

DE BESTE MAASSTUW

BIJLAGEN



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

DE BESTE MAASSTUW

BIJLAGEN

Betreft:	Bijlagedocument van 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:	Ingenieurs- bureau Boorsma	T. Hoekstra	t.hoekstra@Boorsma- consultants.nl

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

INHOUDSOPGAVE

Bijlage A. Situatiebeschrijving en Achtergrondinformatie	81
A1 Inleiding	81
A2 De Maas	82
A2.1 Inleiding	82
A2.2 Geschiedenis	83
A2.3 Classificering	84
A2.4 Opbouw	86
A2.5 Stuwen	88
A2.6 Karakteristieken	94
A2.7 Scheepvaart	96
A3 Stuw Grave	98
A3.1 Inleiding	98
A3.2 Locatie	98
A3.3 Werking stuw	100
A3.4 Ondergrond	103
A4 Toekomst	105
A4.1 Inleiding	105
A4.2 Klimaatverandering	105
A4.3 Klimaatadaptatie/ probabilistisch ontwerpen	106
A4.4 Commerciële sector	108
Bijlage B. Stuwmiddelen	109
B1 Puntdeuren	109
B2 Enkele draaideur	110
B3 Klepstuw	111
B4 Trommeldeur	114
B5 Sectordeur	115
B6 Vizieerdeur	117
B7 Zakdeur	119
B8 Roldeur	120
B9 Horizontaal draaiende segmentdeur	121
B10 Verticaal draaiende segmentdeur	123

B11	Overstroombare segmentdeur.....	126
B12	Roterende segmentdeur.....	128
B13	Dakstuw.....	129
B14	Oprollende cilinderdeur	131
B15	Balgstuw.....	132
B16	Klep-balgstuw.....	134
B17	Membraanstuw.....	135
B18	Hefdeur.....	136
B19	Dubbele hefdeur.....	138
B20	Schotbalken.....	140
B21	Poiréestuws.....	140
B22	Afzinkbare-caisson stuws.....	142
B23	Waaierdeur.....	143
B24	Van Bochoveschuif.....	145
B25	Overige stuwmiddelen.....	146
Bijlage C.	Trade-Off Matrix.....	148
C1	Trade-Off Matrix.....	149
C2	Toelichting.....	150
Bijlage D.	Berekening hoeveelheden	153
Bijlage E.	Locatiestudie.....	176
Bijlage F.	Uitwerking varianten	178
F1	Inleiding:.....	178
F2	Algemeen:.....	178
F2.1	Trillingen:	178
F2.2	Vispasseerbaarheid	179
F2.3	Aanvaringen.....	180
F2.4	Doorvaarbaarheid	181
F3	Variant 1: Segmentdeur met klep.....	181
F3.1	Uitvoering.....	181
F3.2	Betrouwbaarheid.....	182
F3.3	Beheer & onderhoud.....	183
F3.4	Duurzaamheid	186

F3.5	Omgeving	186
F4	Variant 2: Overstroombare segmentdeur	187
F4.1	Uitvoering.....	187
F4.2	Betrouwbaarheid.....	187
F4.3	Beheer & onderhoud.....	189
F4.4	Duurzaamheid	191
F4.5	Omgeving	191
F5	Variant 3: Klep-balgstuw	192
F5.1	Uitvoering.....	192
F5.2	Betrouwbaarheid.....	192
F5.3	Beheer & onderhoud.....	194
F5.4	Duurzaamheid	195
F5.5	Omgeving	195
F6	Variant 4: Kniestuw	197
F6.1	Uitvoering.....	197
F6.2	Betrouwbaarheid.....	197
F6.3	Beheer & onderhoud.....	198
F6.4	Duurzaamheid	199
F6.5	Omgeving	199
Bijlage G.	Poll weging	200
G1	Memo criteriaweging	200
G2	Resultaten Poll	203
Bijlage H.	Multicriteria analyse	205
H1	Deelcriteria scores.....	205
H1.1	Uitvoering.....	205
H1.2	Betrouwbaarheid.....	205
H1.3	Beheer & onderhoud.....	206
H1.4	Duurzaamheid	206
H1.5	Omgeving	206
H2	Multicriteria analyse.....	206
Bijlage I.	Kosten-baten analyse	208
I1	Constructiekosten	208

I1.1	Segmentdeur met klep.....	209
I1.2	Overstroombare segmentdeur	209
I1.3	Klep-balgstuw	210
I1.4	Kniestuw	211
I2	Doorvaarbaarheid	212
I3	Gebruikskosten	213
I4	Onderhoudskosten.....	214
I5	Totale kosten	214
Bijlage J. Validatie voorkeursvariant.....		216

BIJLAGE A. SITUATIEBESCHRIJVING EN ACHTERGRONDINFORMATIE

A1 Inleiding

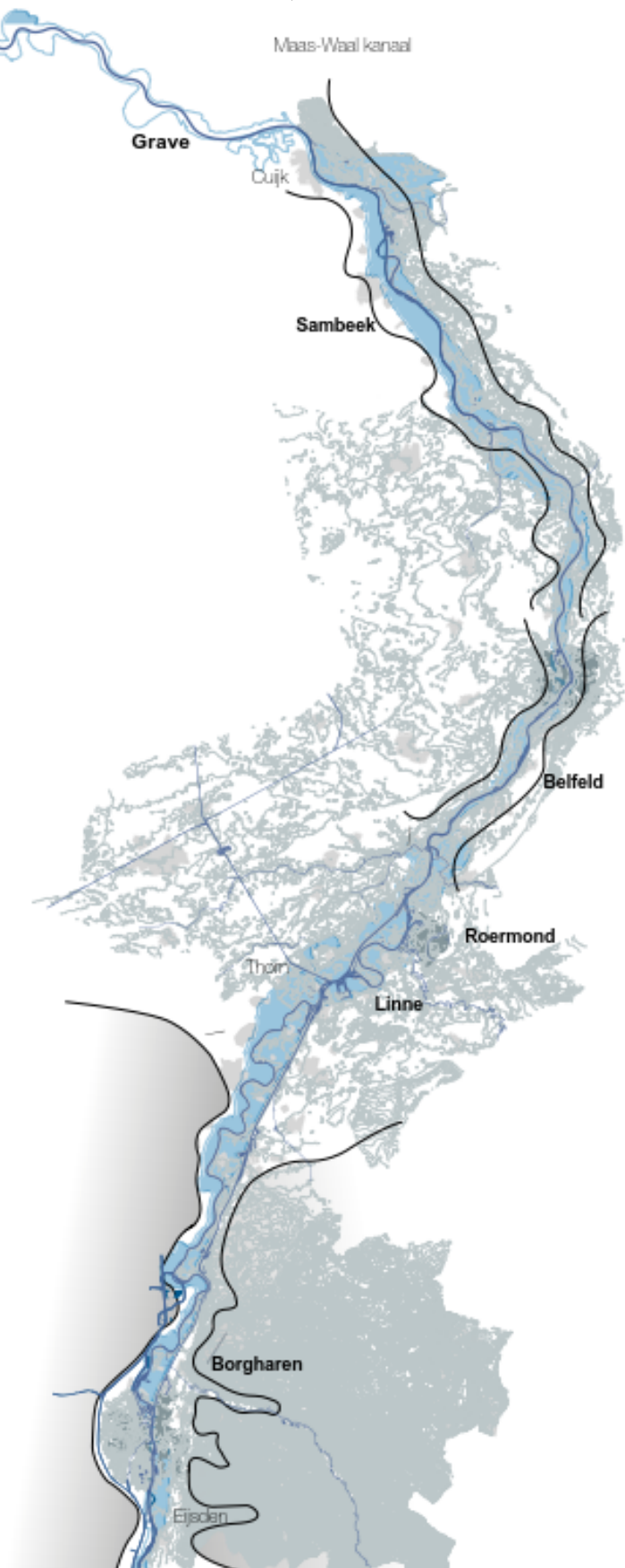
Deze bijlage geeft aandacht aan de situatie en achtergrond waar dit project om draait. Het gaat in het onderzoek om de stuwen in het Nederlandse deel van de Maas. Wat houdt dit in? Wat zijn de kenmerken van de Maas als rivier, hoe verhouden de verschillende stuwen zich tot elkaar en tot de scheepvaart? Hoe past stuw Grave in dit plaatje? Deze bijlage beantwoordt onder andere deze vragen. Figuur 1 geeft grofweg het projectgebied weer, hierbij zijn de locaties waar stuwen zijn gesitueerd vet gedrukt.

Paragraaf A2 beschrijft het systeem van de Maas. Deze paragraaf beschrijft de gegevens, de geschiedenis, de classificering, de opbouw, de stuwen, de karakteristieken en de scheepvaart van de Maas.

Paragraaf A3 beschrijft de stuw bij Grave. De paragraaf beschrijft de locatie, de geschiedenis van de locatie, de stuw en de werking van de stuw.

Paragraaf A4 beschrijft het klimaat en haar verandering in het gebied waarbinnen het onderzoek valt. Hiernaast beschrijft het wat probabilistisch ontwerpen is binnen riviergebieden en de toepassing hiervan binnen het onderzoek naar stuwen.

Figuur 1: Overzicht van het Nederlandse deel van de Maas; van Eijsden tot Geertruidenberg (N. Asselman, 2018).

