

DE BESTE MAASSTUW

HOOFDRAPPORT



**EEN STUDIE NAAR HET MEEST GESCHIKTE STUWMIDDEL VOOR EEN
NIEUWE STUW BIJ GRAVE, ALS CASUS VOOR DE GEHELE NEDERLANDSE
MAAS**

DE BESTE MAASSTUW

HOOFDRAPPORT

Betreft: Afstudeerrapportage
Datum: 02-06-2020
Status: Definitief
Versie: 1.0
Plaats: Zwolle

Afstudeerders:	Windesheim	A.M. Braakman K.M. Polinder	aron_braakman@live.nl matthias.polinder@gmail.com
Studiebegeleider:	Windesheim	J. van Sloten	j.vansloten@Windesheim.nl
2^e Beoordelaar:	Windesheim	F.H. van den Berg van Saparoea	fh.vanden.berg@windesheim.nl
Bedrijfsbegeleider:	Ingenieursbureau Boorsma	T. Hoekstra	t.hoekstra@Boorsma-consultants.nl

Omslagfoto: Stuwcomplex te Grave (Houdt j. v., 2016)

VOORWOORD

Voor u ligt het rapport: 'De beste Maasstuw', "Een studie naar het meest geschikte stuwmiddel voor een nieuwe stuw bij Grave, als casus voor de gehele Nederlandse Maas". Dit rapport is opgesteld in het kader van ons afstudeeronderzoek, voor onze opleiding Civiele Techniek. Dit afstudeeronderzoek vormt de afronding van onze vierjarige opleiding aan de Christelijke Hogeschool Windesheim. We hebben het onderzoek uitgevoerd in samenwerking met Ingenieursbureau Boorsma en in opdracht van Rijkswaterstaat. Een maand na de start van ons onderzoek werden strenge maatregelen gesteld door de overheid die ons verhinderden om het onderzoek verder uit te voeren op het kantoor van Ingenieursbureau Boorsma. Des te dankbaarder zijn we dat we ondanks deze moeilijke periode het onderzoek, mede dankzij de medewerking van een aantal mensen, tot een mooi einde hebben kunnen brengen.

We willen onze dank uitspreken naar een aantal mensen die ons onderzoek mede mogelijk hebben gemaakt. Allereerst gaat onze dank uit naar ir. T. Hoekstra, onze bedrijfsbegeleider, voor het meedenken, bijsturen en adviseren. Verder willen we J. van Sloten bedanken voor de begeleiding vanuit Windesheim. Het was fijn dat je meedacht en tijd voor ons vrijmaakte. We willen daarnaast onze dank uitspreken naar ir. W. Kortlever voor het mogelijk maken van ons onderzoek, het verlenen van de opdracht namens Rijkswaterstaat en het geven van feedback op ons onderzoek. Het team Urk van Ingenieursbureau Boorsma willen we bedanken voor de gezelligheid en de betrokkenheid, ook al hebben de coronamaatregelen ons vaak op afstand gehouden.

De volgende mensen willen we bedanken voor het verstrekken van informatie, het beantwoorden van vragen en het meedenken aan ons onderzoek; K. van der Werff (RWS GPO), J. de Jong (Deltares), J. Helmer (RWS-SEE), S. Hellebrand (RWS-ontwerpt), M. Baaijens (RWS-ontwerpt), E. Ruijgh (Deltares) en L. Colen (RWS-Zuid Nederland).

Daarnaast willen we de volgende mensen hartelijk bedanken voor het redigeren en geven van feedback op ons rapport: A. Polinder, H.H. Joustra, J. Braakman en M. Rorije.

A.M. (Aron) Braakman &
K.M. (Matthias) Polinder

Zwolle, 02-06-2020

SAMENVATTING

De zeven stuwen die de waterstand in het Nederlandse deel van de Maas reguleren, naderen het einde van hun levensduur. Bovendien maken enkele van deze stuwen gebruik van het Poirée stuwconcept dat niet meer aan de eisen en wensen van de opdrachtgever voldoet. Dit 'Poiréesysteem' is te arbeidsintensief, onveilig en heeft een te groot lekdebiet door de stuw heen. Het doel van dit onderzoek is een stuwmiddel te vinden dat het meest geschikt is als vervanging van de huidige stuwen in het Nederlandse deel van de Maas. De stuw bij Grave fungeert hierbij als casus in dit onderzoek.

Om te bepalen welk stuwmiddel het meest geschikt is, zijn enkele uitgangspunten vastgesteld waaraan het stuwmiddel dient te voldoen. Het gaat hierbij om zowel hydraulische randvoorwaarden als ontwerpeisen en eisen van de opdrachtgever. Daarnaast is vastgesteld welke criteria van belang zijn voor de afweging van het meest geschikte stuwmiddel voor de Maas. Hieruit volgen de volgende zeven hoofdcriteria: kosten, fysieke eigenschappen, uitvoering, beheer en onderhoud, betrouwbaarheid, duurzaamheid en omgeving.

Een literatuurstudie ligt ten grondslag aan een totaaloverzicht van 25 stuwmiddelen die meegenomen worden in de afweging. Aan de hand van de eisen en randvoorwaarden wordt dit aantal teruggedrongen tot twaalf stuwmiddelen. Deze twaalf stuwmiddelen voldoen allemaal aan de eisen en randvoorwaarden en zouden dus toegepast kunnen worden in de Nederlandse Maas. Een Trade-Off Matrix vergelijkt deze twaalf stuwmiddelen onderling aan de hand van enkele criteria. Hieruit volgen drie stuwmiddelen die het meest geschikt zijn: de (verticaal draaiende) segmentdeur met klep, de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw. Om het onderzoek een innovatief karakter te geven wordt een vierde innovatieve variant toegevoegd: de kniestuw.

De afweging van deze vier varianten volgt op twee manieren. De varianten zijn hiervoor eerst verder uitgewerkt in een globaal ontwerp. Een Multicriteria Analyse (MCA) vergelijkt de vier varianten op kwaliteit aan de hand van de criteria: uitvoering, beheer en onderhoud, betrouwbaarheid, duurzaamheid en omgeving. Hieruit volgt dat de segmentdeur met klep de hoogste kwaliteit heeft, kort gevolgd door de klep-balgstuw en de overstroombare segmentdeur. Naast de MCA vergelijkt een kosten-batenanalyse de vier varianten op kosten. Hierbij zijn de kosten voor constructie, onderhoud en gebruik van belang en de baten van het faciliteren van scheepvaart door de stuw van belang. De klep-balgstuw is het goedkoopste stuwmiddel. De MCA-scores zijn tegen de totale kosten per variant afgezet om een voorkeursvariant te bepalen. De variant die de hoogste score per euro heeft, is de voorkeursvariant. Dit is dus de variant met de beste prijs-kwaliteitverhouding. Dit is de klep-balgstuw.

Uiteindelijk is bepaald of de uitgewerkte voorkeursvariant voor de locatie bij Grave ook toepasbaar is op de andere zes locaties in het Nederlandse deel van de Maas. De voorkeursvariant voldoet aan de eerder gestelde eisen en randvoorwaarden die gelden voor zeven stuwlocaties in de Maas. Daarnaast kan de klep-balgstuw ook toegepast worden op de andere stuwlocaties in de Nederlandse Maas. De dimensies van de toe te passen stuwmiddelen verschillen wel per locatie.

ABSTRACT

The seven weirs that regulate the water level in the Dutch part of the Meuse approach the end of their lifespan. A few of these weirs are built from the Poirée-concept. This weir concept does not meet the requirements and wishes of the client anymore. The Poirée-system is labor-intensive, unsafe and has a leakage flow rate through the weir that is too high. The goal of this research is to select the best weir concept for a weir that replaces the current weirs in the Dutch part of the Meuse. The weir at Grave will be a case study in this research.

To select the best weir concept, a few starting points are established. These starting points are hydraulic conditions, design requirements and specific requirements from the client. In addition to the starting points, criteria are established for the selection of the most suitable weir concept for the Dutch Meuse. Seven main criteria that are established are: costs, physical characteristics, construction, management & maintenance, sustainability, and the surroundings.

With a literature study an overview of 25 weir concepts is made. These weir concepts will be considered in the process of selection of the most suitable weir concept. Twelve of the twenty-five weir concepts meet the starting points. These twelve weir concepts can be applied in the Dutch part of the Meuse. A Trade-off Matrix (TOM) compares the twelve weir concepts through a few criteria. The TOM concludes that the three following variants are most suitable as weir concepts in the Dutch part of the Meuse: the vertically rotating segment gate with flap, the submersible segment gate and the Obermeyer Gate (bladder powered flap gate). As an innovative addition the knee weir is added as a fourth variant.

The four variants are compared elaborately in two ways: through a multicriteria analysis and a cost-benefit analysis. The four variants are elaborated and roughly designed before the two analysis. The multicriteria analysis compares the four variants on quality through the following main criteria: construction, management & maintenance, sustainability, and the surroundings. The conclusion of the multicriteria analysis is that the vertically rotating segment gate has the highest quality, shortly followed by the Obermeyer Gate and the submersible segment gate. Apart from the multicriteria analysis the cost-benefit analysis compares the four variants by costs. The construction costs, operation costs and maintenance costs are compared together with the benefits of facilitating navigation through the weir, when and if that is possible. The Obermeyer Gate is the most inexpensive variant according to the cost-benefit analysis. To select a variant of preference, the score of the multicriteria analysis is compared with the total costs for each variant. The Obermeyer Gate is the variant with the highest score per euro and is therefore the variant of preference.

Finally, it is determined whether the variant of preference, for the location of Grave, is suitable for other six weir-locations in the Dutch part of the Meuse. The variant of preference, the Obermeyer Gate, meets the conditions and requirements that apply to the seven weir-locations in the Dutch part of the Meuse. In addition, the Obermeyer Gate is applicable to the six other weir-locations in the Dutch part of the Meuse, although some dimensions will differ.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	3
Samenvatting.....	4
Abstract	5
Begrippenlijst	9
1 Inleiding	12
1.1 Aanleiding.....	12
1.2 Probleemanalyse.....	13
1.3 Doelstelling	13
1.4 Vraagstelling.....	13
1.5 Leeswijzer	14
2 Aanpak	15
2.1 Inrichting onderzoek	15
2.2 Afbakening	16
2.2.1 Binnen scope	16
2.2.2 Buiten scope	17
3 Uitgangspunten	18
3.1 Inleiding	18
3.2 Functies.....	19
3.2.1 Scheepvaart doorlaten.....	19
3.2.2 Energiewinning	19
3.3 Hydraulische randvoorwaarden.....	20
3.4 Ontwerpeisen	21
3.5 Eisen van opdrachtgever.....	23
4 Keuzeproces en criteria.....	25
4.1 Inleiding	25
4.1 Keuzeproces	26
4.2 Criteria.....	26
4.2.1 Belangen.....	26
4.2.2 Hoofdcriteria	27
4.2.3 Deelcriteria.....	28

5	Selectie varianten	32
5.1	Inleiding	32
5.2	Stuwmiddelen	33
5.2.1	Totaaloverzicht stuwmiddelen	33
5.2.2	Geschikte stuwmiddelen	33
5.3	Trade-Off Matrix	37
5.3.1	Opzet	37
5.3.2	Resultaat	39
5.4	Innovatieve variant	39
6	Vergelijking varianten	40
6.1	Inleiding	40
6.2	Ontwerputgangspunten	41
6.2.1	Locatie stuw	41
6.2.2	Aantal stuwopeningen	42
6.2.3	Afmetingen	42
6.2.4	Hoeveelheden	44
6.3	Ontwerp varianten	44
6.3.1	Variant 1: segmentdeur met klep	44
6.3.2	Variant 2: overstroombare segmentdeur	46
6.3.3	Variant 3: klep-balgstuw	48
6.3.4	Variant 4: kniestuw	50
6.4	Multicriteria analyse	52
6.4.1	Weging	53
6.4.2	Scores	55
6.4.3	Resultaat Multicriteria analyse	56
6.5	Kosten-batenanalyse	57
6.6	Voorkeursvariant	58
7	Voorkeursvariant	59
7.1	Inleiding	59
7.2	Visualisatie	60
7.3	Validatie eisen	62
7.4	Integraliteit voorkeursvariant	62

7.4.1	Eerste check.....	62
7.4.2	Tweede check.....	63
7.4.3	Conclusie.....	64
8.	Discussie.....	65
9.	Conclusie & aanbevelingen.....	67
9.1	Conclusie.....	67
9.2	Aanbevelingen.....	68
	Referenties.....	69
	Bijlagen.....	75

BEGRIPPENLIJST

Begrip:	Definitie:
Kunstwerk:	Een civieltechnisch werk of installatie rond de natte en/of droge infrastructuur dat één of meer functies vervult.
Natte kunstwerken:	Civieltechnische kunstwerken die een waterkerende of een water doorvoerende hoofdfunctie hebben.
Stuw:	Een (gedeeltelijk) vaste of beweegbare afdamming tussen twee wateren. Als de waterstand boven een bepaalde hoogte komt, dan loopt de stuw over, of openen de deuren. Zo blijft het water op het gewenste peil.
Stuwmiddel:	Een beweegbaar keermiddel wat als afdamming kan fungeren tussen twee wateren.
Stuwdam:	Een dam, gebouwd in een waterloop, die een grote hoeveelheid water keert.
Stuwband:	Een stuk kanaal of rivier tussen minimaal één stuw en een volgend kunstwerk.
(Schut)sluis:	Een scheiding tussen 2 wateren, maar met deuren. Hierdoor is het mogelijk het waterpeil te beïnvloeden. Sluizen reguleren het waterpeil zodat schepen kunnen passeren.
Sluiscomplex:	Een sluis met alle bijbehorende constructies, gronden en inrichtingen, zoals wachtplaatsen en voorhavens.
Sponning:	Verdieping in een verticaal vlak van een betonconstructie waarin of waartegen iets kan sluiten.
Uitsparing:	Verdieping in horizontaal vlak van een betonconstructie.
Drempels:	Een plaatselijk ondiepte over de volledige breedte van een kunstwerk, meestal gemaakt van beton. Dient ter ondersteuning van het stuwmiddel en het beschermen van de bodem.
Pijlers:	Een meestal betonnen constructie die dient ter ondersteuning van een kunstwerk. Bij stuwen bevinden zich de stuwopeningen met stuwmiddelen zich tussen de pijlers.
Schotbalken:	Balken die boven op elkaar geplaatst kunnen worden om een watergang af te sluiten.
Schotbalksponning:	Verdieping in een wand waarin schotbalken geplaatst kunnen worden.
Bekisting:	Een mal, gemaakt van hout, waarin beton gestort kan worden.
Vispassage:	Een kunstmatige passage langs een doorstroom-belemmerend kunstwerk, zoals een stuw of gemaal, waarlangs vissen veilig kunnen passeren.
Vistrap:	Een soort vispassage waarbij gebruik gemaakt wordt van verschillende treden. Het hoogteverschil tussen de treden is dermate klein dat vissen dit hoogteverschil kunnen overbruggen. Hierdoor kunnen vissen stapsgewijs een bepaald hoogteverschil overbruggen.
Woeldrempel:	Een verdieping in een waterloop die als functie heeft om energie uit snelstromend water te halen door middel van turbulentie. Een woeldrempel is vaak onderdeel van de drempel.
Tandbaan:	Rij van (stalen) tanden waarover zich tandwielen kunnen verplaatsen.
Schotten:	Balken of planken welke boven elkaar geplaatst kunnen worden tegen een daarvoor bestemde constructie. Schotten vormen een (gedeeltelijke) afsluiting van een waterloop en kunnen naar behoefte geplaatst of verwijderd worden.
Jukken:	Opklapbare stalen frames waar schotten of balken tegenaan kunnen rusten.
Juksysteem:	Systeem van meerdere opklapbare jukken die samen op- of neerklappen op de bodem van een waterloop of onder een andere constructie.
Aandrijving:	Het mechanisme dat de beweging van een stuwmiddel waarborgt.
Hydraulische cilinder:	Een aandrijfmechanisme dat door middel van vloeistofdruk een druk- of trekkracht kan uitoefenen.
Bouwkuip:	Een (tijdelijke) waterdichte gesloten wandconstructie, gerealiseerd door het gebruik van damwanden, ten behoeve van het realiseren van een bouwwerk onder het maaiveld of waterpeil.

Strekdammen:	Grondlichaam, die tot boven de waterspiegel rijkt, en welke richting geeft aan stroming of twee wateren tot een bepaald punt scheidt. Strekdammen in een stuwcomplex dienen als afscheiding tussen het sluisgedeelte en het stuwgedeelte.
Vakwerkdeuren:	Deuren of schuiven welke zijn opgebouwd uit verschillende (stalen) balken.
Poirréesysteem:	Stuwmiddel dat het water keer door middel van op elkaar gestapelde schotten, welke steunen tegen jukken.
Stoneysysteem:	Stuwmiddel bestaande uit een dubbele hefdeur dat werkt door middel van contragewichten.
Radiale deur:	Stuwmiddel bestaande uit een gebogen plaat, balken en draaipunten. Stuwmiddel opent door rotatie.
Criterium:	Onderscheidend kenmerk waaraan varianten getoetst kunnen worden.
Eis:	Voorwaarde, gesteld voor een tegenprestatie.
Randvoorwaarde:	Bijkomstige voorwaarde waaraan voldaan moet zijn.
Uitgangspunten:	Datgene wat als de basis of het vertrekpunt wordt gezien. In dit rapport zijn dit randvoorwaarden, eisen en wensen.
Hydraulische randvoorwaarde:	Een randvoorwaarde over de functies van de constructie die met water te maken hebben.
TOM:	Trade-Off Matrix: een keuzematrix die bestaat uit een tabel met enerzijds verschillende keuzes en anderzijds verschillende criteria.
MCA:	Multicriteria analyse: een evaluatiemethode om verschillende keuzes af te wegen op basis van meerdere beoordelingscriteria die kunnen verschillen in hun toegekende belang (weging).
Kosten-batenanalyse:	Analyse van de te investeren kosten en het geld of het nut dat het oplevert.
Debiet:	Gemiddelde hoeveelheid water dat door een watergang stroomt per tijdseenheid (m^3/s).
Afvoer:	Hoeveelheid water dat op een specifiek moment door een watergang stroomt per tijdseenheid (m^3/s).
Dimensioneren:	Het bepalen van afmetingen van verschillende onderdelen van een constructie.
Variant:	(in dit onderzoek) Een stuwmiddel dat toepasbaar is in de Nederlandse Maas.
Detailering :	Het nader uitwerken van een (onderdeel van een) variant.
Stakeholders:	Alle personen en instanties die betrokken zijn met of een belang hebben bij een project.
Uitvoering:	De projectfase waarin het kunstwerk gebouwd wordt.
Prefabriceren:	Onderdeel van uitvoering. Het van tevoren maken van (een deel van) een constructie. Hierbij wordt (een deel van) de constructie op een bepaalde locatie gebouwd en vervolgens vervoerd naar zijn uiteindelijke locatie.
In den natte:	Onderdeel van uitvoering. Het op locatie bouwen van de constructie in het water.
In den droge:	Onderdeel van uitvoering. Het op locatie bouwen van de constructie uit het water.
Doorvaarbaarheid:	De mogelijkheid tot het varen door een waterbouwkundig object van een schip van de betreffende CEMT-klasse van de waterloop volgens de richtlijnen.
Vispasseerbaarheid:	De mate waarin vissen een kunstwerk, zoals een stuw of gemaal, in een waterloop veilig kunnen passeren.
Fijnregulatie:	Het nauwkeurig reguleren van de bovenstroomse waterstand door een stuwmiddel.
Horizonvervuiling:	De mate waarin een constructie een belemmering is voor het zicht.
Beschikbaarheid:	De hoeveelheid tijd dat een stuwmiddel beschikbaar is om zijn functies volledig te vervullen.
Esthetica:	De mate waarin een civiel kunstwerk mooi bevonden wordt.
Arbo-veiligheid:	De veiligheid van de werkomstandigheden volgens de Arbowet.
NEN normen:	NEN staat voor Nederlandse norm. Deze normen zijn Nederlandse over de kwaliteit en veiligheid van producten, diensten en processen. Zo zijn ook voor de bouw normen vastgesteld waaraan het gebouwde kunstwerk moet voldoen.
ROK:	ROK staat voor Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken. Kunstwerken dienen te voldoen aan deze richtlijnen die zijn opgesteld door Rijkswaterstaat.
Referentieperiode:	Opgestelde beoogde levensduur voor kunstwerken.

Betrouwbaarheids-klasse:	Opgestelde beoogde betrouwbaarheid, gemeten in een referentieperiode. Aan de betrouwbaarheidsklassen zijn bijhorende veiligheidsfactoren opgestelde voor sterkteberekeningen. Betrouwbaarheidsklassen zijn: RC1, RC2 en RC3.
Interpoleren:	Het bepalen van een waarde door tussen twee bekende waarden de tussenliggende waarde te schatten of berekenen.
Stootkrachten:	Krachten die een puntbelasting veroorzaken op een constructie.
Thermische expansie:	Het uitzetten van een materiaal door een stijging van temperatuur.
Grond-mechanische instabiliteit:	De toestand waarbij grond niet meer voldoende draagkracht heeft om bepaalde belastingen te dragen.
NAP:	Noord Amsterdams Peil, referentiehoogte.
Dubbelkerend:	De mogelijkheid van een stuwmiddel om aan beide kanten van het stuwmiddel een waterdruk te kunnen opnemen.
Enkelkerend:	De mogelijkheid van een stuwmiddel om aan slechts één kant van het stuwmiddel een waterdruk te kunnen keren.
Hydrostatische waterdruk:	Waterdruk die uitgeoefend wordt op een lichaam op een bepaalde diepte in het water.
Hydrodynamisch waterdruk:	Waterdruk afkomstig van bewegend water, zoals golven.
Star:	Niet bewegend of bezwijkend bij belasting.
Watengang:	Gegraven lijnvormige verdieping in het maaiveld, al dan niet gevuld met water, voor onder meer de berging, afvoer en/of aanvoer van water.
CEMT-klasse:	Een scheepsklasse-indeling welke bepaald is door de Conférence Européenne des Ministres de Transport (CEMT). De classificering betreft schepen en classificeert op afmetingen, diepgang en gewicht.
Bovenstroom/Overstort:	Een stroom van water over een stuwmiddel heen.
Onderstroom:	Een stroom van water onder een stuwmiddel door.
Verhanglijnen:	Het verloop van de waterspiegel in lengterichting (= stroomrichting) van een rivier.
Opwaartse migratie:	Vistrek door een waterloop in stroomopwaartse richting (vanuit de zee richting bovenstroomse gebieden).
Neerwaartse migratie:	Vistrek door een waterloop in stroomafwaartse richting (van bovenstroomse gebieden richting zee).
Visverliezen:	Vissterfte bij het passeren van een kunstwerk in een waterloop.
Ontgrondingskuil:	Een kuil in de grond ter gevolge van erosie van stromend water. Vaak ontstaat een ontgrondingskuil benedenstrooms van een stuwmiddel, aangezien daar de stroomsnelheden hoog zijn.
Achterland:	Het gebied achter een dijk dat door deze dijk beschermd wordt van het water.
Hoogwatergolf:	De golf van hoogwater dat door een waterloop van bovenstrooms naar benedenstrooms stroomt. Vaak wordt deze hoogwatergolf veroorzaakt door veel neerslag in een bovenstrooms gebied.
Irrigatie:	Het kunstmatig toevoeren van water naar gewassen.
Lekverliezen/lekdebieten:	De hoeveelheid water die door een stuwmiddel lekt of stroomt in gesloten stand.
Erosie:	Het uitschuren van (bodem)materiaal van een waterloop door stromend water.
Doorstromend oppervlak:	Het verticale oppervlak, haaks op de stroomrichting, van een waterloop waar water door stroomt.
Eigen frequentie:	De frequentie waarbij een object het meest resoneert (meetrilt) met een trillingsbron.
Geotechniek:	Grondmechanica; de wetenschap die zich bezighoudt met het bouwen in de grond.
Osmose:	Een biologisch proces waarbij twee vloeistoffen zich wederzijds vermengen door een membraan (poreuze wand). De vloeistoffen vermengen zich door een hogere concentratie van zout aan een van de zijdes van het membraan.

1 INLEIDING

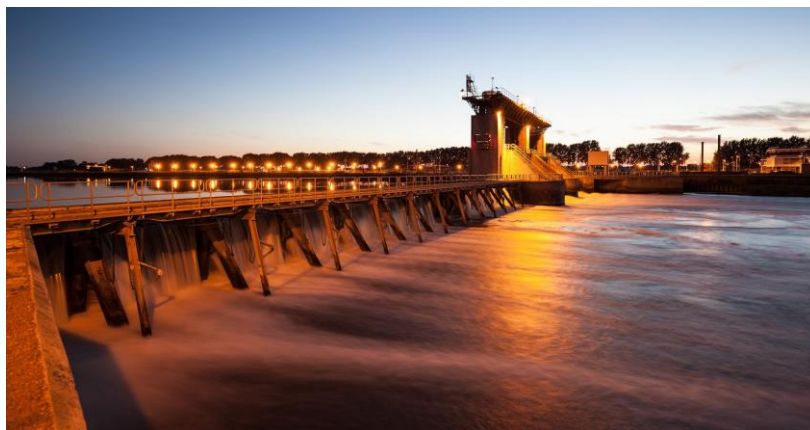
Dit hoofdstuk geeft een inleiding op het onderzoeksrapport: 'De beste Maasstuw'. In dit hoofdstuk zijn de aanleiding (paragraaf 1.1), de probleemanalyse (paragraaf 1.2), de doelstelling (paragraaf 1.3) en de vraagstelling (paragraaf 1.4) opgenomen. Het hoofdstuk sluit af met een leeswijzer (paragraaf 1.5) voor het rapport.

1.1 Aanleiding

De stuwen in de Maas zijn de laatste jaren verschillende keren in het nieuws geweest. Voorbeelden hiervan zijn de aanvaringen op de stuwen bij Grave en Linne. De verschillende aanvaringen hebben de ouderdom van het huidige stuwconcept en de vele nadelen van de stuwen aangetoond. De zeven stuwen in het Nederlandse deel van de Maas naderen namelijk het einde van hun levensduur en zijn aan vervanging toe.

Door middel van stuwen wordt de vaardiepte van de Maas op 4 à 5 m gehouden. Dit zijn, van bovenstrooms naar benedenstrooms, de stuwen bij Borgharen, Linne, Roermond, Belfeld, Sambeek, Grave en Lith. Deze stuwen zijn gebouwd tussen 1925 en 1930, met uitzondering van de stuw bij Lith die in 1936 in gebruik genomen is. De stuwen Belfeld en Sambeek zijn recentelijk gerenoveerd. Voor de overige stuwen wacht de komende jaren nog een renovatie- of vervangingsopgave.

Van de stuwen die de komende jaren vervangen of gerenoveerd dienen te worden, maken drie stuwen gebruik van een juksysteem. De stuwen Linne en Roermond maken gebruik van een 'Stoney- en Poiréesysteem'. Hierin is het Poirée-deel een systeem met jukken met meerdere openingen tussen deze jukken. Figuur 1 laat de benedenstroomse zijde van het Poirée-deel van de stuw te Belfeld zien in gesloten stand. Hierin zijn schotten in de openingen tussen de jukken geplaatst. Stuw Grave maakt gebruik van een vergelijkbaar systeem. Hier hangen de jukken echter aan een brug.



Figuur 1: Poiréestuw Belfeld. De staande balken vormen de jukken. (Ingenieursbureau Boorsma)

Rijkswaterstaat concludeert dat het juksystemen niet wenselijk is. Het gebruik van dit systeem gaat gepaard met vele (mogelijk) onveilige handelingen. Daarnaast zijn de systemen erg onderhoudsgevoelig. Ook lekken de stuwen en zijn de kansen op aanvaringen met de bijbehorende risico's relatief groot. Rijkswaterstaat heeft aangegeven bij de te renoveren stuwen gebruik te willen maken van een ander soort stuwtype. Het gaat hierbij om zowel het systeem van de stuwen Linne en Roermond als het systeem van stuw Grave. Ook de stuwen bij Belfeld en Sambeek maken gebruik van het 'Stoney en Poiréesysteem', omdat deze recent zijn gerenoveerd is de noodzaak van het vervangen van deze stuwen minder groot. Echter deze twee stuwen zullen op den duur ook vervangen moeten worden. De wens van Rijkswaterstaat en het naderen van het einde van de levensduur van de stuwen in de Nederlandse Maas vormen de aanleiding van dit onderzoek.

1.2 Probleemanalyse

Zoals in de aanleiding is beschreven, naderen de stuwen in het Nederlandse deel van de Maas het einde van de levensduur. Het naderen van het einde van de levensduur van de stuwen zorgt ervoor dat de betrouwbaarheid van de stuwen daalt. De kans op falen van de stuw neemt steeds meer toe. Als de kans op falen toeneemt, neemt het risico op het leegstromen van stuwpannen en plaatselijke overstromingen ook toe. Het leegstromen van stuwpannen kan zorgen voor ernstige hinder voor scheepvaart, omwonenden, drinkwaterbedrijven, agrariërs, industrie en ecologie. Deze belanghebbenden hebben belang bij het op peil blijven van het water van de Maas. Het toenemende risico kan dus gezien worden als een probleem.

Naast het mogelijk niet meer kunnen waarborgen van de waterstanden, voldoet het jukkensysteem niet meer aan de eisen en wensen van de beheerder. Dit is vooral uit het oogpunt van beheer, onderhoud en Arboveiligheid. Dit is een tweede probleem. Ten tijde van hoogwater worden bij de Poiréestuwen te Linne, Roermond, Belfeld en Sambeek met kraantjes, die over rails boven op de jukken rijden, de verschillende schotten uit de openingen getild en getransporteerd naar een nabijgelegen opslagplaats. Op zichzelf is dit een technisch goed werkend systeem, maar het systeem is niet erg veilig. De vele handelingen en het werken met het kraantje op de rails bij hoogwater zijn de oorzaak van onveilige situaties. Hetzelfde kan gezegd worden over de stuw bij Grave: het heffen van de schotten tussen de jukken uit en het opklappen van de jukken tegen de onderzijde van de brug, kost erg veel tijd en is de oorzaak van onveilige situaties.

Samengevat zijn dit de problemen:

- het toenemende risico op het falen van de stuwen met de nadelige gevolgen op de waterstanden;
- de onveilige en te onderhoudsgevoelige juksystemen van de stuwen.

1.3 Doelstelling

Het onderzoek geeft een onderbouwde oplossing voor de problemen. De doelstelling van het onderzoek is het oplossen van de probleemstelling. Dit houdt in dat de waterstanden in de Maas gewaarborgd worden en dat het water in de Maas veilig gestuwd kan worden. Dit resulteert in het aandragen van een aanbeveling (een ideaal stuwmiddel) waarbij de waterstanden in de toekomst gewaarborgd zullen zijn, rekening houdend met de eisen en wensen van de opdrachtgever. Hiervoor is de locatie bij Grave de casus voor alle locaties in het Nederlandse deel van de Maas, aangezien de stuw bij Grave als eerste vervangen dient te worden. De aanbeveling is een type stuwmiddel dat toepasbaar is voor de locatie bij Grave, die mogelijk ook integraal is toe te passen op de andere locaties in de Nederlandse Maas. Onderzoeksresultaten bestaan uit een variantenstudie met een bijbehorende voorkeursvariant voor stuw Grave met daarbij een aanbeveling of, en zo ja; hoe dit stuwmiddel toe te passen is op andere locaties in de Nederlandse Maas.

