. Uit Figuur C.13 blijkt dat dit voor alle varianten het geval is.
- De variant met 11 vijzelturbines levert ongeacht het scenario voor de elektriciteitsprijs het hoogste projectrendement op. Deze variant wordt beschouwd als de economisch optimale variant.
- Het is van essentieel belang om op te merken dat de gevonden projectrendementen relatief hoog zijn. Een projectrendement van 70% is onrealistisch. Er dient daarom opgemerkt te worden dat in de bovenstaande grafiek terug te zien is dat niet alle kosten, bijvoorbeeld de indirecte kosten, zijn meegenomen in het financieel model. Desalniettemin kan de grafiek wel uitstekend gebruikt worden om de varianten met elkaar te vergelijken.

Bijlage D – constructief ontwerp voor de ophangconstructie gebruikt in ontwerpconcept A.1 (uitneembare vijzelturbines)

Deze bijlage heeft betrekking op fase 5 van de aanpak, “Ontwerpen van de waterkrachtcentrale inpassing in de basisstuw”, deel 2, de verbeterde ontwerpconcepten (Paragraaf 7.1.2). In deze bijlage wordt de optimale variant van ontwerpconcept A.1, een uitneembare waterkrachtcentrale met 11 vijzelturbines, constructief uitgewerkt om te controleren er een draagconstructie ontworpen kan worden die constructief voldoet.

Wanneer dit niet mogelijk is heeft het namelijk geen zin om dit ontwerpconcept met deze variant in de evaluatie te overwegen; het heeft geen zin om een uitgebreide evaluatie op functioneel niveau te doen wanneer in een vroeg stadium de constructieve haalbaarheid ingeschat kan worden. In de andere ontwerpalternatieven kan met een aangrenzende zekerheid worden gesteld dat het constructief mogelijk is. Een draagbalk van het verbeterde ontwerpconcept A.1 is echter dusdanig uniek dat voorafgaand aan de evaluatie al een inschatting moet worden gemaakt of dit überhaupt mogelijk is. In dit hoofdstuk is een eerste constructieve ontwerpplus doorlopen voor de draagbalk.

- **Het maken van een keuze tussen een draagbalk of een vakwerk:**

A priori wordt geconcludeerd dat het uitvoeren van de draagbalk als een ligger niet opportuun wordt geacht. Dit zou een te zware en kolossale ligger worden. Op basis van het hoge eigengewicht, 11 vijzelturbines inclusief ophanging, in combinatie met de relatief grote overspanning, 50 m, wordt aangenomen dat er geschikt profiel beschikbaar is voor een draagbalk. Bovendien zou dit een dure oplossing zijn. Het is voor een dergelijke constructie gebruikelijker om een vakwerkconstructie toe te passen (Abspoel et al., 2013). Dit zijn namelijk constructies met een hoge stijfheid en sterkte.

In deze bijlage wordt een grof ontwerp voor de draagconstructie gemaakt en geverifieerd. In deze eerste haalbaarheidsstudie wordt het ontwerp nog niet geoptimaliseerd. Dit dient te worden gedaan in de constructieve ontwerpplus als dit ontwerpconcept optimaal blijkt te zijn.

Het ontwerp wordt ontwikkeld op basis de volgende toetsingen:

1. Sterkte toetsing (doorsnede krachten);
2. Knik stabiliteit;
3. Doorbuiging.

- **Ruimtelijk ontwerpen van het vakwerk (stap 1):**

In deze stap worden een schetsontwerp gemaakt en aannames voor de staafprofielen gemaakt.

Een vakwerk kan vlak of ruimtelijk worden uitgevoerd. In eerste instantie is aangenomen om een vlak vakwerk uit te werken omdat deze voornamelijk wordt belast in verticale richting op het maatgevende moment. Dit betreft een eerste constructieve ontwerp. Een optimalisatie in deze keuze is achterwege gelaten.

De volgende stap is het ruimtelijk ontwerpen van een vlak vakwerk. De volgende uitgangspunten met betrekking tot de ruimtelijke indeling worden voor dit ontwerp gebruikt:

- De hellingshoek voor de diagonalen is 45 graden;
- Het vakwerk wordt zo ontworpen dat de krachten exact aangrijpen in de knooppunten. Dit komt ten goede aan de manier van krachtafdracht. Deze eis in combinatie met het feit dat de diagonale een hoek van 45 graden hebben, heeft er leidt tot een vakwerkhogte van 2,25 m. Wanneer deze hoogte en hellingshoek worden aangehouden is de afstand tussen twee knopen in de orderregel precies 4,5m. Dit komt overeen met de uitwendige/totale breedte van de vijzelturbines.

Technical drawing of a roof plan for a building with a gabled roof. The drawing shows a rectangular roof with a total width of 50 m and a total length of 1.125 m. The roof is divided into 10 bays by 11 vertical lines. The height of the roof is 2.25 m. The roof is supported by 11 columns, each with a diameter of 4.5 m. The roof is covered with a material with a thickness of 1.125 m. The drawing includes dimensions for the roof height, column diameter, and bay width.

De volgende stap is het maken van een eerste aanname voor de profielen van het vakwerk. Deze profielen worden weergegeven in Figuur D.2. In de onderstaande figuur zijn twee assenstelsels weergegeven: het rode assenstelsel wordt gebruikt voor de lastendefinitie en het model om de staafkrachten te bepalen, het blauwe assenstelsel wordt gebruikt voor het definiëren van de profiel richtingen van de bovenregel en onderregel. Het profiel is namelijk liggend gebruikt in plaats van staand waardoor de waardes voor onder andere de traagheidsmomenten niet meer over een komen met het rode assenstelsel.



De benodigde informatie van de profielen wordt weergegeven in Tabel D.1, respectievelijk de ligger- en diagonaalstaven. De getoonde informatie is afkomstig van Dlubal (2023).

Tabel D.1: relevante profile-informatie van de onder-, bovenregel en diagonaalstaven voor de toetsing van het vakwerk. Informatie afkomstig van Dlubal (2023).

Onder- en bovenregel:			
Type: RHS (=Rectangular Hollow Section)			
180x80x12.5			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h_r	80	mm
Breedte	b_r	180	mm
Dikte	t_r	12,5	mm
<u>Relevante parameters:</u>			
Staalsoort	σ_s	355	N/mm ²
Oppervlak	A	57,10	cm ²
Traagheidsmoment	I_y	2034,00	cm ⁴
Traagheidsmoment	I_z	522,00	cm ⁴
Elastische weerstandmoment (y-as)	$W_{el,y}$	226,00	cm ³
Elastische weerstandmoment (z-as)	$W_{el,z}$	113,00	cm ³
Gewicht per strekkende m	-	44,5	kg/m'
Diagonaalstaven:			
Type: SHS (=Square Hollow Section)			
80x80x6			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h_d	80	mm
Breedte	b_d	80	mm
Dikte	t_d	6	mm
<u>Relevante parameters:</u>			
Staalsoort	σ_s	355	N/mm ²
Oppervlak	A	16,83	cm ²
Traagheidsmoment	I_y	149,18	cm ⁴
Traagheidsmoment	I_z	298,36	cm ⁴
Elastische weerstandmoment	$W_{el,y}$	37,29	cm ³
Gewicht per strekkende m	-	13,2	kg/m'

- **Vaststellen van de maatgevende situatie (stap 2)**

Uiteindelijk dient in de definitieve constructieve ontwerplus de constructie zowel uitvoerig in de horizontale richting als de verticale richting geverifieerd te worden. Aangezien dit een eerste haalbaarheid studie is die voornamelijk gericht is op het functionele ontwerp, is er gekozen om de constructie enkel verticaal door te rekenen.

Voor de verticale verificatie is een situatie maatgevend waarin de vijzelturbines volledig boven de waterlijn worden geheven. Wanneer de vijzelturbines namelijk boven het water zijn geheven werkt de de opwaartse waterdruk niet gunstig.