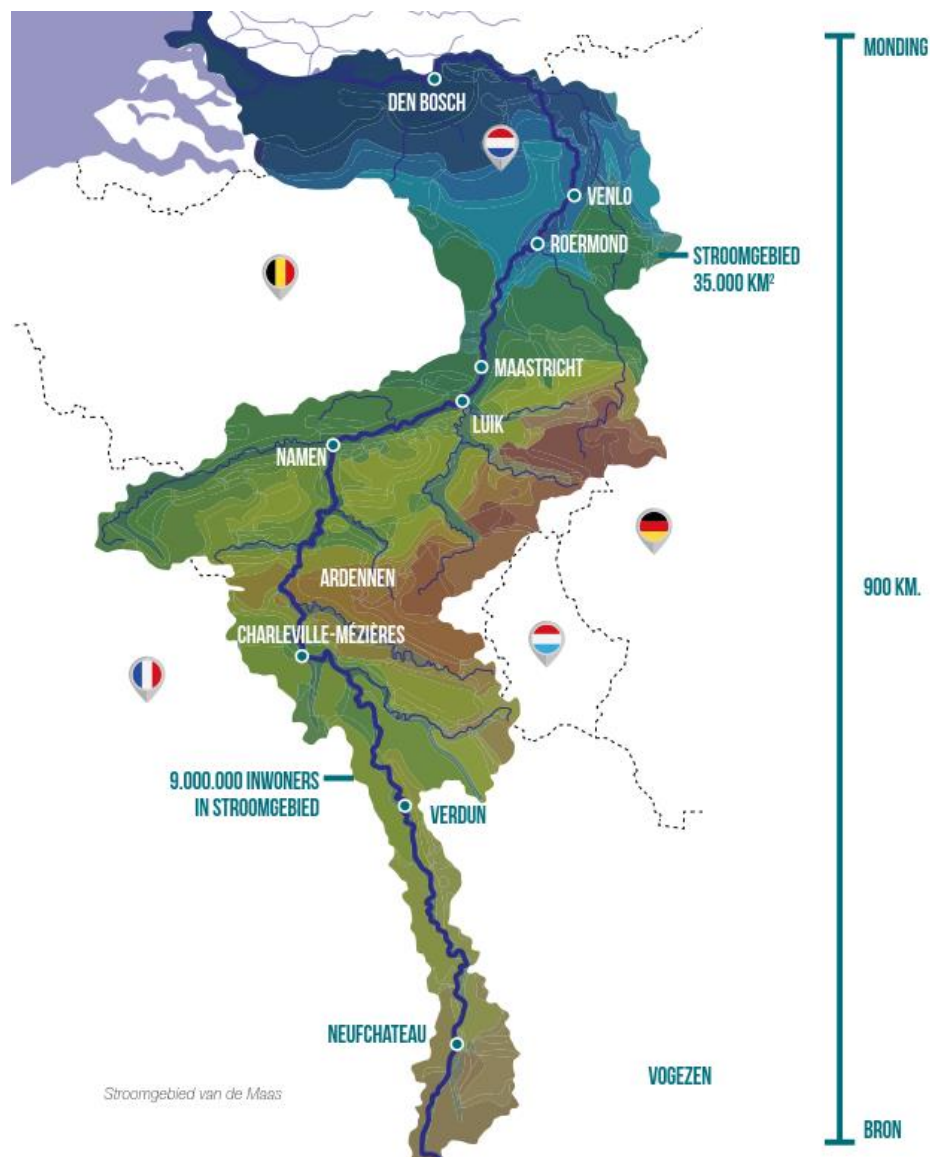


A2 De Maas

A2.1 Inleiding

De Maas is een regenrivier van 935 kilometer lang. De rivier stroomt van de bron, ongeveer 50 kilometer ten noorden van Dijon, door Frankrijk naar het noorden. De rivier stroomt door België, door de Ardennen, waar de koers van de rivier naar het noordoosten buigt. In Nederland aangekomen stroomt de rivier langs Maastricht door naar Roermond, langs Venlo en buigt ten zuiden van Nijmegen naar het westen. De rivier mondt uit na de Biesbosch in het Hollands Diep. Het Hollands Diep staat in verbinding met het Haringvliet, wat weer in verbinding staat met de Noordzee. De Maas heeft een stroomgebied 33.000 km² waarvan 10.000 km² in Frankrijk ligt, 13.000 km² in België, 6000 km² in Nederland en 4000 km² in Duitsland. De Maas stroomt vanaf 409 m +NAP naar de zee en heeft dus een verval van meer dan 400 m. In Figuur 2 is het stroomgebied van de Maas gevisualiseerd. (Verduijn, 2014).

De Maas heeft een gemiddeld debiet van 230 m³/s bij Sint Pieter en heeft een erg variërende afvoer (Frijns, 2019). De laagst gemeten afvoer op de Maas is 20 m³/s (bij Luik) en de hoogst gemeten afvoer is 3000 m³/s. In het stroomgebied van de Maas leven ongeveer 9 miljoen mensen (N. Asselman, 2018).

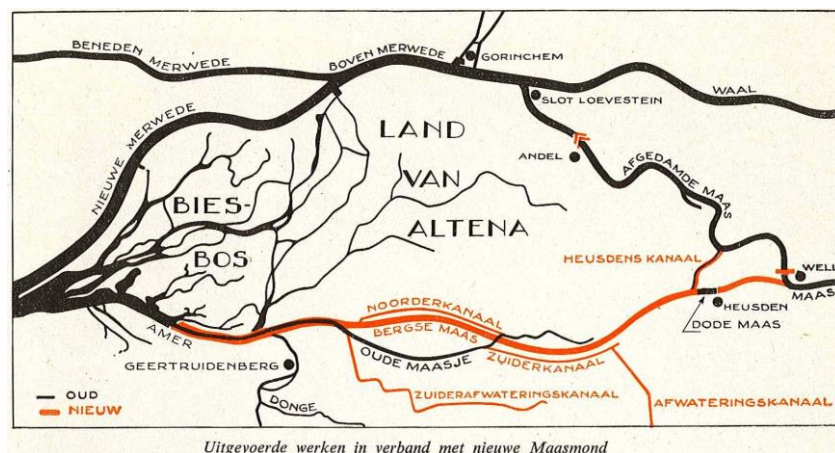


Figuur 2: Stroomgebied van de Maas (N. Asselman, 2018).

A2.2 Geschiedenis

De regenrivier de Maas stroomt al eeuwen vanaf Frankrijk, over de hoogvlaktes van de Ardennen naar het noorden om ter hoogte van Nijmegen af te buigen naar het westen. De rivier heeft zich in Limburg in de loop van duizenden jaren steeds meer naar het westen verlegd en is ingesneden in het landschap. Ook verder benedenstrooms heeft de rivier zich kunnen verleggen door meandering. (N. Asselman, 2018)

In de eerste eeuwen na Christus stroomde de Maas ter hoogte van Heusden richting het westen om in de Noordzee uit te monden. In latere eeuwen is de Maas van loop veranderd om vanaf Heusden richting het noorden ter hoogte van Woudrichem de Waal in te stromen. Het is bekend dat in de vroege middeleeuwen delen van de Maas bedijkt werden. Ten gevolge van hoge debieten waren er verschillende plaatsen waar de Maas regelmatig over overlaten stroomde. Achter deze overlaten vormden zich tijdelijke waterlopen. Voorbeelden hiervan zijn de Beerse Maas en de Heerewaardense overlaat. Bij de Heerewaarden bestond een connectie tussen de Maas en de Waal. Echter kwam veel meer water vanaf de Waal de Maas in dan andersom, zelfs meer dan het totale debiet van de Maas zelf. Dit fenomeen zorgde voor veel overstromingen. Deze problemen werden minder na de aanleg van het Pannerdensch kanaal maar uiteindelijk is de overlaat in Heerewaarden toch gesloten in het jaar 1856. In het jaar 1883 werd besloten om alle connecties tussen de Maas en de Waal te sluiten en in het jaar 1904 was de nieuwe loop van de Maas, vanaf Heusden naar het Haringvliet, gerealiseerd. Figuur 3 visualiseert deze nieuwe loop van de Maas (Wols, De uitvoering van de Maasmondingswerken, 2011) (Verduijn, 2014).



Figuur 3: Wijziging loop van de Maas in 1904 (Wols, De uitvoering van de Maasmondingswerken, 2011).

Toen in het begin van de twintigste eeuw de kolenindustrie in Zuid-Limburg op gang kwam was veel vraag naar een beter bevaarbare Maas. Tot toen toe was de Maas slecht bevaarbaar en was het debiet vaak te laag om beroepsvaart te kunnen toestaan op de Maas. Om dit te verbeteren zijn tussen de jaren 1915 en 1942 zeven stuwen en elf sluizen gebouwd om zo de Maas beter bevaarbaar te maken. In het jaar 1935 is daaraan toevoegend het Julianakanaal aangelegd. Dit kanaal loopt parallel met het deel van de Maas wat de grens vormt met België (de Grensmaas). Dit deel van de Maas heeft een groot verval, hierom zouden zeven stuwen gebouwd moeten zijn om dit deel bevaarbaar te maken. Dit was echter veel duurder dan het aanleggen van een parallel lopend kanaal. Daarnaast is in het jaar 1927 een kanaal gegraven tussen de Maas en de Waal: het Maas-Waalkanaal. Dit kanaal verkort de route naar de Rijn met ongeveer 100 kilometer. In het jaar 1972 is het Lateraalkanaal gegraven tussen Linne en Buggenum (langs Roermond) om zo enkele bochten af te snijden van de Maas ten behoeve van de scheepvaart. (N. Asselman, 2018)

Tot het einde van de 20^e eeuw was het bovenste deel van de Nederlandse Maas, tot aan Cuijk, onbedijkt en werd het enkel beschermd door oplopende oevers. Na de overstromingen in de jaren 1993 en 1995 zijn veel projecten begonnen om de waterveiligheid op de Maas te verbeteren. Niet alleen in het benedenstroomse gebied maar ook in het gebied stroomopwaarts van Cuijk werden dijken versterkt, hoogwatergeulen gegraven,