1.4 Vraagstelling

Om de doelstelling (paragraaf 1.3) te realiseren wordt het onderzoek ingericht met hoofd- en deelvragen. De hoofdvraag luidt:

“Hoe ziet het meest geschikte stuwmiddel voor een stuw te Grave er uit en op welke wijze is dit stuwmiddel toepasbaar op andere locaties in het Nederlandse deel van de Maas?”

De hoofdvraag bestaat uit twee delen: een deel dat specifiek over stuw Grave gaat en een deel dat over de hele Nederlandse Maas gaat. Het onderzoek kijkt eerst naar het grote plaatje, waarin bekeken wordt welke randvoorwaarden en eisen gelden voor de stuwen in de Nederlandse Maas. Daarnaast wordt achtergrondinformatie opgehaald over de gehele Nederlandse Maas. Vervolgens wordt ingezoomd op de stuw bij Grave, waarin de vraag wordt beantwoord welke stuwtypes toepasbaar zijn op stuw Grave, uitgaande van de randvoorwaarden en eisen. In het onderzoek deze stuwtypes onderling vergeleken. Hieruit volgt een voorkeursvariant voor stuw Grave. Vervolgens wordt onderzocht hoe deze voorkeursvariant toepasbaar is op de andere locaties in de Nederlandse Maas. Dit levert de volgende deelvragen op:

1. Welke achtergrondinformatie, randvoorwaarden en eisen zijn van belang bij een integraal ontwerp voor stuwmiddelen in de Nederlandse Maas?
2. Welke criteria zijn van belang bij het kiezen van een stuwmiddel en hoe verhouden deze criteria zich tot elkaar voor de stuw bij Grave?
3. Welke vier stuwmiddelen zijn het meest geschikt voor de stuw bij Grave?
4. Welk stuwmiddel is de voorkeursvariant en hoe is dit stuwmiddel in te passen bij Grave?
5. Op welke wijze is dit stuwmiddel toepasbaar voor meerdere locaties in de Nederlandse Maas?

1.5 Leeswijzer

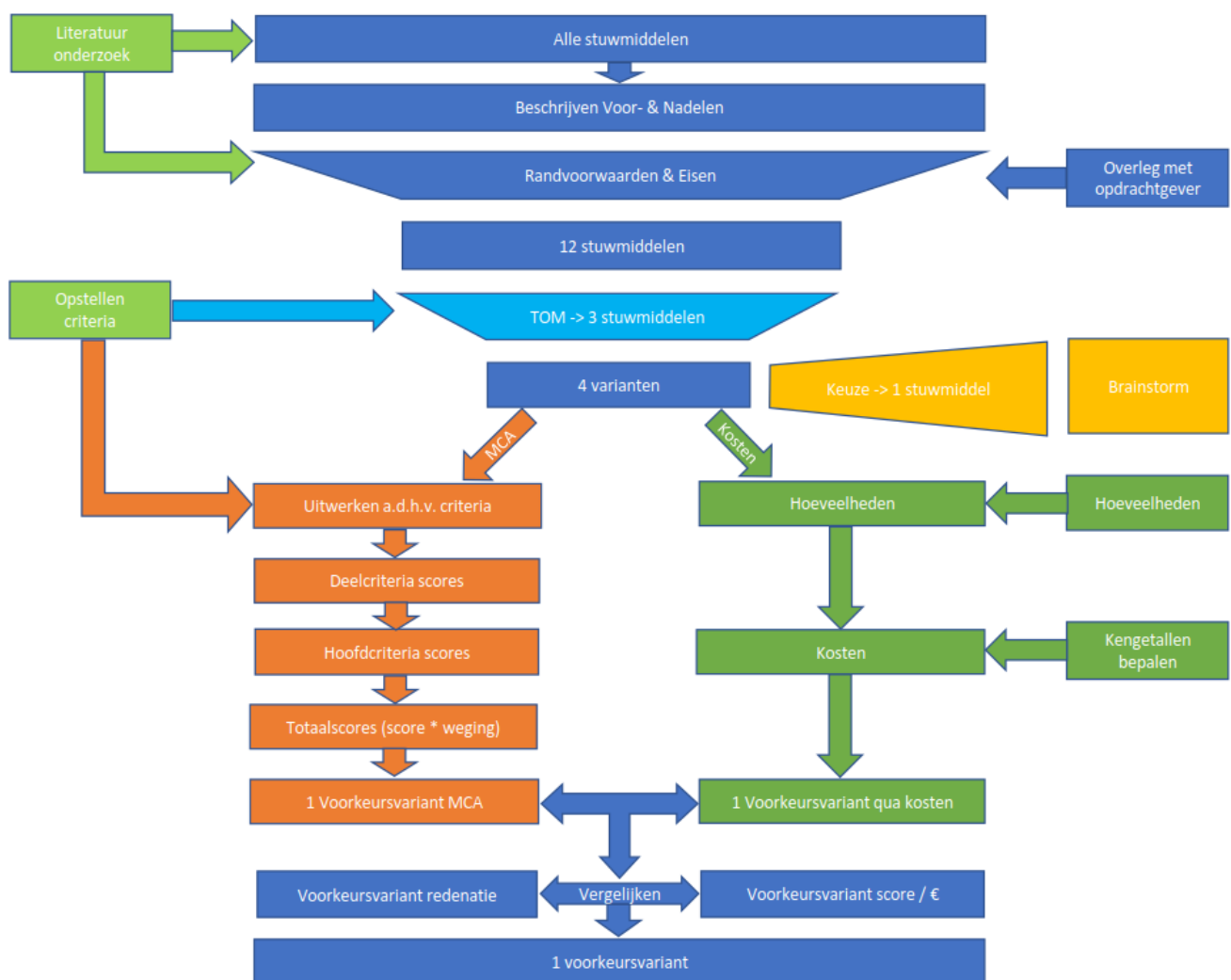
Vanuit de hoofd- en deelvragen is het rapport opgesteld. De verschillende deelvragen vormen de input voor de opbouw van het rapport. Naast de algemene aspecten van het rapport, zoals het voorwoord, de samenvatting, inhoudsopgave, lijsten en deze inleiding op het onderzoek, is een hoofdstuk gewijd aan de aanpak van het onderzoek. Hoofdstuk 3 (Uitgangspunten) geeft de uitgangspunten weer van het onderzoek. Hieronder vallen randvoorwaarden en eisen. Hoofdstuk 3 beantwoordt samen met Bijlage A (Achtergrondinformatie) grotendeels de eerste deelvraag. Hoofdstuk 4 (Keuzeproces en criteria) geeft weer hoe het keuzeproces van stuwmiddelen toegepast wordt en geeft daarbij verschillende criteria waaraan stuwmiddelen getoetst kunnen worden. Hoofdstuk 4 beantwoordt de tweede deelvraag. Hoofdstuk 5 (Globale vergelijking) geeft een globale vergelijking van stuwmiddelen. Dit hoofdstuk selecteert uit alle bekende stuwmiddelen een aantal stuwmiddelen welke voldoen aan de uitgangspunten (Hoofdstuk 3). Deze stuwmiddelen worden globaal met elkaar vergeleken. Hoofdstuk 5 beantwoordt de derde deelvraag en uit het hoofdstuk volgen vier stuwmiddelen welke uitvoerig met elkaar vergeleken worden in hoofdstuk 6 (Uitvoerige vergelijking). De uitkomst van hoofdstuk 6 is een voorkeursvariant voor de locatie bij Grave. Zo beantwoordt hoofdstuk 6 de vierde deelvraag. Hoofdstuk 7 (Voorkeursvariant) geeft een visualisatie van de voorkeursvariant en weegt af of het stuwmiddel toe te passen is op andere locaties in de Maas. Zo beantwoordt hoofdstuk 7 de vijfde deelvraag. De discussie (Hoofdstuk 8) en de conclusie en aanbevelingen (Hoofdstuk 9) ronden het hoofdrapport af. In de bijlagen is achtergrondinformatie, een opsomming en uitwerking van stuwmiddelen, een Trade-Off Matrix, berekeningen, een locatiestudie, een kwalitatieve uitwerking van vier varianten, de uitkomsten van een poll, een Multicriteria analyse en een kosten-batenanalyse weergegeven. Een inhoudsopgave van de bijlagen is te vinden voor de bijlagen.

2 AANPAK

Dit hoofdstuk beschrijft globaal hoe het onderzoek is ingericht en wat de methode van onderzoek is. Dit hoofdstuk is een aanvulling op hoofdstuk 1, waar het onderzoek is ingeleid en het doel van het onderzoek is beschreven. Dit hoofdstuk bestaat uit een verduidelijking van de inrichting van het onderzoek (paragraaf 2.1) en een afbakening van het onderzoek (paragraaf 2.2).

2.1 Inrichting onderzoek

Deze paragraaf licht toe hoe het onderzoek wordt uitgevoerd. Deze paragraaf is een toelichting op de vraagstelling en de leeswijzer uit Hoofdstuk 1. Figuur 2 geeft globaal weer hoe het onderzoek is ingericht. In dit stroomschema is verduidelijkt hoe het keuzeproces van het onderzoek is ingericht, los van de hoofdstukindeling.



Figuur 2: Stroomschema van de opzet van het onderzoek.

Een lijst van alle bekende toe te passen stuwmiddelen vormt de eerste schakel in de keten. Deze lijst is gevormd door middel van literatuuronderzoek (lichtgroen in Figuur 2). Een uitwerking van deze stuwmiddelen is de volgende stap. Hierin zijn eigenschappen en voor- en nadelen beschreven van de verschillende stuwmiddelen ten opzichte van elkaar. Een eerste selectie van stuwmiddelen vindt plaats in de volgende stap aan de hand

van randvoorwaarden en eisen (in dit rapport worden de randvoorwaarden en eisen tezamen de uitgangspunten genoemd). De uitgangspunten worden uit verschillende handboeken overgenomen en opgesteld in overleg met Rijkswaterstaat. Na de selectie blijven twaalf stuwmiddelen over. Aan de hand van literatuur worden criteria opgesteld voor verdere afweging. Alle criteria worden geordend onder een aantal hoofdcriteria. Onder de hoofdcriteria vallen verschillende deelcriteria die samen dezelfde lading hebben als de hoofdcriteria. Een Trade-Off Matrix (TOM) filtert de twaalf stuwmiddelen tot drie stuwmiddelen die het meest geschikt zijn door middel van een aantal criteria (lichtblauw in Figuur 2). Naast de TOM levert een brainstormsessie een innovatieve variant (geel in Figuur 2). Zo komt het aantal varianten op vier (donkerblauw in Figuur 2). Twee manieren van afweging waarborgen de keuze van de uiteindelijke voorkeursvariant: enerzijds een kwalitatieve afweging door middel van een Multicriteria-analyse (MCA) (oranje) en anderzijds een kwantitatieve vergelijking door middel van een kosten-batenanalyse (groen in Figuur 2). Doormiddel van de MCA worden de stuwmiddelen vergeleken op een aantal hoofdcriteria, die weer zijn opgebouwd uit deelcriteria. Door de stuwmiddelen te beoordelen met behulp van deelcriteria worden de scores van de hoofdcriteria bepaald. Naast een score per variant per hoofdcriterium worden wegeningen bepaald voor de hoofdcriteria. De wegeningen worden bepaald door onderzoek en het opvragen van de opinie van civiel technici. De som van de wegeningen maal de scores per variant per criterium vormt de score per variant. De kosten-batenanalyse berekent de kosten van de vier varianten aan de hand van hoeveelheden materiaal, kengetallen en bekende verhoudingen in kosten. Zowel de MCA als de kosten-batenanalyse zullen als resultaat een voorkeursvariant hebben. Een vergelijking tussen de twee voorkeursvarianten vormt de basis voor de keuze van de voorkeursvariant van het onderzoek. Dit wordt enerzijds vanuit redenering gedaan en anderzijds vanuit een objectief getal: de score per geïnvesteerde hoeveelheid geld. Hieruit volgt uiteindelijk een voorkeursvariant van het onderzoek.

Het bovenstaande keuzeproces is gebaseerd op verschillende berekeningen, ontwerpen, tekstuele uitwerkingen en inhoudelijke verdiepingen.

2.2 Afbakening

Het zwaartepunt van het ligt op de stuwmiddelen. Dit onderzoek houdt in beperkte mate rekening met de rest van de constructie en de omgeving. Deze paragraaf beschrijft in paragraaf 2.2.1 wat binnen de scope van het onderzoek valt en hoe verschillende aspecten worden meegenomen in het onderzoek. In paragraaf 2.2.2 staat wat buiten de scope van het onderzoek valt.

2.2.1 Binnen scope

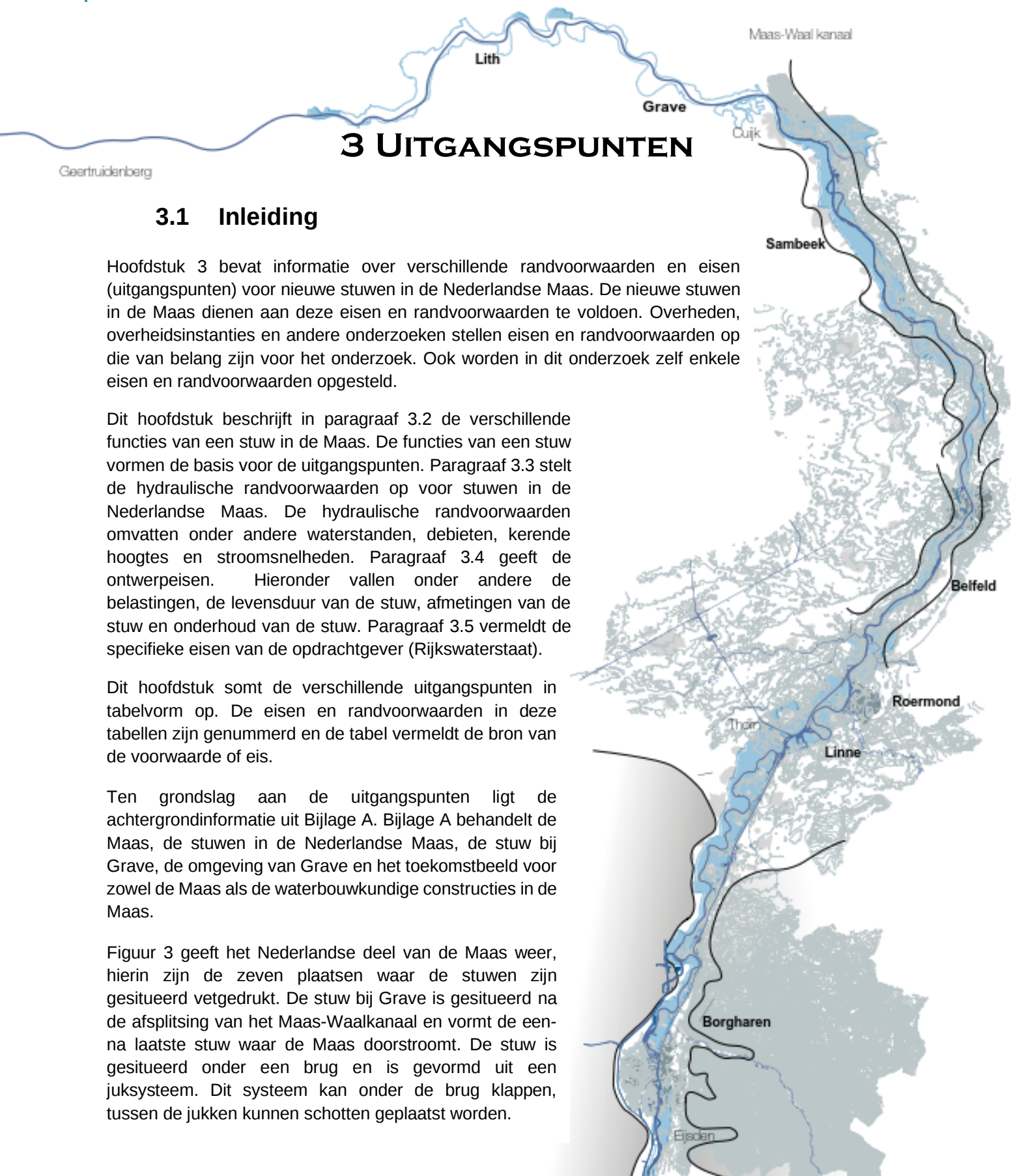
- Het onderzoek is oriënterend van aard en zal dus niet ingaan op detaillering van het ontwerp. De focus van de studie ligt op het keuzeproces.
- Deelvraag één, het eerste deel van de tweede deelvraag en de vijfde deelvraag focussen op stuwen in het Nederlandse deel van de Maas. De huidige stuwlocaties zijn hierbij het uitgangspunt.
- Het tweede deel van de tweede deelvraag, deelvraag drie en deelvraag vier focussen op de locatie van de stuw te Grave. De huidige locatie van de stuw is het uitgangspunt.
- In het onderzoek worden enkel de Nederlandse richtlijnen en eisen in beschouwing genomen die vanuit de NEN-normen, ROK-normen en andere boekwerken worden gegeven.
- Voor de debieten worden prognoses aangehouden. Als de huidige omstandigheden maatgevend zijn, worden de huidige waardes aangehouden.
- De varianten worden uitgewerkt aangaande het toe te passen materiaal, de toe te passen bodembescherming, de dikte van pijlers, de hoogte van het keermiddel (en hoogte van de drempel) en de maximale stroomsnelheid.
- De focus ligt in eerste instantie niet op stakeholders buiten de scheepvaart. De inpassing van het ontwerp in het landschap, horizonvervuiling en de esthetica van het ontwerp zijn echter wel van belang in de afweging.
- De doorvoerbaarheid van stuwmiddelen wordt niet als eis meegenomen, maar als een baat in de kosten- batenanalyse.
- In de afweging van verschillende stuwmiddelen wordt uitgegaan van de gebruikelijke materialen van deze stuwmiddelen.

- Het onderzoek weegt het aspect geotechniek beperkt af in een beschouwing van de toepasbaarheid van de varianten op het gebied van fysieke bodemhoogtes en fundatie.
- De stuw te Grave wordt gedimensioneerd op mogelijk voorkomende calamiteiten, zoals de invloed van het doorbreken van de bovenstroomse stuw Sambeek.
- Hergebruik, circulariteit en overige maatregelen die een positief effect zouden hebben op het klimaat of de milieubelasting verlagen, zullen enkel als criterium meewegen in het onderzoek en niet als uitgangspunt.

2.2.2 *Buiten scope*

De volgende aspecten behoren niet tot de focus van het onderzoek:

- de nabije omgeving en verkeerskundige randvoorwaarden;
- normen, eisen en randvoorwaarden die wel van toepassing op stuwen zijn maar over detaillering gaan, vormen geen input voor het onderzoek, aangezien het onderzoek oriënterend is;
- inrichting van het sluiscomplex;
- uitvoeringsaspecten;
- energieopwekking;
- niet gesprongen explosieven;
- archeologische vondsten en/of belangen;
- werktuigbouwkundige aspecten. Het onderzoek beperkt zich tot ruimtereserveringen voor de werktuigbouwkundige onderdelen;
- zoutindringing vanuit zee;
- bodemdaling. Uitgegaan wordt van een verwaarloosbare bodemdaling (bodemdaling = 0 mm);
- kabels en leidingen;
- faalkansanalyses; de stuw is vaak in gebruik en wordt dus vaak gecontroleerd. Daarnaast zijn stuwen geen onderdeel van de primaire waterkering;
- aardbevingen;
- sterkte-, stijfheid-, stabiliteits- en vermoeiingsberekeningen;
- woeldrempels en een gedetailleerd ontwerp van bodembescherming;
- effecten van het ontwerp op de ecologie (behalve vispasseerbaarheid).



3 UITGANGSPUNTEN

3.1 Inleiding

Hoofdstuk 3 bevat informatie over verschillende randvoorwaarden en eisen (uitgangspunten) voor nieuwe stuwen in de Nederlandse Maas. De nieuwe stuwen in de Maas dienen aan deze eisen en randvoorwaarden te voldoen. Overheden, overheidsinstanties en andere onderzoeken stellen eisen en randvoorwaarden op die van belang zijn voor het onderzoek. Ook worden in dit onderzoek zelf enkele eisen en randvoorwaarden opgesteld.

Dit hoofdstuk beschrijft in paragraaf 3.2 de verschillende functies van een stuw in de Maas. De functies van een stuw vormen de basis voor de uitgangspunten. Paragraaf 3.3 stelt de hydraulische randvoorwaarden op voor stuwen in de Nederlandse Maas. De hydraulische randvoorwaarden omvatten onder andere waterstanden, debieten, kerende hoogtes en stroomsnelheden. Paragraaf 3.4 geeft de ontwerpisen. Hieronder vallen onder andere de belastingen, de levensduur van de stuw, afmetingen van de stuw en onderhoud van de stuw. Paragraaf 3.5 vermeldt de specifieke eisen van de opdrachtgever (Rijkswaterstaat).

Dit hoofdstuk somt de verschillende uitgangspunten in tabelvorm op. De eisen en randvoorwaarden in deze tabellen zijn genummerd en de tabel vermeldt de bron van de voorwaarde of eis.

Ten grondslag aan de uitgangspunten ligt de achtergrondinformatie uit Bijlage A. Bijlage A behandelt de Maas, de stuwen in de Nederlandse Maas, de stuw bij Grave, de omgeving van Grave en het toekomstbeeld voor zowel de Maas als de waterbouwkundige constructies in de Maas.

Figuur 3 geeft het Nederlandse deel van de Maas weer, hierin zijn de zeven plaatsen waar de stuwen zijn gesitueerd vetgedrukt. De stuw bij Grave is gesitueerd na de afsplitsing van het Maas-Waalkanaal en vormt de een-na laatste stuw waar de Maas doorstroomt. De stuw is gesitueerd onder een brug en is gevormd uit een juksysteem. Dit systeem kan onder de brug klappen, tussen de jukken kunnen schotten geplaatst worden.

Figuur 3: Overzicht van het Nederlandse deel van de Maas; van Eijsden tot Geertruidenberg. (N. Asselman, 2018)

3.2 Functies

Stuwen kennen verschillende functies. Deze functies vervullen het doel van het kunstwerk. De stuw dient te allen tijde over de volledige levensduur van de stuw te voldoen aan deze functies. Functies vormen daarom ook de input voor de uitgangspunten. Hieronder zijn de hoofdfuncties, sub functies (niet primaire functies van een stuw) en functies ten aanzien van belastingen voor stuwen in de Nederlandse Maas opgesomd:

- Hoofdfuncties (Baars, et al., 2009):
 - scheepvaart waarborgen;
 - irrigatie waarborgen;
 - overstromingen voorkomen benedenstrooms.
- Sub functies (Snel, 1987):
 - waterpeil reguleren;
 - variabele afvoer reguleren;
 - doorvoer vaste objecten;
 - scheepvaart doorlaten;
 - energiewinning.
- Functies ten aanzien van belastingen (Verduijn, 2014):
 - hydraulische belasting opnemen;
 - windbelasting opnemen;
 - lekken voorkomen;
 - erosie voorkomen.

De sub functies en de functies ten aanzien van belastingen uit het bovenstaande overzicht volgen uit de hoofdfuncties zoals hierboven beschreven. Twee functies zijn niet van toepassing op alle stuwen in de Maas, namelijk de sub functies ‘scheepvaart doorlaten’ en ‘energiewinning’. De paragrafen 3.2.1 en 3.2.2 behandelen deze uitzonderingen.

3.2.1 Scheepvaart doorlaten

Niet op alle locaties in de Maas is het noodzakelijk om scheepvaart door te laten. In een aantal gevallen komt dit door een lage scheepvaartintensiteit en in andere gevallen zijn bepaalde riviergedeeltes afgesloten voor scheepvaart. Dit is bijvoorbeeld bij Borgharen het geval, waar de stuw gesitueerd is aan het begin van de Grensmaas. Schepen varen hier over het Julianakanaal en niet over de Grensmaas. Bij de stuwen bij Roermond en Linne varen schepen over het Lateraalkanaal en omzeilen hierdoor de twee stuwen. De meeste stuwen in de Maas zijn maar een paar weken per jaar geheel open en te bevaren, de rest van het jaar varen schepen door een schutsluis langs de stuw. De afweging of een stuw doorvaarbaar moet zijn, dient per stuw gemaakt te worden door de kosten en baten van een doorvaarbare stuw af te wegen.

3.2.2 Energiewinning

Energiewinning is voor bepaalde situaties erg rendabel, bijvoorbeeld bij stuwdammen met een hoog verval. Bij stuwdammen is een groot verval, wat resulteert in een hoog rendement van een waterkrachtcentrale. Stuwen zijn enkel rendabel voor waterkrachtenergiewinning bij genoeg verval over een groot gedeelte van het jaar. Een van de hoofdfuncties van een stuw is het op peil houden van het bovenstroomse stuwpannd ten behoeve van scheepvaart en irrigatie van het achterland. Een waterkrachtcentrale zal bij gebruik altijd water doorlaten. Het debiet dat door de waterkrachtcentrale stroomt, kan ervoor zorgen dat het stuwpeil van het stuwpannd verlaagt. Om deze reden zal het in de praktijk vaak niet mogelijk zijn om een waterkrachtcentrale te gebruiken in tijden van een laag debiet van de Maas. Daarnaast zal de waterkrachtcentrale niet te gebruiken zijn bij te hoge debieten van de Maas, aangezien in dat geval de stuw openstaat en de waterstand bovenstrooms en benedenstrooms gelijk is. Per stuw dient gekeken te worden of een waterkrachtcentrale rendabel is. Dit onderzoek laat deze afweging achterwege en neemt aan dat de stuwen in de Maas niet rendabel zijn voor energiewinning.

3.3 Hydraulische randvoorwaarden

Deze paragraaf beschrijft de hydraulische randvoorwaarden over nieuwe stuwen in de Nederlandse Maas. Tabel 1 geeft de hydraulische randvoorwaarden zoals deze gelden voor stuwen in de Nederlandse Maas. In deze tabel zijn de hydraulische randvoorwaarden genummerd. Hierin is 'HydrRand' een afkorting voor hydraulische randvoorwaarden. Onder de tabel is een toelichting gegeven op enkele randvoorwaarden.

Tabel 1: Hydraulische randvoorwaarden die gelden voor stuwen in de Nederlandse Maas. Bronnen: [1]: (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019), [2]: In overleg met W. Kortlever (RWS, GPO), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Rijkswaterstaat, 2007), [5]: (Beersma, Bouzaziz, Hegnauer, & Weiland, 2015), [6]: zie Bijlage A4.3.

Nummer hydraulische randvoorwaarde	Tekst hydraulische randvoorwaarde	Bron
HydrRand-1	Nieuwe stuwen dienen de streefpeilen, zoals in Bijlage A beschreven, te kunnen waarborgen plus een marge van 0,5 m om toekomstige streefpeilverhogingen te waarborgen.	[1], [2]
HydrRand-2	De minimale hoogte voor stuwmiddelen bestaat uit de hoogte uit HydrRand-1 te verhogen met de extra hoogte ten gevolge van windgolven (Hs) die daarna verhoogd wordt met een waakhoogte van 0,3 m. Deze eis gaat niet op wanneer de hoogte van de uiterwaarden lager is dan de toe te passen hoogte van het stuwmiddel, in dit geval dient de hoogte van het stuwmiddel gelijk te zijn aan de minimale hoogte van de uiterwaarden.	[3], [4]
HydrRand-3	Het doorstroomprofiel van het winterbed (de doorstroomopeningen van de stuw samen met de uiterwaarden naast de stuw) dient een maximale afvoercapaciteit van 4760 m ³ /s te waarborgen.	[5]
HydrRand-4	Het lekdebiet door de stuw dient afgerond 0 m ³ /s te zijn.	[6]
HydrRand-5	Het stuwmiddel en aangrenzende constructies dienen de belastingen ten gevolge van overstort te kunnen opnemen. Een extra waterhoogte van 0,5 m is maatgevend.	[6]
HydrRand-6	Het maximale verval van een stuw staat gelijk aan de hoogte zoals gegeven in HydrRand-2.	
HydrRand-7	Het maximaal door te voeren zomerbeddebet is gelijk aan het debiet wat voorkomt bij de waterstanden die zo hoog zijn als de minimale hoogte van de aangrenzende uiterwaarden.	[1]
HydrRand-8	Nieuwe stuwen dienen een doorstromend oppervlak te hebben dat minimaal 10% groter is dan het doorstromende oppervlak van de bestaande stuw.	[2]
HydrRand-9	De netto breedte van de stuw dient gelijk of groter te zijn dan de bestaande stuw.	[2]

De eerste hydraulische randvoorwaarde (HydrRand-1) geeft een minimaal te keren hoogte voor de stuwen in de Nederlandse Maas. Boven op de hoogte van de stuwen komt een extra marge van een halve meter om de eventuele verhogingen van het stuwpeil in de toekomst te waarborgen. Zoals bijlage A4.3 beschrijft, is het minimale maatgevende debiet 10 m³/s. Een dermate laag debiet resulteert in een maximaal lekdebiet van 0 m³/s zoals HydrRand-4 beschrijft. HydrRand-2 geeft de voorwaarde voor de uiteindelijke hoogte van het stuwmiddel ten opzichte van de hoogte zoals gesteld in HydrRand-1. De uiteindelijke toe te passen hoogte van het stuwmiddel bij Grave is 8,5 m +NAP, deze hoogte staat gelijk aan de minimale hoogte van de uiterwaarden. De betrekkinglijnen voor de Maas (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019) vormen de input voor de zomerbeddebieten. Het zomerbeddebet is het debiet dat de stuw moet kunnen doorvoeren zonder dat de uiterwaarden onderlopen. HydrRand-7 stelt dat dit debiet gelijk staat aan het debiet dat voorkomt bij de minimale hoogte van de uiterwaarden. In het geval van stuw Grave is de minimale uiterwaardehoogte 8,5 m +NAP ten oosten van de stuw. De minimale hoogte van de uiterwaarden ten westen van de stuw is 9,5 m +NAP (Rijkswaterstaat, 1926) en het zomerbeddebet 1803 m³/s. Deze waarde is berekend door middel van het

interpoleren van de debieten uit de betrekkinglijnen van de Maas 2019_2020 (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019) in bijlage D.

HydrRand-1, HydrRand-8 en HydrRand-9 zijn opgesteld in afstemming met de onderzoekers en de opdrachtgever. Het streven van de opdrachtgever is dat het doorstromend oppervlak door de stuw net zo groot is als het doorstromend oppervlak van het zomerbed. Omdat de stuwen hierbij zeer groot gedimensioneerd zouden worden, is dit uitgangspunt bijgesteld. Het doorstromend oppervlak door de stuw dient minimaal 10% groter te zijn dan het doorstromend oppervlak van de bestaande stuw.