Naast de verticale belasting omlaag kan er ook een verticale belasting omhoog optreden in de vorm van windbelasting. Dit kan tevens een maatgevende situatie zijn voor bepaalde vakwerkstaven. Voor deze eerste constructieve ontwerplus is het belastinggeval met windbelasting buiten beschouwing gelaten. Er wordt verwacht dat dit niet de maatgevende situatie is aangezien aangenomen wordt dat 11 vijzelturbines dusdanig zwaar zijn dat dit wel de maatgevende belastingsituatie moet zijn. In een vervolgstudie moet het vakwerk ook nog getoetst worden op de windbelasting.

Naast de verticale belasting wordt het vakwerk ook horizontaal belast. Onder andere door de hydraulische belasting, zowel waterdruk als meevoerend, en/of wind. In deze fase is dit achterwegen gelaten omdat dit niet in vergelijking met de verticale belasting een relatief kleine belasting is. Tevens zijn er een hoop ontwerp oplossingen beschikbaar die het ontwerp niet ingrijpend doen veranderen. Een voorbeeld van een dergelijke ontwerp oplossing is om het vakwerk ruimtelijk te maken in plaats van vlak.

- **Aannames voor de verificatie (stap 3):**

Voorafgaand aan de toetsing van het ontwerpen vakwerk moeten nog een aantal aannames worden gemaakt:

1. Er zit in de maatgevende situatie geen water meer in de turbines. Het water stroomt namelijk tijdens de heffingsprocedure die uit de turbines. Tijdens de beginfase van het heffen staan de vijzelturbines namelijk nog schuin.
2. Aangezien bezwijken van de constructie grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens (enkele tientallen), en/of zeer grote economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving kan hebben, moet het vakwerk worden ontworpen op gevolgklasse CC3..
3. Dynamische belasting, zoals wind- en golfbelasting, worden in dit conceptuele ontwerp buiten beschouwing gelaten. Er wordt aangenomen dat de belasting van de turbines in de maatgevende situatie permanent op het vakwerk werken en op dezelfde plek aangrijpen. Verder wordt zoals hierboven beschreven de dynamisch werkende windbelasting buiten beschouwing gelaten. Het is voor een vervolgstudie echter wel belangrijk om te weten dat bij een dynamische belasting de vermoeingssterkte van de verbindingen meestal maatgevend zijn (Abspoel et al., 2013). Voor nu kan deze toetsing überhaupt buitenbeschouwing worden gelaten omwille van het doel van deze bijlage. Dat is niet een gedetailleerd constructief ontwerp bepalen, maar om een orde grote idee van het materiaalgebruik te krijgen en in te schatten of een dergelijke draagconstructie realistisch is. Hiervoor is een optimaal ontwerp nog niet nodig. Er wordt verondersteld dat de verbindingen kundig te ontwerp zijn en dat het wat betreft vermoeingssterkte dus voldoet.
4. In deze eerste analyse wordt windkracht buitenbeschouwing gelaten. De verwachting is dat dit gunstig zou werken.
5. Voor de gravitatiekracht wordt een waarde van 9,81 m2/s aangenomen.

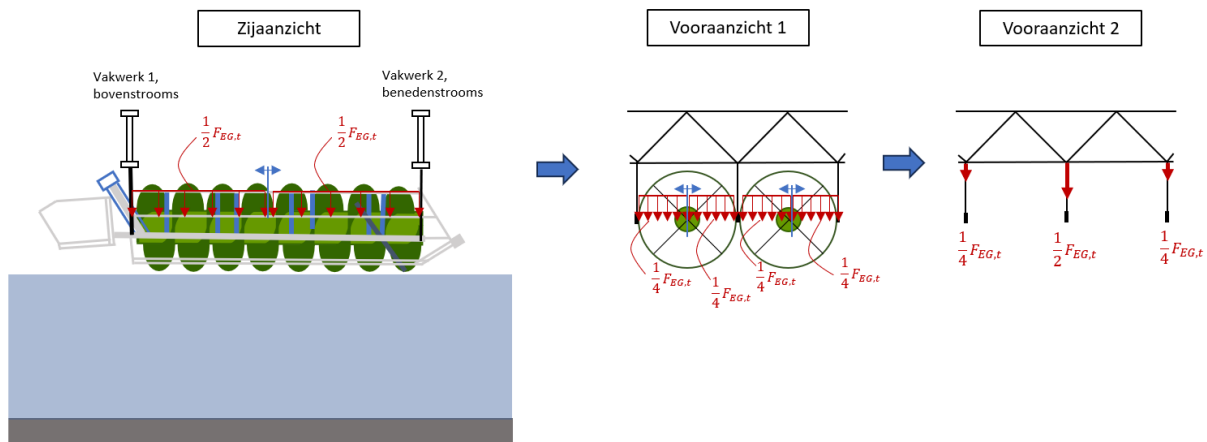
- **Schematisering van de constructiemechanicaschema (stap 4):**

In Figuur D.3 wordt de krachtafdracht voor de maatgevende situatie getoond. Vervolgens wordt in Figuur D.4 weergegeven hoe dit in het MatrixFrame-model waarmee de staafkrachten en doorbuiging wordt bepaald is gemodelleerd.

De volgen de krachten werken op het vakwerk:

- Het eigengewicht van de vijzelturbines ($F_{EG,t}$):
Het eigengewicht wordt op vier plekken, 2 staven voor en 2 staven achter, afgedragen naar de vakwerken. In dit ontwerp wordt aangenomen dat het gewicht van vijzelturbines in de maatgevende, horizontale, situatie gelijk verdeelt wordt over deze punten. De helft van het eigengewicht van de vijzelturbine wordt dus opgenomen door het bovenstroomse vakwerk en de andere helft door het benedenstroomse vakwerk zoals weergegeven in Figuur D.3. Vervolgens wordt de helft van deze kracht opgenomen door de linker verbinding tussen de vijzelturbine en het vakwerk en de andere helft door de rechter. Dus per ophangpunt van de vijzelturbines wordt $\frac{1}{4}$ van het totale eigengewicht van de vijzelturbines opgenomen.

Zoals hierboven beschreven is het constructief gewenst om de krachten in de knooppunten van de vakwerken te laten aangrijpen. Naar aanleiding hiervan is er gekozen om via één verbinding de kracht van twee vijzelturbines naar het vakwerk te transfereren. Dit is zichtbaar in vooraanzicht 2 weergegeven in Figuur D.3. De middelste verbinding neemt zowel $\frac{1}{4}$ van het eigengewicht van de linker als rechter vijzelturbine op. De buitenste verbindingen, waaraan maar één vijzelturbine is bevestigd, neemt maar $\frac{1}{4}$ van het eigengewicht van een turbine op.

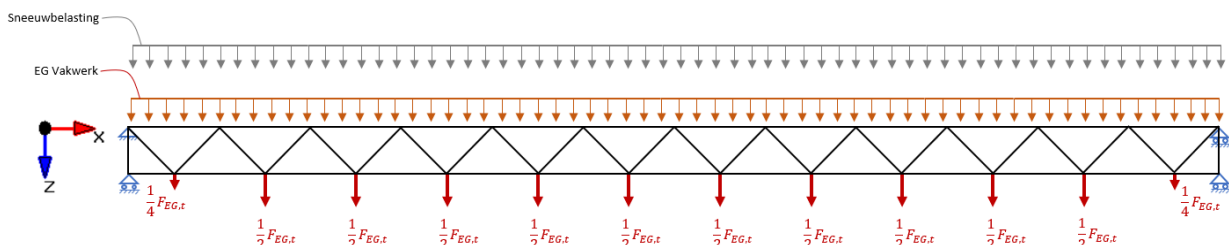


Figuur D.3: schematisering van de krachtafdacht van de vijzelturbines naar het vakwerk.

In het rapport 'Vijzels en vissen' (Baeyens et al., 2020) wordt het gewicht van een vergelijkbare vijzelturbine gegeven.) wordt aangenomen dat het gewicht van de gekozen vijzelturbines ongeveer 42,5 ton is. In dit rapport wordt het gewicht van een vijzelturbines gegeven die de zelfde diameter heeft maar twee keer zolang is. Naar proportie wordt het gewicht van de vijzelturbine in deze thesis berekend. De vijzelturbine in dat rapport weegt ongeveer 85 ton. Er wordt aangenomen dat het eigengewicht van de vijzelturbines in dit rapport neerkomt op 42,5 ton.