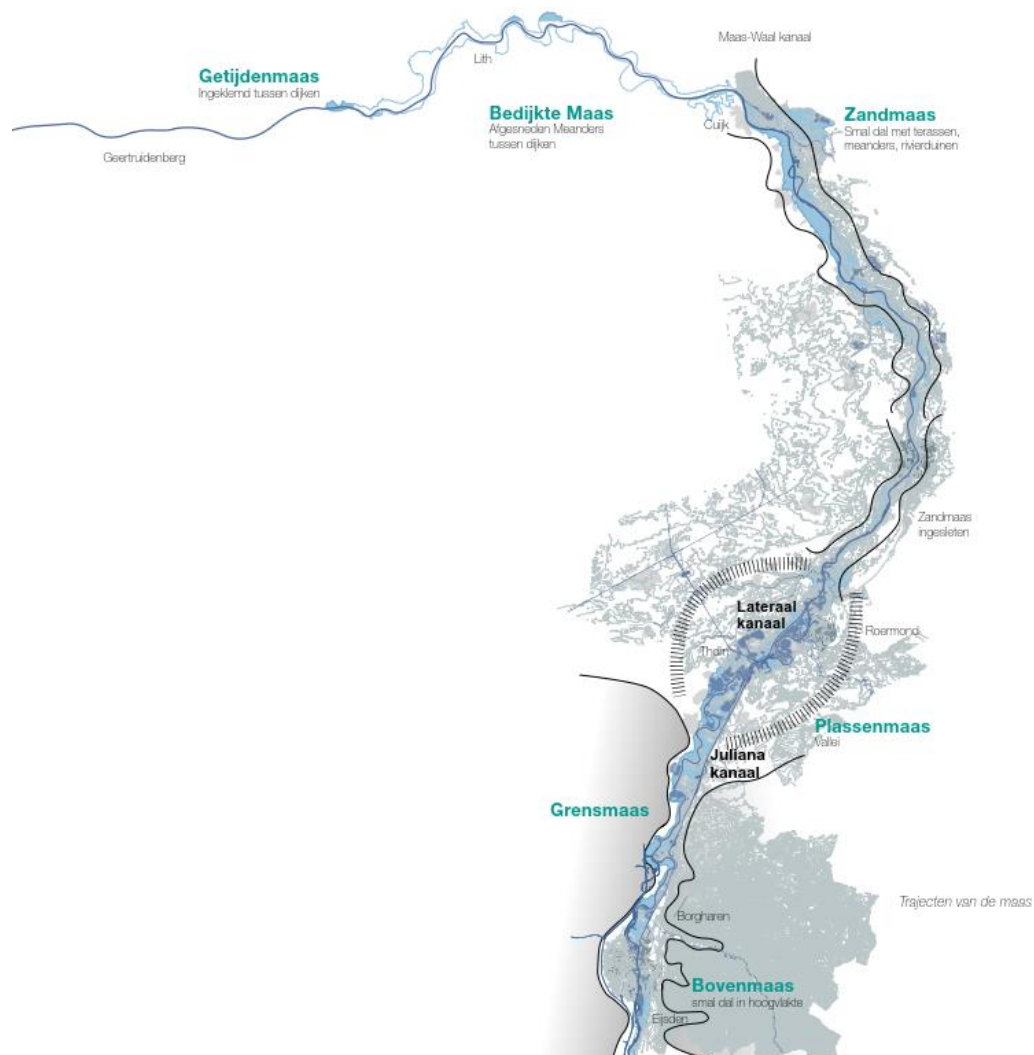
retentiegebieden aangelegd, weerden verlaagd en zomerbedden verdiept. In de Maasvallei (stroomopwaarts van Cuijk) werden de eerste dijken aangelegd. Deze projecten zijn tot stand gekomen in combinatie met de winning van zand en grind. De opbrengsten van zand- en grindwinning zijn gebruikt voor het financieren van de hoogwatermaatregelen en natuurontwikkelingsprojecten langs de Maas. De zand- en grindwinning van de afgelopen honderd jaar in en rond de Maas hebben gezorgd voor grote plassen en diepere zomerbedden. (N. Asselman, 2018)

A2.3 Classificering

De Nederlandse Maas is opgedeeld in verschillende delen. In Tabel 1 en Figuur 4 zijn de verschillende delen van het Nederlandse deel van de Maas in hun onderverdeling opgesomd.

Tabel 1: Onderverdeling Nederlandse Maas (Verduijn, 2014).

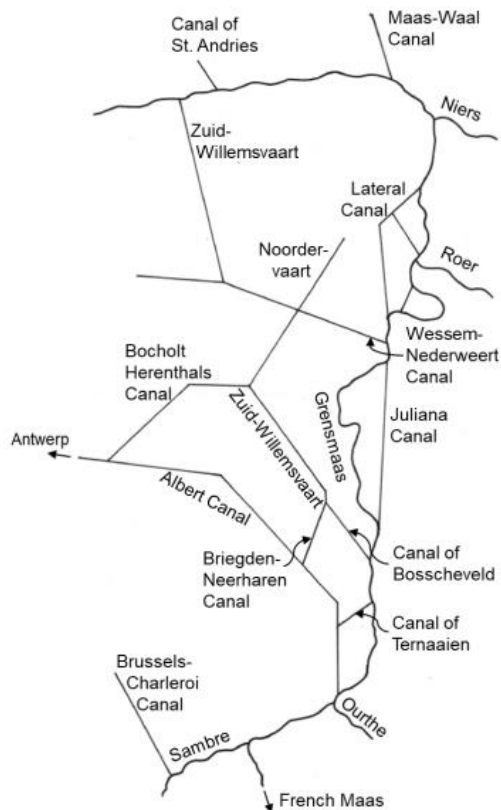
Hoofdclassificering	Onderclassificering	Locatie	Ondergrond	Landschap
Maasvallei	Bovenmaas	Eijsde - Borgharen	Kalksteen, grind, löss	Heuvels, ingesleten rivier
	Grensmaas	Borgharen - Roosteren	Grind & Klei	Grindbanken, bochtige en relatief steile rivier, Julianakanaal
	Plassenmaas	Roosteren - Roermond	Grind & Klei	Grindplassen, bochtige rivier, terrasranden (oude rivierlopen)
	Noordelijke Maas	Roermond - Cuijk	Zand & Klei	Halfopen landschappen, licht oplopende oevers
Zandmaas		Venlo – Den Bosch	Zand & Klei	Open landschap, dijken/lichtoplopende oevers
Bedijkte Maas	Benedenmaas	Cuijk - Lith	Zand & Klei	Open landschap, dijken, hoefijzermereen (afgesneden bochten)
	Getijdenmaas	Lith - Haringvliet	Klei	Open landschap, dijken, redelijk rechte rivier



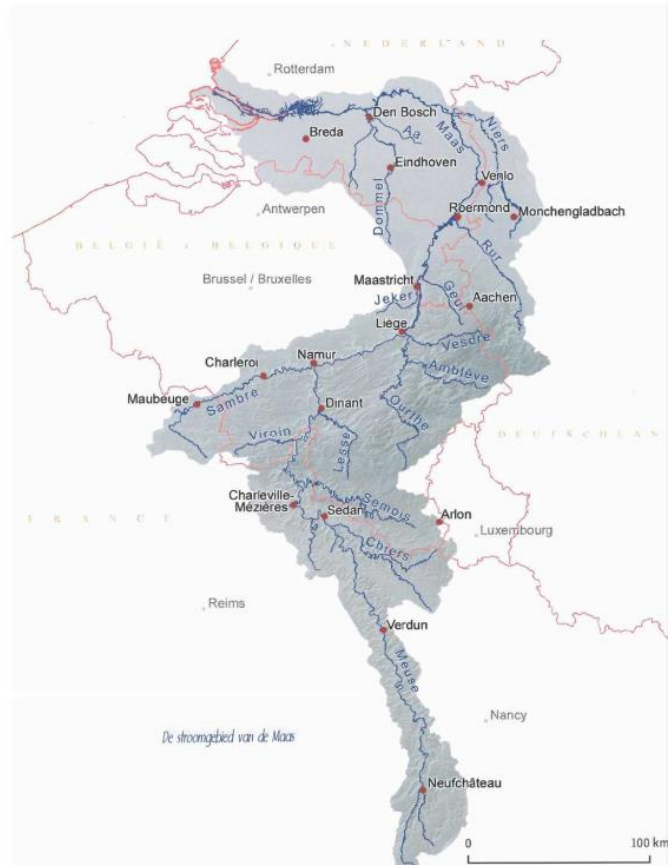
Figuur 4: Classificering Maas (N. Asselman, 2018).

A2.4 Opbouw

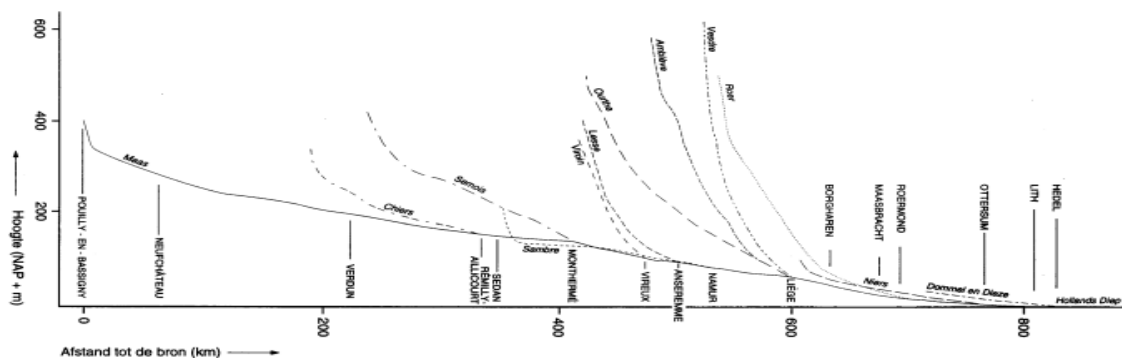
De Maas bestaat uit de hoofdrivier en verschillende zijrivieren. Figuur 5 visualiseert de verschillende vaarwegen rond de Maas. Figuur 6 geeft de verschillende zijtakken van de Maas weer. Figuur 7 geeft de verhanglijnen van de verschillende takken van de Maas weer (Berger & Mugie, 1994). Zoals te zien zijn er twaalf significante zijtakken van de Maas.



Figuur 5: Overzicht van waterwegen rond de Maas (Frijns, 2019).



Figuur 6: De Maas en haar zijtakken (Verduijn, 2014).