3.4 Ontwerpeisen

Deze paragraaf beschrijft de ontwerpeisen voor stuwen in de Nederlandse Maas. De ontwerpeisen komen onder andere voort uit de 'Richtlijn Ontwerp Kunstwerken' (Rijkswaterstaat, 2017), de NEN-EN normen (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2019), 'Richtlijnen Vaarwegen' (Rijkswaterstaat (2), 2017) en het rapport: 'Ontwerp van Schutsluizen' (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000). Tabel 2 somt de ontwerpeisen op en geeft per eis aan wat de bron is. In de tabel zijn de ontwerpeisen genummerd. Hierin is 'OntwEis' een afkorting voor ontwerp-eis. Onderstaande alinea geeft toelichting op de eisen zoals gesteld in Tabel 2.

Het definitieve ontwerp neemt OntwEis-3, OntwEis-4 en OntwEis-11 ontwerp-eis mee. Het voorlopige ontwerp houdt geen rekening met deze eisen. Dit onderzoek bevindt zich in een oriëntatiefase, deze eisen zijn dus van een ondergeschikt belang voor dit onderzoek. Wanneer van een stuwmiddel dat bekend is dat het stuwmiddel niet kan voldoen aan deze eisen, kunnen deze eisen een reden zijn tot het laten vervallen van het stuwmiddel. De zesde ontwerp-eis geeft uitleg over de diepte van een doorvaarbare stuw. De diepgang voor stuw Grave is gelimiteerd door de naastgelegen schutsluis, welke een diepgang heeft van 3,9 m. De schutsluis limiteert hierdoor schepen met een diepgang groter dan 3,2 m. Een doorvaarbare stuw bij Grave dient daarom een minimale waterdiepte te hebben van 3,9 m (kielspeling van 70 cm). OntwEis-9 geeft aan dat stuwmiddelen onder alle hydraulische omstandigheden te gebruiken dienen te zijn. Dit betekent onder andere dat alle stuwmiddelen onder verval dienen te kunnen openen. OntwEis-9 filtert hierdoor een groot aantal stuwmiddelen uit het overzicht van stuwmiddelen (zie Bijlage B).

Tabel 2: Ontwerpeisen die gelden voor stuwen in de Nederlandse Maas. Bronnen: [1]: (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2019), [2]: (Rijkswaterstaat, 2017), [3]: (Rijkswaterstaat (2), 2017), [4]: in overleg met W. Kortlever (RWS, GPO), [5]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000)

Eisnummer	Tekst ontwerpeis	Bron
OntwEis-1	Het kunstwerk dient te zijn getoetst volgens NEN-EN normen 1990 tot 1999.	[1]
OntwEis-2	Stuwen hebben de constructieve betrouwbaarheidsklasse RC3 met een referentieperiode van 100 jaar.	[2]
OntwEis-3	Het kunstwerk dient te zijn ontworpen op stootkrachten van schepen die het kunstwerk aanvaren.	[2]
OntwEis-4	Het kunstwerk dient te zijn ontworpen op buitengewone belastingen door scheepvaart, te weten vallende ankers, slepende ankers en gezonken schepen.	[2]
OntwEis-5	Als sprake is van doorvaarbaarheid door de stuw dient voldaan te zijn aan de minimale breedte van een keersluis. Voor een normaal profiel zijn deze dimensies gelijk aan de breedte van de vaarweg. Deze zijn gegeven in Tabel 3. Voor een krap profiel is een reductie tot 95% van de maatgevende breedte van dit krappe profiel mogelijk. ¹	[3]
OntwEis-6	Bij een doorvaarbare stuw dient de waterdiepte boven de drempel van de doorvaartopening een diepgang te hebben van minimaal 4,9 m.	[4]
OntwEis-7	Als sprake is van doorvaarbaarheid door de stuw dient voldaan te zijn aan de minimale doorvaarthoogte voor vaste bruggen volgend uit Tabel 4.	[3]
OntwEis-8	Onderdelen van constructies dienen goed bereikbaar te zijn voor onderhoud en inspectie.	[2]
OntwEis-9	Het stuwmiddel dient onder alle hydraulische omstandigheden te kunnen worden gebruikt. Hieronder vallen ijsgang, extreme waterstanden, maximaal verval, grote stroomsnelheden en een volledig overstroomde situatie.	
OntwEis-10	Het kunstwerk dient bestand te zijn tegen de aanwezigheid van (drijf)ijs. Keermiddelen dienen op alle genoemde ijsbelastingen (thermische expansie van ijs, opstuwing ijsschotsen, ijsaangroei) te worden berekend zonder gecombineerd te hoeven worden. Minimale waarden zijn voor thermische expansie 50 kN/m, voor opstuwing 50 kN/m en voor aangroei 10 kN/m (deze belasting grijpt net onder het waterniveau aan).	[2]
OntwEis-11	De bodembescherming dient te voldoen aan de volgende eisen: • Bodembescherming dient zodanige horizontale afmetingen te hebben dat als gevolg van de optredende erosie aan de rand van de bodembescherming een eventuele grond-mechanische instabiliteit als gevolg van een ontgrondingskuil geen bedreiging vormt voor het kunstwerk. • De verticale opbouw van de bodembescherming dient zodanig te zijn dat geen transport door de bovenste laag gaat; • De levensduur van de bodembescherming dient gelijk te zijn aan de levensduur van de totale constructie. • De stabiliteit van de bodembescherming dient zodanig te zijn dat het bestand is tegen de huidige en toekomstige belastingen door motorvermogens van schroeven en boegschroeven. • De bodembescherming dient bereikbaar te zijn voor onderhoud en reparatie.	[5]

¹ Een krap profiel mag gekozen worden als sprake is van intensiteit van minder dan 15.000 beroepsvaartuigen per jaar én het traject korter is dan 5 km. (Rijkswaterstaat (2), 2017)
Dit is onder andere het geval voor de stuw bij Grave (Binnenvaartcijfers, 2018).

Tabel 3: Minimale dimensies vaarwegprofielen (Rijkswaterstaat (2), 2017)

klasse	minimum vaarwegprofiel (m)				
	diepte D*	breedte		zijwindtoeslag Δ_w	
		W_t	W_d	landstreek	kuststreek
normaal profiel					
I	3,1 - 3,5	20,4	10,2	2	4
II	3,5 - 3,6	26,4	13,2	3	6
III	3,5 - 3,8	32,8	16,4	4	8
IV	3,9 - 4,2	38,0	19,0	5	11
Va	4,9	45,6	22,8	7	14
Vb	5,6	45,6	22,8	9	18
Vla	5,6	91,2	45,6	6	14
Vlb	5,6	91,2	45,6	9	19
krap profiel**					
I	2,9 - 3,3	15,3	10,2	3	5
II	3,3 - 3,4	19,8	13,2	4	7
III	3,3 - 3,5	24,6	16,4	5	10
IV	3,6 - 3,9	28,5	19,0	7	15
Va	4,6	34,2	22,8	9	19
Vb	5,2	34,2	22,8	12	24
Enkelstrooksprofiel**					
I	2,9 - 3,3	10,2	5,1	nader te bepalen	nader te bepalen
II	3,3 - 3,4	13,2	6,6		
III	3,3 - 3,5	16,4	8,2		
IV	3,6 - 3,9	19,0	9,5		
Va	4,6	22,8	11,4		
Vb	5,2	22,8	11,4		

* gegarandeerde nautische diepte excl. marge voor onderhoud

** klasse Vla en Vlb moeten minimaal voldoen aan het normaal profiel

Tabel 4: Minimale doorvaarthoogte beroepsvaart vaste bruggen (Rijkswaterstaat (2), 2017)

klasse	doorvaarthoogte bij MHWS
I	5,25
II	6,1
III	6,6
IV	7,0
V	9,1
Vla en Vlb	9,1

3.5 Eisen van opdrachtgever

De eisen van de opdrachtgever zijn in dit onderzoek in samenspraak tussen de onderzoekers en de opdrachtgever, Rijkswaterstaat, gemaakt. Tabel 5 geeft de door Rijkswaterstaat gestelde eisen weer. In deze tabel zijn de eisen van de opdrachtgever genummerd. Hierin is 'OpdrEis' een afkorting voor eis van opdrachtgever. Onder de tabel is toelichting gegeven op de verschillende eisen van de opdrachtgever.

Tabel 5: Eisen van opdrachtgever. Bron: [1]: in overleg met W. Kortlever (RWS, GPO)

Eisnummer	Tekst eis van opdrachtgever	Bron
OpdrEis-1	Stuwafmetingen dienen conform de huidige zomerbedafmetingen en het hele huidige dwarsprofiel (met uiterwaarden) van de rivier gedimensioneerd te worden.	[1]
OpdrEis-2	De inrichting van de Maas met de zeven stuwen blijft onveranderd. Hieruit volgt dat toekomstige stuwen op dezelfde locaties als de huidige stuwen dienen te worden gebouwd.	[1]
OpdrEis-3	Stuw Grave blijft op het huidige stuwcomplex (binnen de strekdammen). De nieuwe stuw dient los van de brug beschouwd te worden.	[1]
OpdrEis-4	Er dienen minimaal drie stuwopeningen te zijn in de nieuwe stuw te Grave.	[1]
OpdrEis-5	De stuw dient de waterstanden nauwkeurig te reguleren.	[1]
OpdrEis-6	Maatgevende schepen zijn de schepen van de CEMT-klasse Vb.	[1]

OpdrEis-1 en OpdrEis-2 stellen dat nieuwe stuwen gebouwd dienen te worden binnen het zomerbed van de Maas en op de locaties van de huidige stuwen. Stuwen mogen wel binnen een bandbreedte van enkele honderden meters van de huidige stuwen gebouwd worden, als ze maar binnen het zomerbed van de huidige stuw gebouwd worden en bij voorkeur gebruik gemaakt kan worden van de huidige schutsluis. De nieuwe stuw bij Grave dient binnen de huidige strekdammen van de stuw gebouwd te worden. Hierbij geldt een breedte, tussen de strekdammen, van 120 m ten noorden van de stuw en 140 m ten zuiden van de stuw. Bij een kleine verplaatsing van de stuw zijn de rivierbouwkundige gevolgen van de verplaatsing van de stuw relatief klein.

OpdrEis-3 komt voort uit het 'n-1' principe. Als één van de stuwopeningen niet beschikbaar is, bijvoorbeeld door onderhoud of falen, dienen de overgebleven stuwopeningen te waarborgen dat de stuw zijn functies blijft vervullen. Om dit te kunnen waarborgen is een minimale waarde van drie stuwopeningen vereist.

OpdrEis-5 stelt dat de stuw de waterstanden nauwkeurig dient te reguleren. Hiervoor heeft een stuwmiddel dat overstort en onderstroom kan waarborgen de voorkeur. Het is echter ook mogelijk om waterstanden nauwkeurig te reguleren als enkel een overstort mogelijk is.

OpdrEis-6 stelt een eis ten aanzien van schepen. Deze gestelde eis gaat over de CEMT-klassen. Tabel 3 en Tabel 4 geven inzicht over de minimale afmetingen van de vaarwegprofielen per CEMT-klasse. De vaarwegdiepte wijkt af van de gestelde diepte door het document: 'Richtlijnen Vaarwegen' (Rijkswaterstaat (2), 2017). OntwEis-6 geeft deze vermindering van diepte aan, paragraaf 3.4 geeft de vaarwegdiepte voor stuw Grave.

4 KEUZEPROCES EN CRITERIA

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het keuzeproces van de stuwmiddelen door het toelichten en opzetten van het keuzeproces en het onderbouwen van bepaalde gemaakte keuzes. De functies, randvoorwaarden en eisen uit hoofdstuk 3 zijn het uitgangspunt voor dit hoofdstuk. Daarnaast beschrijft dit hoofdstuk de criteria die het keuzeproces vormgeven. Hoofdcriteria met daaronder deelcriteria vormen de basis van de selectie van stuwmiddelen naast de uitgangspunten uit Hoofdstuk 3. Figuur 2 laat de verschillende selectiemethoden, met de plaats van deze methoden in het onderzoek, schematisch zien. Dit hoofdstuk gaat dieper in op het gestelde keuzeproces zoals in Figuur 2 weergegeven is.

Dit hoofdstuk bestaat uit een aantal paragrafen. Paragraaf 4.1 beschrijft het keuzeproces van het onderzoek. De paragraaf legt uit welke methodes van toepassing zijn, hoe het onderzoek deze methodes toepast en waar in het onderzoek deze methodes toegepast worden. Paragraaf 4.2 geeft aan welke criteria gelden als onderbouwing voor het keuzeproces.

Achtergrondfiguur: Stuw bij Borgharen
(Cormont H. , 1989)

4.1 Keuzeproces

Figuur 2 laat de verschillende selectiemethoden en de plaats van deze methoden in het onderzoek schematisch zien. In Figuur 2 is te zien dat de eerste selectie plaatsvindt aan de hand van de randvoorwaarden en eisen die gelden voor de stuwen en het beschrijven van de voor- en nadelen van de stuwmiddelen. Binnen enkele stuwmiddelen zijn verschillende varianten te bedenken. Hier ontstaat de tweede selectie. Varianten binnen de stuwmiddelen onderscheiden zich hier bijvoorbeeld in aandrijving, detaillering en beweging; tussen de varianten zijn geen grote verschillen te onderscheiden in vormgeving. Deze tweede selectie bepaalt van elk stuwmiddel wat de meest geschikte variant van het stuwmiddel is aan de hand van een vakkundig oordeel op basis van de functies en eisen van de stuw.

Daarna vindt de Trade-Off Matrix (TOM) plaats. Een TOM is een keuzematrix met enerzijds verschillende varianten en anderzijds verschillende criteria. In de matrix wordt aangegeven hoe elke variant scoort op het criterium. Deze TOM vergelijkt de overgebleven stuwmiddelen, dit zijn de stuwmiddelen die voldoen aan de eisen, onderling op grove schaal op basis van enkele deelcriteria. Deze criteria staan benoemd in Tabel 6. Paragraaf 5.3 beschrijft de opzet en onderbouwing van de TOM. Het resultaat van deze TOM is een drietal stuwmiddelen die het meest geschikt zijn om toe te passen in de Maas.

Uit een brainstormsessie volgt een innovatieve variant, die nog niet eerder is toegepast. Deze vormt samen met de drietal varianten uit de TOM het uiteindelijke aantal van vier varianten die de laatste selecties zullen ondergaan. Paragraaf 6.3 en Bijlage F werken deze vier varianten verder uit aan de hand van verschillende criteria. Doordat de varianten uitgewerkt zijn aan de hand van de criteria, zijn ze onderling op basis van deze criteria te vergelijken. In de Multicriteria analyse (MCA) staan de hoofdcriteria centraal. Een MCA is een vergelijkingsmethode waarin varianten aan de hand van criteria en wegeningen een score krijgen. Deze score zegt iets over de kwaliteit van de variant. Tabel 6 benoemt welke hoofd- en deelcriteria van belang zijn voor de MCA. De deelcriteria geven binnen de MCA een onderbouwing van de hoofdcriteria. Los van de MCA laat een kosten-batenanalyse, uitgevoerd voor elke variant, zien wat de te verwachte kosten van elke variant zijn. Aan de ene kant laat de MCA zien welke variant kwalitatief het beste is, aan de andere kant laat de kosten-batenanalyse zien welke variant het minste zal kosten.

De voorkeursvariant volgt uit een vergelijking tussen de uitkomsten van de MCA en de kosten-batenanalyse. Uit de MCA volgt een score, die iets zegt over de kwaliteit van de variant. Uit de kosten-batenanalyse volgt een totaal aan euro's. De uiteindelijke vergelijking deelt per variant de score van MCA door de kosten uit de kosten-batenanalyse. Hieruit volgt een score per geïnvesteerde euro. Deze score per euro geeft aan hoeveel kwaliteit een variant per euro levert. De voorkeursvariant is die variant die per euro de meeste kwaliteit levert en dus de variant met de hoogste score per euro. Paragraaf 6.6 werkt dit verder uit.

4.2 Criteria

Paragraaf 4.2 geeft inzicht in welke criteria van belang zijn in het selectieproces en hoe deze zijn opgesteld. Paragraaf 4.2.1 legt uit wie belang hebben bij een stuw in de Maas en wat het belang is van die belanghebbende. Deze belangen vormen deels de input tot de keuze van de hoofd- en deelcriteria. Vervolgens geeft Paragraaf 4.2.2 inzicht in de keuze van hoofdcriteria en laat zien wat de redenatie is achter de keuze van deze hoofdcriteria. Deze hoofdcriteria en de bijbehorende deelcriteria worden vervolgens verder uitgelegd. Een samenvatting van de hoofd- en deelcriteria is te vinden in Tabel 6. Deze tabel geeft ook aan of de hoofd- en deelcriteria zijn opgenomen in de TOM en de MCA.

4.2.1 Belangen

Bij het ontwerpen van een nieuwe stuw staan enkele dingen centraal. De opdrachtgever vindt de betrouwbaarheid van stuwmiddelen en het risico op calamiteiten kernwaarden. Hieronder vallen verschillende zaken, zoals bijvoorbeeld in hoeverre het stuwmiddel bestand is tegen ijs, vuil en calamiteiten (zoals een

aanvaring of het falen van een nabijgelegen stuw) en in hoeverre de stuw afhankelijk is van menselijke handelingen en andere systemen. De opdrachtgever vindt daarnaast kosten, onderhoud en het gebruiksgemak belangrijk. Vanuit het oogpunt van de gebruikers van het stuwpand, binnen- en recreatievaart, is een betrouwbaar stuwpeil een kernwaarde. Hiervoor dient de stuw een specifiek debiet te kunnen doorlaten. Voor de ecologie bovenstrooms en benedenstrooms is een natuurlijk rivierverloop van belang. Daarnaast is het voor de ecologie een groot pluspunt als vissen langs of door de stuw kunnen zwemmen. Omwonenden vinden esthetica en eventuele maatschappelijke belangen belangrijk. Hierbij kan het uiterlijk van een stuw een toevoeging zijn aan het landschap of kan het juist afbreuk doen aan het landschap. Ook is de mate van horizonvervuiling door een stuw van belang voor omwonenden. De uitvoerende partij zal belang hebben bij de maakbaarheid van de stuw en de ervaring die er is met het gekozen stuwmiddel. Een belang dat steeds belangrijker wordt is de duurzaamheid van objecten. Hierbij telt de impact van de uitvoering op het milieu, de hoeveelheid materiaal, de mogelijkheid op hergebruik van materialen en het totale energieverbruik van de stuw. Uiteindelijk heeft iedereen een belang bij het aspect duurzaamheid. Daarnaast is het voor de lucht-, water- en bodemkwaliteit van belang dat zo min mogelijk schadelijke stoffen worden uitgestoten of afgegeven in zowel de bouw als gedurende de levensduur.

Al de bovenstaande belangen vormen de input voor het opstellen van de criteria uit paragraaf 4.2.2

4.2.2 Hoofdcriteria

Functies, belangen en de gestelde uitgangspunten uit hoofdstuk 3 vormen de input voor het kiezen van criteria waarmee stuwmiddelen vergeleken kunnen worden. Paragraaf 4.1 beschrijft de verschillende methodes van selectie van stuwmiddelen. Doordat het keuzeprocess verschillende methodes van filtering gebruikt, bestaat de behoefte om de criteria te verdelen in hoofd- en deelcriteria. De verschillende deelcriteria zijn onderverdeeld onder de hoofdcriteria. De TOM maakt gebruik van enkele deelcriteria, de MCA is opgesteld uit de hoofdcriteria. Een literatuuronderzoek naar stuwmiddelen en studies waarin stuwmiddelen vergeleken worden is de basis van de keuzes van deelcriteria. De criteria die in de TOM de stuwmiddelen vergelijken zijn daarnaast een behartiging van de belangen zoals gesteld in paragraaf 4.2.1.

De MCA weegt varianten tegen elkaar af op basis van de hoofdcriteria. De deelcriteria die onder de hoofdcriteria vallen zijn een hulpmiddel om zo objectief mogelijk af te wegen per hoofdcriterium. De MCA omvat de meeste deelcriteria. De TOM bevat echter enkele deelcriteria die niet in de MCA worden afgewogen. Deze deelcriteria vormen geen toevoeging voor de MCA omdat ze al voldoende zijn afgewogen in de TOM. De hoofdcriteria zijn de volgende:

- uitvoering;
- betrouwbaarheid;
- beheer & onderhoud;
- duurzaamheid;
- omgeving.

De twee onderstaande hoofdcriteria vormen geen deel van de MCA maar worden in de TOM of de kosten-batenanalyse afgewogen:

- fysieke eigenschappen (TOM);
- kosten (kosten-batenanalyse).

In paragraaf 4.2.1 staat dat scheepvaart ook een belang is waar rekening mee gehouden zou moeten worden. Scheepvaart is echter alleen deel van de kosten-batenanalyse. Het faciliteren van scheepvaart door de stuw is namelijk een van de baten. Het faciliteren van scheepvaartdoorgangen door de stuw, ten tijde van een hoog debiet, zal geld besparen doordat de schutsluis naast de stuw niet meer voor vertraging van scheepvaart zal zorgen. Bijlage I weidt hier verder over uit.

4.2.3 Deelcriteria

Deze paragraaf behandelt de verschillende deelcriteria aan de hand van de hoofdcriteria zoals gesteld in paragraaf 4.2.2. Tabel 6 somt de deelcriteria per hoofdcriterium op. Daarnaast geeft deze tabel aan op welke plaats in het onderzoek het criterium van belang is. De onderstaande kopjes geven toelichting op de verschillende deelcriteria per hoofdcriterium, die onderdeel vormen van de TOM, de MCA en de kosten-batenanalyse.

Kosten

Het hoofdcriterium 'kosten' valt volledig onder de kosten-batenanalyse. 'constructiekosten' is het eerste deelcriterium dat onder dit hoofdcriterium valt. Constructiekosten zijn alle kosten die gemaakt worden in de bouw van het stuwcomplex. Hieronder vallen bijvoorbeeld materiaalkosten, materieelkosten, manuurkosten en algemene kosten. Het tweede deelcriterium is 'onderhouds- en vervangingskosten'. Hieronder vallen alle kosten die na de oplevering gemaakt worden, met uitzondering van gebruikskosten en sloopkosten. 'gebruikskosten' zijn de kosten voor de werking van de stuw. Hieronder vallen bijvoorbeeld de kosten voor aandrijving, elektrische systemen en bedieningssystemen. Het laatste deelcriterium is 'scheepvaart'. Zoals paragraaf 4.2.2 beschrijft, is scheepvaart een baat die van de totale kosten kan worden afgehaald.

Fysieke eigenschappen

Het hoofdcriterium 'fysieke eigenschappen', met de daaronder vallende deelcriteria, is alleen van belang voor de TOM. Onder de fysieke eigenschappen vallen de afmetingen van de stuw. Voor ieder stuwmiddel gelden enkele rendabele en kostenefficiënte afmetingen. Hieronder vallen de breedte (Erbisti, 2004) en de maximaal keerbare waterhoogte (Verduijn, 2014) van een stuwmiddel. Uit de gestelde eisen volgt een bepaalde keerbare waterhoogte waar de stuwmiddelen aan dienen te voldoen. Als het stuwmiddel hieraan voldoet, scoort het goed in de TOM. Hetzelfde geldt voor de breedte van de stuwopeningen. Uit de eisen en de situatie op de locatie van de nieuwe stuw volgt een ideaal aantal stuwopeningen en een referentiebreedte. Ook is het deelcriterium 'benodigd materiaal' van belang (Erbisti, 2004). Het deelcriterium 'benodigd materiaal' weegt af hoeveel materiaal nodig is voor het stuwtype en de omliggende constructie. De TOM filtert op deze manier grofweg dure constructies uit, aangezien grote, brede of lange constructies hoge kosten zullen hebben.

Uitvoering

Onder het hoofdcriterium 'uitvoering' vallen de belangen van de uitvoering. Het eerste deelcriterium dat hieronder valt, is 'constructietijd'. Deze tijd omvat het inrichten van de bouwplaats tot aan de oplevering aan de opdrachtgever (Daniel & Paulus, 2018). Dit hoofdcriterium omvat verder het deelcriterium: 'maakbaarheid': Dit deelcriterium zegt iets over de complexiteit van de te bouwen constructie (Erbisti, 2004). Zo is het een meerwaarde als het stuwmiddel te prefabriceren is. Daarnaast is 'bouwmethode' een aspect en deelcriterium dat van belang is. Bij het deelcriterium 'bouwmethode' gaat het bijvoorbeeld om de fasering van de uitvoering het bouwproject. Een stuw met vier stuwopeningen zal hier beter scoren dan een stuw met drie stuwopeningen. Bij een stuw met vier stuwopeningen zijn de bouwkuipen namelijk minder groot, wat meer mogelijkheden heeft ten aanzien van de doorstroom van water door de Maas tijdens de uitvoering. Verder speelt 'transporteerbaarheid' een grote rol bij de uitvoering van een project. Dit is het laatste deelcriterium. Wanneer het stuwmiddel slecht te transporteren is, is dat een negatief aspect (Erbisti, 2004). De deelcriteria binnen dit hoofdcriterium zijn alleen in de MCA van belang.

Betrouwbaarheid

Dit hoofdcriterium geeft aan in welke mate een variant betrouwbaar, voorspelbaar en robuust is. Binnen dit hoofdcriterium valt de zogenoemde 'gevoeligheid voor ijs en vuil' (Erbisti, 2004) (Daniel & Paulus, 2018). Dit deelcriterium toetst in de TOM en de MCA in hoeverre het stuwmiddel onafhankelijk is van de aanwezigheid van ijs en vuil. Stuwmiddelen waar ijs en vuil gemakkelijk overheen stromen, scoren beter bij dit criterium. Stuwmiddelen waarbij ijs en vuil een grote belemmering op het functioneren van de stuw vormen, scoren minder in dit deelcriterium. Onder vuil valt zowel sediment als drijvende objecten of objecten op de bodem.

Stuwmiddelen met uitsparingen lopen een hoger risico op blokkade door sediment of objecten. Daarnaast is bijvoorbeeld de aangroei van ijs aan een stuwmiddel een belemmering, zeker als dat stuwmiddel beweegt door middel van een contragewicht. Het deelcriterium: 'bewezen technologie' zegt iets over de voorspelbaarheid van het naar behoren functioneren van het object (Daniel & Paulus, 2018). De TOM en de MCA wegen dit deelcriterium af. Stuwmiddelen met een grote afhankelijkheid van andere systemen scoren lager in de MCA op het deelcriterium 'afhankelijkheid van andere systemen' (Erbisti, 2004). Het deelcriterium: 'beschikbaarheid' weegt mee in de MCA (Daniel & Paulus, 2018) (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000). Hoe vaker een stuwmiddel naar verwachting niet in gebruik is, hoe lager het zal scoren op het deelcriterium 'beschikbaarheid'. Daarnaast beschouwt het deelcriterium 'gevoeligheid op menselijke fouten & aanvaringen' in de MCA de kans op en de gevolgen van het voorkomen van menselijke fouten en de kans op aanvaringen (Frijns, 2019) (Daniel & Paulus, 2018). Een stuwmiddel heeft een grote kans op aanvaringen, als het stuwmiddel zich tijdens de periodes van grote afvoeren in de doorstroomopeningen bevindt. Bijlage F legt dit nader uit. De TOM voegt de deelcriteria 'afhankelijkheid van andere systemen' en 'gevoeligheid op menselijke fouten & aanvaringen' samen en neemt het mee als 'risico's op menselijke fouten, aanvaring, en storingen'. Het deelcriterium 'trillingen' weegt af hoe groot het risico is op trillingen en hoe groot de gevolgen hiervan zijn op de stuw; de MCA weegt dit aspect af (Erbisti, 2004). Voor de betrouwbaarheid van een stuwmiddel is de manier van afdracht van de krachten in het stuwmiddel en van de omliggende constructie van groot belang. Het deelcriterium 'afdracht krachten' vergelijkt in de MCA de verschillende varianten op dit aspect (Erbisti, 2004). Daarnaast is het van belang dat het stuwmiddel ook in de toekomst zijn functie kan blijven vervullen. Hiervoor is het deelcriterium 'opwaardeerbaarheid' van belang (Verduijn, 2014). Dit deelcriterium wordt meegenomen in de MCA. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat in de toekomst de te keren waterhoogte groter wordt. Als een stuwmiddel de mogelijkheid heeft om zijn keerbare hoogte te vergroten, is dit een voordeel.

Beheer & onderhoud

Het hoofdcriterium 'beheer & onderhoud' weegt al het af werk dat plaatsvindt tussen de oplevering en de sloop van een object. De TOM weegt de mate van onder andere onderhoudsgemak en de te verwachten hoeveelheid onderhoud van een stuwtype af in het deelcriterium 'onderhoudbaarheid' (Erbisti, 2004). Binnen de TOM is het gehele proces van onderhoud meegenomen binnen dit deelcriterium. Het MCA weegt het deelcriterium 'veiligheid' af: de veiligheid voor onderhoud, inspectie en operatie (Erbisti, 2004). Het deelcriterium 'bereikbaarheid' beoordeelt in de MCA in welke mate de kritieke en gevoelige onderdelen bereikbaar zijn voor inspecties en onderhoud (Daniel & Paulus, 2018). Het deelcriterium: 'hoeveelheid onderhoud' beoordeelt in de MCA hoeveel onderhoud in de levensduur plaatsvindt en met welke hoeveelheid mankracht dit zal moeten gebeuren (Daniel & Paulus, 2018). Het gaat hierbij aan de ene kant om de frequentie van het onderhoud, en aan de andere kant om de kwantiteit van onderhoud per onderhoudsronde. Het laatste hangt bijvoorbeeld af van de hoeveelheid onderdelen van de stuw. Het deelcriterium 'bedienbaarheid', onderdeel van de MCA, vergelijkt de stuwmiddelen op de wijze van bediening (Erbisti, 2004). Stuwmiddelen die op afstand bedienbaar zijn, hebben een voordeel. Daarnaast is hierbij de mate van nauwkeurigheid in de regulatie van de waterstanden van belang; hoe gemakkelijker dit gaat, hoe meer bedienbaar de stuw is. Het laatste onderdeel van het hoofdcriterium 'beheer & onderhoud' is het deelcriterium 'bestand tegen vandalisme', hierbij gaat het om de bereikbaarheid van kritieke onderdelen voor derden (Daniel & Paulus, 2018). Daarnaast spelen de gevolgen van vandalisme een rol.

Duurzaamheid

Het hoofdcriterium 'duurzaamheid' beschrijft in welke mate een stuw met een bepaald stuwmiddel een negatief effect op het milieu en het klimaat heeft over de gehele levensduur. Het eerste deelcriterium 'klimaatimpact' weegt de gevolgen van de bouw, onderhoud en vervanging van het desbetreffende stuwmiddel op het klimaat af in de MCA (Daniel & Paulus, 2018). Het deelcriterium 'hergebruik' beoordeelt in de MCA in welke mate de materialen opnieuw gebruikt kunnen worden en met welke waarde (Erbisti, 2004). Materialen of onderdelen die na de levensduur een goede kwaliteit hebben, hebben een hogere beoordeling. De MCA weegt in het deelcriterium 'energiegebruik' af hoeveel energie nodig is om een stuwmiddel te gebruiken over de gehele

levensduur (Daniel & Paulus, 2018). Stuwmiddelen die werken op waterkracht of erg weinig hydraulische druk nodig hebben, scoren beter in dit deelcriterium. Het hoofdcriterium 'duurzaamheid' is alleen van belang in de MCA.