- Het eigengewicht van het vakwerk ($q_{EG,vakwerk}$):
dit is een continue q-last die over de volledige breedte van vakwerk werkt. Voor de profielen is een gewicht per strekkende meter gedefinieerd waarmee dit berekend kan worden.
- Sneeuwbelasting:
Dit is wederom een q-last die over de volledige breedte van het vakwerk werkt. De sneeuw dat op het vakwerk zelf valt wordt als enige meegenomen. Er wordt namelijk aangenomen dat sneeuw niet blijft liggen op de turbines omdat deze cilindervorming zijn waardoor het sneeuw van de turbines afschuift.

De bovenstaande beschrijving van de belastingen resulteert in het belastingschema zoals weergegeven in Figuur D.4. Dit is een modelering van het vakwerk in MatrixFrame.



Figuur D.4: MatrixFrame-Model van het vakwerk.

• Bepalen van het maatgevende belastingschema (stap 5):

De volgende stap is het bepalen van het maatgevende belastingschema. Er wordt gekozen om een deterministische toetsing uit te voeren. Dit volstaat voor de conceptuele ontwerpfase. De eerste stap is dan het bepalen van de partiele veiligheidsfactoren.

De sterkte en stabiliteit moet getoetst worden op de uiterste grenstoestand (ULS, Engels: ultimate limit state). Hiervoor wordt de volgende uitdrukking voor de belastingen gebruikt afkomstig uit het boek 'Quick Reference' (Pasterkamp et al., 2015):

$$\gamma_g \cdot G_k + \gamma_{Q;1} \cdot Q_{1;k} + \sum(\gamma_{Q;i} \cdot \Psi_{0;i} \cdot Q_{i;k})$$

Waarin:

γ_g = partiële veiligheidsfactor voor permanenten belasting

G_k = totale permanenten belasting

$\gamma_{Q;i}$ = partiële veiligheidsfactor voor variabele belasting

$Q_{1;k}$ = karakteristieke waarde van de maatgevende veranderlijke belasting

$\Psi_{0;i}$ = combinatie factor voor variabele belasting i

$Q_{i;k}$ = karakteristieke waarde van veranderlijke belasting i

De waarden voor de partiele veiligheidsfactoren zijn bepaald op basis van het boek 'Quick Reference' (Pasterkamp et al., 2015). De vereiste gevolgklasse, cc3, vereist dat de waarden uit de 'Quick Reference' worden vermenigvuldigd met K_{fi} , voor gevolgklasse cc3 is deze factor 1,1. Uiteindelijk zijn de afgeronde, gebruikelijke, waarde die gepresenteerd worden in de 'Quick Reference' gebruikt (Pasterkamp et al., 2015):

Tabel D.2: de relevante partiele veiligheidsfactoren. Afkomstig van Pasterkamp et al. (2015).

K_{fi}	Partiële factor voor permanente belasting (γ_g)	Partiële factor voor gunstig werkende belasting	Partiële factor voor veranderlijke belasting ($\gamma_{Q;i}$)
1,1	1,5	0,9	1,65

Nu de partiele veiligheidsfactoren bekend zijn kunnen de rekenwaarde van de belastingen worden bepaald. Een overzicht van de belastingen, de karakteristieke waarde, de bijbehorende partiele factoren en de rekenwaarde van de belasting worden weergegeven in Tabel D.3. De totale karakteristieke belasting van het eigengewicht van een vijzelturbine bedraagt 416.925 kN. De karakteristieke waarde van de sneeuwbelasting is afkomstig uit de eerder genoemde boek 'Quick Reference'. Om een 1-Dimensionale q-last te bepalen moet de gegeven waarde vermenigvuldigd worden met de diepte van het vakwerk, 180 mm.

Tabel D.3: Belastingen op het vakwerk.

Permanente belasting: (EG vakwerk + EG vijzelturbines)						
EG vakwerk:						
Onderdeel	Type belasting	Gewicht	Karakteristieke belasting	γ_g	Rekenwaarde belasting	
Randstaven (2x)	lijnlast	44,5 [kg/m']	0,437 [kN/m']	1,5	0,655 [kN/m']	
Diagonale	lijnlast	13,2 [kg/m']	0,129 [kN/m']	1,5	0,194 [kN/m']	
Totaal vakwerk	lijnlast	57,7 [kg/m']	1,002 [kN/m']	1,5	1,504 [kN/m']	
EG vijzelturbines						
Onderdeel	Type belasting	Karakteristieke belasting van 1 puntlast	γ_g	Rekenwaarde belasting van 1 puntlast		
Belasting op buitenste verbindingen	Puntlast	104,231 [kN]	1,5	156,347 [kN]		
Belasting op resterende, binnenste, verbindingen	Puntlast	208,462 [kN]	1,5	312,693 [kN]		
Veranderlijke belasting: (sneeuwbelasting)						
Sneeuwbelasting:						
Karakteristieke	Type	Breedte	Belasting per	$\gamma_{0,i}$	Rekenwaarde	

waarde	belasting		strekken meter (q-last)	belasting
0,56 [kN/m ²]	lijnlast	180 [mm]	0,1 [kN/m']	1,65 0,17 [kN/m']

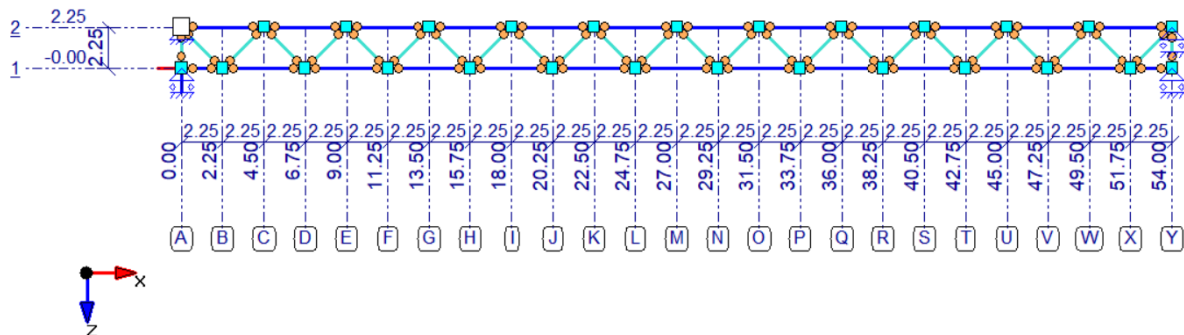
1. Bepalen van de doorsnede-krachten (stap 6):

De doorsnede-krachten worden bepaald door het vakwerk te analyseren met een MatrixFrame-model. Uit het MatrixFrame-model volgen de doorsnede krachten: het buigend moment, de dwarskracht en de normaalkracht.

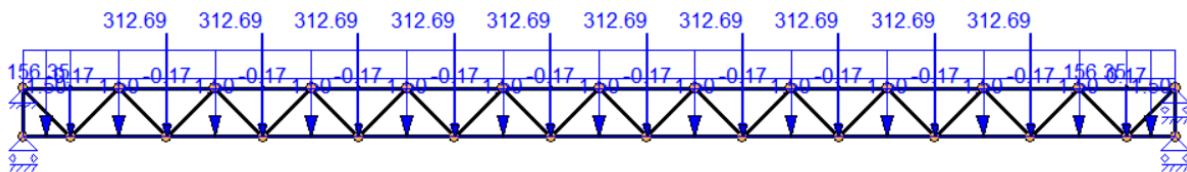
Voor de modelering van het vakwerk zijn een aantal aanvullende aannames gemaakt:

- De knopen worden als scharnieren uitgevoerd in het model;
- De belasting van de vijzelturbines grijpt exact aan in het knooppunt. Op basis van dit uitgangspunt is het ruimtelijk ontwerp van het vakwerk opgesteld;
- De vakwerkligger wordt zodanig gedetailleerd dat een excentriciteitsmomenten in de knooppunten niet optreden. Als dit niet het geval zou zijn mogen de knopen niet als scharnieren worden gemodelleerd
- Geen iteratieve stap ondergaan dat nieuwe profielen, als de gekozen profielen niet voldoen, verwerkt zijn in het matrixframe model. Leg uit dat dit geen probleem is. Zoals later bewezen wordt is de impact op de belasting klein.