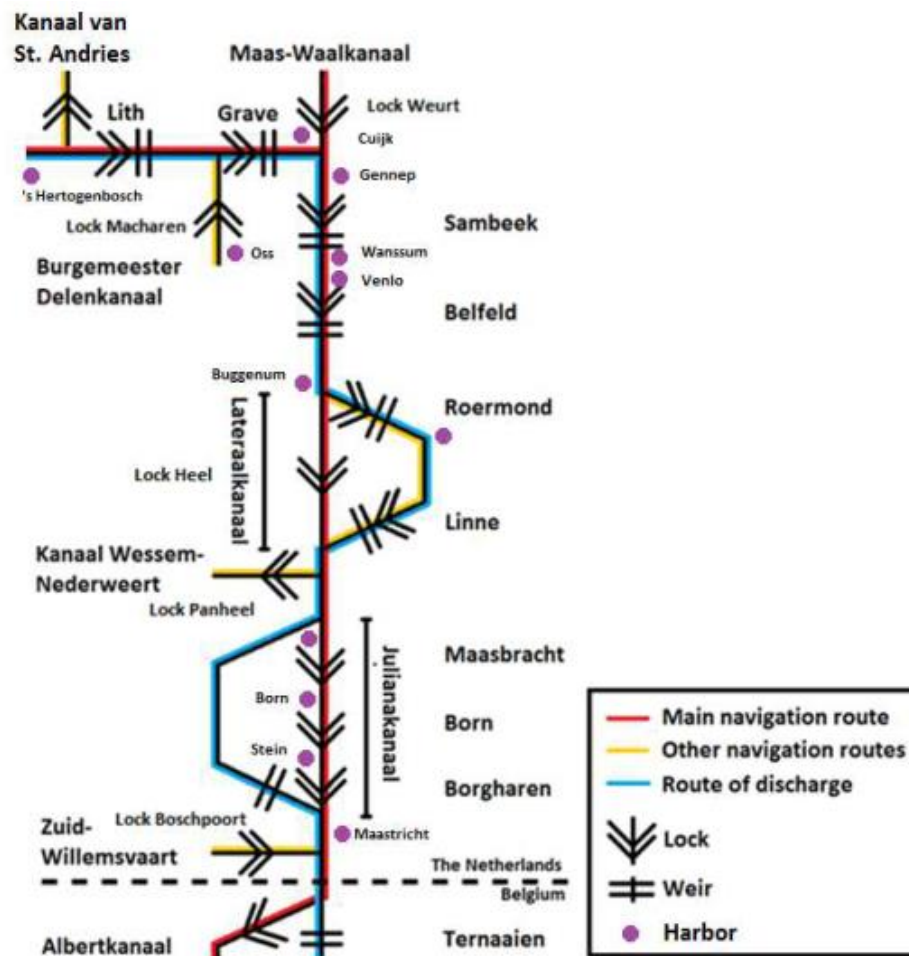


Figuur 7: Verhanglijnen van de Maas en haar belangrijkste zijtakken (Berger & Mugie, 1994).

De figuren laten zien dat de Maas een relatief smal stroomgebied heeft en dat het grootste gebied van het stroomgebied in de Ardennen gelokaliseerd is. Dit gedeelte van het stroomgebied herbergt ook de meeste zijtakken van de rivier. De zijtakken van de Maas in de Ardennen vormen de voornaamste bron van (regen)watertoevoer voor de rivier, grofweg de helft van het water komt hier vandaan. Regen in het bovenstroomse gebied van de Maas bepaald voornamelijk de omvang van het debiet wat aankomt in Nederland. De rivieren de Roer en de Niers stromen vanuit Duitsland en monden uit in de Nederlandse Maas. Deze zijtakken vormen ongeveer 8% van het totale debiet van de Maas. De zijtakken de Dommel en de Aa stromen door Noord-Brabant en monden bij Den Bosch in de Maas. Deze rivieren vormen ongeveer 6% van het totale debiet van de Maas. (N. Asselman, 2018)

De belangrijkste kanalen die in verbinding staan met de Nederlandse Maas zijn het Julianakanaal, het Lateraalkanaal, het Maas-Waalkanaal en het St. Andrieskanaal. Alle kanalen zijn van de rivier afgescheiden door schut- en/of keersluizen en hanteren een standaard waterpeil.

De Nederlandse Maas is te schematiseren zoals in Figuur 8. Figuur 8 visualiseert de Maas met daarin aangegeven waar de schepen langs varen, wat optionele vaarwegen zijn en waarlangs de Maas het water afvoert. De figuur geeft de verschillende stuwen en de sluizen in en rond de Maas weer. Zoals te zien gaat de scheepvaart langs het Julianakanaal en het Lateraalkanaal in plaats van de Maasbochten. Deze kanalen vormen een veel snellere verbinding dan de bochtige rivier daar ter plaatse. Figuur 8 laat daarnaast de verschillende commerciële havens langs de Maas zien. De Nederlandse Maas heeft in totaal 77 recreatie- en 12 commerciële havens. De 12 commerciële havens zijn te zien in Figuur 8. (Verduijn, 2014)



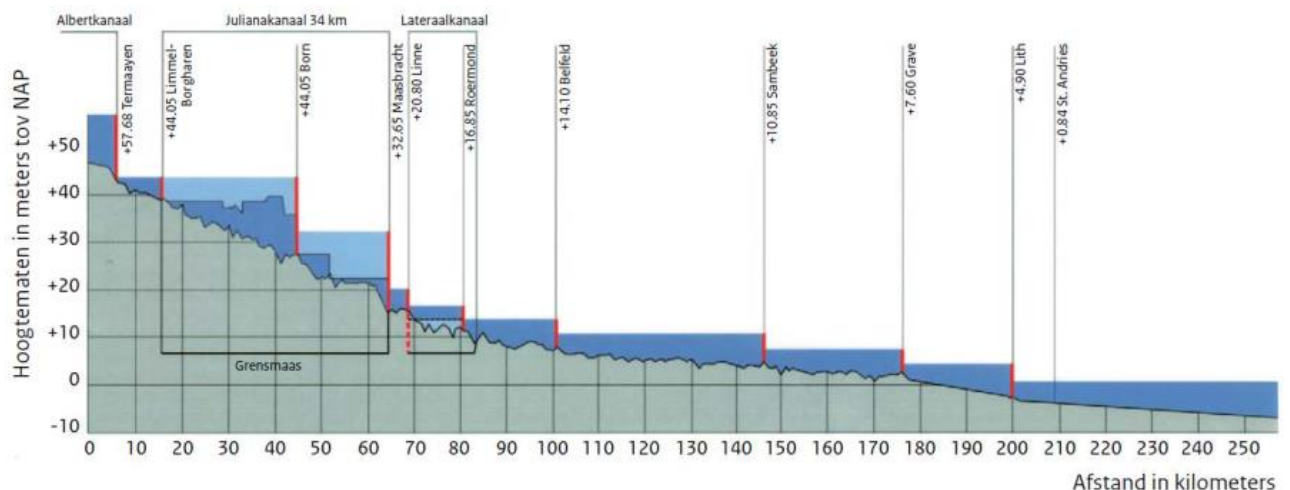
Figuur 8: Schematisering Nederlandse Maas (Verduijn, 2014).

A2.5 Stuwen

De Maas komt België binnen op een hoogte van 93 m +NAP en komt Nederland binnen bij Eijsden op een hoogte van 57,68 m +NAP. De gehele Maas bevat in totaal zeventig stuwen waarvan zeven in de Nederlandse Maas liggen. De stuwen in de Nederlandse Maas zijn de volgende (van bovenstrooms naar benedenstrooms):

- Borgharen;
- Linne;
- Roermond;
- Belfeld;
- Sambeek;
- Grave;
- Lith.

Figuur 9 laat zien wat de stuwpeilen van de stuwen in de Nederlandse Maas zijn zoals deze een aantal jaren geleden waren. In de loop van afgelopen jaren zijn enkele peilen verhoogd om de diepgang van grotere schepen te garanderen en het uitdrogen van bepaalde natuurgebieden tegen te gaan. Deze figuur visualiseert daarnaast de keersluizen die in het Julianakanaal en in het Lateraalkanaal liggen. Keersluizen hebben net als stuwen ook de functie om het waterpeil achter de sluis te reguleren, bijvoorbeeld om diepgang voor schepen te garanderen, echter hebben ze geen watervoerende functie. Keersluizen staan meestal open en worden gesloten in (extreme) situaties van te hoog of te laag water. Wat betreft de Maas zijn de keersluizen te Limmel, Born en Maasbracht van belang. Het Lateraalkanaal beschikt niet over een keersluis. Hierin wordt het water enkel gekeerd door een schutsluis. (Verduijn, 2014)



Figuur 9: Stuwpeilen van de verschillende stuwen in de Maas (Verduijn, 2014).

De streefpeilen die tegenwoordig worden gehanteerd voor de zeven stuwen in de Nederlandse Maas zijn te zien in Tabel 2.

Tabel 2: Streefpeilen stuwen Nederlandse Maas (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019).

Stuw	Streefpeil bovenstrooms (Q laag)	Bouwjaar
Borgharen	44,10m +NAP	1928
Linne	20,85m +NAP	1921
Roermond	16,85m +NAP	1921
Belfeld	14,15m +NAP	1924
Sambeek	11,10m +NAP	1925
Grave	7,95m +NAP	1926
Lith	4,90m +NAP	1936

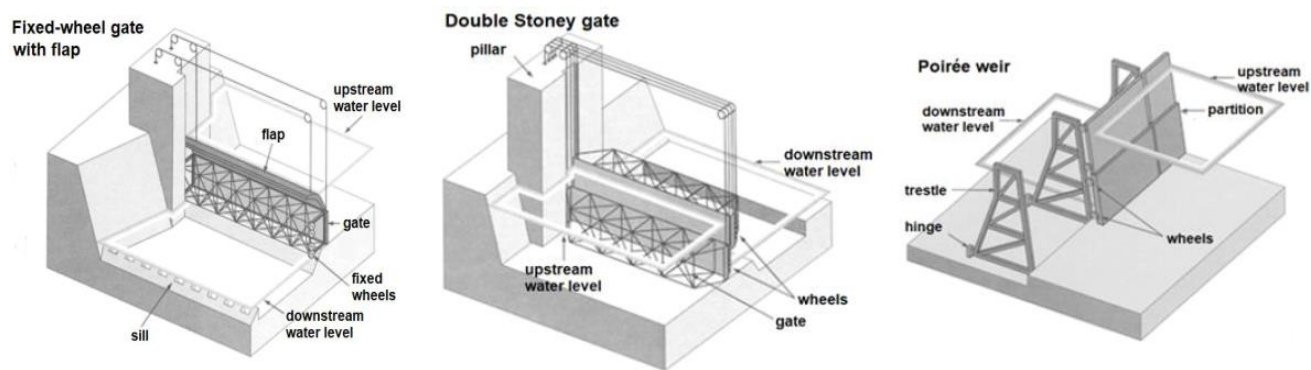
De stuwen zijn in de jaren '30 gedimensioneerd op een verval van 3 tot 3,5 m per stuw. De streefpeilen zoals genoemd in Tabel 2 worden niet altijd precies gehanteerd. Op de meeste stuwen zit een bandbreedte voor het stuwpeil van 5 tot 30 centimeter. Ook worden voor hogere debieten andere streefpeilen gehanteerd. Het verval van de Grensmaas (het stuk rivier tussen de stuwen Borgharen en Linne) is erg groot omdat hier de rivier niet gestuwd is en het Julianakanaal er parallel aan loopt. Ook het verval tussen Linne en Roermond lijkt niet te voldoen (te klein) maar hiervoor geldt dat hier het Lateraalkanaal voor gegraven is. (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019)