Omgeving

Het hoofdcriterium 'omgeving' bevat de meeste belangen van omwonenden, het landschap en de natuur. Onder dit hoofdcriterium valt onder andere 'Esthetica' (Daniel & Paulus, 2018). De TOM weegt de esthetica op een relatief subjectieve manier af. Naast esthetica zijn maatschappelijke belangen van belang bij de verschillende stuwtipes. Onder het deelcriterium 'maatschappelijke belangen' valt alle meerwaarde die omwonenden kunnen hebben aan de stuw. Hieronder valt bijvoorbeeld de mogelijkheid om de stuw te gebruiken als een overbrugging over de Maas. De MCA weegt dit deelcriterium af (Erbisti, 2004). Zowel de TOM als de MCA wegen het deelcriterium 'innovatie' af binnen dit hoofdcriterium. Dit deelcriterium weerspiegelt in welke mate het kunstwerk een voorbeeld en innovatie is op technisch gebied en wat dus mogelijk de toon aangeeft voor technische kunstwerken in de toekomst (Daniel & Paulus, 2018). Het deelcriterium 'horizonvervuiling' weegt in de TOM en de MCA af hoeveel afbreuk het kunstwerk doet aan het landschap. Niet opvallende constructies wegen positief in dit deelcriterium; hoge en opvallende constructies wegen negatief in dit deelcriterium (Erbisti, 2004). 'vispasseerbaarheid' en 'risico op waterverontreiniging' wegen als afzonderlijke deelcriteria in de MCA (Daniel & Paulus, 2018). Als laatste weegt het deelcriterium 'benodigde ruimte' in de TOM en MCA het benodigde oppervlak voor de stuwmiddelen en het totale oppervlak dat nodig is voor het stuwcomplex af (Erbisti, 2004). Hoe minder ruimte benodigd is, hoe beter het stuwmiddel op dit deelcriterium zal scoren.

Tabel 6: Hoofdcriteria met onderverdeling in deelcriteria met de plaats van het deelcriterium in het selectieproces aangegeven. Bronnen: [1]: (Erbisti, 2004), [2]: (Daniel & Paulus, 2018), [3]: (de Jong, Kramer, & Ruijgh, 2020), [4] (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [5]: (Frijns, 2019), [6]: (Verduijn, 2014), [7]: (Baars, et al., 2009)

Hoofdcriteria:	Deelcriteria:	TOM	MCA	Kosten-baten analyse	Bronnen:
Kosten	Constructiekosten			X	[1], [2]
	Onderhouds- en vervangingskosten			X	[1]
	Gebruikskosten			X	[2]
	Scheepvaart (baten omzeiling sluis)			X	[3], [1]
Fysieke eigenschappen	Kostenefficiënte breedte stuwmiddel	X			[1]
	Keerbare waterhoogte	X			[1]
	Benodigd materiaal	X			[1]
Uitvoering	Transporteerbaarheid		X		[1]
	Bouwmethode		X		
	Maakbaarheid		X		[1]
	Constructietijd		X		[2]
Betrouwbaarheid	Gevoeligheid voor ijs & vuil	X	X		[1], [2]
	Bewezen technologie	X	X		[2]
	Afhankelijkheid van andere systemen	X	X		[1]
	Beschikbaarheid		X		[2], [3]
	Gevoeligheid op menselijke fouten & aanvaringen	X	X		[2], [5]
	Trillingen		X		[1]
	Afdracht krachten		X		[1]
	Opwaardeerbaarheid		X		[6]
	Onderhoudbaarheid	X			[7]
	Veiligheid		X		[7]
Beheer & onderhoud	Bereikbaarheid		X		[2]
	Hoeveelheid onderhoud		X		[2]
	Bedienbaarheid		X		[1]
	Bestand tegen vandalisme		X		[2]
	Milieu-impact		X		[7]
	Hergebruik		X		[7]
	Energieverbruik		X		[2]
Omgeving	Esthetica	X			[2]
	Benodigde ruimte	X	X		[1]
	Maatschappelijke belangen		X		[5]
	Innovatie	X	X		[2]
	Horizonvervuiling	X	X		[1]
	Vispasseerbaarheid		X		[2]
	Waterverontreinigingsrisico		X		[2]

5 SELECTIE VARIANTEN

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk vergelijkt stuwmiddelen en geeft een selectie van stuwmiddelen weer. Zoals hoofdstuk 4 illustreert zullen stuwmiddelen allereerst geselecteerd worden aan de hand van eisen en randvoorwaarden zoals gesteld in hoofdstuk 3. Paragraaf 5.2 en Bijlage B geven een totaaloverzicht van de stuwmiddelen weer. Per stuwmiddel is een tabel opgesteld met voor- en nadelen en zijn minimale breedtes en hoogtes gegeven. Paragraaf 5.2 geeft aan welke stuwmiddelen voldoen aan de eisen en welke deelvarianten gekozen zijn binnen de verschillende stuwtypes. Paragraaf 5.3 behandelt de Trade Off Matrix en geeft toelichting op de gemaakte keuzes binnen deze selectie. Paragraaf 5.4 geeft toelichting op de keuze van een innovatieve variant. Hoofdstuk 5 geeft uiteindelijk vier varianten, waarvan drie uit de TOM en één innovatieve variant, deze vier varianten worden uitvoerig vergeleken in Hoofdstuk 6.

Achtergrondfoto: Monding van de Niers in de Maas
(Houdt J. v., Maas oevers projecten ID507866, 2016)

5.2 Stuwmiddelen

5.2.1 Totaaloverzicht stuwmiddelen

Het totaaloverzicht van stuwmiddelen is te vinden in Bijlage B. Bijlage B geeft alle bekende stuwmiddelen weer en geeft per stuwmiddel een korte uitleg over de werking en de economische rendabele breedtes en hoogtes. Daarnaast geven tabellen de voor- en nadelen weer per stuwmiddel. De voor- en nadelen zijn opgesteld vanuit bronnen en vanuit redentie. Als laatste geeft de bijlage weer waarom de stuwmiddelen wel of niet aan de eisen voldoen en of ze meegenomen worden in verder onderzoek. Paragraaf 5.2.2 geeft de twaalf verschillende stuwmiddelen weer die voldoen aan de eisen; deze zal het onderzoek verder meenemen.

5.2.2 Geschikte stuwmiddelen

Uit de opsomming van 25 stuwmiddelen in Bijlage B zijn twaalf stuwmiddelen geschikt gebleken voor verdere vergelijking. Deze twaalf stuwmiddelen zijn kort beschreven in deze paragraaf; een uitgebreidere uitwerking is te vinden in Bijlage B. Onderstaande stuwmiddelen voldoen aan de uitgangspunten en vormen de input voor de TOM:

Vizierstuw

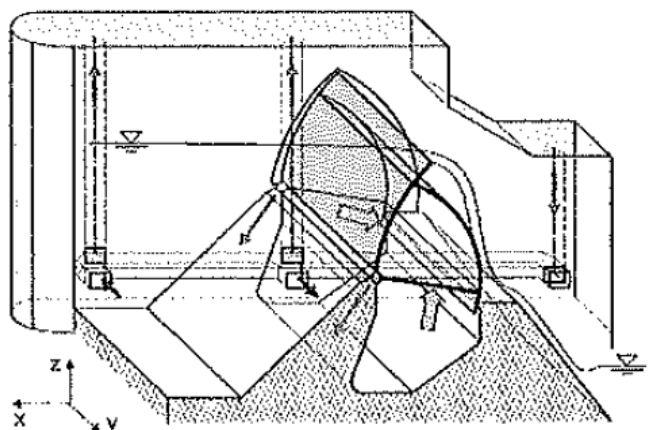
De vizierstuw bestaat uit één of meerdere halve bogen. De halve bogen keren het water en kunnen door middel van kabels geheven worden. Draaipunten aan het einde van de halve bogen garanderen de draai naar boven en de verankering in de pijlers. In Nederland zijn drie vizierstuwen toegepast in de Neder-Rijn en de Lek. Figuur 4 geeft de vizierstuw bij Hagestein weer.



Figuur 4: Stuw Hagestein, een vizierstuw (RWS, 2007).

Trommeldeur met klep

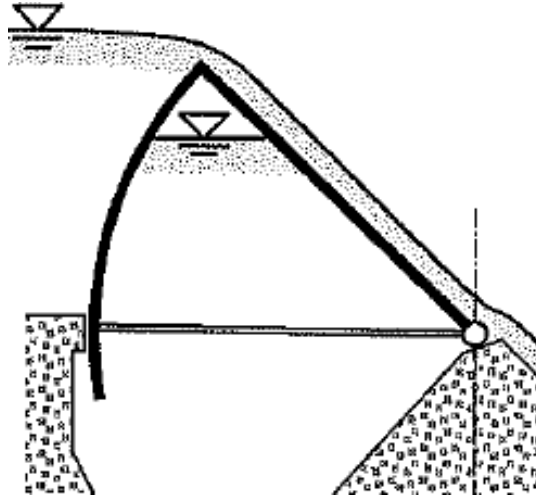
De trommeldeur is een oud concept, waarin de trommel, of luchtkist, in een uitsparing gesitueerd is en scharnierend vastgezet is aan de drempel. Wanneer de uitsparing vol met water loopt, zal de trommel opdrijven en zo water keren. Boven op de trommel zijn kleppen toe te passen om zo specifieke debieten te kunnen reguleren. Figuur 5 geeft het principe van een trommeldeur weer (Daniel & Paulus, 2018).



Figuur 5: Schematische weergave van een trommeldeur (Daniel & Paulus, 2018).

Sectordeur met klep

De sectordeur lijkt qua werking erg op de trommeldeur. Ook de sectordeur opent en sluit door middel van water dat in een uitsparing loopt en zo het keermiddel heft. Waar de trommeldeur bestaat uit een kist met lucht, heeft de sectordeur echter geen beplating aan de onderzijde. Dit zorgt ervoor dat water onder de deur stroomt en dat waterdruk de deur heft. Boven op de sectordeur zijn kleppen toe te passen om zo specifieke debieten te kunnen laten overstromen. Figuur 6 geeft schematisch de werking van de sectordeur weer.



Figuur 6: Schematische weergave van een sectordeur (Daniel & Paulus, 2018).

Verticaal draaiende segmentdeur met klep

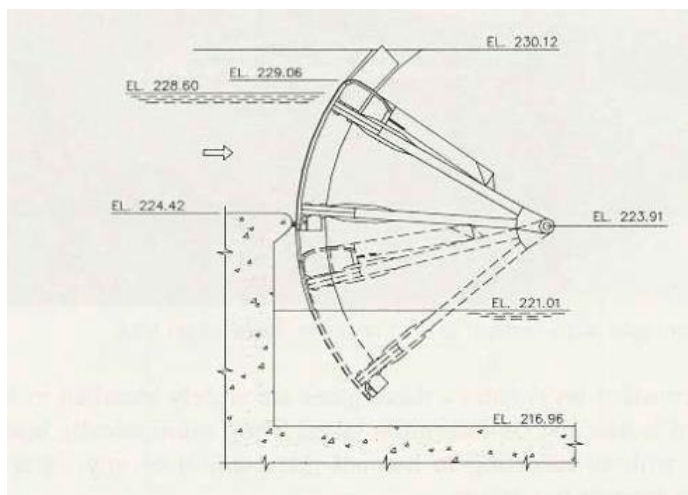
Segmentdeuren bestaan uit gebogen platen die met een arm scharnierend vastgezet zijn in pijlers. Segmentdeuren kunnen horizontaal en verticaal draaien. Deze variant draait verticaal en heeft dus een horizontale draai-as. Boven op de verticaal draaiende segmentdeuren zijn kleppen toe te passen voor het doorlaten van specifieke debieten. Figuur 7 geeft de verticaal draaiende segmentdeur met klep weer bij Donzère in Frankrijk. De verticaal draaiende segmentdeur met klep wordt in het vervolg segmentdeur met klep genoemd.



Figuur 7: Segmentdeur met klep bij Donzère, Frankrijk (Janberg, 2006).

Overstroombare segmentdeur

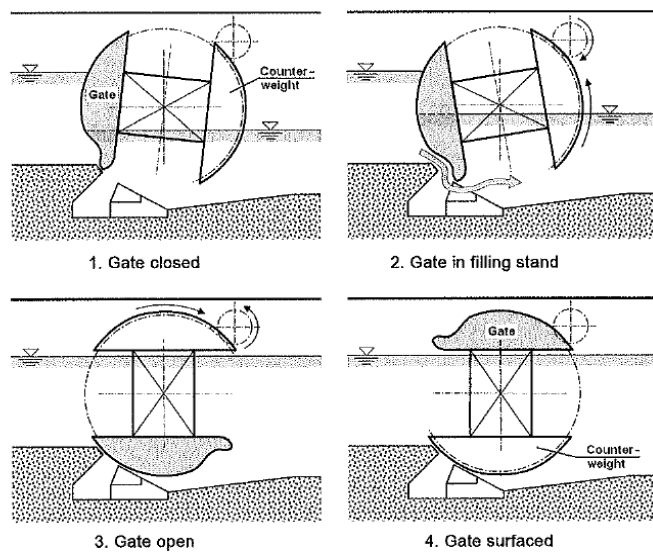
De overstroombare segmentdeur is qua werking vrijwel identiek aan de segmentdeur met klep. De overstroombare segmentdeur draait echter naar beneden in een uitsparing of verlaging van de drempel. Figuur 8 geeft een voorbeeld van een overstroombare segmentdeur weer.



Figuur 8: Schematische weergave van de overstroombare segmentdeur bij Saint Anthony Falls, VS, in de Mississippi rivier (Erbisti, 2004).

Roterende segmentdeur

De roterende segmentdeur bestaat uit een bolle deur welke door middel van cilinderschijven of armen, met eenzelfde radius als de deur, volledig rond kunnen draaien. Kenmerkend aan de roterende segmentdeur zijn de bewegingswerken. Deze zijn anders dan bij andere segmentdeuren, aangezien de deur volledig rond kan draaien. De Thames Barrier is een goed voorbeeld van een roterende segmentdeur (zie Figuur 10). Figuur 9 geeft schematisch de werking van een roterende segmentdeur weer (Daniel & Paulus, 2018).



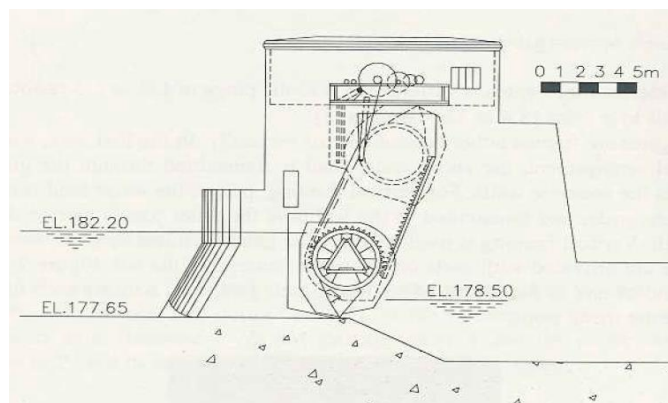
Figuur 9: Schematische weergave van een roterende segmentdeur (Daniel & Paulus, 2018).



Figuur 10: Thames Barrier met roterende segmentdeur (Institut für Hydromechanik Universitaet Karlsruhe).

Oprollende cilinderdeur

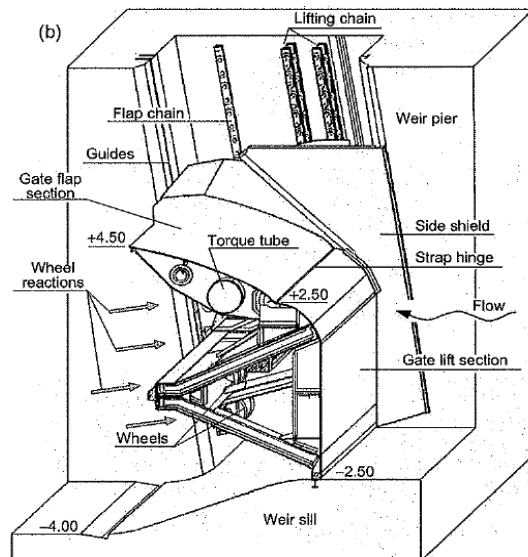
De oprollende cilinderdeur bestaat uit een langwerpige horizontale cilinder. Deze cilinder of buis keert het water en kan over een tandbaan schuin omhoog getrokken worden door kabels. De oprollende cilinderdeur is een relatief oud concept en is in de Verenigde Staten veelvuldig toegepast (Erbisti, 2004). Figuur 11 geeft een oprollende cilinderdeur weer.



Figuur 11: Schematische weergave van een oprollende cilinderdeur (Erbisti, 2004).

Hefdeur met klep

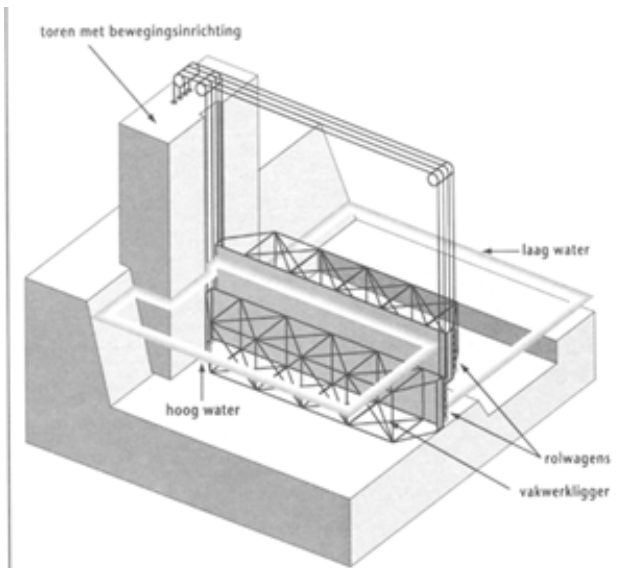
Een hefdeur is kortgezegd een schuif die op en neer beweegt en zo water keert en doorlaat. Hefdeuren zijn door de jaren heen veelvoudig toegepast in Nederland. Boven op de hefdeur is een klep te plaatsen om zo specifieke debieten te kunnen afvoeren. Een voorbeeld hiervan is de stuw bij Borgharen; hier zijn hefdeuren met klep toegepast. Figuur 12 geeft schematisch een hefdeur met klep weer.



Figuur 12: Schematische weergave van hefdeur met klep (Daniel & Paulus, 2018).

Dubbele hefdeur

Een dubbele hefdeur bestaat uit twee schuiven die los van elkaar kunnen bewegen. De schuiven zijn tegen elkaar geplaatst en kunnen samen een hogere waterhoogte keren dan afzonderlijk. Doordat ze afzonderlijk kunnen bewegen kunnen ze zowel onder- als overstroom waarborgen. Voorbeelden van dubbele hefdeuren zijn de Stoneydeuren toegepast bij Sambeek, Belfeld, Roermond en Linne. Figuur 13 geeft schematisch de werking van een dubbele hefdeur weer.



Figuur 13: Schematische weergave van een dubbele hefdeur (Frijs, 2019).

Klepstuw

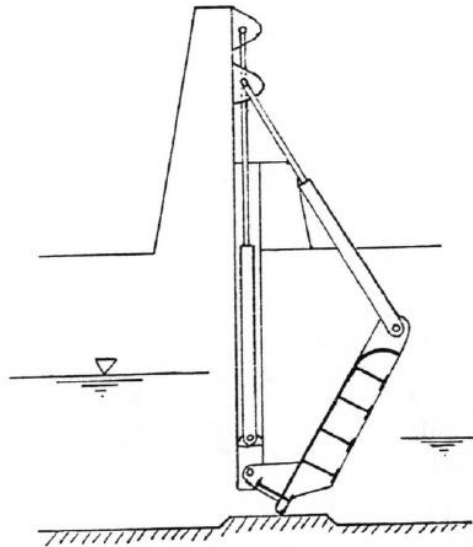
Klepstuwen bestaan uit een of meerdere kleppen die scharnierend verbonden zijn aan een drempel. De kleppen worden aangedreven door cilinders, kabels of drijven zelf op. Figuur 14 geeft een klepsysteem weer van de stormvloedkering bij Venetië, die uit zichzelf opdrijft (Daniel & Paulus, 2018).



Figuur 14: Klepsysteem als stormvloedkering in Venetië (Daniel & Paulus, 2018).

Van Bochhoveschuif

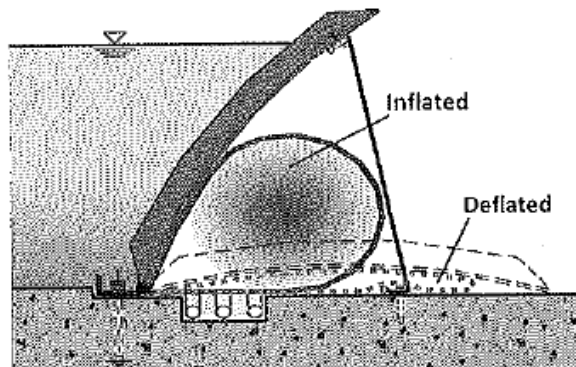
De Van Bochhoveschuif is een soort klepstuw met meerdere aandrijvingen, waardoor de schuif niet alleen op en neer kan klappen, maar ook de onderzijde van de schuif op en neer kan laten. De Van Bochhoveschuif is echter nog nooit toegepast. Figuur 15 geeft een doorsnedetekening van de Van Bochhoveschuif weer (Snel, 1987).



Figuur 15: Schematische weergave van de Van Bochhoveschuif. (Snel, 1987).

Klep-balgstuw

De klep-balgstuw bestaat uit een klep, net zoals bij de klepstuw, en uit een balg. De balg drukt door zwelling de klep omhoog. In de balg kan water of lucht gelaten worden, waardoor de klep omhoog komt te staan. Figuur 16 geeft een doorsnede van een klep-balgstuw weer (Daniel & Paulus, 2018).



Figuur 16: Schematische weergave van een klep-balgstuw (Daniel & Paulus, 2018).

5.3 Trade-Off Matrix

5.3.1 Opzet

De Trade-Off Matrix (TOM) vergelijkt de twaalf stuwmiddelen uit paragraaf 5.2 redelijk grof op een aantal aspecten. Deze paragraaf beschrijft de deelcriteria die de TOM gebruikt en licht ze toe. Daarnaast licht deze paragraaf toe hoe de TOM de verschillende deelcriteria afweegt en geeft bij enkele kwantitatieve deelcriteria een referentiewaarde. Paragraaf 4.2.3 beschrijft welke deelcriteria de TOM afweegt. Deze zijn in de onderstaande opsomming gegeven:

- kostenefficiënte breedte stuwmiddelen;
- keerbare waterhoogte;
- benodigde ruimte;
- benodigd materiaal;
- bewezen technologie;
- gevoeligheid voor ijs & vuil;
- risico's op menselijke fouten, aanvaring & storingen;
- horizonvervuiling;
- onderhoud;
- innovatie;
- esthetica.

Deze paragraaf beschrijft de opzet van de TOM en geeft een korte toelichting op de toetsing door de deelcriteria. Paragraaf 5.3.2 geeft het resultaat van de TOM. De TOM, met een uitleg, is weergegeven in Bijlage C.

De TOM beoordeelt de verschillende deelcriteria op verschillende manieren. Deze deelcriteria wegen af in welke mate de stuwmiddelen voldoen aan het criterium. De stuwmiddelen kunnen goed voldoen, niet goed voldoen of niet voldoen. Stuwmiddelen die goed voldoen krijgen een groene beoordeling in de TOM, stuwmiddelen die niet goed voldoen krijgen een oranje beoordeling en stuwmiddelen die niet voldoen krijgen een rode beoordeling. Onderstaande opsomming beschrijft de verschillen in beoordeling van de verschillende deelcriteria:

- De eerste twee deelcriteria: 'kostenefficiënte breedte stuwmiddelen' en 'keerbare waterhoogte' beoordelen stuwmiddelen op een specifiek waarde, in beide gevallen maten in meters. Deze deelcriteria wegen af aan de hand van een referentiewaarde. Voor het deelcriterium 'kostenefficiënte breedte stuwmiddelen' is deze referentiewaarde 30 tot 50 m. Stuwmiddelen met een kostenefficiënte breedte tussen de 30 en 50 meter krijgen een groene kleur. Als de kostenefficiënte breedte van een stuwmiddel 5 m of minder afwijkt van de referentiebreedte krijgt het een oranje kleur. Als de kostenefficiënte breedte meer dan 5 m afwijkt van de referentiebreedte krijgt het een rode kleur. Voor het deelcriterium 'keerbare waterhoogte' geldt dat het stuwmiddel een groene kleur krijgt als de keerbare waterhoogte van het stuwmiddel hoger is dan 6 m. Het krijgt een oranje kleur bij een keerbare waterhoogte tussen 5 en 6 m en een rode kleur bij een keerbare waterhoogte lager dan 5 m. In Bijlage C is de bepaling van de referentiewaardes weergegeven.
- De volgende twee deelcriteria: 'benodigde ruimte' en 'benodigd materiaal', wegen af hoeveel oppervlak of materiaal benodigd is voor een stuw met een bepaald stuwmiddel. Bij veel benodigde ruimte of materiaal krijgt het stuwmiddel een rode beoordeling, bij een gemiddelde hoeveelheid ruimte of materiaal krijgt het desbetreffende stuwmiddel een oranje beoordeling, bij weinig ruimte of materiaal krijgt het stuwmiddel een groene beoordeling.
- Andere deelcriteria wegen af hoe goed de stuwmiddelen voldoen doormiddel van een 'ja', 'nee' of een 'enigszins'. De deelcriteria 'bewezen technologie' en 'gevoeligheid voor ijs & vuil' beoordelen op deze manier met een groene kleur (ja), oranje kleur (enigszins) of rode kleur (nee).
- Als laatst wegen bepaalde deelcriteria af in welke mate stuwmiddelen voldoen aan het criterium doormiddel van een hoge, lage of neutrale beoordeling. De deelcriteria: 'risico's op menselijke fouten, aanvaring & storingen', 'horizonvervuiling' en 'onderhoud' zien een hoge beoordeling als slecht (rood) en lage beoordeling als goed (groen). De deelcriteria 'Innovatie' en 'Esthetica' zien hoog als goed (groen) en laag als slecht (rood).

De som van groene, oranje en rode scores geeft een totaalscore per stuwmiddel. Rode scores geven in deze TOM een negatieve punt aan de totaalscore, oranje scores geven geen punt aan de totale score en groene scores geven een positieve punt aan de totaalscore. Het onderzoek neemt de drie stuwmiddelen met de hoogste totaalscore mee in de rest van de vergelijking. Daarnaast zal het onderzoek een innovatieve variant meenemen in verdere vergelijking (paragraaf 5.4).

De deelcriteria vereisen een korte toelichting. Deze toelichting is te vinden in Bijlage C. Deze toelichting is van belang om te begrijpen waarom de stuwmiddelen een bepaalde score krijgen.

5.3.2 Resultaat

Bijlage C geeft de TOM weer. Tabel 7 geeft scores per stuwmiddel zoals bepaald in de TOM.

Tabel 7: TOM-scores per stuwmiddel.

Stuwmiddel:	TOM-score:
Vizierstuw	1
Trommeldeur met klep	1
Sectordeur met klep	3
Verticaal draaiende segmentdeur met klep	7
Overstroombare segmentdeur	8
Roterende segmentdeur	3
Oprollende Cilinderdeur	1
Hefdeur met klep	2
Dubbele hefdeur	-1
Van Bochoveschuif	-3
Klepstuw	2
Klep-balgstuw	5

Het onderzoek zal de segmentdeur met klep, de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw, samen met een vierde innovatieve variant verder ontwerpen, uitwerken en vergelijken.

5.4 Innovatieve variant

De opsomming van stuwmiddelen uit Bijlage B is door een literatuurstudie tot stand gekomen. In deze literatuurstudie komen alleen maar al bestaande stuwmiddelen aan bod. Alle stuwmiddelen in de opsomming zijn dus stuwmiddelen die al vaker zijn toegepast en dus niet erg innovatief. Om het onderzoek toch een innovatief karakter te geven, wordt een innovatieve variant toegevoegd aan de drie varianten uit de TOM. Deze vier varianten worden verder uitgewerkt en afgewogen in de MCA.

Een brainstormsessie ligt ten grondslag aan de keuze voor de innovatieve variant. Deze brainstormsessie heeft voornamelijk de focus gehad op nieuwe open-sluit bewegingen van stuwmiddelen, mogelijkheden tot multifunctionaliteit en nog niet eerder toegepast materialen. Ideeën waren bijvoorbeeld het hergebruiken van kanaalplaatvloeren als hefschuiven, een stuw gemaakt van een gebruikte windmolenwiek, balgstuwen die gebruik maken van osmose bij sluiten, een kniestuw waar een deur als een been opklapt, een holle bewoonbare stuw en een drijvende maar afzinkbare fietsbrug-stuw.

De kniestuw is uit de brainstormsessie naar voren gekomen als beste innovatieve variant. Kniestuven zijn opgebouwd uit kniesystemen: twee deuren in het verlengde van elkaar die met een scharnier aan elkaar verbonden zijn en door een scharnier aan een pijler verbonden zijn. Kabels en hydraulische cilinders waarborgen de opening van de kniesystemen zodat de twee deuren als een knie opklappen naar boven. Deze variant heeft daarom de naam 'kniestuw', hoofdstuk 6 en Bijlage F werken deze variant verder uit. Een soortgelijk bewegingsmechanisme is nog niet eerder toegepast als stuwmiddel. In dit onderzoek wordt gekeken hoe een innovatief stuwmiddel met een compleet nieuw bewegingsmechanisme zich verhoudt tot al bestaande en bewezen technologieën.

6 VERGELIJKING VARIANTEN

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de uitvoerige vergelijking van de vier varianten (stuwmiddelen), met daarnaast de keuze voor een voorkeursvariant voor een nieuwe stuw bij Grave. Paragraaf 4.1 geeft aan dat voor deze vergelijking een vijftal selectiemethoden van toepassing zijn. Drie hiervan zijn reeds toegepast. Dit hoofdstuk gebruikt de laatste twee methodes: de MCA en de kosten-batenanalyse. Tussen de TOM en de MCA bevinden zich het uitwerken en het ontwerpen van de overgebleven stuwmiddelen. Deze uitgewerkte stuwmiddelen vormen namelijk de input van de MCA.

Paragraaf 6.2 beschrijft wat de input is voor de MCA en geeft verschillende uitgangspunten voor de ontwerpen van de stuwmiddelen. Paragraaf 6.3 beschrijft de vier varianten, geeft hoeveelheden materiaal per variant en geeft aan hoe de stuwmiddelen uitgewerkt zijn. Paragraaf 6.4 geeft informatie over de MCA, de wegingen en de scores. Daarnaast geeft deze paragraaf het resultaat van de MCA. Paragraaf 6.5 beschrijft de kosten-batenanalyse. Paragraaf 6.6 bepaalt aan de hand van de MCA en de kosten-batenanalyse de uiteindelijke voorkeursvariant.