Figuur D.5 toont de geometrie van het MatrixFrame-model. In figuur D.6 wordt weergegeven hoe de belastingen zijn gedefinieerd in het model.

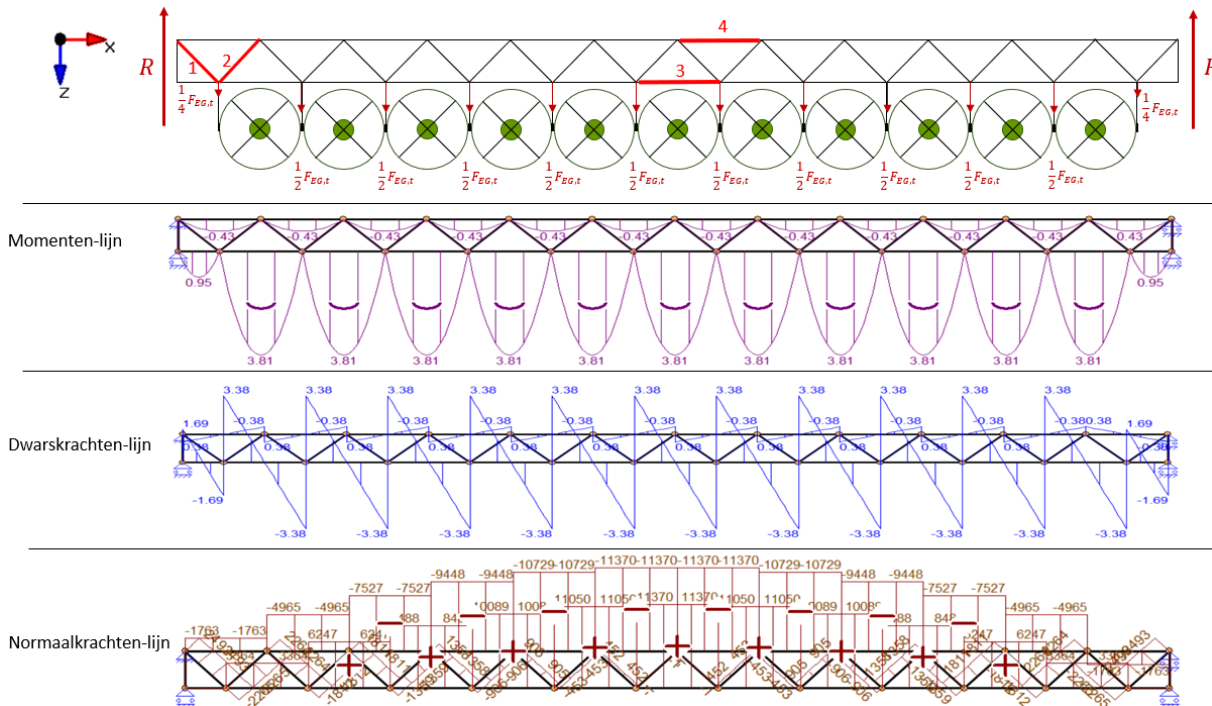


Figuur D.5: geometrie van het MatrixFrame-model.



Figuur D.6: Belastingdefinitie in het MatrixFrame-model van de maatgevende situatie.

De resultaten, de doorsnede-krachten, van het matrixframe-model worden weergegeven in Figuur D.7.



Figuur D.7: De resultaten, de doorsnede-krachten, van het matrixframe-model.

2. Deterministische toetsing van het vakwerk (stap 7):

Het vakwerk dient getoetst te worden op:

- Sterkte;
- Knik- en kipstabiliteit;
- Verplaatsing.

In de bovenste diagram van Figuur D.7 wordt aangeduid welke staven de maatgevende zijn. Deze zijn bepaald op basis van de doorsnede-krachten die volgen uit het MatrixFrame-model. De aangegeven staven zijn maatgevend voor het gehele vakwerk. Als eerst worden de maatgevende diagonalen, in Figuur D.7 aangegeven met staafnummer 1 en 2, getoetst. Daarna worden de maatgevende liggerstaven, in Figuur D.7 aangegeven met staafnummer 3 en 4, getoetst.

Deel 1 - Toetsing diagonalen:

De toetsing van de sterkte van de vakwerkliggers bestaat uit een toetsing van de afzonderlijke staven van het vakwerk op gelijktijdig optreden van normaalkracht, dwarskracht en momenten.

De diagonaalstaaf nabij de oplegging, staaf 1, is de maatgevende diagonaalstaaf van het vakwerk met betrekking tot trekkracht. Deze dient op getoetst te worden op trekcapaciteit, ook wel de sterkte. De maximale drukkracht in de diagonalen treed op in de staaf aangegeven met staafnummer 2 in Figuur D.7. Deze dient getoetst te worden op knip- en mogelijk kipstabiliteit.

Toets 1 – sterkte (diagonaal 1):

Doorgaans dient in de sterkte toetsing de normaalkracht en het buigend moment tezamen behandeld te worden aangezien beide leiden tot normaalspanningen in de doorsnede (Abspoel et al., 2013). Echter zoals in Figuur D.7 te zien is, treedt in de diagonalen geen buigend moment en dwarskracht op. Hierdoor hoeft de sterkte enkel getoetst te worden op basis van de gevonden trekkracht. Uit matrixframe volgt dat de normaalkracht in staaf 1 ($N_{Ed,1}$) 2493 kN bedraagt. De volgende unity check moet uitgevoerd worden om te toetsen of het vakwerk deze belasting kan weerstaan.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1 \quad (\text{vgl. D.1})$$

Waarin:

$$N_{Ed} = \text{rekenwaarde van de normaalkracht} = 2493 \text{ [kN]}$$

$$N_{Rd} = \text{rekenwaarde van de normaalkracht capaciteit}$$

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} \quad (\text{vgl. D.2})$$

Waarin:

$$A = \text{oppervlak van het staalprofiel} = 1683 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$f_y = \text{vloeigrens staalsoort (S355)} = 355 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\gamma_{M,0} = \text{materiaalfactor staal} = 1,0$$

Dit resulteert in een rekenwaarde van de normaalkracht capaciteit van:

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} = 1683 \cdot 355 = 598 \text{ kN}$$

$$UC := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{2493}{598} = 4,17 \rightarrow \text{dus voldoet NIET}$$

Het gekozen profiel voor de diagonaalstaven voldoet niet. Iteratief is naar een nieuw profiel gezocht. De uitkomst hiervan is dat een vierkant SHS-180x180x12,5-profiel wel voldoet:

$$UC := \frac{2493 \cdot 1000}{355 \cdot 7704} = 0,91 \rightarrow \text{dus voldoet WEL}$$

De karakteristieke voor het nieuwe profiel worden weergegeven in Tabel D.4.

Tabel D.4: karakteristieke voor vierkant staalprofiel 180x180x12,5. Afkomstig van van Dlubal (2023).

Diagonale-staven:			
Type: SHS (=Square Hollow Section) 180x180x12,5			
<u>Dimensies:</u>			
Hoogte	h_d	180	mm
Breedte	b_d	180	mm
Dikte	t_d	12,5	mm
<u>Relevante parameters:</u>			
Staalsoort	σ_s	355	N/mm ²
Oppervlak	A	77,04	cm ²
Traagheidsmoment	I_y	3406	cm ⁴
Traagheidsmoment	I_z	3406	cm ⁴
Elastische weerstandmoment	$W_{el,y}$	378,49	cm ³
Gewicht per strekkende m	-	60,5	kg/m'

Toets 2 – (knik)stabiliteit (diagonaal 2):

Diagonaal twee zoals aangegeven in D.7 treedt de maximale drukkracht op. Deze staaf moet daarom worden getoetst op knikstabiliteit.