De stuwen in de Maas zijn ontworpen en gebouwd vanuit de principes van normalisatie en kanalisatie van de Maas die werden nagestreefd in het begin van de 20^e eeuw. Deze principes vervulden de volgende twee functies (Verduijn, 2014):

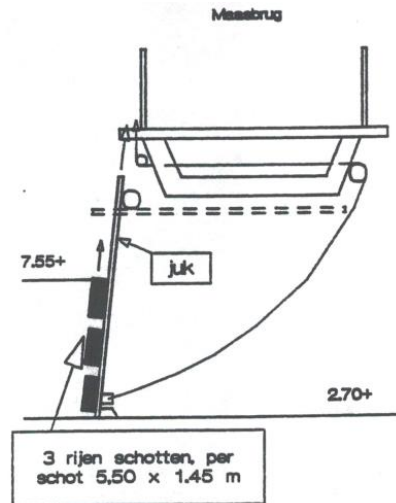
- bevaarbaarheid garanderen voor scheepvaart;
- betere regulering van afvoer om zo benedenstroomse overstromingen te voorkomen.

Drie stuwtypes zijn toegepast in de Nederlandse Maas: de (rol)hefdeur met klep, het Poiréestuwtype en het Stonestuwtype. Figuur 10 visualiseert deze drie stuwtypes. Een (rol)hefdeur met klep is een grote schuif die met kettingen via katrollen opgehesen wordt. Boven op de schuif is een klep gesitueerd die overstroomt over de schuif kan genereren. Een Poiréestuw bestaat uit vele schotten die door middel van rolwielen tegen stalen staanders (jukken) leunen. De jukken zijn verankerd op de drempel en kunnen naar beneden klappen als de schotten zijn weggehaald. De schotten worden weggehaald bij hoge debieten. De dubbele Stoneydeuren zijn hefdeuren die door middel van contragewichten en katrollen omhoog gehesen kunnen worden. Het stuwtype bestaat uit twee Stoneydeuren die onafhankelijk van elkaar bewegen en opgehesen of gezakt kunnen laten worden. Bijlage B geeft meer informatie over de verschillende stuwtypes.

Omdat de stuwen in de Maas in dezelfde periode, en vanuit dezelfde gedachte, zijn gebouwd zijn de stuwen erg vergelijkbaar. De stuw bij Borgharen en de stuw bij Lith zijn uitgevoerd met hefdeuren met kleppen. De stuwen bij Linne, Roermond, Belfeld en Sambeek zijn combinatiestuwen die gebouwd zijn uit twee delen: één deel bestaande uit dubbele Stoneydeuren en één deel bestaande uit het Poiréesysteem. De stuw bij Grave is gebouwd vanuit een gemodificeerd soort Poiréetype stuw: de opklapbare Poiréestuw. Hierbij kantelen de jukken onder een brug in plaats van dat ze tegen de bodem plat klappen. Ook hier kunnen schotten voor de jukken geschoven worden. Dit principe is gevisualiseerd in Figuur 11. (Frijns, 2019)



Figuur 10: Principetekening van de hefdeur met klep (links), de dubbele Stoneydeur (middel) en de Poiréestuw (rechts) (Frijns, 2019).



Figuur 11: Opklapbare Poiréestuw bij Grave (Veen, 1989).

Tabel 3 geeft voor de zeven stuwen per stuw de belangrijkste afmetingen en kenmerken. De vier stuwtypes zijn in verschillende kleuren gearceerd in deze tabel. Donkergroen geeft aan dat de stuw uitgevoerd is met hefdeuren met klep, lichtblauw geeft aan dat het gaat om een Poiréestuw, blauw dat het om een Stoneystuw gaat en donkerblauw wil zeggen dat het om een opklapbare Poiréestuw gaat. De tabel geeft bij de gecombineerde stuwen per onderdeel aan om welk systeem het gaat.

Tabel 3: Afmetingen van de stuwen in de Nederlandse Maas. Bronnen: [1]: (Rijkswaterstaat Directie Limburg, 1946), [2]: (Rijkswaterstaat, 1984), [3]: (Rijkswaterstaat, 1922), [4]: (Tijd, 1923), [5]: (Rijkswaterstaat, 1962), [6]: (Rijkswaterstaat, 1926), [7]: (Rijkswaterstaat, 1935), [8]: (Rijkswaterstaat, 1935).

Stuw	Borgharen ([1])	Linne ([2])	Roermond ([3])	Belfeld ([4])	Sambeek ([5])	Grave ([6])	Lith ([7], [8])
Streefpeil Bovenstrooms	44,10m +NAP	20,85m +NAP	16,85m +NAP	14,15m +NAP	11,10m +NAP	7,95m +NAP	4,90m +NAP
Streefpeil benedenstrooms	-	16,85m +NAP	14,15m +NAP	11,10m +NAP	7,95m +NAP	4,90m +NAP	0,45m +NAP
Bodemhoogte scheepvaart-gedeelte	38,50m +NAP	15,95m/ 15,30 +NAP	11,60/ 11,40m +NAP	8,05/ 7,65m +NAP	4,20/ 4,80m +NAP	2,70m +NAP	NAP- 3,0/ 2,5m
Bodemhoogte afvoergedeelte	39,60m +NAP	16,95/ 16,55m +NAP	11,80/ 12,20m +NAP	8,35/ 7,65m +NAP	5,10/ 4,80m +NAP	-	-
Diepte woeldrempel/ uitsparing	0,70 / 1,80m	1,2m	1,2m	1,25m	0,9m	0,4	2m
Aantal openingen	4	4	3	3	3	2	3
Breedte scheepvaart-gedeelte	30,00m (1x)	60m (1x)	68,05m (1x)	63m (1x)	63m (1x)	60,74 (1x), 49,7m (1x)	38,00m (3x)
Breedte afvoergedeelte	23,00m (3x)	17m (3x)	17m (2x)	17m (2x)	17m (2x)	-	-
Hoogte voor scheepvaart	49,46m +NAP	∞	∞	∞	∞	15,15m +NAP	13,60m +NAP
Breedte pijlers	4/ 4,25/ 5,75 m (3 pijlers)	6,5/ 4/ 4 m (3 pijlers)	6,5/ 4m (2 pijlers)	6,5/ 4m (2 pijlers)	6/ 4m (2 pijlers)	7,08/ 4,4/ 4,4m (3 pijlers)	6/ 6m (2 pijlers)
Lengte pijlers	16,3m	20m	20m	20m	20m	36m	29,1m

Onderstaande kopjes beschrijven de zeven stuwen nader, hierin zijn de globale afmetingen beschreven aan de hand van Tabel 3. Daarnaast beschrijven de onderstaande kopjes waar de stuw gesitueerd is, wat de bijzonderheden per stuw zijn en of bij afvoeren maatregelen genomen worden.

Borgharen

De stuw bij Borgharen is gesitueerd pal naast de afsplitsing van het Julianakanaal van de Maas en markeert het begin van de Grensmaas (zie paragraaf A2.3). Zoals beschreven bestaat deze stuw uit verschillende rolhefdeuren met klep (zie Figuur 10). Stuw Borgharen bestaat in totaal uit vier schuiven. Drie van deze schuiven waarborgen enkel de afvoer van water, één schuif is breder zodat scheepvaart door deze stuwopening kan varen. De schuiven voor de afvoer van water hebben boven op de schuif een klep. Deze kleppen zijn in gesloten stand 1,875 m hoog, en zorgen dus voor een extra stuwhoogte van 1,875 m boven op de schuif. De klep is op het dikste punt 0,135 m dik; hierdoor zorgt de klep in neergeklapte stand nog steeds voor een extra stuwhoogte van 0,135 m boven op de schuif. De schuif gesitueerd in de scheepvaartopening is een normale hefschuif zonder klep. Alle schuiven zijn gemaakt van stalen vakwerken. Aan de bovenstroomse kant van de stuw loopt een loopbrug waaronder uitklapbare staanders hangen. Deze staanders kunnen in verlengde stand op de bodem gezet worden. Figuur 12 visualiseert dit systeem. Tussen de staanders zijn schotten te plaatsen door middel van een kraantje die over de loopbrug rijdt. De schotten zijn in sponningen te zakken in de staanders (en de pijlers) zodat het bovenstroomse water gekeerd wordt in tijden van onderhoud en inspectie. Deze stuw reguleert de waterstand bij debieten tot 230 m³/s geheel doormiddel van de kleppen op de schuiven. Bij debieten

van 230 tot 1275 m³/s worden de schuiven met stappen van 0,10 m geheven, ook kan tegelijkertijd water over de kleppen worden afgevoerd. Bij debieten boven de 1275 m³/s zijn alle schuiven geheel geopend. (Veen, 1989) (Rijkswaterstaat Directie Limburg, 1946)



Figuur 12: Stuw bij Borgharen; loopbrug met daaronder uitgeklapte staanders met schotten in de ene opening en opgeklapte staanders in de andere stuwopening (Cormont, 1989).