Achtergrond figuur: Maas
(Houdt J. v., Maas oevers projecten ID507888, 2016)

6.2 Ontwerputgangspunten

Hoofdstuk 6 werkt de drie varianten vanuit de TOM (paragraaf 5.3) en een vierde innovatieve variant (paragraaf 5.4) uit. In onderstaande opsomming zijn deze vier varianten opgesomd:

- segmentdeur met klep;
- overstroombare segmentdeur;
- klep-balgstuw;
- kniestuw.

Deze paragraaf geeft de input en de uitgangspunten voor de ontwerpen van de vier stuwmiddelen. Daarnaast vormt Bijlage D de input voor het ontwerp van de varianten; hier worden de hoeveelheden en de afmetingen berekend. Paragraaf 6.2 licht enkele aspecten toe welke van belang zijn voor deze berekeningen en voor het ontwerp van de verschillende varianten en vormt zo samen met de TOM de input voor de MCA. Het gaat hierbij om de volgende aspecten, deze worden in het vervolg van de paragraaf verder uitgewerkt:

- locatie stuw;
- aantal stuwopeningen;
- afmetingen;
- hoeveelheden materiaal.

6.2.1 Locatie stuw

Nieuwe stuwen in de Maas dienen los van de huidige stuwen te worden gebouwd, zoals vermeld in de eisen van de opdrachtgever (OpdrEis-3) in hoofdstuk 3. De locatie van de nieuwe stuw bij Grave is vastgesteld op 200 m bovenstrooms van de huidige stuw. De stuwlocatie is daarnaast gesitueerd tussen de westelijke uiterwaarde en de strekdam die de sluis van de stuw scheidt. Figuur 17 geeft het sluis- en stuwcomplex bij Grave weer. De locatie voor de nieuwe stuw ligt tussen het begin van de vistrap en de huidige sluis in. Dit is op de foto te zien. De breedte tussen de westelijke uiterwaarde en de strekdam is 144 m. Dit is vastgesteld als de totale breedte van de toekomstige stuw. Bijlage E geeft de volledige redenering voor de keuze van de locatie van de stuw.



Figuur 17: Stuw- en sluiscomplex bij Grave, foto van bovenstroomse zijde genomen (Houdt j. v., 2016).

6.2.2 Aantal stuwopeningen

Bijlage C beschrijft dat een aantal stuwopeningen van drie of vier het meest optimaal is voor de toekomstige stuw bij Grave. Voor elke variant dient dus inhoudelijk gekeken te worden naar het aantal stuwopeningen dat het meest geschikt is. Enkele aspecten wegen hier in mee. Deze zijn hieronder opgesomd:

- Het doorstromend oppervlak dient zo groot mogelijk te zijn, namelijk hoe meer stuwopeningen toegepast worden, hoe minder groot het doorstromend oppervlak is.
- De hoeveelheid materiaal dient zo klein mogelijk te zijn, namelijk hoe meer materiaal gebruikt wordt, hoe hoger de kosten zullen zijn.
- De varianten hebben een maximaal toe te passen breedte. Dit kan limiterend zijn bij het toepassen van een klein aantal stuwopeningen.
- Het aantal werktuigbouwkundige onderdelen dient zo laag mogelijk te zijn, namelijk hoe minder stuwopeningen, hoe minder onderdelen, hoe lager de faalkans van de stuw is.
- Het gevolg van het afsluiten van een stuwopening moet zo laag mogelijk zijn, namelijk hoe meer stuwopeningen, hoe kleiner de impact is.

Bovengenoemde aspecten wegen mee in de afweging voor het aantal stuwopeningen. Aangezien de laatste twee argumenten elkaar nagenoeg opheffen, is de keuze gemaakt met behulp van de eerste drie aspecten. Zoals Bijlage B beschrijft, zijn de toe te passen (kostenefficiënte) breedtes de volgende:

- segmentdeur met klep: 15 m tot 30 m (InCom Working Group, 2005);
- overstroombare segmentdeur: 15 m tot 30 m (InCom Working Group, 2005);
- klep-balgstuw: 20 m tot 120 m (Obermeyer Hydro inc, 2018);
- kniestuw: naar schatting 30 m tot 60 m.

Bij een stuwbreedte van 144 m en pijlers van 4 m breed zullen bij vier stuwopeningen de openingen 31 m breed zijn. Bij eenzelfde stuw- en pijlerbreedte zullen bij drie stuwopeningen de openingen 44 m breed zijn. Grotere pijlerbreedtes zullen in kleinere stuwopeningen resulteren. Deze informatie geeft samen met bovenstaande opsomming weer dat de segmentstuwen met vier stuwopeningen moeten worden toegepast. Voor de meeste toe te passen materialen geldt: hoe meer stuwopeningen, hoe meer materiaal; enkel voor staal geldt dat vaak minder staal toegepast hoeft te worden bij een vermeerdering van stuwopeningen. Vanuit deze redenering, en omdat het doorstromend oppervlak bij voorkeur groot is en de faalkans laag, is voor de klep-balgstuw en de kniestuw voor een aantal van drie stuwopeningen gekozen.

6.2.3 Afmetingen

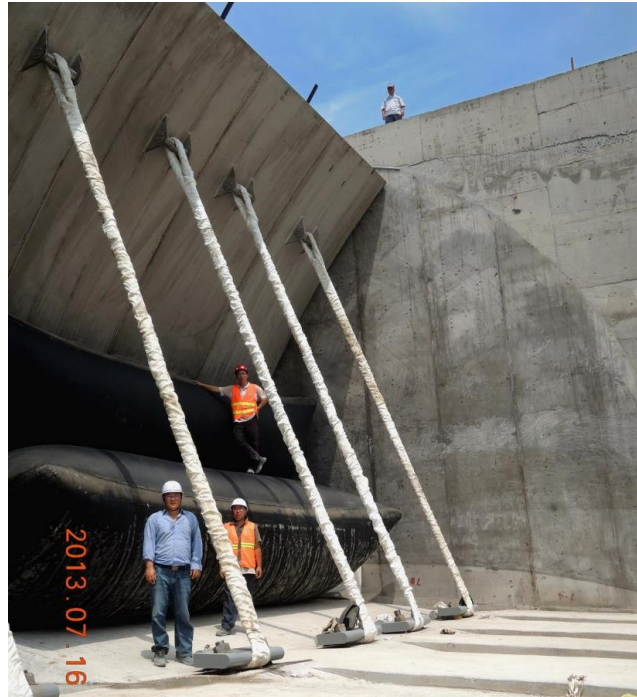
Dit onderzoek bepaalt de afmetingen van de vier varianten door middel van onderbouwde aannames en berekeningen. Hoofdstuk 3 vormt het uitgangspunt voor de afmetingen van de varianten. Bijlage D geeft de berekeningen weer voor de afmetingen van de varianten. Deze berekening berekent eerst het minimaal benodigd oppervlak van de stuw aan de hand van de eisen. Het doorstromend oppervlak is 10% groter dan het doorstromend oppervlak van de huidige stuw (HydrRand-8): 704 m² bij een waterstand van 8,5 m +NAP (hoogte van uiterwaarden ten oosten van de stuw). Toekomstige stuwen dienen minimaal te voldoen aan dit doorstromend oppervlak. De berekening laat verder de lijnbelastingen ten gevolge van waterdrukken en ijsbelastingen zien. De belastingen bestaan uit hydrostatische waterdrukken, hydrodynamische waterdrukken ten gevolge van windgolven en ijsbelastingen. Voor de waterdrukken is de maximale waterstand in het zomerbed inclusief een golfhoogte van 0,84 m maatgevend. Deze extra hoogte dekt de hydraulische randvoorwaarde HydrRand-5 waarin een extra waterhoogte van 0,5 m voor overstroom gesteld wordt. De berekeningen houden geen rekening met de hydrodynamische belasting van hoogwatergolven, omdat windgolven maatgevend zijn. Maatgevende combinaties van belastingen zijn 440-450 kN/m onder in de deur en 96 kN/m boven in de deur. Voor de varianten zijn een aantal dingen aangenomen, namelijk:

- De drempels zijn 3 m dik.
- De pijlers zijn 4 m dik, plus de diepte van de sponningen (Jong, 2014). De kniestuw is een uitzondering met diepere sponningen.
- De pijlers zijn maximaal 20 m lang (Jong, 2014) (afwijkende maten per stuwmiddel) en elk stuwmiddel heeft een lengte die bestaat uit de benodigde lengte voor bewegen van de deur plus minimaal 2,5 m aan beide kanten van het stuwmiddel (opeenvolgend vanaf buitenzijde: 1 m, 0,5 m voor schotbalksponning, 1 m, stuwmiddel). Het ontwerp is hierna het uitgangspunt voor eventuele extra lengte van de pijlers.
- De pijlers hebben een hoogte van 1 m boven de minimale hoogte van de uiterwaarden (Jong, 2014).

Bovenstaande aannames zijn gebaseerd op afmetingen van andere stuwen met vergelijkbare breedtes en keerbare hoogtes. Bijlage A geeft de dimensies van stuwen in de Maas, die vergelijkbaar zijn met de stuw bij Grave. De stuwopeningen zijn echter voor de toekomstige stuw bij Grave een stuk breder dan de stuwopeningen van meeste huidige stuwen in de Maas. Enkele stuwen in de Maas hebben pijlerbreedtes die een stuk breder zijn dan 4 m, maar deze pijlers bevatten vaak ingebouwde vispassages of fijnregulatie-openingen, waardoor deze breder zijn. De andere stuwen hebben vaak pijlers van 20 m lang en 4 m breed en drempels met diktes rond de 3 m. Een rapport voor de vervangingsopgave voor de stuwen in de Maas schrijft voor een toekomstige hefstuw een pijlerlengte voor van 20 m, een pijlerdikte van 4 m en een pijlerhoogte van 1 m boven het stuwpeil (Jong, 2014). De hoogte van pijlers is overgenomen uit deze bron en de lengte en breedte van de pijlers zijn als referentiewaarde genomen. De lengte van de pijlers verschilt voor de verschillende type deuren en de breedtes zijn ongeveer gelijk, met uitzondering van de kniestuw. Niet alle maten zijn overeenkomstig bovenstaande uitgangspunten. Hieronder zijn de afwijkende en aanvullende maten onderbouwd:

- De pijlers van de kniestuw zijn 10 m en 6 m breed. De pijlers van 10 m zijn zo breed gedimensioneerd, omdat de volledige deurhoogte de pijlers inklapt als het kniesysteem opent. Eén pijler heeft een breedte van 6 m, omdat hier geen kniesystemen in klappen, maar alleen heen rollen als de kniestuw gesloten is (sponningen zijn hier een meter diep).
- De balgen in de klep-balgstuw hebben een hoogte van 3 m in volledig opgeblazen stand. Deze hoogte is gekozen naar aanleiding van een vergelijkbaar project in China in de Nanming rivier. In Figuur 18 toont de klep-balgstuw bij Nanming (Obermeyer Hydro inc, 2018). Daarnaast beschermt de klep de balg en moet de balg in lege stand ook volledig onder de klep verdwijnen. Dit resulteert in een niet al te grote balg.
- De draaipunten van de segmentdeuren zijn minstens 1 m boven het stuwpeil van het stuwpannd Grave-Lith gesitueerd (Erbisti, 2004).

Bijlage D geeft de gehele berekening voor de dimensies en hoeveelheden van de verschillende stuwmiddelen. De berekening geeft een toelichting per variant op de maten en hoeveelheden voor het betonwerk, staalwerk, de bodembescherming, funderingspalen en wapening. Woeldrempels worden buiten beschouwing gelaten in het ontwerp.



Figuur 18: Klep-balgstuw bij Namding. (Obermeyer Hydro inc, 2018).

6.2.4 Hoeveelheden

De berekening van de hoeveelheden materiaal neemt enkele aspecten als uitgangspunt. De volgende aspecten vormen de basis van de berekening van hoeveelheden zoals in Bijlage D weergegeven is:

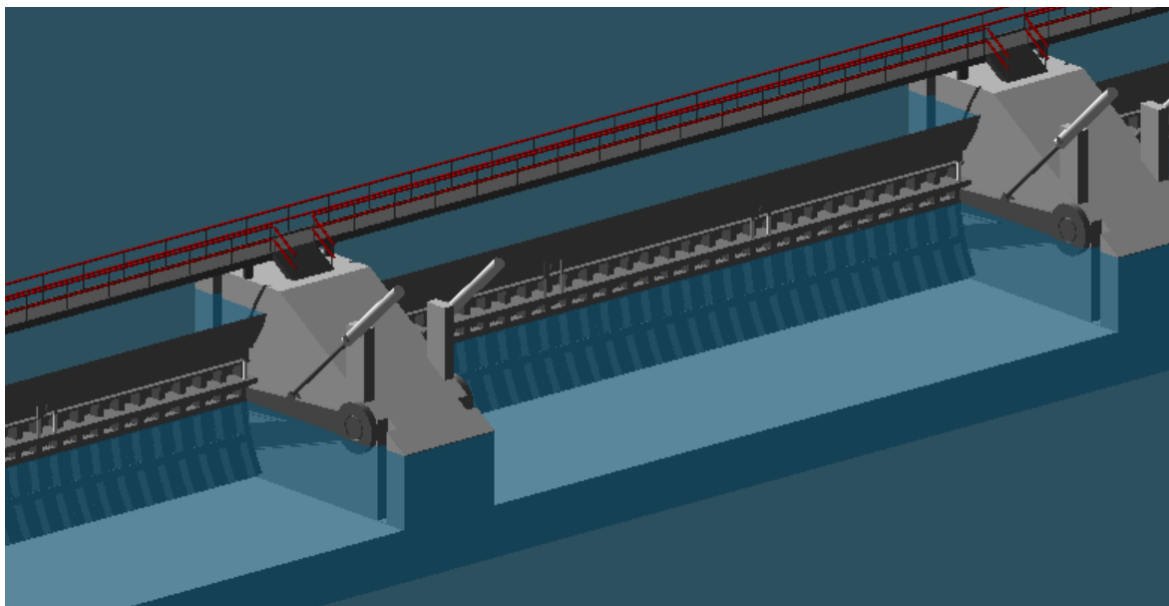
- Vuistregels liggen ten grondslag aan de bepaling van de hoeveelheden staal voor de segmentdeuren. Deze vuistregels zijn overgenomen uit het handboek: Design of Hydraulic Gates (Erbisti, 2004).
- Voor wapening is een hoeveelheid van 160 kg per m³ beton aangenomen (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020)
- Voor de fundering zijn palen van 10 m gekozen van 450 bij 450 mm in een raster van 2 m bij 2 m. (DINOloket, sd).
- Voor de bodembescherming is voor de benedenstroomse zijde van de stuw een toe te passen lengte van 10 maal de keerbare waterhoogte vastgesteld, voor de bovenstroomse zijde is een lengte van 8 maal de keerbare hoogte vastgesteld (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000).
- Draaipunten van de kniestuw zijn geschat op 10 ton staal per draaipunt.

6.3 Ontwerp varianten

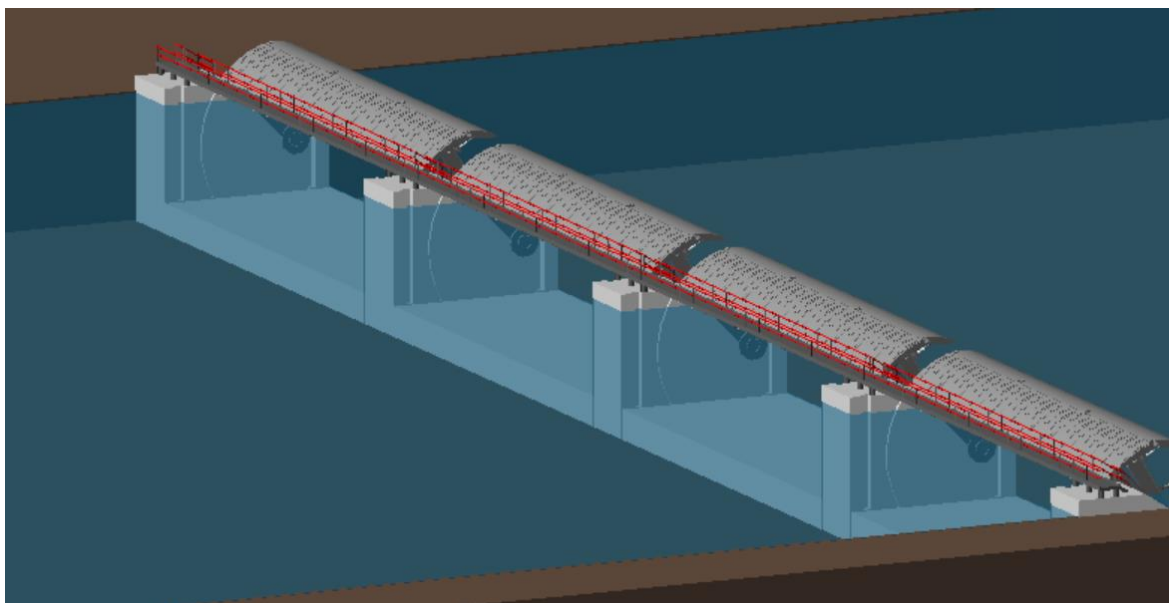
6.3.1 Variant 1: segmentdeur met klep

Ontwerp

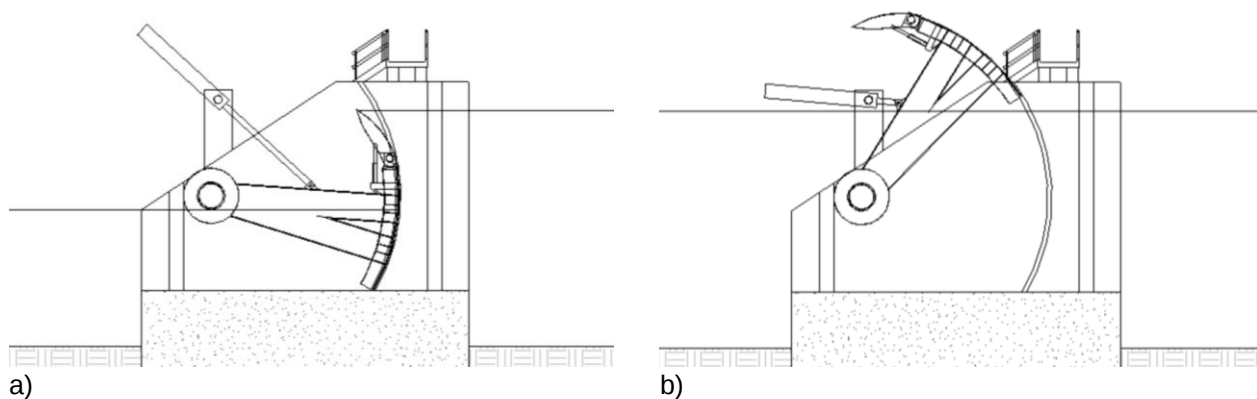
De eerste variant is de segmentdeur met klep. Zoals Bijlage B beschrijft, is een segmentdeur een radiale deur die vanuit een draaipunt een gebogen plaatconstructie draait door middel van aandrijvingen, in dit geval hydraulische cilinders. Deze variant op de segmentdeur draait naar boven en kan volledig boven het water uitkomen. De segmentdeur blijft altijd voor minimaal een halve meter tussen de pijlers en in de sponning zitten wanneer deze naar boven draait. Deze variant op de segmentdeur heeft daarnaast een klep boven op de deur die door middel van overstroom fijnregulatie kan garanderen. Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21 geven het ontwerp van de segmentdeur met klep weer. Zoals te zien is, draait de deur door kleine en ondiepe sponningen in de pijlers (Daniel & Paulus, 2018). Daarnaast is een voetgangersbrug toegepast over de pijlers voor onderhoud en inspectie.



Figuur 19: Ontwerp van de segmentdeur met klep. Geloten stand, gezien van de benedenstroomse zijde.



Figuur 20: Ontwerp van de segmentdeur met klep. Geopende stand, gezien vanaf bovenstroomse zijde.



Figuur 21: Ontwerp segmentdeur met klep. a) doorsnede gesloten stand, b) doorsnede geopende stand

Hoofdafmetingen

Deze alinea geeft de hoofdafmetingen van de variant. Paragraaf 6.2 en de berekening uit Bijlage D vormen hier het uitgangspunt. Tabel 8 geeft de afmetingen weer van het ontwerp van de segmentdeur met klep. Het ontwerp bestaat uit vier segmentdeuren tussen vijf pijlers.

Tabel 8: Hoofdafmetingen van de variant: segmentdeur met klep.

	Aantal	Breedte	Lengte	Bovenkant t.o.v. NAP	Hoogte element
Stuwopeningen	4	30,5 m	-	8,45 m +NAP	6,45 m
Segmentdeur	4	30,9 m	-	6,95 m +NAP	4,95 m
Klep op segmentdeur	4	30,9 m	-	8,5 m +NAP	1,55 m
Pijlers	5	4,4 m	11,75 m	9,5 m +NAP	7,5 m
Drempel	1	144 m	11,75 m	2 m +NAP	3 m

Voorbeelden van stuwen met verticaal draaiende segmentdeuren zijn te vinden in de Mississippi rivier (Daniel & Paulus, 2018) en de stuw bij Donzère-Mondragon in de rivier de Rhône in Frankrijk (Janberg, 2006). De pijlerlengte is afgesteld op deze voorbeelden en wijkt dus af van het initiële uitgangspunt van 20 m (paragraaf 6.2). Wel komt het overeen met het latere genoemde uitgangspunt (benodigde ruimte plus 5 m). De extra lengte voor de pijlers is vooral toegepast voor het waarborgen van onderhoud aan de deur. Namelijk het kunnen droogzetten van het stuwmiddel door schotbalken en het waarborgen van voldoende ruimte tussen de deur en de schotbalken.

Benodigd materiaal

Deze alinea gaat in op de hoeveelheden materiaal die nodig zijn voor de segmentdeur met klep. Bijlage D geeft de berekening weer van de hoeveelheden materiaal. De hoeveelheden zijn weergegeven in Tabel 9 en daaronder is toelichting gegeven op verschillende waarden.

Tabel 9: Hoeveelheden materiaal van de variant: segmentdeur met klep. Hoeveelheden zijn afgerond.

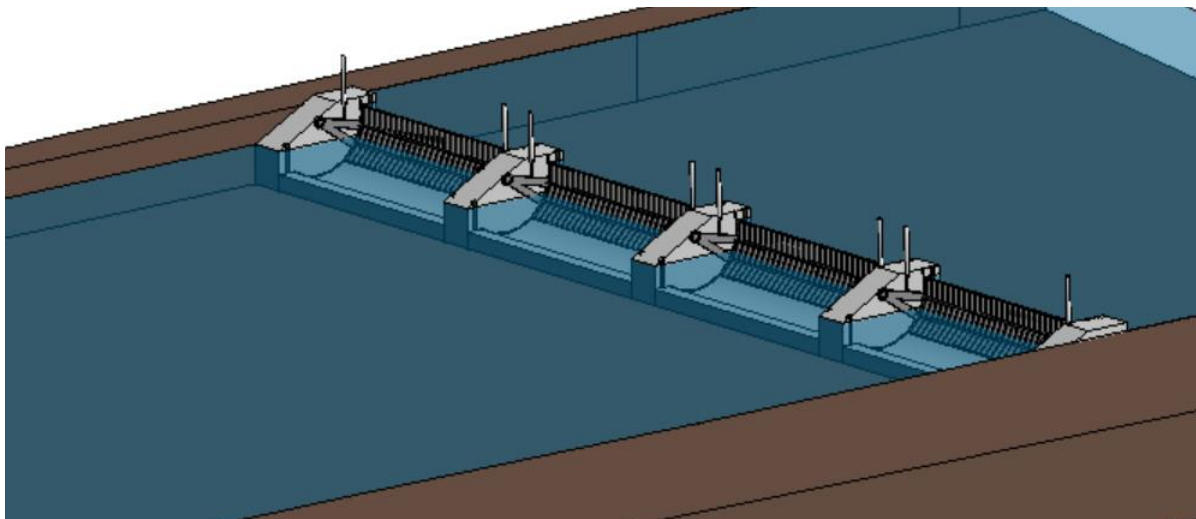
	Aantal	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Bodem-bescherming
Segmentdeur	4	360 ton	-	-	-	-
Drempel	1	-	5100 m ³	810 ton	900 m ²	-
Pijlers	5	-	1500 m ³	250 ton	1.300 m ²	-
Fundering (palen 450x450)	423	-	4200 m ¹	-	-	-
Bodem	-	-	-	-	-	17.000 m ²

Samengenomen is ongeveer 360 ton staal nodig voor de deuren, 6.600 m³ beton voor de drempel en de pijlers, 1.060 ton betonstaal, 2200 m² bekisting en 17.000 m² bodembescherming.

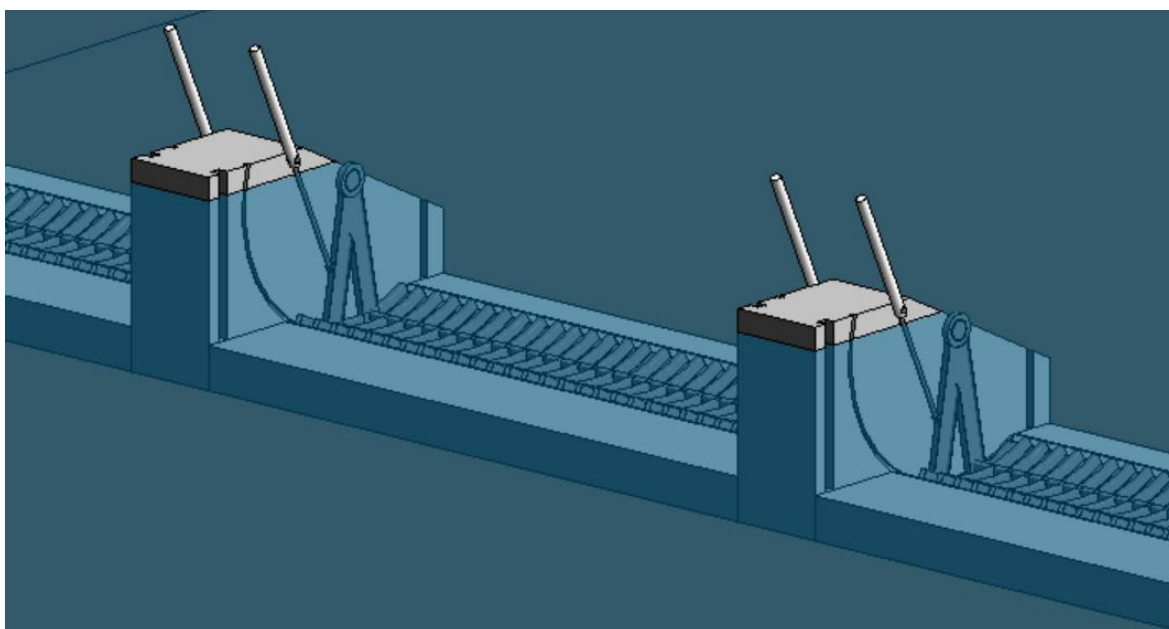
6.3.2 Variant 2: overstroombare segmentdeur

Ontwerp

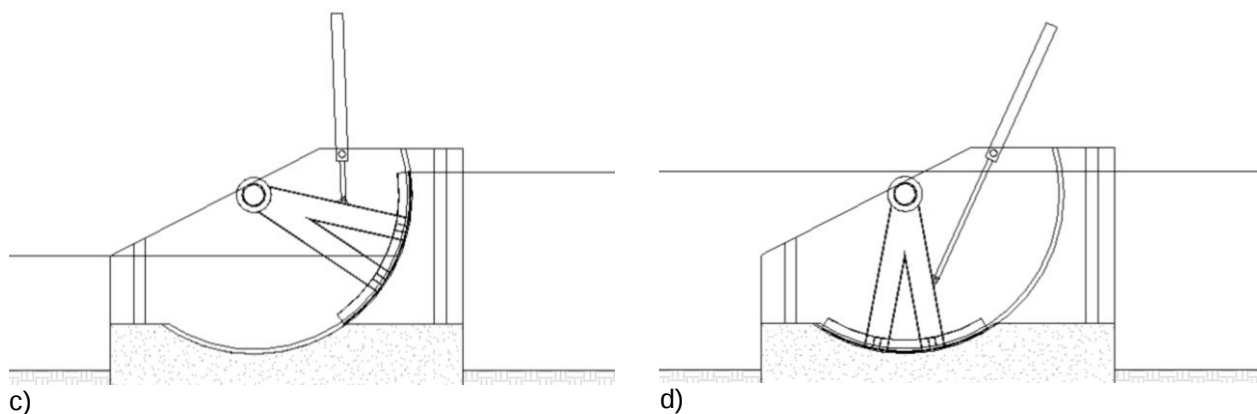
Deze paragraaf beschrijft het ontwerp van de overstroombare segmentdeur. Zoals bijlage B beschrijft, zijn segmentdeuren radiale deuren die vanuit een draaipunt door middel van zware armen een gebogen plaatconstructie draaien. De overstroombare segmentdeur draait naar onderen in een uitsparing. Het stuwmiddel wordt in dit geval aangedreven door hydraulische cilinders vanaf vijf pijlers. Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 geven het ontwerp weer van de overstroombare segmentdeur. Zoals te zien is, zijn vier segmentdeuren tussen vijf pijlers toegepast.



Figuur 22: Ontwerp van de overstroombare segmentdeur. Gesloten stand, benedenstroomse zijde.



Figuur 23: Ontwerp van de overstroombare segmentdeur. Gesloten stand, bovenstroomse zijde.



Figuur 24: Ontwerp overstroombare segmentdeur. a) doorsnede gesloten stand, b) doorsnede geopende stand.

Hoofdafmetingen

Deze alinea geeft inzicht in de hoofdafmetingen van het ontwerp. Uitgangspunten voor de afmetingen staan vermeld in paragraaf 6.2; de berekening, de bepaling van de dimensies en hoeveelheden materiaal zijn opgenomen in Bijlage D. Tabel 10 geeft de afmetingen van het ontwerp van de overstroombare segmentdeur.

Tabel 10: Hoofdafmetingen van de variant: overstroombare segmentdeur.

	Aantal	Breedte	Lengte	Bovenkant t.o.v. NAP	Hoogte element
Stuwopeningen	4	30,5 m	-	8,45 m +NAP	6,45 m
Segmentdeur	4	30,9 m	-	8,5 m +NAP	8,5 m
Pijlers	5	4,4 m	15,125 m	9,5 m +NAP	7,5 m
Drempel	1	144 m	15,125 m	2 m +NAP	3 m

Het ontwerp van de pijlers is afgeleid van reeds toegepaste segmentdeuren, paragraaf 6.3.1 geeft hierbij enkele voorbeelden. De overstroombare segmentdeur heeft echter langere pijlers en een langere drempel nodig dan de segmentdeur met klep, omdat de deur een heel eind in de uitsparing in de drempel draait in geopende stand. Daarnaast zijn de pijlers nog ongeveer 5 m langer voor het kunnen waarborgen van voldoende ruimte voor onderhoud en het kunnen droogzetten van het stuwmiddel door schotbalken.