Door de aanname om horizontale krachten achtereven te laten en deze toetsing dus ook. Doordat er nog een ruimtelijk vakwerk ontworpen moet worden maar dit niet het maatgevende aspect (voor het materiaal gebruik is) wordt kip instabiliteit en de toetsing hiervan niet opgenomen in dit rapport. Geen lateraal torsie moment aanwezig. Wellicht klopt deze aanname niet helemaal. Bijvoorbeeld wanneer de waterkracht en windkracht kunnen een dergelijk moment de constructie opleggen. Wanneer verder wordt gewerkt met dit ontwerp zal de constructie ook hierop getoetst moeten worden. Op dit moment wordt aangenomen dat het ontwerp ten gevolge van de verticale toetsingen zo robuust uitgevoerd worden dat dit geen probleem is; de kracht in verticale richting is significant veel groter.

Uit het matrixframe-model volgt dat staaf 2 de diagonaal staaf is die op de maatgevende druk wordt belast. In deze staaf werkt een rekenwaarde van de drukkracht van 2265 kN. Deze dient op knikstabiliteit getoetst te worden:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (\text{vgl. D.3})$$

Waarin:

N_{Ed} = rekenwaarde van de drukkracht = 2493 [kN]

$N_{b,Rd}$ = rekenwaarde van de knikcapaciteit van het gedrukte element

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M,1}} \quad (\text{vgl. D.4})$$

Waarin:

χ = de knikfactor voor de van toepassing zijnde knikvorm

$\gamma_{M,1}$ = de modelfactor voor de berekeningen die de stabiliteit betreffen = 1,0

De knikfactor(χ) is de enige resterende parameter die nog bepaald moet worden. Deze kan met de volgende formule bepaald worden:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (\text{vgl. D.5})$$

Waarin:

$\bar{\lambda}$ = de relatieve slankheid

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (\text{vgl. D.6})$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{F_{euler}}} \quad (\text{vgl. D.7})$$

De volgende stap is het bepalen van de Eulerse knikkracht (F_{euler}) en de imperfectiefactor (α). Om de eulerse knikkracht te bepalen wordt de volgende formule gebruikt:

$$F_{euler} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_{buc}^2} \quad (\text{vgl. 8.8})$$

Waarin:

$$E = \text{elasticiteitsmodules van staal} = 210.000 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$I = \text{traagheidsmoment} [mm^4]$$

$$l_{buc} = \text{kniklengte}$$

Het vierkant buisprofiel dat volgt uit het iteratieve proces op basis van de sterkte toetsing wordt op knikstabiliteit getoetst. In tabel xx zijn waarden van de relevante parameters gegeven. Het betreft een vierkant buisprofiel. Dit zorgt ervoor dat het traagheidsmoment om de y-as en z-as hetzelfde zijn. Hierdoor is de imperfectiefactor voor knikken om beide assen gelijk. Het uitknikken zal plaatsvinden in de richting waarin de diagonaal de grootste kniklengte heeft. In dit geval betekent dat de lengte van een diagonaal als kniklengte genomen moet worden.

$$l_{buc} = \sqrt{h_{vakwerk}^2 + b_{sectie}^2} = \sqrt{2,25^2 + 2,25^2} = 3,18 [m]$$

Uit de bovenstaande eigenschappen voor het gekozen profiel en de kniklengte van de diagonalen volgt de Eulerse knikkracht:

$$F_{euler} = \frac{\pi^2 \cdot 210.000 \cdot (3406 \cdot 10^4)}{3,18 \cdot 1000} = 22.199.161 [kN]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{F_{euler}}} = \sqrt{\frac{(7704 \cdot 355)/10^6}{22.199.161}} = 0,0111$$

De imperfectiefactor(α) wordt bepaald op basis van knikkromme (Abspoel et al., 2013). Op dit moment wordt aangenomen dat de profielen warm vervaardigd worden. Voor een rechthoekig buisprofiel betekent dit dat stuwkromme a gebruikt moet worden. Dit resulteert in een imperfectiefactor(α) van 0,21. Alle waarde die nodig zijn om de knikfactor te berekeningen met vergelijking D.5 en D.6 zijn nu bekend:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21(0,0111 - 0,2) + 0,0111^2] = 0,48$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,48 + \sqrt{0,48^2 - 0,0111^2}} = 1,04$$

De rekenwaarde voor de knikcapaciteit kan nu bepaald worden met vergelijking D.4:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M,1}} = \frac{1,04 \cdot 7704 \cdot 355}{1,0} = 2849 [kN]$$

De unity check voor de knikcapaciteit (vergelijking D.3):

$$UC := \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2265}{2849} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{dus voldoet WEL}$$

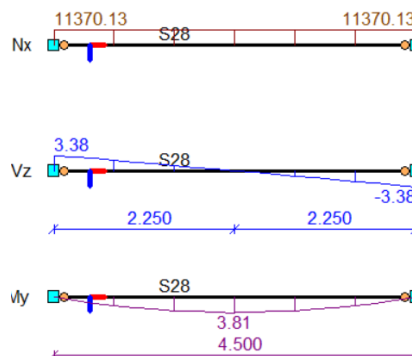
Het gekozen profiel voldoet tevens aan de toets voor knikstabiliteit.

Deel 2 - Toetsing liggers:

Aan de hand van matrixframe kan worden vastgesteld dat in staven 3 en 4 de grootste staafkrachten optreden, dit is grafisch te zien in Figuur D.7. In de onderregel, staaf 3, treedt de maximale trekkracht op. Deze dient enkel getoetst te worden op de trekcapaciteit. In de onderregel treedt tevens een buigend moment op. Het is belangrijk om in de toetsing zowel normaalkrachten als het buigend moment te betrekken. Wat betreft de knikstabiliteit zijn de randstaven in de bovenregel maatgevend, deze worden namelijk op druk belast.

Toets 3 – sterkte (staaf 3):

In Figuur D.8 worden alle krachten die in deze staaf werken getoond. Het maximale moment treedt op in het midden van de ligger en de maximale dwarskracht juist aan beide uiteinden van de staaf. De maximale waarden van de optredende buig- en schuifspanningen hoeven daarom niet te worden gecombineerd. Het blijkt dat in belastinggeval gebruikt in deze bijlage het toetsen van deze afzonderlijke doorsneden op alleen buiging of alleen dwarskracht volstaat om aan te tonen dat de ligger t.a.v. deze aspecten veilig is.



Figuur D.8: doorsnede krachten voor staaf 3 uit het MatrixFrame model.

Dus de doorsnede in staaf 3 wordt zowel belast op normaalkracht, trekkracht, als een buigend momenten. In de maatgevende staaf 3 treedt een trekkracht (N_{Ed}) van 11370 kN op en een buigend moment ($M_{y,Ed}$) van 3,81 kNm. Deze combinatie kan getoetst worden met de volgende unity check:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1 \quad (\text{vgl. D.9})$$

Hoe het huidige vakwerk is gemodelleerd treedt er alleen een buigend moment om de y-as op. De rekenwaarde van de elastische capaciteit van de doorsnede voor buiging om de y-as ($M_{el,y,Rd}$) kan met de volgende formule berekend worden, let op er is aangenomen dat horizontale belasting achterwegen mag worden gelaten:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y,min} \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} \quad (\text{vgl. D.10})$$

Waarin:

$W_{el,y,min}$ = kleinste waarde van het elastische weerstandmoment van de doorsnede

De waarde voor deze parameter van het gekozen profiel (Tabel D.1) bedraagt 226,00 cm³. Invullen van vergelijking D.10 geeft de volgende rekenwaarde van de elastische capaciteit van de doorsnede voor buiging om de y-as:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{226,0 \cdot 10^3 \cdot 335}{1,0} = 80,23 \text{ [kNm]}$$

De rekenwaarde voor de normaalkracht-capaciteit kan berekend worden met vergelijking D.2. De oppervlakte van het gekozen profiel bedraagt 5710 m².