Linne

De stuw bij Linne is gesitueerd aan het begin van een lus in de Plassenmaas (zie paragraaf A2.3). Bovenstrooms van de stuw (en de lus) begint het Lateraalkanaal die in totaal drie bochten omzeilt. De stuw is een combinatiestuw met een Poiréegedeelte en een Stoneygedeelte. Figuur 10 laat deze twee systemen zien. Het Poiréegedeelte heeft een breedte van 60 m en het Stoneygedeelte bestaat uit drie openingen van 17 m breed. Het Poiréegedeelte bestaat uit schotten die leunen tegen jukken, verankerd aan een lage drempel. Er rusten maximaal twee schotten bovenop elkaar. Bij debieten tot 200 m³/s (bij Sint Pieter) zijn de Poiréestuwen geheel dicht en wordt het debiet gereguleerd door de Stoneyschuiven. Bij debieten van 200 tot 1000 m³/s worden schotten weggehaald uit het Poiréegedeelte (zoveel als nodig is voor het gewenste debiet), de regulatie wordt nog steeds gedaan door het Stoneygedeelte. Bij debieten boven de 1000 m³/s zijn alle schotten verwijderd van het Poiréegedeelte. Door de stuw komt over het algemeen geen scheepvaart meer: alle scheepvaart gaat door het Lateraalkanaal. (Veen, 1989) (Rijkswaterstaat, 1921) (Rijkswaterstaat, 1984)

Roermond

De stuw bij Roermond ligt, zoals de naam al zegt, ten westen van Roermond en enkele kilometers stroomafwaarts van de monding van de Roer in de Plassenmaas (zie paragraaf A2.3). Vijfhonderd meter stroomafwaarts van de stuw komen het Lateraalkanaal en de Maas weer bij elkaar. De stuw is, net zoals de stuw bij Linne, een combinatiestuw van het Poiréesysteem en het Stoneysysteem. Er zijn twee Stoney-openingen van 17 m breed waar dubbele Stoneyschuiven de afvoer kunnen reguleren. De Stoneyschuiven hebben, in tegenstelling tot de stuw bij Borgharen en Linne, een lensvormige vakwerkstructuur. Het Poiréegedeelte bestaat uit zeventien jukken die op een gemiddelde afstand van 4,02 m van elkaar staan. Tegen de jukken rusten maximaal drie schotten bovenop elkaar. Bij debieten tot 200 m³/s (bij Sint Pieter) zijn de

Poiréestuwen geheel dicht en wordt het debiet gereguleerd door de Stoneyschuiven. Bij debieten van 200 tot 1070 m³/s worden schotten weggehaald uit het Poiréegedeelte (zoveel als nodig is voor het gewenste debiet), de regulatie wordt nog steeds gedaan door het Stoneygedeelte. Bij debieten boven de 1070 m³/s zijn alle schotten verwijderd van het Poiréegedeelte. Scheepvaart zal alleen door de stuw varen als het de bestemming Roermond heeft, de rest van de scheepvaart gaat door het lateraalkanaal. (Veen, 1989) (Rijkswaterstaat, 1922)

Belfeld

Stuw Belfeld ligt in de Zandmaas (zie paragraaf A2.3), 6 kilometer bovenstrooms van de stad Venlo. De stuw bij Belfeld is erg vergelijkbaar met de stuw bij Roermond. Ook deze stuw bestaat uit twee Stoneysysteem openingen en een breed Poiréegedeelte. De Stoneyschuiven zijn beide 17 m breed en voor elke opening zijn twee schuiven die samen de maximale waterhoogte kunnen keren. De Stoneyschuiven zijn lensvormig. Het Poiréegedeelte bestaat uit twaalf jukken waar veertien rijen schotten tegenaan leunen. Het maximaal aantal op elkaar te stapelen schotten is ook bij deze stuw drie schotten. Bij debieten tot 200 m³/s (bij Sint Pieter) zijn de Poiréestuwen geheel dicht en wordt het debiet gereguleerd door de Stoneyschuiven. Bij debieten van 200 tot 870 m³/s worden schotten weggehaald uit het Poiréegedeelte (zoveel als nodig is voor het gewenste debiet); het Stoneygedeelte regelt in deze situatie de specifieke regulatie. Bij debieten boven de 870 m³/s zijn alle schotten verwijderd van het Poiréegedeelte. (Veen, 1989) (Tijd, 1923)

Sambeek

De stuw bij Sambeek is gesitueerd tussen de plaatsen Sambeek en Afferden in de provincie Noord-Brabant, vlak bij de Duitse grens. De stuw is gesitueerd in de Zandmaas (zie paragraaf A2.3), 17 kilometer bovenstrooms van de afsplitsing van het Maas-Waalkanaal. Ook stuw Sambeek is, net zoals de stuwen bij Linne, Roermond en Belfeld, een combinatiestuw van het Poiréesysteem en het Stoneysysteem. De Poiréestuw is iets verdiept aangelegd ten opzichte van de Maasbodem op vlak beton. Het Poiréegedeelte bestaat in totaal uit twaalf jukken met veertien tussenruimtes waar maximaal drie schuiven bovenop elkaar staan. Het Stoneygedeelte bestaat uit twee openingen van 17 m breed waar dubbele hefschuiven in hangen. De hefschuiven zijn gemaakt als stalen vakwerken en kunnen zowel onder- als bovenstroomse afvoer genereren. Bij debieten tot 200 m³/s (bij Sint Pieter) zijn de Poiréestuwen geheel dicht en wordt het debiet gereguleerd door de Stoneyschuiven. Bij debieten van 200 tot 1070 m³/s zullen schotten weggehaald worden uit het Poiréegedeelte (zoveel als nodig is voor het gewenste debiet); de regulatie wordt nog steeds gedaan door het Stoneygedeelte. Bij debieten boven de 1070 m³/s zijn alle schotten verwijderd van het Poiréegedeelte. (Rijkswaterstaat, 1962) (Veen, 1989)

Grave

De stuw bij Grave is gesitueerd tussen de vestingstad Grave en Nederasselt. Stuw Grave is vijf kilometer stroomafwaarts gesitueerd van de afsplitsing met het Maas-Waalkanaal. De stuw is een variant op het Poiréesysteem, hier klappen de jukken niet naar beneden maar naar boven onder een brug. Figuur 11 laat dit systeem zien. De stuw klappt onder de John S. Thompsonbrug, welke samen met het stuwsysteem in 1926 is gebouwd, op. Naast de stuw, aan de Nederasselt zijde, zijn twee schutsluizen gesitueerd. Eén hiervan is buiten gebruik, de ander is in gebruik door dagelijks scheepverkeer. De stuw bestaat uit twee doorstroomgedeeltes onder de brug, één van zestig m breed en één van vijftig m. Beide zijn te gebruiken door scheepvaart en scheepvaart kan in twee richtingen varen door de opening van 60 m. In de dagelijkse praktijk wordt de stuw gesloten gehouden. Gemiddeld gaan de jukken eens in de tien jaar omhoog zodat onder de brug door te varen is. Paragraaf A3.3 gaat nader in op de specificaties van de stuw. (Rijkswaterstaat, 1926) (Veen, 1989) (informatievoorziening, 2020)

Lith

De stuw bij Lith is gesitueerd tussen Lith en Alphen (ten noordwesten van Oss) en vormt de overgang van de Getijdenmaas naar de Benedenmaas (zie Tabel 1). Langs het gehele stuwband tussen Lith en Grave zijn dijkkringgebieden te vinden, dit deel van de Maas is daarom ook de Bedijkte Maas genoemd. De stuw heeft hefdeuren met klep net zoals de stuw bij Borgharen. Drie stuwopeningen van 38 m breed vormen het doorstromend oppervlak. Tussen de drie openingen zijn twee pijlers gesitueerd van 6 m breed. De hefschuiven

zijn bovenstrooms af te sluiten doormiddel van schotschuiven die in sponningen vallen. Alle drie de openingen zijn te gebruiken door scheepvaart met een doorvaarhoogte van 8,7 m als het streefpeil wordt gehanteerd. Langs de stuw loopt een vistrap en is een waterkrachtcentrale gevestigd, deze is in gebruik genomen in 1990. Bij debieten tot 1000 m³/s zijn enkel de kleppen in gebruik. Vanaf 1000 m³/s zijn de schuiven geheel geheven. Dit wordt geleidelijk gedaan omdat over de schuiven nog een bovenstroom kan stromen. Het heffen van de schuiven duurt ongeveer zeven uur. Bij peilen hoger dan 5,10 m +NAP komt een oude Maasarm onder water te staan. (Veen, 1989) (Rijkswaterstaat, 1935) (Rijkswaterstaat, 1935)

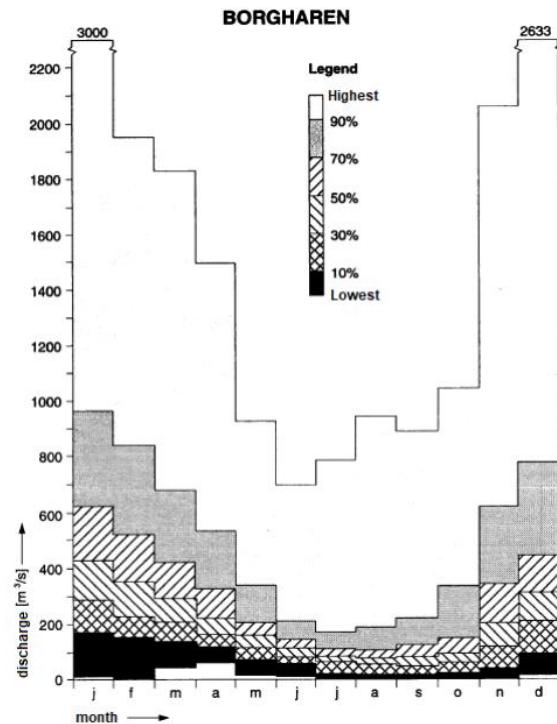
A2.6 Karakteristieken

De Maas vertoont over de loop van de jaren vergelijkbare karakteristieken. Over het algemeen zijn de debieten in de winter een grote factor groter dan de debieten in de zomer. Deze factor van verschil kan oplopen tot 300, de laagst gemeten afvoer is 10 m³/s en de hoogst gemeten afvoer is 3000 m³/s. Het grote verschil tussen de zomer en de winter is vooral eraan te danken dat de Maas een regenrivier is waarin het, bij veel neerslag, in het hele stroomgebied dagenlang tegelijk kan regenen. Debieten in de zomer kunnen erg laag zijn omdat de rivier primair gevoed is door regen en niet door smeltwater uit gebergte; dit is bijvoorbeeld wel het geval bij de rivier de Rijn. De debieten voor de Maas zijn meestal gegeven vanuit de meetlocatie Sint Pieter. Dit is het debiet wat Nederland instroomt. Over het algemeen is het debiet bovenstrooms een stuk grilliger dan het debiet benedenstrooms. Dit wil zeggen dat de waardes extremer zijn wat betreft het minimum en maximum van het debiet. Verder benedenstrooms van een rivier is de hoogwaterpiek over het algemeen meer afgevlakt en zijn de extreme afvoeren dus lager.