Benodigd materiaal

Deze alinea gaat in op de hoeveelheden materiaal die nodig zijn voor de variant. Bijlage D geeft de berekening weer van deze hoeveelheden. De hoeveelheden zijn weergegeven in Tabel 11 en daaronder is toelichting gegeven op verschillende waarden.

Tabel 11: Hoeveelheden materiaal van de variant: overstroombare segmentdeur. Hoeveelheden zijn afgerond.

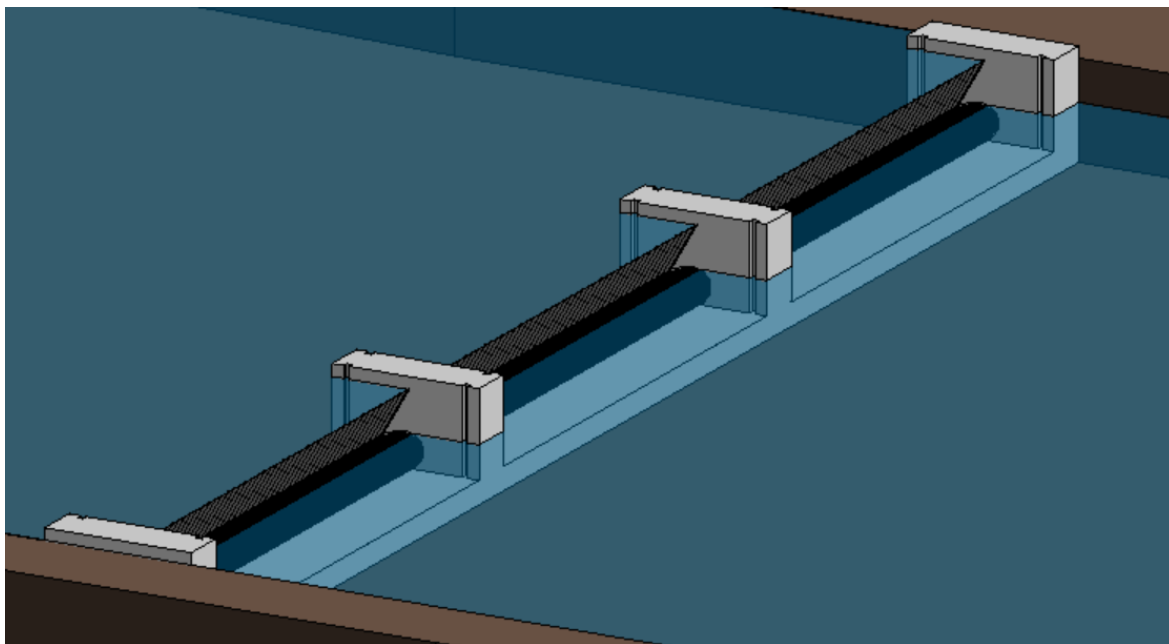
	Aantal	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Bodem-bescherming
Segmentdeur	4	380 ton	-	-	-	-
Drempel	1	-	6500 m ³	1.050 ton	900 m ²	-
Pijlers	5	-	2000 m ³	320 ton	1.500 m ²	-
Fundering (palen 450x450)	545	-	5445 m ¹	-	-	-
Bodem	-	-	-	-	-	17.000 m ²

Samengenomen is er 380 ton staal nodig voor de deuren, 8.500 m³ beton voor de drempel en de pijlers, 1.370 ton betonstaal, 2400 m² bekisting en 17.000 m² bodembescherming.

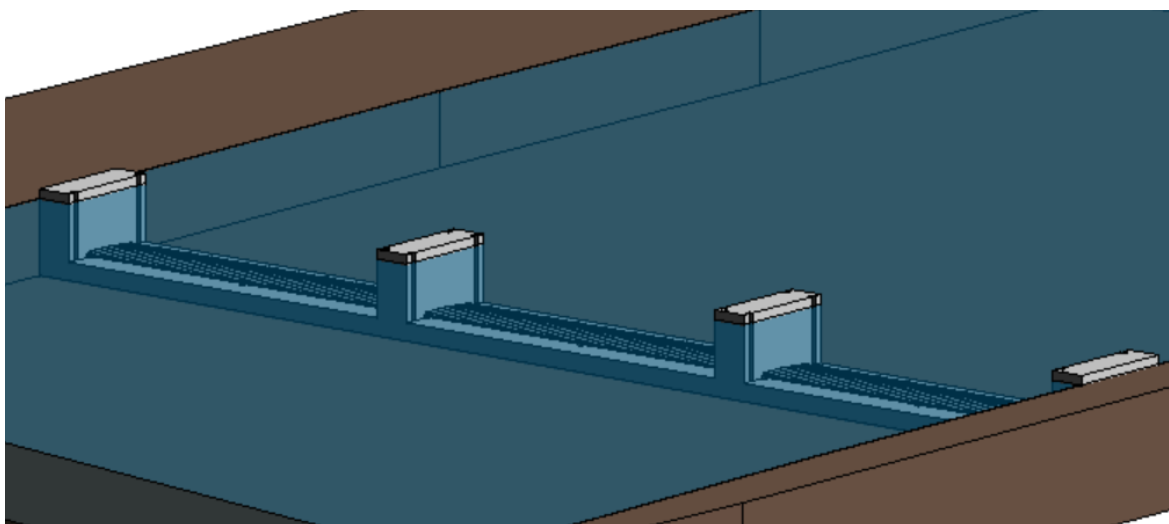
6.3.3 Variant 3: klep-balgstuw

Ontwerp

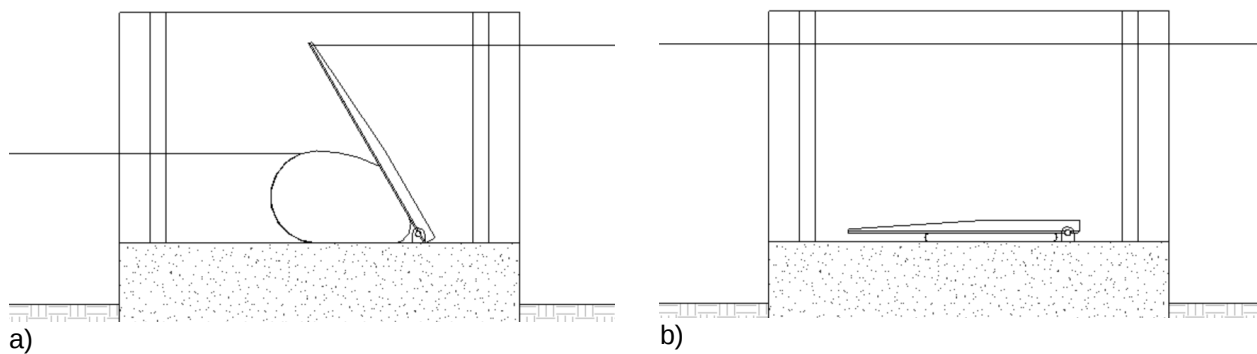
Deze alinea licht het ontwerp van de klep-balgstuw toe. Zoals bijlage B beschrijft, is een klep-balgstuw een combinatie van een klepstuw en een balgstuw. De balg drukt in opgeblazen vorm de klep omhoog tot de klep in een hoek van ongeveer 60° staat. Figuur 25, Figuur 26 en Figuur 27 geven het ontwerp van de klep-balgstuw weer.



Figuur 25: Ontwerp van de Klep-balgstuw. Gesloten stand, benedenstroomse zijde.



Figuur 26: Ontwerp van de Klep-balgstuw. Geopende stand, bovenstroomse zijde.



Figuur 27: Ontwerp klep-balgstuw. a) doorsnede gesloten stand, b) doorsnede geopende stand.

Hoofdafmetingen

Deze alinea geeft inzicht in de hoofdafmetingen van het ontwerp. Uitgangspunten voor de afmetingen staan vermeld in paragraaf 6.2; de berekening en bepaling van de dimensies en hoeveelheden zijn opgenomen in Bijlage D. Tabel 12 geeft de afmetingen weer van het ontwerp van de klep-balgstuw.

Tabel 12: Hoofdafmetingen van de variant: klep-balgstuw.

	Aantal	Breedte	Lengte	Bovenkant t.o.v. NAP	Hoogte element
Stuwopeningen	3	42,67 m	-	8,45 m +NAP	6,45 m
Klep (verschillende deellekken)	3	42,67 m	-	8,5 m +NAP	8,5 m
Balg	3	42,67 m	3 m	5 m +NAP	3 m
Pijlers	5	4 m	12,95 m	9,5 m +NAP	7,5 m
Drempel	1	144 m	12,95 m	2 m +NAP	3 m

De pijlerlengte is afgeleid van een vergelijkbaar project (Obermeyer Hydro inc, 2018). De lengte van de pijlers en de drempel is ongeveer gelijk aan de lengte van de klep in neergelaten stand plus 5 m ten behoeve van schotbalken en onderhoud.

Benodigd materiaal

Deze alinea gaat in op een aantal materiaalhoeveelheden die benodigd zijn voor de variant. Bijlage D geeft de berekening weer van deze hoeveelheden. De hoeveelheden zijn weergegeven in Tabel 13 en daaronder is toelichting gegeven op verschillende waarden.

Tabel 13: Hoeveelheden materiaal van de variant: klep-balgstuw.

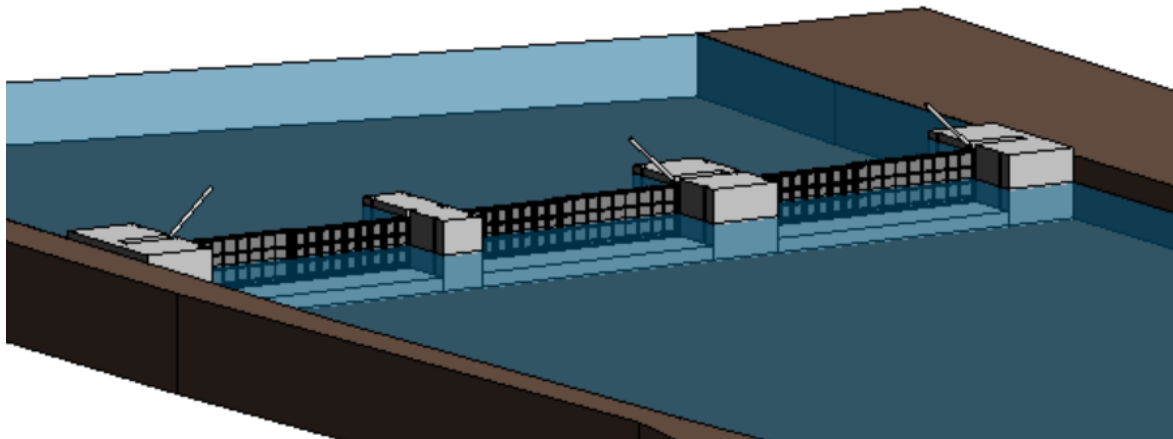
	Aantal	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Bodem- bescherming
Klep	3	290 ton	-	-	-	-
Drempel	1	-	5.600 m ³	560 ton	900 m ²	-
Pijlers	5	-	1.500 m ³	150 ton	1.000 m ²	-
Fundering (palen 450x450)	467	-	4670 m ¹	-	-	-
Bodem	-	-	-	-	-	17.000 m ²

Samengenomen is er 290 ton staal nodig voor de deuren, 7.100 m³ beton voor de drempel en de pijlers, 710 ton betonstaal, 1.900 m² bekisting en 17.000 m² bodembescherming.

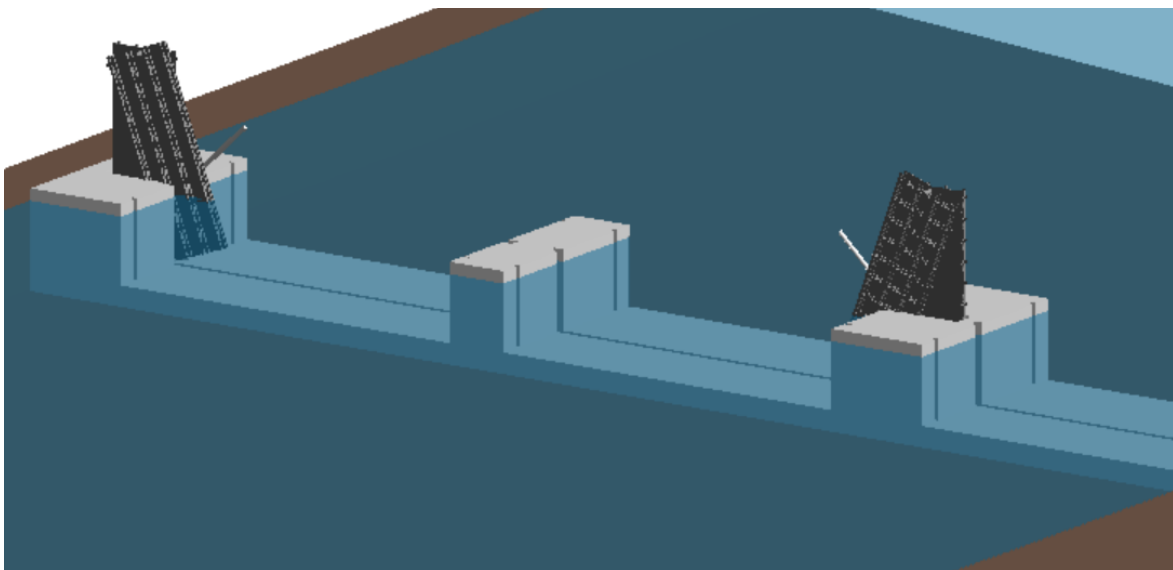
6.3.4 Variant 4: kniestuw

Ontwerp

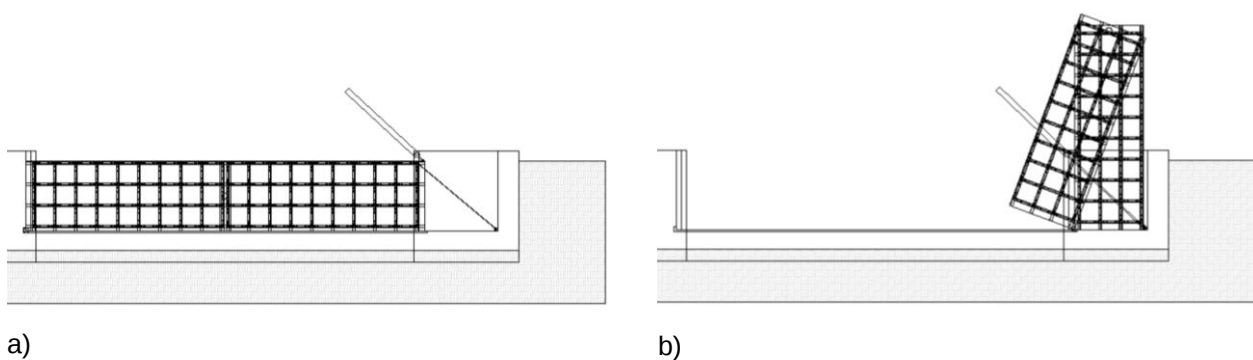
Deze alinea behandelt het ontwerp van de innovatieve variant: de kniestuw. De kniestuw is door de onderzoekers gekozen als innovatieve variant door middel van een brainstormsessie. De kniestuw bestaat uit drie stuwoopeningen, waarin drie kniestuwsystemen kunnen openen en sluiten. De kniestuwsystemen bestaan uit twee starre vakwerkdeuren die door middel van een draaipunt als een knie kunnen bewegen. Daarnaast is per stuwoopening één van de vakwerkdeuren door middel van een draaipunt verankerd in de pijlers. Door de twee draaipunten per kniestuwsysteem kunnen de deuren door middel van kabels, rollers en hydraulische cilinders als een been opklappen. Figuur 28, Figuur 29 en Figuur 30 geven dit systeem weer. Wanneer het kniestuwsysteem opengaat, zal het uiterste punt van de vakwerkdeur die niet aan een pijler verbonden is door middel van een roller over de drempel van de stuw getrokken worden door een kabel.



Figuur 28: Ontwerp van de Kniestuw. Gesloten stand, benedenstroomse zijde.



Figuur 29: Ontwerp van de Kniestuw. Geopende stand, benedenstroomse zijde.



a)

b)

Figuur 30: Ontwerp kniestuw. a) vooraanzicht enkele stuwoopening gesloten stand, b) vooraanzicht enkele stuwoopening geopende stand.

Hoofdafmetingen

Deze alinea geeft inzicht in de hoofdafmetingen van het ontwerp. Uitgangspunten voor de afmetingen staan vermeld in paragraaf 6.2. De berekening en de bepaling van de dimensies en hoeveelheden zijn opgenomen in Bijlage D. Tabel 14 geeft de afmetingen weer van het ontwerp van de kniestuw.

Tabel 14: Hoofdafmetingen van de variant: kniestuw.

	Aantal	Breedte	Lengte	Bovenkant t.o.v. NAP	Hoogte element
Stuwopeningen	3	36 m	-	8,45 m +NAP	6,45 m
Kniesysteem	3	38 m	-	8,5 m +NAP	8,5 m
Pijlers	4	10 m (3x) / 6 m (1x)	20 m	9,5 m +NAP	7,6 m
Drempel	1	144 m	20 m	1,9 m +NAP	3 m

De pijlerlengte is gekozen op basis van het feit dat de pijlers veel kracht moeten opnemen. Daarnaast is een pijlerlengte voorgeschreven voor een nieuwe stuw bij Grave (Jong, 2014). De drempeldiepte is 10 cm dieper dan bij de andere stuwmiddelen. Hier is voor gekozen om het doorstromend oppervlak te kunnen waarborgen (HydrRand-8).

Benodigd materiaal

Deze alinea gaat in op de hoeveelheden materiaal die nodig zijn voor de variant. Bijlage D geeft de berekening weer van deze hoeveelheden. De hoeveelheden zijn weergegeven in Tabel 15 en daaronder is toelichting gegeven op de verschillende waarden.

Tabel 15: Hoeveelheden materiaal van de variant: kniestuw. Hoeveelheden zijn afgerond.

	Aantal	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Bodem- bescherming
Kniedeur	3	505 ton	-	-		-
Drempel	1	-	8.600 m ³	860 ton	900 m ²	-
Pijlers	5	-	5.200 m ³	520 ton	2.200 m ²	-
Fundering (palen 450x450)	720	-	7200 m ¹	-		-
Bodem	-	-	-	-		17.000 m ²

Samengenomen is er 505 ton staal nodig voor de deuren, 14.000 m³ beton voor de drempel en de pijlers, 1.380 ton betonstaal, 3.100 m² hout voor de bekisting en 17.000 m² bodembescherming.

6.4 Multicriteria analyse

Zoals paragraaf 4.2 beschrijft, weegt de MCA de varianten op basis van de hoofdcriteria af, met uitzondering van de hoofdcriteria 'fysieke eigenschappen' en 'kosten'. De verschillende onderliggende deelcriteria fungeren als ondersteuning en onderbouwing van de hoofdcriteria. Deze paragraaf beschrijft hoe de MCA is opgezet en wat de weging is per hoofd criterium. Een MCA fungeert altijd door middel van scores en wegingen per criterium. De weging zegt iets over de mate van importantie van een criterium. Elk gesteld criterium geeft dus per variant een score, welke wordt vermenigvuldigd met een weging. De hoogte van de weging (paragraaf 6.4.1) en de bepalingsmethode van de score (paragraaf 6.4.2) moeten zijn vastgesteld voordat de MCA ingevuld wordt. Dit wordt in de volgende twee paragrafen gedaan. Paragraaf 6.4.3 beschrijft het resultaat van de MCA.

De kwalitatieve uitwerking van de varianten is opgenomen in Bijlage F. Deze uitwerking vult de informatie uit paragraaf 6.3 aan en gaat specifiek in op de hoofdcriteria per variant. Deze uitwerking vormt de basis van de MCA.

6.4.1 Weging

De MCA kent aan elk hoofdcriterium een weging toe. De weging van het criterium volgt uit het principe dat het ene criterium zwaarder weegt dan de andere voor de belanghebbenden. Het onderzoek heeft via twee methodes de wegingen van de criteria bepaald. Dit zijn de volgende twee methodes:

- bepaling van weging met behulp van een matrix;
- een online poll waarop mensen de volgorde van belangrijkheid van de verschillende hoofdcriteria hebben kunnen aangeven.

De tweede methode is gebruikt als check of de resultaten van de eerste methode overeenkomen met de mening van meerdere mensen. De uitkomsten van de poll vormen dus de validatie van de matrix. Hieronder zijn beide methodes uitgelegd.

Matrix

Een matrix bepaalt zo objectief mogelijk de balans in de weging door middel van het afwegen van alle criteria ten opzichte van elkaar. De matrix zorgt ervoor dat het grotere belang van een criterium ten opzichte van een ander criterium vertaald wordt naar een weging. Als criterium A belangrijker is dan criterium B dan krijgt criterium A één punt. Als het minder belangrijk is dan het andere criterium dan krijgt criterium A geen punt. Deze werkwijze weegt af hoe vaak de gestelde hoofdcriteria belangrijker zijn dan de andere hoofdcriteria.

Bij een aantal van vijf hoofdcriteria kan een criterium maximaal vijf punten krijgen. Dit criterium is dan dus belangrijker dan alle andere criteria. Als een criterium in de matrix met zichzelf wordt afgewogen krijgt het één punt, dit zorgt voor een minimumweging voor alle hoofdcriteria van één punt, anders kan het voorkomen dat enkele criteria niet meewegen in de MCA. Het totaal van punten dat over de vijf criteria behaald kan worden, is 15. De weging wordt vervolgens bepaald door de score per criterium te delen door het totaal aantal te behalen punten. Als aan criterium A bijvoorbeeld vijf punten toegekend zijn, zal de weging dus $(5 / 15 =) 0,33$ zijn. Alle wegingen bij elkaar opgeteld zijn samen één. Deze werkwijze vormt een zo objectief mogelijke balans tussen de verschillende criteria. De uiteindelijke beoordeling is gevormd door per criterium de score te vermenigvuldigen met de weging. Het totaal van uitkomsten per criterium vormt de uiteindelijke beoordeling van de variant. (Verduijn, 2014). De weging van de verschillende criteria is in Tabel 16 weergegeven.

Tabel 16: Matrix bepaling weging MCA. In de matrix geeft een '1' aan dat het criterium in de rij (horizontaal) belangrijker is dan het criterium (verticaal) in de kolom.

	Uitvoering	Betrouwbaarheid	Beheer & Onderhoud	Duurzaamheid	Omgeving	Totaal	Weging
Uitvoering	1	0	0	1	1	3	0,20
Betrouwbaarheid	1	1	1	1	1	5	0,33
Beheer & onderhoud	1	0	1	1	1	4	0,27
Duurzaamheid	0	0	0	1	1	2	0,13
Omgeving	0	0	0	0	1	1	0,07
Totaal						15	1

Poll

De matrix zorgt voor een redelijk objectieve weging. Echter het vaststellen van de mate van belangrijkheid van de verschillende criteria is wel subjectief. Daarom is het goed om de resultaten van de matrix te spiegelen aan de mening van meerdere mensen. Dit is gedaan door een poll op te stellen, waarin mensen hebben kunnen aangeven wat volgens hen de volgorde van belangrijkheid van de verschillende hoofdcriteria is. In deze poll krijgt het belangrijkste criterium een waarde van zes en het minst belangrijke criterium een waarde van één. De criteria in de poll zijn: kosten, uitvoering, betrouwbaarheid, beheer & onderhoud, duurzaamheid en omgeving.

Gekozen is om kosten niet mee te nemen in de MCA, maar om een losse kosten-batenanalyse uit te voeren. Deze keuze is gemaakt omdat het belang van de kosten niet bepaald kan worden door anderen dan de opdrachtgever, deze bezit namelijk het budget en de visie over hoe kosten geïnvesteerd moeten worden. Dit blijkt ook uit toelichtingen en reacties op de poll (deze toelichtingen en reacties zijn vanwege privacy redenen niet gegeven). Door kosten los af te wegen kan de opdrachtgever, naast de door dit onderzoek voorgeschreven voorkeursvariant voor de stuwen in de Maas, met de resultaten zelf een afweging maken tussen de kwaliteit (MCA) en de kosten (kosten-batenanalyse). De poll is opgezet inclusief het hoofdcriterium kosten, om wel een inzicht te creëren in het belang van kosten. Zo wordt een beeld verkregen van hoe een groep vakmensen denkt over de rol van kosten in een afweging. De kosten zijn uit de resultaten gefilterd door per ingevulde resultaat de score van de kosten te verwijderen en van alle scores die hoger waren dan of gelijk aan de score van de kosten één punt af te trekken, mits de score van de kosten twee of hoger was. Hierdoor is de maximale score vijf en de minimale score nog steeds één.

De weging van de deelcriteria is vervolgens berekend door de score van alle criteria op te tellen en deze totaalscore per criteria te delen door de som van de totaalscores van de vijf criteria samen. De weging is hierdoor een getal tussen nul en één en de som van de vijf weegfactoren is precies één. Tabel 17 laat de weegfactoren zien die volgen uit de poll in vergelijking met de weegfactoren uit de matrix. Te zien is dat uitvoering, betrouwbaarheid en beheer & onderhoud minder belangrijker worden bevonden in de poll dan ingeschat door de matrix en dat duurzaamheid en omgeving belangrijker worden bevonden.

Tabel 17: Weging MCA volgens poll en matrix.

Criterium	Weging volgens poll	Weging volgens matrix
Uitvoering	0,17	0,20
Betrouwbaarheid	0,28	0,33
Beheer & onderhoud	0,22	0,27
Duurzaamheid	0,18	0,13
Omgeving	0,15	0,07
Totaal	1	1

Tabel 17 laat zien dat de wegingen van beide methodes redelijk overeenkomen. Toch zijn er wel verschillen. Hierdoor neemt het vervolg van het onderzoek beide methodes van bepaling van weegfactoren mee. De MCA neemt beide wegingen een keer mee. Hierdoor is te zien wat de invloed van de verschillende wegingen is. Wel is op te merken dat de wegingen volgens de matrix en volgens de poll redelijk dicht bij elkaar liggen. Dit geeft aan dat de matrix een goede inschatting is van de weging volgens een breed publiek (de groep mensen die de poll heeft ingevuld).

Bijlage G geeft deze poll weer met een memo die is opgesteld ter verduidelijking van deze poll. Bijlage G laat daarnaast de ingevulde resultaten van de poll zien met de functies van de participanten. De namen en opmerkingen van de respondenten zijn vanwege privacy redenen niet in de bijlage opgenomen.

6.4.2 Scores

Het geven van scores kan erg subjectief zijn. Daarnaast is het moeilijk om aan een hoofdcriterium een score toe te kennen, aangezien deze hoofdcriteria van veel zaken afhankelijk zijn. Om zo objectief mogelijk de scores van de criteria te bepalen, zijn de volgende zaken vastgesteld:

- De varianten krijgen per deelcriterium dat van belang is voor de MCA, een score van één, twee, drie of vier; een variant krijgt een score van één als het niet goed scoort op het deelcriterium en een vier als het wel goed scoort. De varianten worden op volgorde gezet van de mate waarin ze voldoen aan het gestelde deelcriterium.
- De score van de hoofdcriteria is afhankelijk van de verhouding van de totaalscores van de deelcriteria binnen de hoofdcriteria.

Doordat de scores van de hoofdcriteria bepaald worden aan de hand van de deelcriteriumscores, zijn de hoofdcriteriumscores objectiever dan wanneer aan de hoofdcriteria, per variant, scores van één tot vier zouden zijn toegewezen. Hieronder wordt dit verder verduidelijkt.

De MCA vergelijkt de verschillende varianten zoals paragraaf 4.1 beschrijft. De opbouw van de MCA is als volgt: de hoofdcriteria, bestaande uit deelcriteria, wegen door middel van scores de vier varianten af. De hoofdcriterium-scores, vermenigvuldigd met de van tevoren bepaalde weging, wegen de varianten af ten opzichte van elkaar. Alle hoofdcriterium-totaalscores bij elkaar opgeteld geven per variant een eindscore. Deze eindscore geeft aan hoe hoog de variant scoort in vergijking met de andere varianten. Bijlage F beschrijft de varianten die in de MCA worden afgewogen. Figuur 2 laat het keuzeprocess van het onderzoek door middel van een stroomschema duidelijker zien.

De scores van de hoofdcriteria zijn bepaald door per deelcriterium de varianten op volgorde te zetten. In enkele gevallen is deze volgorde niet aangehouden en hebben verschillende varianten dezelfde deelcriterium-score gekregen. Per deelcriterium krijgt elke variant een score van één, twee, drie of vier. De som van alle deelcriterium-scores vormt een deelcriterium-totaalscore per hoofdcriterium per variant. Deze deelcriterium-totaalscore vormt de input voor de hoofdcriterium-score per variant. De verhouding tussen de deelcriterium-totaalscores van de verschillende varianten is gelijk aan de verhouding tussen de hoofdcriterium-scores voor de varianten. De hoofdcriterium-scores zijn minimaal één en maximaal vier. Ze worden bepaald door de deelcriterium-totaalscore te delen door het aantal deelcriteria binnen dit hoofdcriterium. Tabel 18 geeft een voorbeeldberekening; te zien is dat de verhouding tussen de verschillende deelcriterium-totaalscores ook de verhouding is tussen de hoofdcriteriumscores.

Tabel 18: Voorbeeld bepaling score per hoofdcriterium

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4
Deelcriterium 1	2	1	3	4
Deelcriterium 2	4	3	2	1
Deelcriterium 3	4	1	2	3
Deelcriterium 4	1	2	3	4
Deelcriterium-totaalscore	11	7	10	12
Hoofdcriterium-score	$(11/4 =)$ 2,75	$(7/4 =)$ 1,75	$(10/4 =)$ 2,5	$(12/4 =)$ 3

Bijlage H geeft deelcriteriumscores met de daaruit volgende hoofdcriteriumscores.