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{5710 \cdot 335}{1,0} = 2027,05 \text{ [kN]}$$

Dit resulteert in de volgende unity check:

$$UC := \frac{11370}{2027,05} + \frac{3,81}{80,23} = 5,66 \rightarrow \text{dus voldoet NIET}$$

Om te voldoen aan deze toetsing moet het oppervlak van het profiel ongeveer 330 cm² bedragen. Er zijn geen rechthoekige buisprofielen beschikbaar met een dergelijk oppervlak. Dit betekent dat hogere sterkte benodigd is. Er wordt daarom gekozen om de randstaven uit te voeren in hoogwaardig staal S690. Alleen het verhogen van de kwaliteit van het staal volstaat nog niet, daarnaast dient het profiel tevens toe te nemen. Er wordt gekozen voor een RHS 350x250x16 profiel. Hieruit volgt de volgende toetsing:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{new} \cdot f_{y,new}} + \frac{M_{el,y,Ed}}{W_{el,y,min} \cdot f_y} = \frac{11370 \cdot 10^3}{179 \cdot 690} + \frac{3,81 \cdot 10^6}{1715 \cdot 10^3 \cdot 690} = 0,92 \rightarrow \text{dus voldoet WEL}$$

Let op, het toegenomen gewicht in de belasting van het eigen gewicht ten gevolgen van robuustere, grotere, profielen is in deze unity check nog niet meegenomen. Desalniettemin mag verwacht worden dat de uitkomst hierdoor niet significant veranderd aangezien dit een relatief kleine verandering in belasting is ten opzichte van het gewicht van de vijzelturbines. In een vervolg studie moet dit nog een keer worden nagekeken. Voor nu zijn de conclusie dat een dergelijk vakwerk te ontwerpen is en het materiaalgebruik wat hiermee grof geschat kan worden voor de kosten berekening voldoende.

Profiel info, voor nu aangenomen dat alle randstaven uitgevoerd worden met het gevonden profiel dat wel voldoet. In de praktijk hoeft dit echter niet zo te zijn. In Tabel D.5 worden de karakteristieke voor het nieuwe profiel gegeven.

Tabel D.5: karakteristieke voor het gevonden rechthoekige staalprofiel 180x180x12,5. Afkomstig van van Dlubal (2023).

Liggers:			
Type: RHS (=Rectangular Hollow Section)			
350x250x16			
Dimensies:			
Hoogte	h_r	250	mm
Breedte	b_r	350	mm
Dikte	t_r	16	mm
Relevante parameters:			
Staalsoort	σ_s	690	N/mm ²
Oppervlak	A	179,00	cm ²
Traagheidsmoment	I_y	30011,00	cm ⁴
Traagheidsmoment	I_z	17654,00	cm ⁴
Elastische weerstandmoment (y-as)	$W_{el,y}$	1715,00	cm ³
Elastische weerstandmoment (z-as)	$W_{el,z}$	1412,00	cm ³
Gewicht per strekkende m	-	140,5	kg/m'

Toets 4 – knikstabiliteit (staaf 4):

In deze staaf treedt de maximale drukkracht in een randstaaf op. Deze dient getoetst te worden op de knikstabiliteit. In deze toetsing is wordt enkel getoetst op de drukkracht ondanks dat er ook een primair moment op deze staaf werkt. Dit is echter een relatief klein moment 0,43 kNm. Daarom is het geoorloofd om in deze eerste constructieve berekening het moment achterwegen te laten. Wanneer het definitieve ontwerp gemaakt wordt is aan te raden om deze wel mee te nemen.

Bij de staven moet goed worden gekeken naar de knik in en uit het vlak van het vakwerk. Met name de kniklengte wordt hierdoor beïnvloed. Bij knik in het vlak is er sprake van buiging om de y-as zoals die is weergegeven in figuur D.5, het matrixframe model. Terwijl bij knik uit het vlak er sprake is van buiging om de z-as. Let op het assenstelsel van de profielen kan anders georiënteerd zijn dan die van matrixframe.

Het is dus niet zo dat bij knik in het vlak het traagheidsmoment om de y-as zoals gegeven in Tabel D.1 gebruikt kan worden. Doordat de profielen gedraaid zijn, liggend in plaats van staand, zijn deze anders georiënteerd en moet voor de randstaven voor knik in het vlak het traagheidsmoment om z-as (I_z) worden gebruikt.

4.1 Knik in het vlak:

Bij het uitknikken in het vlak van het vakwerk is er sprake van buiging om de z-as van het RHS 250x350x16 profiel. Voor het bepalen van de Eulerse knikkracht moet daarom het traagheidsmoment I_z worden gebruikt. Voor de kniklengte van deze staven wordt de afstand tussen de twee knooppunten van staaf 4 genomen ($l_{buc} = 4,5 \text{ m}$)

kniklengte bekend is kan met de unity check uit vergelijking D.3 de knikstabiliteit getoetst worden. Hiervoor dient de rekenwaarde van de knikcapaciteit van het gedrukte element ($N_{b,Rd}$) bepaald te worden. Voor staaf 4 wordt dit bepaald door de vergelijkingen die ook zijn gebruikt bij het controleren van de knikstabiliteit voor diagonaal staaf 2 gebruikt. In Tabel D.6 zijn de resultaten van de tussenstappen weergegeven. Voor deze berekeningen zijn de waarden voor de parameter genomen die weergegeven worden in Tabel D.4.

Tabel D.6: Berekening van de knikcapaciteit inclusief resultaten van de tussenstappen.

*1: Het betreft wederom een warm gewalst profiel. Voor een rechthoekig profiel moet dan een imperfectiefactor (α) van 0,21 worden gebruikt.

Stap	Parameter	Symbool	Vgl. nr.	De vergelijking	Waarde	Eenheid
1.	Eulerse knikkracht	F_{euler}	D.8	$F_{euler} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_{buc}}$	$1,38 \cdot 10^8$	[kN]
2.	De relatieve slankheid	$\bar{\lambda}$	-	$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{F_{euler}}}$	0,0095	[-]
3.	-	ϕ	-	$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$	0,48	[-]
4.	Reductie factor	χ	-	$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$	1,04	[-]
5	Knikcapaciteit	$N_{b,Rd}$	D.4	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M,1}}$	12866	[kN]

De rekenwaarde van de drukkracht (N_{Ed}) in staaf 4 bedraagt 11370 kN. De bovenstaande berekening van de knikcapaciteit leidt tot de volgende unity check (vergelijking D.3):

$$UC := \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{11370}{12866} = 0,88 \leq 1 \rightarrow \text{dus voldoet WEL}$$

Het gekozen profiel voldoet dus met betrekking tot de knikstabiliteit in het vlak. De laatste controle die uitgevoerd moet worden is knikken uit het vlak.

4.2 Knik uit het vlak:

Omdat de normaalkracht parabolisch verloopt en deze in de uiterste staven van de bovenregel geen nul zijn wordt de kniklengte met de volgende vergelijking bepaald (Koninklijke Staalfederatie, n.d.)

$$l_{buc} = l_{sys} \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,09 (N_0/N_4)}{2,09}} \quad (\text{vgl. D.11})$$

Waarin:

l_{sys} = de totale systeem lengte van het vakwerk = overspanning [m]

N_0 = de normaalkracht in de buitenste staaf [kN]

N_4 = de normaalkracht in staaf 4 [kN]

De systeem lengte(l_{sys}) is de volledige span van het vakwerk, dit komt neer op 54 m. De normaalkrachten volgen uit het matrixframe-model. Deze bedragen respectievelijke 1763 kN en 11370. De kniklengte is dus:

$$l_{buc} = l_{sys} \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,09 \left(\frac{1763}{11370} \right)}{2,09}} = 0,74 \cdot l_{sys} = 40,4 \text{ m}$$

Nu de kniklengte bekend is kan met de unity check uit vergelijking 8.3 de knikstabiliteit getoetst worden. Hiervoor dient de rekenwaarde van de knikcapaciteit van het gedrukte element ($N_{b,Rd}$) bepaald te worden. Voor staaf 4 wordt dit bepaald door de vergelijkingen die ook zijn gebruikt bij het controleren van de knikstabiliteit voor diagonaal staaf 2 gebruikt. In tabel xx zijn de resultaten van de tussenstappen weergegeven. Voor deze berekeningen zijn de waardes voor de parameter genomen die weergegeven worden in tabel xx.