Tabel 4 geeft de debieten weer zoals die voorkomen bij Sint Pieter met daarbij een kansverdeling hoe vaak de debieten overschreden worden per seizoen. Figuur 13 visualiseert de debieten zoals die zijn voorgekomen bij Sint Pieter. Zoals te zien is zijn debieten voorgekomen tussen 3000 m³/s en 10 m³/s. (Berger & Mugie, 1994) (Frijns, 2019)

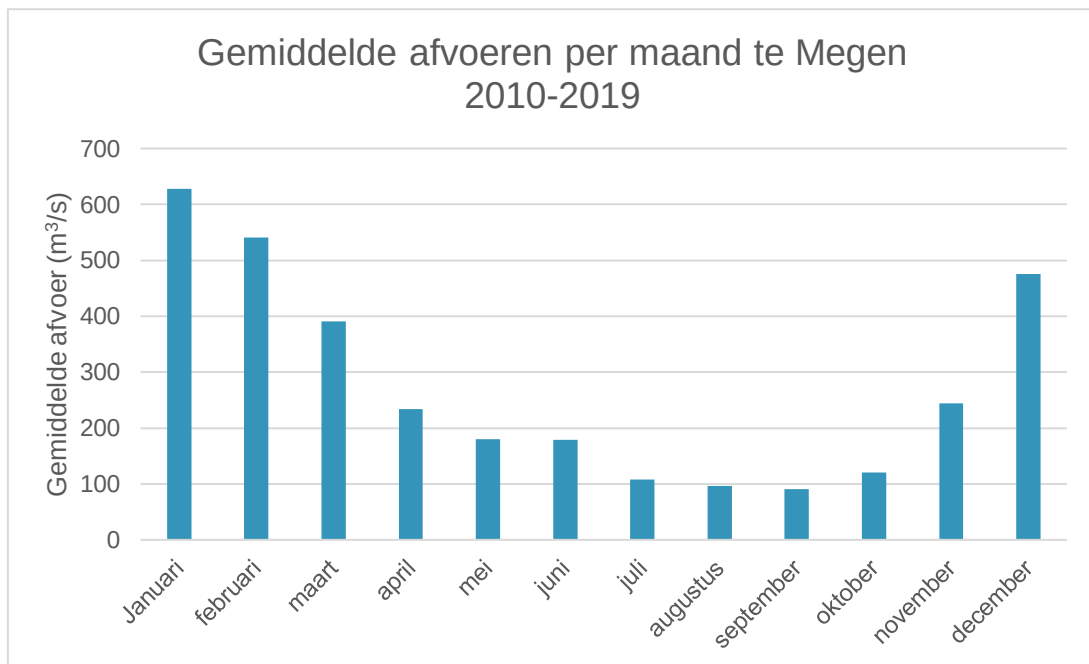
Tabel 4: Gemiddeld aantal dagen dat bepaalde debieten overschreden worden in Sint Pieter per jaar (Frijns, 2019).

Debiet (m ³ /s)	Winter	Voorjaar	Zomer	Najaar	Totaal	
50	87.1	88.6	54.9	54.5	285.0	78%
75	84.5	83.7	39.6	44.5	252.3	69%
100	81.5	76.6	25.5	37.0	220.6	60%
150	74.5	59.3	12.3	26.6	172.6	47%
200	64.9	44.6	6.6	20.0	136.1	37%
300	49.6	28.0	2.8	12.7	93.1	25%
400	38.2	18.0	1.4	7.9	65.4	18%
500	28.9	11.7	0.7	5.1	46.3	13%
600	21.2	7.2	0.3	3.2	31.9	9%
700	15.8	4.7	0.2	2.0	22.6	6%
800	11.5	3.0	0.1	1.3	16.0	4%
900	8.7	2.0	0	1.0	11.7	3%
1000	6.4	1.2	0	0.8	8.3	2%



Figuur 13: Frequentieverdeling per maand van de debieten om 8 uur 's morgens te Sint Pieter van de Maas (Berger & Mugie, 1994).

Figuur 14 geeft de gemiddelde debieten per maand van de Maas bij Megen (in het stuwpaand tussen Grave en Lith) weer voor de jaren 2010 tot 2019. De gegevens van deze meetlocatie geven een gemiddeld debiet van 270,1 m³/s over de gehele meetperiode. (Rijkswaterstaat, 2020)



Figuur 14: Gemiddelde debieten per maand over de jaren 2010-2019 bij Megen (Rijkswaterstaat, 2020).

Water dat in de Ardennen valt en in de Maas terechtkomt heeft gemiddeld vijf dagen nodig om de Noordzee te bereiken. In tijden van hoogwater kan het minimaal twee dagen kosten voor het water om de Noordzee te

bereiken. In dit geval zal water in ongeveer een dag in Nederland zijn, gerekend vanaf het grensgebied van Frankrijk en België (Verduijn, 2014).

De Maas kent, net zoals alle rivieren, een sedimenttransport. De Maas heeft echter een lager transport dan andere rivieren met vergelijkbare debieten en stroomsnelheden. Dit komt door de kanalisatie van de Maas. Door de kanalisatie van de Maas zijn veel stuwpanden gerealiseerd waardoor de stroomsnelheid drastisch omlaaggegaan is en het sedimenttransport praktisch stilgelegd is. Hoge debieten zorgen echter voor hogere stroomsnelheden, dit stimuleert het transport van sediment. In het jaar 1992 zijn cijfers gepubliceerd over het sedimenttransport van de Maas. Het gemiddelde zand- en grindtransport in de buurt van Linne was 26.000 m³ zand en grind per jaar. Dit fluctueerde van 5.000 m³ in droge jaren tot 90.000 m³ in jaren met hoge debieten. Verder stroomafwaarts bij Kessel was het gemiddelde zand- en grindtransport 19.000 m³ per jaar. Bij Grave was het gemiddelde zand- en grindtransport gemiddeld 70.000 m³ per jaar. Het gemiddelde slibtransport in de Maas tussen de jaren 1970 en 1990 was 559.000 ton per jaar met een minimum van 79.000 ton in het jaar 1976 en een maximum van 1.287.000 ton in het jaar 1984. (Verduijn, 2014)

A2.7 Scheepvaart

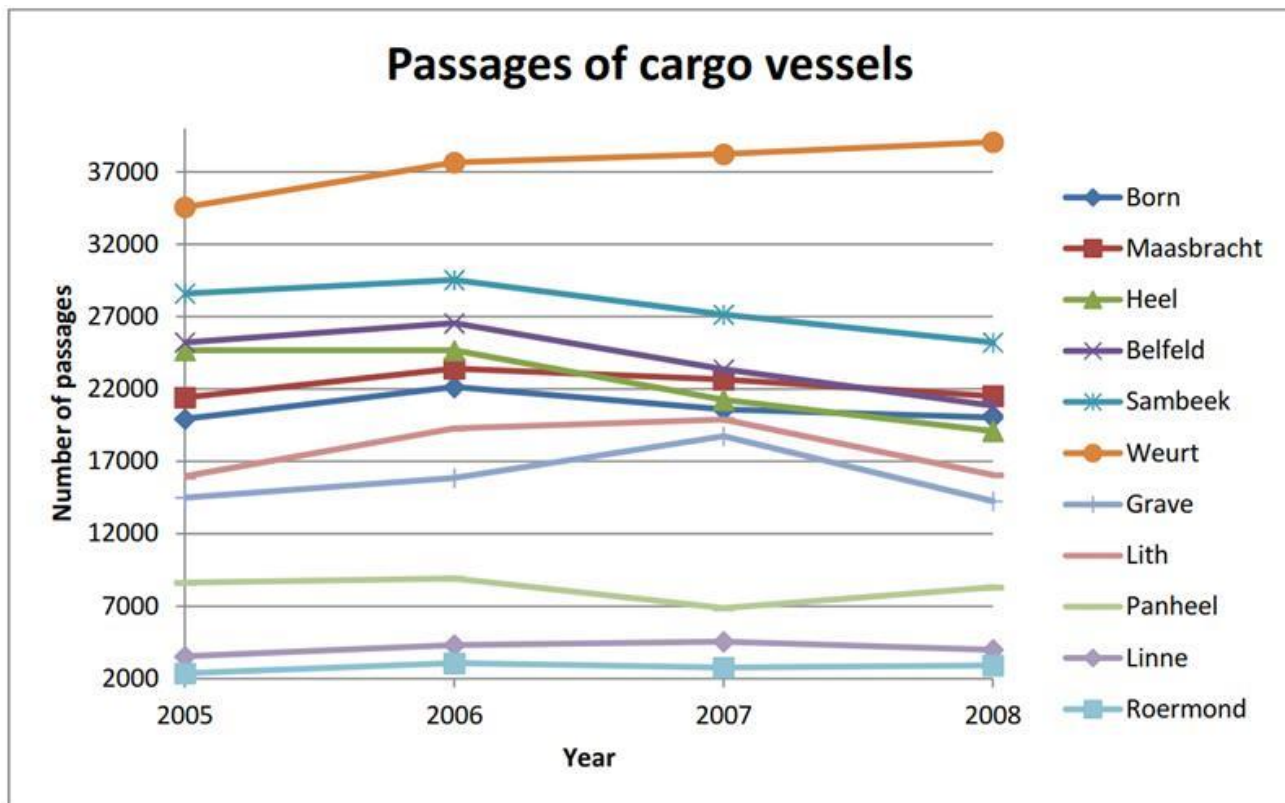
Figuur 8 geeft weer hoe de Maas bevaren wordt door transportscheepvaart. De route waarlangs de schepen varen is in Figuur 8 te zien. Logischerwijs zullen in deze kanalen en stuwpanden meer schepen per jaar varen. In de delen van de Maas waar geen beroepsvaart vaart is wel sprake van recreatievaart. In de scheepvaart wordt gesproken van CEMT-classes. Dit zijn classes die aangeven hoe groot en hoe zwaar de schepen mogen zijn die door een waterweg varen. Tabel 5 geeft de maatgevende maten en laadvermogens van de verschillende schepen aan. (Rijkswaterstaat (2), 2017)

Tabel 5: Kenmerken van maatgevende schepen volgens de CEMT-classes. (Rijkswaterstaat (2), 2017).