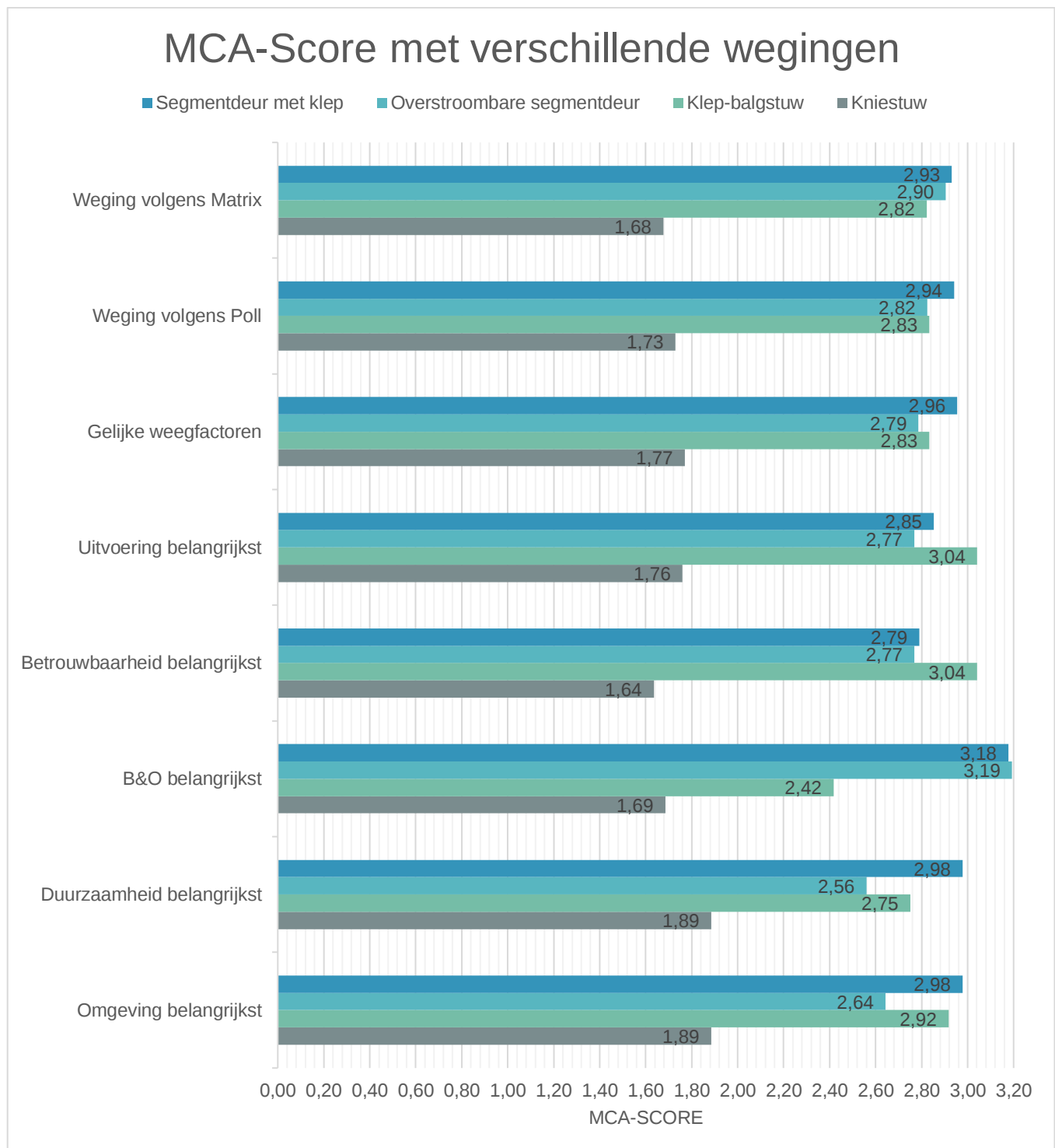
6.4.3 Resultaat Multicriteria analyse

Bijlage H laat het resultaat van de MCA zien. Paragraaf 6.4.1 beschrijft dat de weging van de MCA op twee verschillende manieren bepaald is. Tabel 19 geeft het resultaat van de MCA weer met de weging die uit de matrix volgt, de weging die uit de poll volgt en het resultaat zonder weegfactoren. In alle drie de gevallen heeft de verticaal draaiende segmentdeur met klep de hoogste score. Dit betekent dat de kwaliteit van de segmentdeur met klep van deze vier varianten het hoogst is. Wel valt op dat het verschil tussen de scores erg klein is.

Tabel 19: Resultaat Multicriteria analyse

Variant	Score zonder weging	Score volgens matrix	Score volgens poll
Segment met klep	14,8	2,93	2,94
Overstroombare segment	13,9	2,90	2,82
Klep-balgstuw	14,2	2,82	2,83
Kniestuw	8,9	1,68	1,73

Figuur 31 geeft de scores van de MCA met verschillende wegingen weer. Van boven naar beneden zijn eerst de scores te zien met de weging volgens de matrix, daarna volgens de poll, vervolgens de score van de MCA die volgt als alle hoofdcriteria een gelijke weging (0,2) hebben en daaronder de scores van de MCA die volgen als één criterium het belangrijkste criterium is. Bij het laatste geval is een weging van 0,6 toegekend aan de criteria die als belangrijkste beschouwd worden en een score van 0,1 aan de overige vier criteria. In deze vergelijking is te zien dat de klep-balgstuw het hoogste scoort als de aspecten uitvoering en betrouwbaarheid het belangrijkste bevonden worden. De overstroombare segmentdeur scoort het hoogst als beheer & onderhoud als het belangrijkste criterium bevonden wordt. In alle andere gevallen is de segmentdeur met klep de variant met de hoogste score. Figuur 31 laat aan de ene kant zien dat de varianten, met uitzondering van de kniestuw, wat betreft de score erg dicht bij elkaar liggen. De kwaliteit van de verschillende varianten is dus erg vergelijkbaar. Aan de andere kant zijn er wel enkele verschillen te zien. De klep-balgstuw scoort op de aspecten 'uitvoering' en 'betrouwbaarheid' duidelijk het best. Dit weegt echter niet op tegen de positieve eigenschappen van de segmentdeur met klep op de andere aspecten. De segmentdeur met klep scoort namelijk het hoogste op de vergelijking met gelijke wegingen én met de wegingen die volgen uit de matrix en poll. Hieruit volgt dat de segmentdeur met klep, kwalitatief gezien, van deze varianten de beste variant is. De score uit de Matrix wordt in de verdere afweging als maatgevend beschouwd.



Figuur 31: MCA-scores van de verschillende varianten aan de hand van verschillende wegingen.

6.5 Kosten-batenanalyse

Deze paragraaf beschrijft de opzet van de kosten-batenanalyse. De kosten-batenanalyse vormt samen met de MCA de input voor de uiteindelijke keuze van de voorkeursvariant. De volledige kosten-batenanalyse is opgenomen in Bijlage I. Ten grondslag aan de kosten-batenanalyse liggen verschillende aannames en kengetallen. Kengetallen zijn overgenomen uit verschillende bronnen of zijn in overleg met de kostenpool van

Rijkswaterstaat opgesteld (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020). De kosten-batenanalyse focust zich op een viertal kosten en baten. Deze vier aspecten zijn de volgende: constructiekosten, gebruikskosten, onderhoudskosten en baten ten gevolge van de mogelijke doorgang van scheepvaart.

Tabel 20 geeft de totale kosten van de verschillende varianten naar schatting. Bijlage I licht het bepalen van de kosten verder toe. De kosten zijn relatief onnauwkeurig bepaald. Wel is het een goede manier om verschillen tussen de vier varianten aan te tonen. Uit Tabel 20 blijkt dat de klep-balgstuw naar schatting de goedkoopste variant is.

Tabel 20: Totale kosten varianten in miljoenen euro's. De kolom 'Actie' geeft aan of de rij moet worden opgeteld (+) of afgetrokken (-) om tot het totaal te komen (=).

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw	Actie
Constructiekosten	33,7	37,1	30,7	50,4	+
Gebruikskosten	5,0	5,6	3,4	8,0	+
Onderhoudskosten	8,0	8,0	10,3	12,6	+
Baten scheepvaart	-	3,3	3,3	3,3	-
Totale kosten [miljoenen euro's]	46,8	47,9	41,1	67,7	=

6.6 Voorkeursvariant

Deze paragraaf geeft inzicht in welke variant gekozen wordt naar aanleiding van de MCA (paragraaf 6.4) en de kosten-batenanalyse (paragraaf 6.5). Uit de MCA komt dat de segmentdeur met klep het stuwmiddel met de hoogste kwaliteit is. Uit de kosten-batenanalyse volgt de klep-balgstuw het goedkoopste stuwmiddel is. De score van de MCA en de uitkomst van de kosten-batenanalyse kunnen, afhankelijk van verschillen in budget en belangen, verschillend geïnterpreteerd worden. Bij een hoog budget kan gekozen worden voor een stuwmiddel met een hogere kwaliteit en bij een laag budget kan gekozen worden voor een stuwmiddel met een lage prijs.

Zoals paragraaf 4.1 beschrijft, kiest het onderzoek een voorkeursvariant door per variant de MCA-score per euro uit te rekenen. De variant met de hoogste score per euro geeft de meeste kwaliteit per euro dat in het stuwmiddel geïnvesteerd wordt. Tabel 21 bepaalt deze waarde. In de tabel is gekozen om in verband met de overzichtelijkheid van de tabel de MCA-score per honderd miljoen euro te bepalen.

Tabel 21: Bepaling score per honderd miljoen euro van varianten.

Variant	MCA-score	Totale Kosten [honderd miljoenen euro's]	MCA-score per euro [score / honderd miljoen euro]
Segmentdeur met klep	2,93	0,468	6,26
Overstroombare segmentdeur	2,90	0,479	6,06
Klep-balgstuw	2,82	0,411	6,87
Kniestuw	1,68	0,677	2,48

Uit Tabel 21 blijkt dat de klep-balgstuw de hoogste score per euro heeft. Per honderd miljoen euro behaalt deze variant een MCA-score van 6,87. Ondanks dat de klep-balgstuw niet de hoogste score in de MCA behaalt, is het de meest geschikte variant als de kosten even belangrijk geacht worden als de kwaliteit. De minder hoge kwaliteit van de klep-balgstuw weegt op tegen de lagere kosten van deze variant. Het onderzoek zal de klep-balgstuw meenemen als voorkeursvariant. Wanneer kwaliteit belangrijker is dan prijs heeft de segmentdeur met klep de voorkeur. Wanneer zowel doorvaarbaarheid door de stuw als de kwaliteit de focus hebben, boven kosten, zullen de klep-balgstuw en de overstroombare segmentdeur de voorkeur hebben, aangezien de segmentdeur met klep geen scheepvaart door de stuw kan waarborgen.

7 VOORKEURSVARIANT

7.1 Inleiding

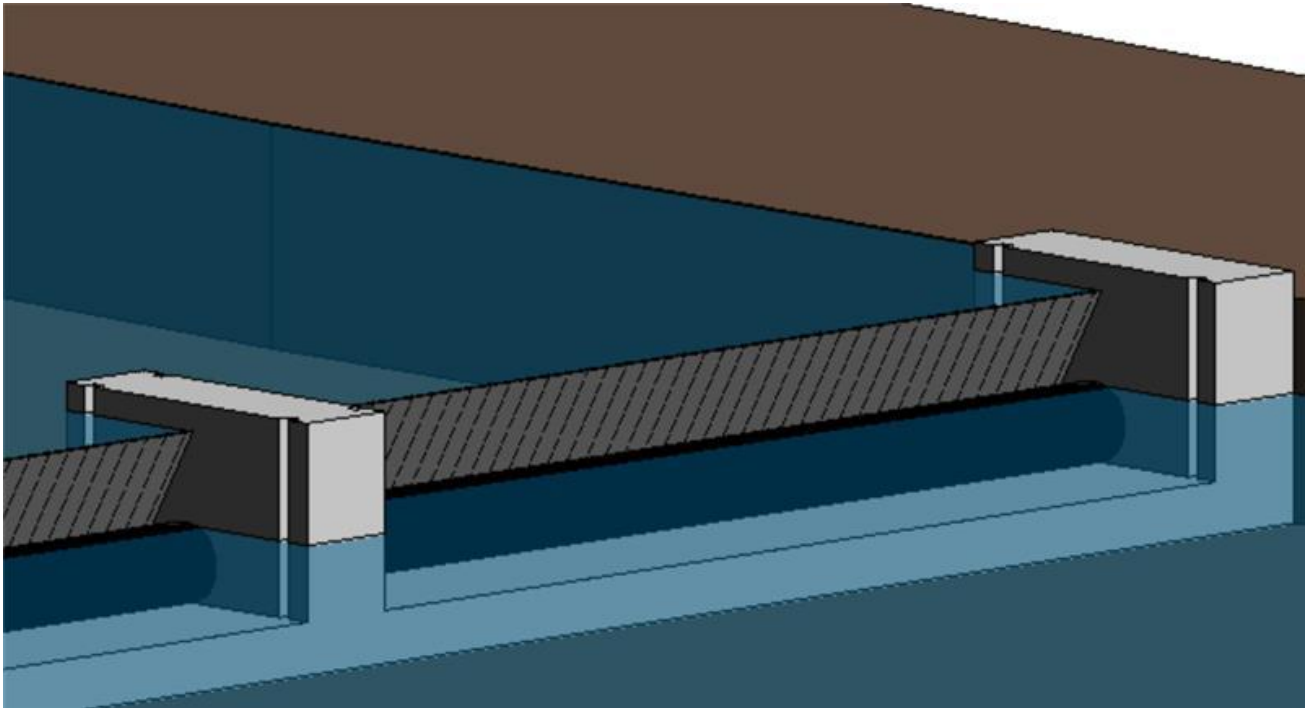
Dit hoofdstuk beschrijft de voorkeursvariant, controleert of de voorkeursvariant aan de gestelde eisen voldoet en bepaalt of de voorkeursvariant op andere locaties kan worden toegepast. Hoofdstuk 6 licht het keuzeproces toe tot de voorkeursvariant: de klep-balgstuw. Dit hoofdstuk visualiseert de voorkeursvariant in paragraaf 7.2. Hier zijn verschillende aanzichten van het 3D-ontwerp van de klep-balgstuw gegeven. Paragraaf 7.3 legt het ontwerp van de klep-balgstuw naast de eisen en randvoorwaarden uit hoofdstuk 3 en valideert het ontwerp aan deze eisen. Paragraaf 7.4 doet een check of de klep-balgstuw toegepast kan worden op andere locaties in de Maas.



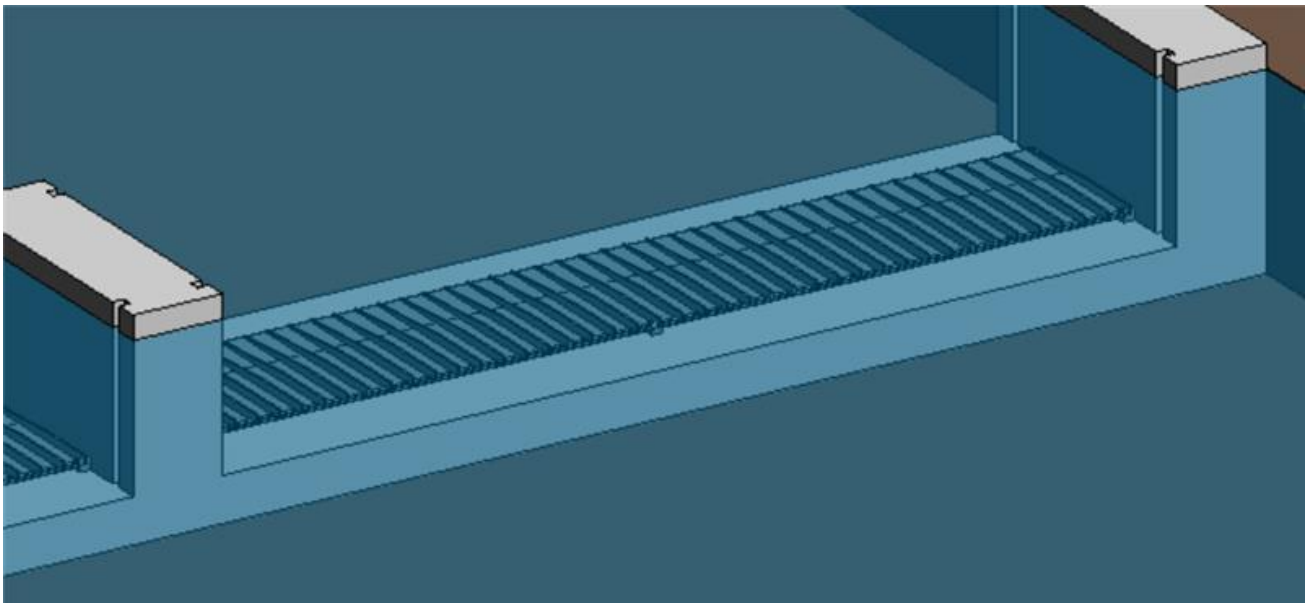
Achtergrond figuur: Stuw bij Belfeld (de Bouwcampus, 2017)

7.2 Visualisatie

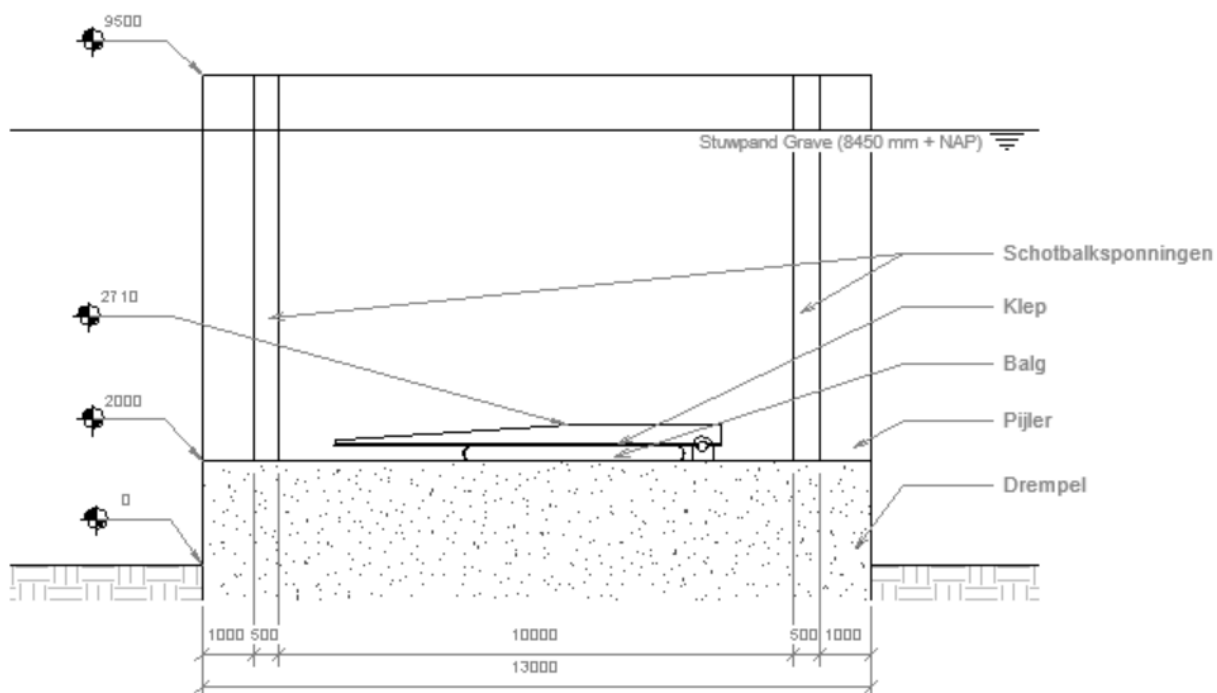
In onderstaande figuren is de voorkeursvariant: de klep-balgstuw, gevisualiseerd doormiddel van het programma Autodesk Revit. Figuur 32 geeft het ontwerp van één stuwopening. Figuur 33 geeft de klep-balgstuw weer in geopende stand. Figuur 34 en Figuur 35 geven dwarsdoorsneden van het ontwerp. Figuur 36 geeft een vooraanzicht van het ontwerp weer.



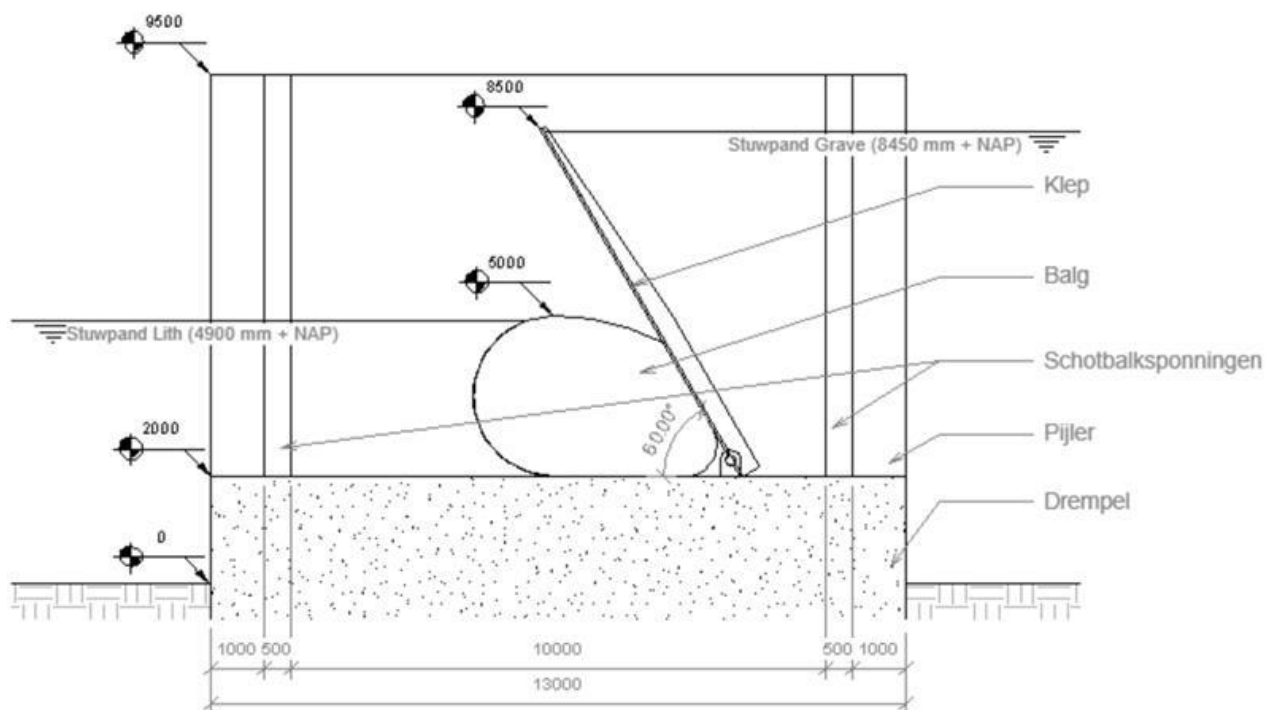
Figuur 32: Stuwopening vanaf benedenstroomse zijde, klep-balgstuw in gesloten stand.



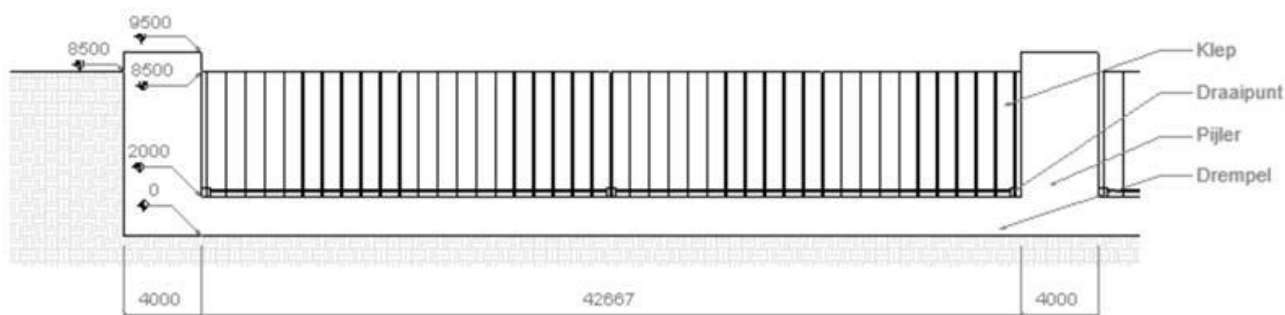
Figuur 33: Klep-balgstuw in geopende stand, balg en klep bevinden zich op de bodem.



Figuur 34: Dwarsdoorsnede voorkeursvariant klep-balgstuw in geopende stand.



Figuur 35: Dwarsdoorsnede voorkeursvariant klep-balgstuw in gesloten stand.



Figuur 36: Vooraanzicht klep-balgstuw in gesloten stand.

7.3 Validatie eisen

De voorkeursvariant is getoetst aan de uitgangspunten uit Hoofdstuk 3. Deze uitgangspunten gelden voor de gehele Nederlandse Maas. De voorkeursvariant: de klep-balgstuw, voldoet aan de eisen uit Hoofdstuk 3. Enkele eisen zijn van belang voor een latere fase van ontwerp. Deze eisen zijn niet gevalideerd maar moeten in een latere fase van ontwerp gevalideerd worden. De toetsing van de voorkeursvariant aan de eisen is opgenomen in Bijlage J. Hier is per eis of randvoorwaarde een validatie gegeven.

7.4 Integraliteit voorkeursvariant

Deze paragraaf behandelt de mogelijkheid of de voorkeursvariant toe te passen is op andere locaties in de Maas. Zoals paragraaf 3.5 stelt zal de inrichting van de Maas wat betreft de stuwen onveranderd blijven. Het is de wens van de opdrachtgever dat de stuwen grofweg op dezelfde plek blijven. Verschillende studies concluderen dat een verandering in de locatie van de stuwen niet wenselijk is (Jong, 2014) (Jütte & Maarten, 2017). Paragraaf 7.4.1 geeft een eerste check of de voorkeursvariant toegepast kan worden op andere stuwlocaties in de Maas. Deze eerste check is gedaan aan de hand van literatuur. Paragraaf 7.4.2 geeft een tweede check op de vraag of voorkeursvariant toegepast kan worden op andere locaties in de Maas aan de hand van enkele uitgangspunten en stuwdimensies.

7.4.1 Eerste check

Naast dat de locatie voor de andere stuwen grofweg hetzelfde blijft, gelden de uitgangspunten uit Hoofdstuk 3 niet alleen voor stuw Grave maar ook voor de andere stuwen in de Nederlandse Maas. Aangezien de klep-balgstuw voldoet aan de eisen en randvoorwaarden die gelden voor alle stuwlocaties in de Nederlandse Maas (zie paragraaf 7.3), is de klep-balgstuw op dit aspect ook goed te passen op de andere stuwlocaties in de Nederlandse Maas. Verschillende rapporten beschrijven dat op meerdere stuwlocaties hetzelfde stuwconcept toegepast kan worden (Jong, 2014) (RWS-Ontwerpt, PPO, 2019). Dit geldt ten eerste voor de stuwen die nu al opgebouwd zijn uit dezelfde stuwconcepten (Linne, Roermond, Belfeld en Sambeek) maar ten tweede ook voor de andere stuwen in de Nederlandse Maas. Het feit dat de uitgangspunten voor de zeven stuwlocaties gelden en dat verschillende bronnen beschrijven één stuwconcept op de zeven stuwen toegepast kan worden, geven een eerste indicatie dat de klep-balgstuw inderdaad toegepast kan worden op de andere stuwlocaties in de Nederlandse Maas.

7.4.2 Tweede check

Deze paragraaf vergelijkt de verschillende stuwlocaties in de Nederlandse Maas op een aantal aspecten. Zo wordt gekeken of de voorkeursvariant voor stuw bij Grave ook op de andere stuwlocaties toepasbaar is. De volgende zaken zijn van belang als de voorkeursvariant toegepast wordt op andere locaties in de Maas:

- De voorkeursvariant dient het verval kunnen keren. Het verval hangt samen met het doorstromend oppervlak, wat samenhangt met de plaatselijke waterdiepte en de beschikbare breedte.
- Het doorstromend oppervlak van de toekomstige stuw moet voldoen aan de eis: HydrRand-8. Het doorstromend oppervlak dient dus minimaal 10% groter te zijn dan het doorstromend oppervlak van de huidige stuw op locatie. Dit hangt samen met het maximum verval en de beschikbare ruimte.
- De locatie dient voldoende ruimte te bieden aan de te bouwen voorkeursvariant. Dit hangt samen met het doorstromend oppervlak en het maximum verval. De netto breedte van de toekomstige stuw moet groter of gelijk zijn aan de netto breedte van de huidige stuw conform HydrRand-9 op locatie.
- De stuw moet aansluiten op de wensen van de scheepvaartsector.

Tabel 22 geeft voor de zeven stuwlocaties een aantal parameters weer van de huidige stuwen (lichtblauw in Tabel 22) en van toekomstige stuwen (blauw in Tabel 22). De tabel geeft voor de huidige stuwen het verval weer bij aanhouden van het streefpeil, de maximale waterdiepte aan de bovenstroomse zijde van de stuw (diepste drempeldiepte tot bovenkant deur), het doorstromend oppervlak en de breedte van de stuw. De tabel geeft voor toekomstige stuwen het minimale doorstromend oppervlak (bij toepassing van HydrRand-8), de locatie van de stuw (Jong, 2014), de beschikbare breedte op de stuwlocatie en de CEMT-klasse van schepen in het riviergedeelte van de Maas bij de stuw.

Tabel 22: Overzicht verschillende parameters huidige (lichtblauw) en toekomstige stuwen (blauw)/ Bronnen: [1]: (Jong, 2014), [2]: (Google Earth, sd).

	Borgharen	Linne	Roermond	Belfeld	Sambeek	Grave	Lith
Verval (streefpeilen)	-	4,0 m	2,7 m	3,1 m	3,2 m	3,1 m	4,5 m
Max. waterdiepte (bovenstrooms)	4,5 m	5,6 m	5,5 m	6,5 m	6,9 m	5,3 m	7,4 m
Doorstromend oppervlak (huidige stuw)	486 m ²	565 m ²	538 m ²	620 m ²	652 m ²	638 m ²	844 m ²
Breedte stuw (inc. Pijlers)	112,5 m [1]	124 m [1]	122,2 m [1]	141 m [1]	140 m [1]	110 m [1]	140 m [1]
Minimaal doorstromend oppervlak (+10%)	534 m ²	622 m ²	592 m ²	682 m ²	718 m ²	702 m ²	928 m ²
Locatie t.o.v. huidige stuw (bovenstrooms: bo. of benedenstrooms: be.)	200 m be. [1]	200 m be. [1]	200 m be. [1]	200 m be. [1]	200 m be. [1]	200 m bo. [1]	200 m bo. [1]
Beschikbare breedte	115 m [1]	127 m [1]	118 m [1]	122 m [2]	128 m [2]	144 m [2]	152 m [2]
(Toekomstige) CEMT-klasse	Vb	-	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb

De verschillende stuwen zijn vergelijkbaar wat betreft het verval, de stuwen bij Lith Linne zijn echter wat betreft het verval uitschieters. De maximale hoogtes van de zeven stuwen liggen verder uit elkaar. Zoals HydrRand-6 stelt staat het maximale op te nemen verval van stuwmiddelen gelijk aan de maximale waterhoogte van de bovenstroomse zijde van de stuw. Bijlage B beschrijft dat de maximale kostenefficiënte keerbare waterhoogte van de klep-balgstuw 8 m is. Deze hoogte is hoger dan alle bovenstroomse maximale waterhoogtes van de zeven stuwen, ook bij een verhoging van het streefpeil met 0,5 m (HydrRand-1). De drempels van de toekomstige stuwen kunnen dus dieper aangelegd worden dan de drempels van de huidige stuwen, als daar behoefte naar is. Dit geeft de mogelijkheid om het doorstromend oppervlak te vergroten.