Er is in dit geval bij het uitknikken spraken van buiging om de z-as zoals deze is aangegeven in het matrix-frame model. Voor het profiel is er dan spraken van buiging om haar y-as, aangezien deze liggend in plaats van staand worden toegepast. Voor het bepalen van de eulerse kniklast moet daarom het traagheidsmoment I_y worden gebruikt.

Het betreft wederom een warm gewalst profiel. Voor een rechthoekig profiel moet dan een imperfectiefactor(α) van 0,21 worden gebruikt. In Tabel D.7 zijn de resultaten inclusief de resultaten van de tussenstappen weergegeven. Voor deze berekeningen zijn de waardes voor de parameter genomen die weergegeven worden in Tabel D.5.

Tabel D.7: Berekening van de knikcapaciteit inclusief resultaten van de tussenstappen.

**1: Het betreft wederom een warm gewalst profiel. Voor een rechthoekig profiel moet dan een imperfectiefactor(α) van 0,21 worden gebruikt.*

Stap	Parameter	Symbol	Vgl. nr.	De vergelijking	Waarde	Eenheid
1.	Eulerse knikkracht	F_{euler}	D.8	$F_{euler} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_{buc}}$	$1,54 \cdot 10^7$	[kN]
2.	De relatieve slankheid	$\bar{\lambda}$	-	$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{F_{euler}}}$	0,028	[-]
3.	-	ϕ	-	$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$	0,48	[-]
4.	Reductie factor	χ	-	$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$	1,04	[-]
5	Knikcapaciteit	$N_{b,Rd}$	D.4	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M,1}}$	12813	[kN]

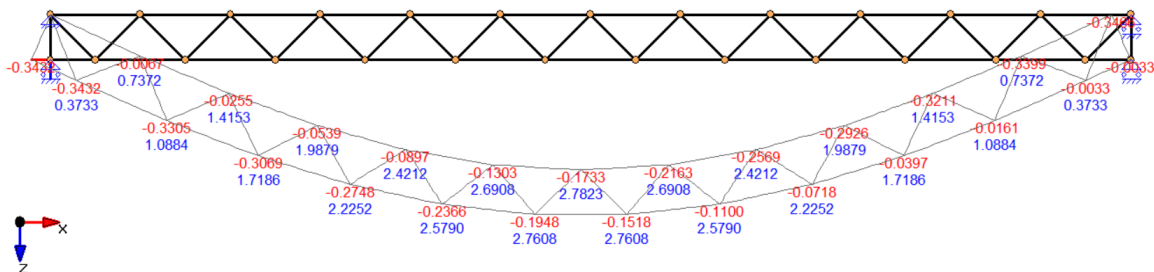
De rekenwaarde van de drukkracht(N_{Ed}) in staaf 4 bedraagt 11370 kN. De bovenstaande berekening van de knikcapaciteit leidt tot de volgende unity check (vergelijking D.3):

$$UC := \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{11370}{12813} = 0,89 \leq 1 \rightarrow \text{dus voldoet WEL}$$

Het gekozen profiel heeft voldoende knikcapaciteit om de drukkracht te weerstaan. Mocht men het ontwerp om welke reden dan ook nog willen optimaliseren maar vormt de knikcapaciteit een probleem dan moet opgemerkt worden dat het meestal economischer is om de onderrand zijdelings te steunen met knikverkorters. Een andere mogelijkheid is dat het vakwerk ruimtelijk in plaats van vlak wordt uitgevoerd. In dat geval worden de staven ook zijdelings gesteund. De hierboven berekende knik zal dan niet optreden. Het is dus redelijk aannemelijk dat de unity check van dit profiel conservatief is uitgevoerd. Concluderend mag verwacht worden dat het vakwerk waarschijnlijk voldoet op knikstabiliteit.

Deel 3 - Toetsing van de verplaatsing:

De verplaatsing wordt tevens bepaald met het ontwikkelde MatrixFrame-model. De verplaatsing is bepaald voor de in eerste instantie gekozen profielen. Mocht dit niet voldoen worden de iteratief gevonden profielen getoetst. Wanneer de originele profielen voldoen zullen de nieuwe profielen ook voldoen aangezien deze een stuk stijver zijn. In Figuur D.9 wordt de gevonden doorbuiging weergegeven. Let op, ter verduidelijking is er gekozen om de schaalgrootte van de verplaatsing op 1:100 in te stellen.



Figuur D.9: Doorbuigingsresultaten vanuit het MatrixFrame-model.

Voor de toetsing van de doorbuiging is geen concrete eis beschikbaar aangezien dit een uniek ontwerp is. De doorbuiging mag niet te groot zijn aangezien er anders een situatie kan ontstaan dat de turbines geheven zijn maar toch nog gedeeltelijk in het water liggen. Hierdoor zou in principe dan alsnog opstuwing kunnen ontstaan. Er is daarom gekozen om een redelijk conservatieve doorbuigingseis op te stellen. Om dit te bepalen wordt als referentieproject een brug gebruikt. Doorgaans geldt hiervoor dat de doorbuiging van het midden van de brug niet groter mag zijn dan 1/500 of 1/800 van de overspanning. De specifieke eis is onder andere afhankelijk van de brugklasse en de levensduur. Voor nu is zoals hierboven beschreven gekozen voor een conservatieve unity-check:

$$\delta_{max} \leq \frac{1}{500} l_{overspanning} \quad (\text{vgl. D.12})$$

Waarin:

δ_{max} = de maximale doorbuiging van het vakwerk [mm]

$l_{overspanning}$ = de totale overspanning van het vakwerk = $54 \cdot 10^3$ [mm]

Hieruit volgt dat de maximale doorbuiging van het vakwerk 108 mm mag bedragen. Op basis van figuur D.9 wordt geconcludeerd dat de maximale doorbuiging van het vakwerk 2,76 mm bedraagt. Dit betekend dat het ontworpen vakwerk voldoet.

3. Presentatie van het resulterende vakwerk:

Uiteindelijk zijn profielen gevonden waarmee een realistisch vakwerk ontworpen kan worden.

Het is belangrijk om aan te geven dat dit een eerste constructieve ontwerplus betreft. Er zijn nog veel mogelijkheden ter optimalisatie van het ontwerp. Daarnaast is het zaak om het vakwerk voor het

definitieve ontwerp probabilistisch door te rekenen. De huidige controle is uitgevoerd om een inschatting van de toepasbaarheid van uitneembare vijzelturbines volgens ontwerpconcept A.1 te maken.

Mogelijk optimalisaties zijn:

- functionele vormgeving
- Constructieve vormgeving
- Variaties in staafprofiel
- Het vakwerk uitvoeren als een ruimtelijk vakwerk, mogelijk kan dit door de twee vakwerken, boven- en benedenstrooms, aan elkaar te verbinden.
- Etc.