De nieuwe stuwlocaties zullen 200 m van de huidige stuwen afliggen. Tabel 22 beschrijft per stuw of dit aan de bovenstroomse of de benedenstroomse zijde van de huidige stuwen is. Bij de zeven nieuwe stuwlocaties geldt voor de stuwen bij Borgharen, Linne, Grave en Lith dat de beschikbare rivierbreedte groter is dan de breedte van de huidige stuwen (inclusief pijlers). Voor de stuwen bij Roermond, Belfeld en Sambeek geldt dat de beschikbare rivierbreedte niet groter is dan de huidige stuwbreedte. Wanneer de klep-balgstuw toegepast wordt moet hier dus afgezien worden van de randvoorwaarde: HydrRand-9² of dienen oevers ontgraven te worden. Wanneer de breedte van de stuw groter is dan de breedte van de huidige stuw, of wanneer de diepte van de drempel lager is dan de drempeldiepte van de huidige stuw, kan het gewenste doorstromend oppervlak toegepast worden. Aangezien de klep-balgstuw door te varen is in geopende stand zal de stuw voldoen aan de wensen vanuit de scheepvaartsector.

7.4.3 Conclusie

Bovenstaande paragrafen beschrijven dat de klep-balgstuw toegepast kan worden op de andere locaties in de Maas. Echter dient hier wel per situatie gedimensioneerd te worden, aangezien de breedte, diepte en het doorstromend oppervlak per stuwlocatie verschillen.

² De netto breedte van de stuw dient gelijk of groter te zijn dan de bestaande stuw

8. DISCUSSIE

Uit de voorgaande hoofdstukken volgt dat de klep-balgstuw de voorkeursvariant is voor de nieuwe stuw bij Grave. Dit hoofdstuk licht toe of dit aannemelijk is aan de hand van conclusies van andere rapporten. Daarnaast beschrijft dit hoofdstuk welke aspecten ter discussie gesteld kunnen worden bij het trekken van een conclusie.

Uit verschillende rapporten blijken de klep-balgstuw en de segmentdeuren als voorkeursvariant naar voren te komen. Zo beschrijft het rapport: 'Future of Weir Linne' dat voor de stuw bij Linne een klep-balgstuw de beste oplossing is (Verduijn, 2014). Het rapport: 'Design of an Adaptive Weir' beschrijft een combinatie van de overstroombare segmentdeur en de verticaal draaiende segmentdeur als de beste oplossing voor de stuw bij Belfeld (Frijns, 2019). Het rapport: 'Vervangingsopgave Natte Kunstwerken (VONK), Stuwen Maas' beschrijft een investeringsraming voor de stuwen in de Maas en gaat uit van hefdeuren (Jong, 2014). Dit rapport heeft echter het bepalen van kosten als hoofdfocus en niet de selectie van een stuwmiddel. Het rapport: 'Stuw in de Maas te Grave' concludeert dat de beste stuw voor Grave een klepstuw is (Snel, 1987). Uit de rapporten blijkt dat de verschillende varianten van segmentdeuren en kleppen de voorkeur hebben. Dit benadrukt in zekere zin het resultaat van dit onderzoek, aangezien in de afweging van dit onderzoek de segmentdeuren en de klep-balgstuw inderdaad dicht bij elkaar liggen in kwaliteit en kosten.

Enkele aspecten in het onderzoek kunnen ter discussie gesteld worden. Andere aspecten van het onderzoek spelen een grote factor in het bepalen van de uitkomst van het onderzoek maar zijn in het onderzoek niet uitgebreid aan bod gekomen. Deze aspecten zijn hieronder opgesomd.

- Dit onderzoek is zo objectief mogelijk uitgevoerd, echter kan een keuzeprocess als deze nooit volledig objectief zijn. De mate van subjectiviteit is echter zo laag mogelijk gehouden, dit beïnvloedt dus zo weinig mogelijk de resultaten van het onderzoek.
- De kwaliteit en de kosten zijn per variant vastgesteld. Het onderzoek heeft niet aangetoond hoe belangrijk de kosten zijn in verhouding met de kwaliteit. Door de MCA-score per kosteneenheid te geven zijn de kosten en de kwaliteit op eenzelfde waarde geschat. Het onderzoek toont niet aan of deze aanname juist is. Als de verhouding wel bekend was had een andere variant wellicht de voorkeur gehad, aangezien de vier varianten dicht op elkaar liggen in kosten en kwaliteit. De verhouding in het belang tussen kwaliteit en kosten kan echter per opdrachtgever en per jaar verschillen, afhankelijk van persoonlijke voorkeuren, budget en visie.
- De pijlerlengtes en -breedtes zijn per variant vastgesteld aan de hand van de benodigde ruimte voor beweging van het stuwmiddel, voorbeeldprojecten en literatuur. De lengte en breedte van de pijlers is echter van groot belang in de kostenbepaling en de MCA. Als pijlers langer of breder zijn zullen de uitvoeringskosten fors stijgen en zal de variant minder hoog scoren op de deelcriteria: ruimtegebruik, constructietijd en maakbaarheid. De bepaling van de lengte en breedte van de pijlers heeft veel invloed en zou in dit onderzoek te weinig onderzocht kunnen zijn. Wanneer de pijlers nauwkeuriger gedimensioneerd zouden zijn, zouden de kosten van de vier varianten anders kunnen zijn. Verwacht wordt echter dat de verhouding in pijler-lengte en breedte niet veel zal veranderen bij een nauwkeuriger onderzoek naar de optimale dimensies. Dit betekent dat de verhouding in kosten naar verwachting ongeveer zal kloppen.
- De kosten van de vier varianten zijn globaal bepaald aan de hand van enkele kengetallen, vergelijkbare kostenramingen en percentages van kostengroepen. De bepaling van de kosten is relatief onnauwkeurig en geeft vooral een verschil weer in wat de volgorde van de hoeveelheid kosten is voor de vier varianten. De kosten zijn wel van groot belang bij de bepaling welke variant de voorkeursvariant is. De kosten kunnen daardoor ter discussie gesteld worden, aangezien ze redelijk globaal zijn bepaald maar van groot belang zijn. Verwacht wordt dat de verhouding tussen de kosten van vier varianten in dit onderzoek een goede indicatie geeft van de verhouding in uiteindelijke kosten tussen de vier

varianten. Voor de selectie van een stuwmiddel in dit onderzoek, is de verhouding tussen de kosten van de vier varianten namelijk van groter belang dan de uiteindelijke grootte van bedragen.

- Uitvoering is in dit onderzoek niet uitvoerig behandeld, wel is de uitvoering van groot belang bij het ontwerpen van stuwen in de Maas. Aangezien de Maas te allen tijde water moet kunnen afvoeren is dit voor de uitvoering ook van belang. Dit resulteert in grote uitdagingen en beperkingen en zet de uitvoering qua planning onder druk. Verwacht wordt dat de uiteindelijke bouwmethode geen grote invloed heeft op de keuze van stuwmiddelen, aangezien voor alle stuwmiddelen geldt dat de uitvoering een grote uitdaging is. Deze verwachting is echter niet diepgaand te onderbouwen. De vraag blijft dus staan wat de invloed is van de uitvoering op de keuze van stuwmiddelen.
- Per stuwmiddel is, in een vroeg stadium van het onderzoek, gekozen om een bepaalde variant af te wegen. Voor de segmentdeuren is bijvoorbeeld gekozen om de overstroombare segmentdeur alleen naar beneden te laten draaien en niet omhoog. Voor de verticaal draaiende segmentdeur is gekozen voor de toepassing van kleppen. Daarnaast zijn verschillende stuwtypes niet gecombineerd afgewogen. De keuze om bepaalde varianten van de stuwmiddelen af te wegen heeft dus een beperkt beeld gegeven van de varianten. Aangezien de resultaten van de MCA en de kosten-batenanalyse voor de segmentdeuren en de klep-balgstuw redelijk dicht bij elkaar liggen, zou het kunnen dat het uiteindelijke resultaat beïnvloed is door deze keuzes. Een andere mogelijkheid is dat andere, niet gekozen, varianten op stuwmiddelen mogelijk hoger gescoord zouden hebben dan de gekozen varianten op stuwmiddelen.
- In het onderzoek worden de verschillende varianten uitgewerkt aan de hand van de MCA en hoeveelheden materiaal. Vuistregels, aannames en voorbeeldprojecten vormen de input voor het bepalen van materiaalhoeveelheden. In het berekenen van de materiaalhoeveelheden is weinig gerekend aan sterkte, stijfheid, stabiliteit en vermoeiing. Dit is in zekere zin een beperking van het onderzoek.
- Het onderzoek heeft aspecten als energieopwekking, vispasseerbaarheid, circulariteit, materiaalgebruik, stakeholders, niet gesprongen explosieven en omgeving kort behandeld. Deze aspecten zijn van groot belang in het ontwerpen van een stuw.
- Wat betreft doorvaarbaarheid zijn stroomsnelheden niet onderzocht als beperkende factor. Dit dient nader onderzocht te worden.

9. CONCLUSIE & AANBEVELINGEN

9.1 Conclusie

De kans dat het water in de Maas niet op peil gehouden kan worden door de stuwen in de Nederlandse Maas neemt toe. Dit komt doordat de huidige stuwen het einde van hun levensduur naderen, waardoor het risico op het falen van de stuwen toeneemt. Daarnaast voldoen enkele van de huidige stuwen in de Maas niet meer aan de huidige veiligheidsnormen. Dit onderzoek heeft als doelstelling om een oplossing aan te dragen waardoor de waterstanden in de Maas veilig en met een verlaagd risico op peil gehouden kunnen worden. Doormiddel van verschillende deelvragen wordt de doelstelling behaald. In onderstaande tekst worden de deelvragen beantwoord aan de hand van de inhoudelijke hoofdstukken in dit rapport, de discussie en de verschillende bijlagen. De volgende deelvragen worden beantwoord in het rapport:

1. Welke achtergrondinformatie, randvoorwaarden en eisen zijn van belang bij een integraal ontwerp voor stuwmiddelen in de Nederlandse Maas?
2. Welke criteria zijn van belang bij het kiezen van een stuwmiddel en hoe verhouden deze criteria zich tot elkaar voor de stuw bij Grave?
3. Welke vier stuwmiddelen zijn het meest geschikt voor de stuw bij Grave?
4. Welk stuwmiddel is de voorkeursvariant en hoe is dit stuwmiddel in te passen bij Grave?
5. Op welke wijze is dit stuwmiddel toepasbaar voor meerdere locaties in de Nederlandse Maas?

De conclusie op de eerste deelvraag is hoofdzakelijk dat de zeven stuwen in de Maas vergelijkbaar zijn en in de komende jaren vervangen moeten worden. Daarnaast zijn de functies van de zeven stuwen en de belangen bij de zeven stuwen over het algemeen hetzelfde. De informatie uit Bijlage A en hoofdstuk 3 vormt een antwoord op de eerste deelvraag.

De volgende hoofdcriteria zijn van belang bij het kiezen van een stuwmiddel voor de Nederlandse Maas: kosten, fysieke eigenschappen, uitvoering, betrouwbaarheid, beheer & onderhoud, duurzaamheid en omgeving. Wegingen zijn bepaald aan de hand van een online poll en een matrix. De criteria: kosten, betrouwbaarheid en beheer & onderhoud zijn het belangrijkste gebleken. De weging van de matrix is leidend in het onderzoek en komt globaal overeen met de weging van de online poll. Door de meeste hoofdcriteria worden stuwmiddelen kwalitatief geselecteerd, door de hoofdcriteria 'fysieke eigenschappen' en 'kosten' worden stuwmiddelen echter kwantitatief geselecteerd op afmetingen of kosten. De verhouding in weging tussen de kwalitatieve criteria en de kwantitatieve criteria is niet helemaal duidelijk geworden. Daarom is gekozen om enerzijds te selecteren op kwaliteit en anderzijds op kosten en afmetingen.

Bij het kiezen van een stuwmiddel zijn 25 bestaande en een aantal innovatieve varianten te kiezen. Uit deze stuwmiddelen zijn de (verticaal draaiende) segmentdeur met klep, de overstroombare segmentdeur, de klep-balgstuw en de kniestuw de meest geschikte stuwmiddelen gebleken voor de vervanging van de stuw bij Grave. Deze varianten zijn gekozen in een filtering door de uitgangspunten (deelvraag 1), een Trade-Off Matrix (TOM) en een brainstormsessie. In de TOM is zowel op kwaliteit als op kwantiteit geselecteerd in een aantal deelcriteria. Bij het opstellen van het overzicht van de bestaande stuwmiddelen zijn bepaalde varianten gekozen van stuwmiddelen. Deze keuzes hebben uiteindelijk invloed gehad in het selecteren van de voorkeursvariant. Deze keuzes zorgen echter ook voor een afgebakend keuzeproces, aangezien het niet mogelijk is om alle varianten en combinatie van stuwmiddelen tegelijk af te wegen.

Globale ontwerpen en berekeningen en een uiteenzetting van eigenschappen van de varianten, vormen de basis van de vergelijking van de vier varianten. De ontwerpen en berekeningen zijn aan de hand van vuistregels, aannames en voorbeeldprojecten opgesteld. Bepaalde keuzes in het ontwerpproces hebben een relatief grote invloed op de vergelijking van de vier stuwmiddelen. Een Multicriteria analyse (MCA) en een kosten-baten analyse wegen de vier varianten onafhankelijk af waardoor de vier varianten door de MCA op kwaliteit worden afgewogen en door de kosten-batenanalyse op kwantiteit. De segmentdeur met klep heeft volgens de MCA de meeste kwaliteit, kort gevolgd door de klep-balgstuw en de overstroombare segmentdeur. De kniestuw heeft in

vergelijking met de andere drie varianten een lage kwaliteit. Met een andere weging (deelvraag 2) heeft de verticaal draaiende segmentdeur met klep in de meeste gevallen de hoogste score, in enkele gevallen scoort bij een verandering van de weging de klep-balgstuw of de overstroombare segmentdeur hoger. De uitkomst van de kosten-batenanalyse is dat de klep-balgstuw de goedkoopste variant is. Wanneer de MCA en de kosten-batenanalyse vergeleken worden blijkt dat de klep-balgstuw de favoriet is als de kosten even belangrijk worden geacht als de kwaliteit. Wanneer de kwaliteit van een stuwmiddel belangrijker is, is de segmentdeur met klep favoriet. Vast staat dat de segmentdeur met klep, de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw alle drie goed scoren voor de situatie bij Grave. Dit onderzoek beschouwt de klep-balgstuw als favoriet.

De klep-balgstuw voldoet aan de uitgangspunten voor zowel Grave als de andere locaties in de Nederlandse Maas. Vast staat dat bij vervanging van de stuwen in de Maas het stuwbeleid onveranderd blijft en dat de locaties van stuwen globaal hetzelfde blijven. De klep-balgstuw kan met eventuele kleine nuances toegepast worden op de andere zes stuwlocaties in de Maas en kan de functies van de andere stuwen vervullen.

De beantwoorde deelvragen geven samen antwoord op de hoofdvraag:

“Hoe ziet het meest geschikte stuwmiddel voor een stuw te Grave er uit en op welke wijze is dit stuwmiddel toepasbaar op andere locaties in het Nederlandse deel van de Maas?”

Met zekerheid is te zeggen dat de segmentdeur met klep, de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw alle drie goede opties zijn voor nieuwe stuwen in de Nederlandse Maas. Van deze drie stuwmiddelen is de klep-balgstuw het meest geschikt voor stuw Grave, als men de uitgangspunten en keuzes van dit onderzoek in acht neemt. De klep-balgstuw kan toegepast worden op de zes andere stuwlocaties in de Nederlandse Maas met een vergelijkbare dimensionering.

9.2 Aanbevelingen

Dit rapport vormt enkel een verkenning naar mogelijke oplossingen voor de vervanging van de stuwen in de Maas. Deze paragraaf bevat enkele aanbevelingen voor het vervolgtraject van het ontwerpen van de stuwen in de Maas.

- Als eerst dient besloten te worden wat van het grootste belang is, kosten of kwaliteit, en onder welke voorwaarden de een belangrijker is dan de ander. Pas als dit inzichtelijk is kan een goede keuze gemaakt worden voor een toe te passen stuwmiddel.
- Het is aan te bevelen om een verdiepende studie uit te voeren naar de toe te passen constructie rondom de stuwmiddelen.
- De kosten-batenanalyse dient aangevuld en verbeterd te worden door specialisten.
- Het is aan te bevelen om studies naar uitvoeringsmethodes uit te voeren. Daarbij dient de voorkeursvariant getoetst te worden aan deze uitvoeringsmethodes.
- Bepaalde detailleringskeuzes omtrent varianten welke gemaakt zijn in een vroeg stadium van het onderzoek dienen te worden heroverwogen. Hierbij is de werking van de overstroombare segmentdeur de eerste te overwegen keuze.
- De voorkeursvariant dient op sterkte, stijfheid, stabiliteit en vermoeiing te worden berekend.
- Verder is het aan te bevelen aanvullende studies uit te voeren naar zaken als energieopwekking, vispasseerbaarheid, circulariteit, materiaalgebruik, stakeholders, niet gesprongen explosieven en omgeving. Een aantal van deze zaken zijn in behandeling door het team RWS-Ontwerpt.
- Maximaal toelaatbare stroomsnelheden dienen te worden vastgesteld voor het passeren van scheepvaart door de stuw.
- De voorkeursvariant dient te worden uitgewerkt in een voorlopig ontwerp.

REFERENTIES

- Actueel hoogtebestand Nederland. (2020, Maart 12). *ahnviewer*. Opgehaald van Actueel hoogtebestand Nederland: <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>
- Baars, S., Bezuyen, K., Colenbrander, W., Kuijper, H., Molenaar, W., Spaargaren, C., & Vrijling, J. (2009). *Course CIE3330 Hydraulic Structures General*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Beeldbank Cultureel Erfgoed. (sd). *Gemaal Van Sasse, gemaalnr. 0470*. Opgehaald van beeldbank.cultureelerfgoed: <https://beeldbank.cultureelerfgoed.nl/alle-afbeeldingen/detail/9fd37936-63d6-b4d5-28dc-5fb3bb9afd6a/media/43d67866-adbb-fb7c-65c1-1c4b5e385bec>
- Beeldbank Rijkswaterstaat. (sd). *DL F026 005 Stuw te Grave Fotoboek F026 ID439530*. Opgehaald van Beeldbank.rws: https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/DL%20F026%20005%20%20%20Stuw%20te%20Grave%20%20Fotoboek%20F026_439530?resultType=Search&resultList=350742,350741,350740,350739,350738,350485,350471,350457,348735,348734,348733,348732,345384,344958,344933,344932
- Beeldbank Rijkswaterstaat. (sd). *Het trekken van de schotten van stuw Grave in verband met het verlagen van het stuwpand vanwege ijsgang ID360075*. Opgehaald van beeldbank.rws: <https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/360075>
- Beersma, J., Bouzaziz, L., Hegnauer, M., & Weiland, F. S. (2015). *Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse*. Delft: Deltares.
- Berger, H., & Mugie, A. (1994). *Hydrologische syteembeschrijving Maas*. Rijkswaterstaat.
- Binnenvaartcijfers. (2018). *Aantal passages van binnenvaartschepen per sluis*. Opgehaald van binnenvaartcijfers: <https://binnenvaartcijfers.nl/aantal-passages-van-binnenvaartschepen-per-sluis/>
- Blok, R. (2016). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen*. Eindhoven: ThiemeMeulenhoff.
- Bouman, P. (2019, Oktober 24). *Unieke sluisdeur bij Eefde: veiliger én makkelijker te onderhouden*. Opgehaald van detechniekachternederland.nl: https://www.detechniekachternederland.nl/article/mobiliteit/maritieme-techniek/eefde-unieke-sluisdeur-die-veiliger-en-onderhoudsvriendelijker-is?gclid=CjwKCAjw5Ij2BRBdEiwA0Frc9cXRZim-VDZxkpjq3UU0iH7WLuGnqLc_dYTx6hl58yLPGs55kXu8RoCz7oQAvD_BwE

- Bouwdienst Rijkswaterstaat. (2000). *Ontwerp van Schutsluizen*. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat.
- Canon van Nederland. (sd). *Grave in de Tweede Wereldoorlog*. Opgehaald van entoen.nu: <https://www.entoen.nu/nl/noord-brabant/grave/tweede-wereldoorlog>
- Cormont, H. (1989, Juli 3). *Stuw in de Maas bij Borgharen ID13518*. Opgehaald van Beeldbank.rws: https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/Stuw_in_de_Maas_bij_Borgharen_13518
- Cormont, H. (1989, Juli 3). *Stuw in de Maas bij Borgharen ID176657*. Opgehaald van Beeldbank.rws: https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/Stuw_in_de_Maas_bij_Borgharen_176657?resultType=Search&resultList=492367,176662,176660,176659,176663,176661,13519,13517,176657,13521,176658,13515,13520,13518,23542,23544,23541,23543,23547,23546
- Daniel, R., & Paulus, T. (2018). *Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Project*. Oxford, Cambridge: Butterworth-Heinemann.
- Daniel, R., Rigo, P., & Dembicki, E. (2008). *Multi-criteria selection of hydraulic gates*.
- de Bouwcampus. (2017). *Vervangingsopgave grip op de Maas*. Opgehaald van de Bouwcampus: <https://debouwcampus.nl/vraagstukken/vervangingsopgave-grip-op-de-maas>
- de Jong, J., Kramer, N., & Ruijgh, E. (2020). *Vispasseerbaarheid stuwcomplexen*. Deltares.
- Dijk, A., & van der Ziel, F. (2010). *Multifunctionele beweegbare waterkeringen*. Nijmegen: Royal Haskoning.
- DINOloket. (sd). *Ondergrondgegevens*. Opgehaald van dinoloket: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- Dukers, J. (2003). *Kostenramingsmethode paalfunderingen*.
- Erbisti, P. C. (2004). *Design of Hydraulic Gates*. Lisse/Abingdon/Exton(Pa)/Tokyo: A.A. Balkema Publishers.
- Frijns, R. (2019). *Design of an adaptive weir*. Delft: TU Delft.
- Gmiter, T. (2020, Januari 29). *Soo Locks empties its largest lock, see inside*. Opgehaald van mlive.com: <https://www.mlive.com/news/j66j-2020/01/9ef3fcec417407/soo-locks-empties-its-largest-lock-see-inside.html>

- Google Earth. (sd). *Google Earth*. Opgehaald van earth.google.com:
<https://earth.google.com/web/@51.77002622,5.73774411,7.62069133a,922.16696031d,35y,153.23455924h,0t,0r>
- Houdt, J. v. (2016, 9 28). *Maas oevers projecten ID507866*. Opgehaald van Beeldbank.rws:
https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/Maas%20oevers%20projecten%20%20Trefwoorden%20%20de%20Maas%20%20rivier_507866?resultType=Search&resultList=507884,507883,507882,507881,507880,507879,507878,507877,507876,507875,507874,507873,507872,507871,507870
- Houdt, J. v. (2016, 9 28). *Maas oevers projecten ID507888*. Opgehaald van Beeldbank.rws:
https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/Maas%20oevers%20projecten%20%20Trefwoorden%20%20de%20Maas%20%20rivier_507888?resultType=Search&resultList=508109,508108,508107,508106,508105,508095,507898,507897,507896,507895,507894,507893,507892,507891,507890
- Houdt, j. v. (2016, 9 2). *magazinesrijkswaterstaat.nl*. Opgehaald van Vistrap stuw Grave:
<https://www.magazinesrijkswaterstaat.nl/binaries/large/content/gallery/magazines-rijkswaterstaat/programmakrw/vistrap-stuw-grave--rws-j.v.houdt-sept.-2016-2.jpg>
- InCom Working Group. (2005). *Design of movable weirs and storm surge barriers*. PIANC.
- informatievoorziening, R. C. (2020). *Vaarwegen in Nederland*. Rijkswaterstaat Centrale informatievoorziening .
- Ingenieursbureau Boorsma. (sd). *Aanpassing Poirée-stuw, Belfeld [online afbeelding]*. Opgehaald van boorsma-consultants: <https://boorsma-consultants.nl/projecten-grid/aanpassing-poiree-stuw-belfeld/>
- Institut für Hydromechanik Universitaet Karlsruhe. (sd). *Bilder zu Thames Barrier*. Opgehaald van ifh.uni-karlsruhe: <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/lehre/kurse/Anschaungsmaterial/Hochwasserschutz/Thames%20Barrier/Bilder%20zu%20Thames%20Barrier.htm>
- Iv-Infra b.v. (2010). *RINK 2010 - Stuw Grave - Analyse Waterbouw*.
- Janberg, N. (2006, 12 28). *Barrage de retenue de Donzère*. Opgehaald van Structurae:
<https://structurae.net/fr/ouvrages/barrage-de-retenu-de-donzere>
- Jong, D. d. (2014). *Vervangingsopgave Natte Kunstwerken*. Antea Group.
- Jongeling, T. (2012). *MAASSTUWEN – Handelingskader voor bediening stuwen*.
- Jütte, M., & Maarten, v. (2017). *Grip op de Maas*.

- Kadaster. (sd). *Tijdreis over 200 jaar topografie*. Opgehaald van topotijdreis: <https://www.topotijdreis.nl/>
- Kolkman, P., & Jongeling, T. (2000). *Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies*. Delft: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Kostenpool Rijkswaterstaat. (2020, 4 30). Schriftelijk interview over kengetallen. (M. Polinder, Interviewer)
- Molenaar, W. (2011). *Hydraulic Structures Locks*. TU Delft.
- Molenaar, W., & Voorendt, M. (2017). *Manual Hydraulic Structures*. Delft: TU Delft.
- N. Asselman, H. B. (2018). *Het verhaal van de Maas*. Rijkswaterstaat, Deltares.
- Nationaal Georegister. (sd). *Kaarten AutoCAD NL - BE*. Opgehaald van CADCollege.nl: https://www.cadcollege.nl/cadtools/Conversie/Kaarten_AutoCAD.htm
- Nederlands Normalisatie-Instituut. (2019). *NEN-EN 1990+A1+A1/C2 Grondslagen voor het constructief ontwerp*. Delft: Nederlands Normalisatie-Instituut.
- Obermeyer Hydro inc. (2018). *Project Highlight - Nanming River*. Opgehaald van Obermeyerhydro: <http://www.obermeyerhydro.com/nanming>
- Paans van Oord. (2017, Juli 14). LBAN-2017-650156. 170713 - *Grave bovenzijde Overzicht*. Limburg, Nederland: Paans van Oord.
- Rijksmonumenten. (2014, Oktober 12). *John S. Thompsonbrug in Grave*. Opgehaald van Rijksmonumenten: <http://rijksmonumenten.nl/monument/514153/john-s-thompsonbrug/grave/>
- Rijkswaterstaat (2). (2017). *Richtlijnen Vaarwegen 2017*. Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1921). *Kanalisatie van de Maas in Nederland*. Delft: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1922). LBAN-1922-08038. *Tekeningen stuw te Roermond*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1926). LBAN-1926-9114. *Overzichttekening Stuw Grave*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1935). LBAN-1935-6001 & LBAN-1935-6002. *Overzichtstekening stuw Lith*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1935). LBAN-1935-9043. *Plattegrond en doorsneden Stuw bij Lith*. Nederland: Rijkswaterstaat.

- Rijkswaterstaat. (1962). LBAN-1962-08023. *Tekeningen diverse aanzichten Stuw Sambeek*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1984). LBAN-1984-03301. *Doorsnede stuw Linne*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2007). *Technisch rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2008). LBAN-2008-41162. *Jukkendetails stuw Grave*. Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken 1.4*. Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2020, Februari 11). *Waterinfo*. Opgehaald van Waterinfo.rws: <https://waterinfo.rws.nl/#!/nav/index/>
- Rijkswaterstaat Directie Limburg. (1946). LBAN1946-9003. *Tekeningen stuwcomplex bij Borgharen*. Maastricht, Limburg, Nederland: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat Zuid-Nederland. (2019). *Betrekkinglijnen 2019_2020*. Maastricht: Rijkswaterstaat.
- Ruijgh, E. (2020, April 15). Bespreken vispasseerbaarheid in de Maas. (K. M. Polinder, Interviewer)
- RWS. (2007, Mei 3). <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat. Opgehaald van Beeldbank RWS: <https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/313174>
- RWS-Ontwerpt, PPO. (2019). *Uitgangspuntennota Stuwen in de Maas*.
- Schuttevaer. (2018, Februari 9). *OM eist 1400 euro boete na aanvaring stuw Grave*. Opgehaald van schuttevaer.nl: <https://www.schuttevaer.nl/nieuws/varend-bestaan/2018/02/09/om-eist-1400-euro-boete-na-aanvaring-stuw-grave/>
- Snel, A. (1987). *Stuw in de Maas te Grave*. Delft.
- Steunpunt Economische Expertise. (2016). *Discontovoet*. Opgehaald van rwseconomie.nl: <https://www.rwseconomie.nl/discontovoet>
- Stichting Willem Smit Historie Nijmegen. (2008, juni 30). *Gemaal van Sasse in Grave*. Opgehaald van willemsmithistorie: <https://www.willemsmithistorie.nl/smitslikkerveer/artikelen-smit-slikkerveer/84-gemaal-van-sasse-in-grave-1928>
- Tijd, I. D. (1923). LBAN-1923-8037. *Tekeningen Stuw te Belfeld*. Nederland: Rijkswaterstaat.

- TU Delft. (2010). *Effecten op de scheepvaart*. Delft: TU Delft.
- Veen, i. R. (1989). *Stuwen in de Maas*. Arnhem: Rijkswaterstaat.
- Veenstra, P. (2003). *Sluis Grave, een flessenhals?* Enschede: Universiteit Enschede.
- Verduijn, M. (2014). *Future of weir Linne*. Delft: TU Delft.
- Verwoolde, L. (2018, 05 25). *Biologisch Afbreekbare Olie: Beter voor Milieu en Materieel*. Opgehaald van gww-bouw: <https://www.gww-bouw.nl/artikel/biologisch-afbreekbare-olie-beter-voor-milieu-en-materieel/>
- Volker, W., Rook, M., & Volker, M. (2017). *Bevaarbaarheid van de Maas en de Noord-Brabantse kanalen nu en in de toekomst*. Bureau Voorlichting Binnenvaart.
- Vorstenbosch, H. v. (2011, Juli 28). *De normalisatie van de Maas*. Opgehaald van Brabants Historisch Informatie Centrum: <https://www.bhic.nl/ontdekken/verhalen/de-normalisatie-van-de-maas>
- Vriese, F. (2017). *Vissterfte bij passage van stuwen*.
- Wols, R. (2009, November 2). *Grave in vogelvlucht*. Opgehaald van Brabants Historisch Informatie Centrum: <https://www.bhic.nl/ontdekken/verhalen/grave-in-vogelvlucht>
- Wols, R. (2009, november 2). *Het gemaal Van Sasse*. Opgehaald van Brabants Historisch Informatie Centrum: <https://www.bhic.nl/ontdekken/verhalen/het-gemaal-van-sasse>
- Wols, R. (2011, Juli 28). *De uitvoering van de Maasmondingswerken*. Opgehaald van Brabants Historisch Informatie Centrum: <https://www.bhic.nl/ontdekken/verhalen/de-uitvoering-van-de-maasmondingswerken>
- Ziel, F. v. (2009). *Movable water barrier for the 21st century*. Delft: TU Delft.