Referentielijst

- Abspoel, R., Bijlaard, F. S. K., & De Vries, P. A. (2013). *Dictaat CTB2220 Beton- en Staalconstructies - Staalconstructies*.
- Asselman, N., Barneveld, H., Klijn, F., & van Winden, A. (2019). *Het verhaal van de Maas - De Maas uit balans? Geraadpleegd van* <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma-projecten/rivierkennis/verhaal-maas/>
- Baijens, M., & Schropp, M. (2021). *Overleg afstudeeronderzoek stuw bij Grave met afgevaargde van het 'RWS-ontwerpt'-team/Interviewer: J. T. van Bergen*.
- Bakker, H. (2015). Onderzoek naar visbeschermende maatregelen bij waterkrachtcentrales in de Maas. Geraadpleegd van <https://docplayer.nl/2581489-Onderzoek-naar-visbeschermende-maatregelen-bij-waterkrachtcentrales-in-de-maas.html>
- Bakker, H., Van den Berg, M. S., & Van Kempen, J. (2014). *Toetsingskader voor waterkrachtcentrales in Nederlandse Rijkswateren*. Geraadpleegd van https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_146214_31/
- Baeyens, R., Coeck, J., De Laak, G., Pauwels, I., & Nederland, S. (2020). *Vijzels en vissen*. Geraadpleegd van https://purews.inbo.be/ws/portalfiles/portal/19620128/Vijzels_en_vissen_1_.pdf
- Beersma, J., Bouaziz, L., Hegnauer, M., & Sperna Weiland, F. (2015). *Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse*. Geraadpleegd van https://publications.deltares.nl/1220042_000.pdf
- Centraal Bureau voor de Statistiek (2022). Average energy prices for consumers, 2018 - 2022. Geraadpleegd van <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/en/dataset/84672ENG/table?ts=1662893676019>.
- Centraal Bureau voor de Statistiek (2022). Prijs van energie 86 procent hoger. Geraadpleegd van <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2022/07/prijs-van-energie-86-procent-hoger>
- Charisiadis, C. (2015). *An introductory presentation to the "Archimedean Screw" as a Low Head Hydropower Generator*. Geraadpleegd van <https://www.slideshare.net/ccharisiadis/archimedes-screw-as-a-low-head-hydropower-generator>
- De Jonge, D. (2014). *Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (VONK) Stuwen Maas*.
- Delbressine, R., Kiljan, D., & Michon, H. (2021). Symposium stuwen Maas: Werken met de winkel open. [PowerPoint slides]
- Dlupal. (2023). Cross-section Properties. Geraadpleegd van <https://www.dlupal.com/en/cross-section-properties/rhs-180x80x12.5-gost-8645-68>.
- Edenhofer, O., Intergovernmental Panel On Climate, C., Ipcc, Madruga, R. P., & Sokona, Y. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge: University Press.
- Edenhofer, O., Pichs Madruga, R. N., Sokona, Y., United Nations Environment Programme., W., Organization., M., Ill., I. P. o. C. C. W. G., & (2012)., P.-I. f. r. K. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation : special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- EnergieMarktInformatie.nl. (2022). Marktinformatie APX. Geraadpleegd van <https://www.energiemarktinformatie.nl/beurzen/elektra/>. Retrieved 08-07-2022 <https://www.energiemarktinformatie.nl/beurzen/elektra/>
- Ghodrati, G. (2021). *Bespreking van de visvriendelijkheid van de vijzelturbine technologie/Interviewer: J. T. van Bergen*.
- Kortlever, W. (2021). Symposium stuwen Maas: Keuze stuwtype Maas, een verkenning. [PowerPoint slides]
- Koster, R. (Producer). (2022). Europa verplaatst megawinsten energieproducenten naar consument. Geraadpleegd van <https://nos.nl/artikel/2444473-europa-verplaatst-megawinsten-energieproducenten-naar-consument>
- Kramer, N., De Jong, J., & Ruijgh, E. (2021). *Vispasseerbaarheid stuwcomplexen*. Geraadpleegd van <https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/vispasseerbaarheid-stuwcomplexen-kennisvragen-beantwoorden-en-analysetool-ontwikkelen>

- Leefomgeving, C. v. d. (2021). *Energieverbruik door huishoudens, 1990-2019*. Geraadpleegd van <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0035-energieverbruik-door-de-huishoudens>
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat [EZK] (2020). *Klimaatplan 2021-2030*. Geraadpleegd van <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-c66c8a00-ac14-4797-a8ea-973a98c5bee0/pdf>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2017a). *Waterwet bijlage I Primaire wterkeringen en dijktrajecten als bedoeld in artikel 1.3, eerste lid*
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2017b). *Waterwet bijlage III Normen voor dijktrajecten als bedoeld in artikel 2.2, tweede en derde lid (ondergrens)*
- Moll, R. (2022) *Bespreking omtrent scheepvaart tijdens hoogwatercondities op de Maas/Interviewer: J. T. van Bergen*.
- Molenaar, W. F., & Voorendt, M. Z. (2017). *Manual Hydraulic Structures*.
- Molenaar, W. F., & Voorendt, M. Z. (2019). *Hydraulic Structures General Lecture Notes*.
- Molenaar, W. F., & Voorendt, M. Z. (2023). *Hydraulic Structures General Lecture Notes*.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2023). Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++). Geraadpleegd van <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde>. Retrieved 15-09-2023 <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde>
- Pasterkamp, S., Soons, F. A. M., Van Es, S. H. J., Van Raaij, B. P. M., & Wagemans, L. A. G. (2015). *Quick Reference*.
- Planbureau van de Leefomgeving (2020). *Klimaat- en Energieverkenning 2020*. Geraadpleegd van <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2020>
- Rijkswaterstaat. (2018). Binnenvaartcijfers. Geraadpleegd op 25-01-2022 van <https://binnenvaartcijfers.nl/aantal-passages-van-binnenvaartschepen-per-sluis/>
- Rijkswaterstaat. (2021). *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken*. Geraadpleegd van <https://standaarden.rws.nl/index.html>
- Rijkswaterstaat. (z.d.). Maasroute. Geraadpleegd van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/maaswerken/maasroute>
- Rijkswaterstaat, & Water, V. e. L. W. (2020). *Richtlijnen Vaarwegen 2020*. Geraadpleegd van <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/vaarwegen>
- Royal HaskoningDHV (2021). Ontwerptekeningen van de huidige stuw bij Grave - afkomstig uit het jaartal rond 1930.
- Schropp, M. (2021) *Verdiepend overleg met betrekking tot de uitgangspunten van Rijkswaterstaat voor de toekomstige stuw bij Grave/Interviewer: J. T. van Bergen*.
- Schropp, M., & Tuin, H. (2021). Symposium stuwen Maas: Hoe werkt de gestuwde Maas. [PowerPoint slides]
- Shengenga, P., Spijkerman, A., Di Paola, C., Van Meijeren, D., Kreulen, M., & Strikers, T. (2020). *Ruimtelijk Kwaliteitskader Cuijk-Ravenstein*. Retrieved from Amersfoort: file:///C:/Users/jeroe/Downloads/ruimtelijk_kwaliteitskader_cuijk-ravenstein_21092020_2.pdf
- Staalfederatie, K. (n.d.). Staalsupport. Geraadpleegd van <https://www.staalsupport.nl/zoeken-detail.asp?pag=295>
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen[TAW] (2003). *Leidraad Kunstwerken*. Geraadpleegd van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A3a3ae8-08a8-4c99-afe9-ada2811d15c1>
- Ten Hove, D. (2019). *Richtlijnen rivieren - vormgeving van en inrichting rond stuwen*.
- Van Den Noortgaete, T., Van Heereveld, M., & Claassen, L. (2016). *Onderzoek potentie energie uit waterkracht in Provincie Gelderland*. Geraadpleegd van https://www.geldersenergieakkoord.nl/images/uploads/RHDHV_-_Waterkracht_provincie_Gelderland_-_20161227_def.pdf
- Van der Horst, A. Q. C. (2018). *Construction Technology of Civil Engineering Projects*.
- Van der Kreeke, P. (2023) *Overleg afstudeeronderzoek stuw bij Grave met vragen die betrekking hebben op hefconstructie/Interviewer: J. T. van Bergen*.
- Van Heereveld, M., Doornbos, H., Ghodrati, G., & De Mars, H. (2020). *Waterkrachtcentrale Grave*.
- Veiligheid, D. O. v. (2018). *Stuwaanvaring door Benzeentanker bij Grave*.

Van Heereveld, M. (2022, 21-12-2022) *Overleg met betrekking tot het ontwikkelde financieel model voor de kostenraming van de ontwerpconcepten/Interviewer: J. T. van Bergen.*

Waterschap AA en Maas (2022). *Nota Voorkeursalternatief dijkverbetering Cuijk-Ravenstein – Een herkenbare dijk met veel gezichten, onderdeel van een groter geheel.*