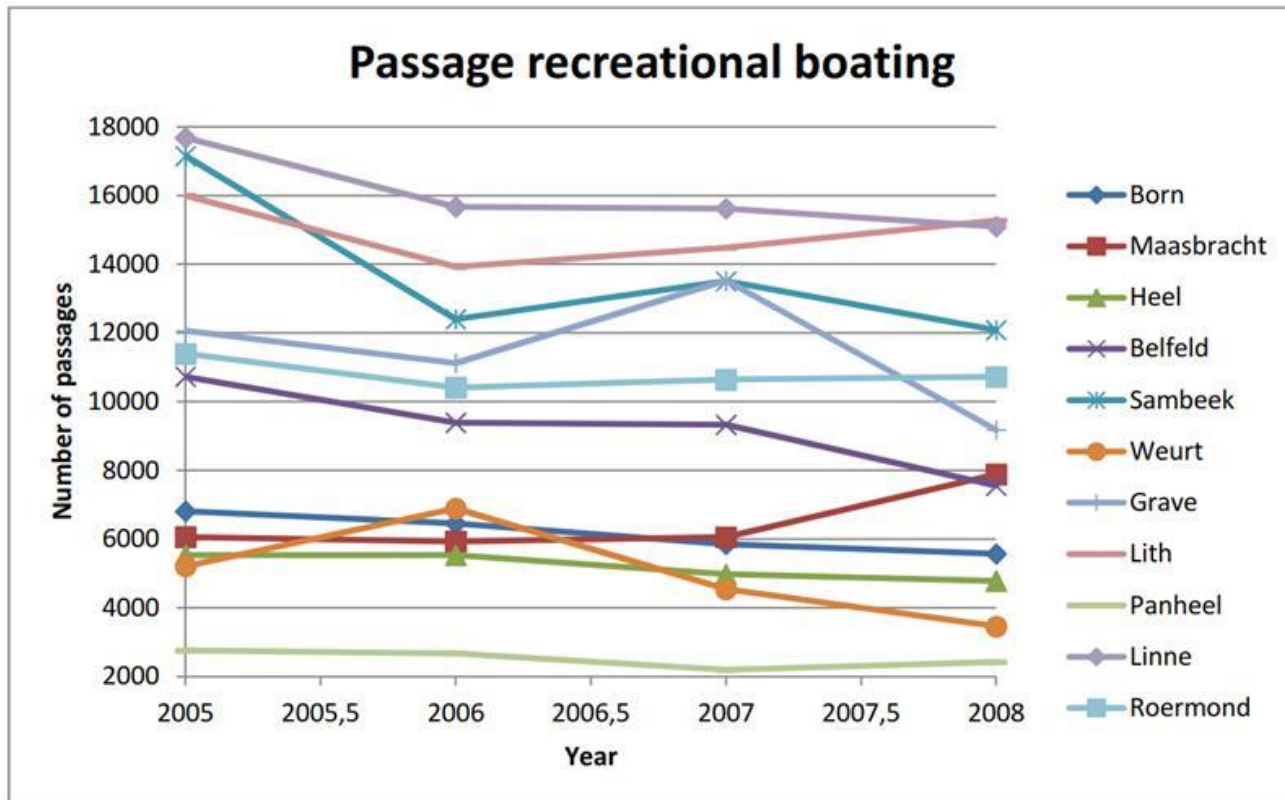
CEMT-klasse	Duwstiel				Koppelverband			
	Breedte (m)	Lengte (m)	Diepgang (m)	Laadvermogen (ton)	Breedte (m)	Lengte (m)	Diepgang (m)	Laadvermogen (ton)
I	5,2	55	1,9	≤400	5,05	38,5/80	2,5	≤900
II	6,6	60-70	2,6	401-600				
III	8,2	85	2,7	601-1250				
IVa	9,5	85-105	3,0	1251-1800				
IVb					9,5	170-185	3,0	901-3350
Va	11,4	95-135	3,5-4,0	1801-3950				
Vb	11,4	170-190	3,5-4,0	3951-7050	11,4	170-190	3,5-4,0	3351-7250
Via	22,8	95-145	3,5-4,0	3951-7050	22,8	95-110	3,5-4,0	3351-7250
Vib	22,8	185-195	3,5-4,0	7051-12000	22,8	185	3,5-4,0	≥7250
Vic	22,8	270	3,5-4,0	12001-18000				
VIIa	34,2	195	3,5-4,0	12001-18000				

Rijkswaterstaat heeft de Maas de CEMT-klasse Va gegeven voor het gehele stuk van Eijsden tot en met Geertruidenberg. Het Maas-Waalkanaal heeft CEMT-klasse Vib, het Julianakanaal en het Lateraalkanaal hebben beide de CEMT-klasse Va. (informatievoorziening, 2020)

Figuur 15 en Figuur 16 visualiseren de passages voor beroepsvaart en recreatievaart voor een aantal locaties in de Maas. Figuur 8 geeft weer waar de belangrijkste havens in de Maas zijn gesitueerd; dit zijn alle beroepshavens, de figuur geeft niet weer waar de recreatiehavens zijn gesitueerd.



Figuur 15: Beroepsvaart passages per locatie per jaar, van 2005 tot en met 2008 (Verduijn, 2014).



Figuur 16: Recreatievaart passages per locatie per jaar, voor de jaren 2005 tot 2008 (Verduijn, 2014).

A3 Stuw Grave

A3.1 Inleiding

De stuw bij Grave fungeert als case voor het onderzoek. Daarom wordt deze stuwlocatie in dit hoofdstuk wat specifieker behandeld. De stuw bij Grave is in 1928 gebouwd en nadert het einde van de levensduur. Hierom dient deze stuw vervangen te worden. Hiervoor wordt gekeken naar de locatie van de stuw: wat is de geschiedenis van dit gebied, hoe is dit gebied door de jaren heen ontwikkeld en welke belangrijke elementen liggen in dit gebied? Daarnaast dient de huidige stuw bij Grave gebouwd te worden: welke functies vervult het, welke dimensies heeft deze stuw en wat is de werking van deze stuw?

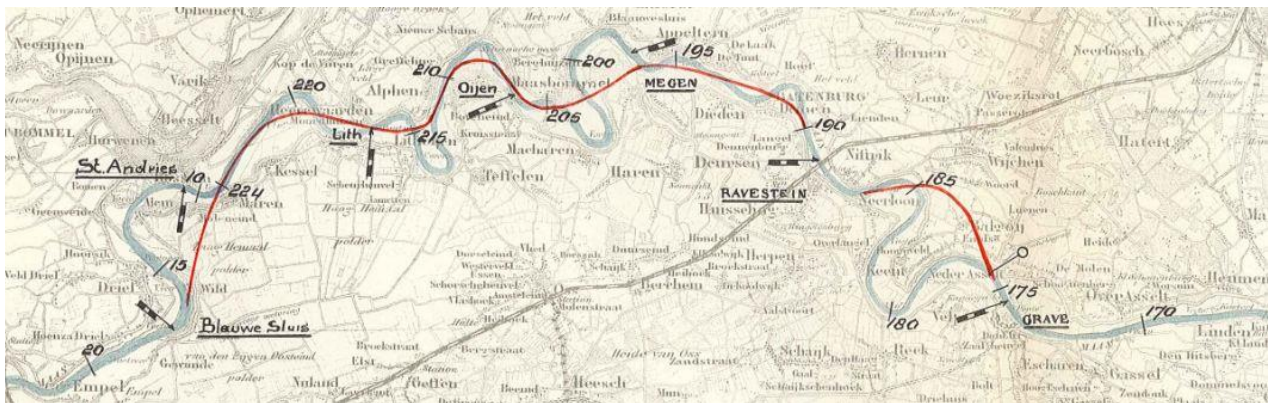
A3.2 Locatie

Geschiedenis locatie

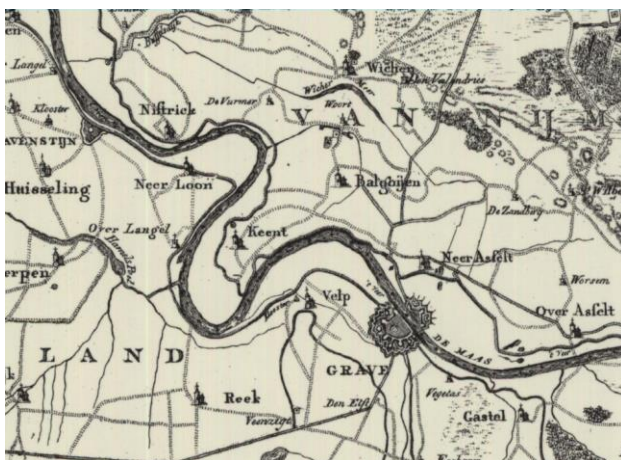
De brug en stuw bij Grave liggen tussen de stad Grave in Noord-Brabant en het dorp Nederasselt in Gelderland. Het dorpje ten noorden van de brug en stuw, Nederasselt, valt binnen gemeente Heumen. Het dorpje ligt op een oude terp. Grave, ten zuiden van de brug en stuw, is een oude vestingstad. Rond het jaar 1140 hebben Godefrius en Herman van Cuijk, nabij het huidige Grave, een nieuw kasteel gebouwd omdat hun Cuijkse Burcht vernield was. In de jaren hierna is een stadje rondom het kasteel ontstaan. Rond het jaar 1250 heeft de hertog van Brabant stadsrechten ontleent aan de stad Grave. De geschiedenis van de regio kenmerkt zich door vele belegeringen. Te beginnen in de 14^e en 15^e eeuw, toen vele gevechten tussen Gelre en Brabant plaatsvonden. Ten tijde van de Tachtigjarige Oorlog is de stad Grave tweemaal belegerd en in 1672 en 1794 is de stad ingenomen door de Fransen. De laatste grootschalige belegering was in 1814, dit was om de Fransen weer uit de stad te verdrijven (Wols, Grave in vogelvucht, 2009).

De Maasbrug bij Grave is in de tweede wereldoorlog een belangrijke schakel geweest. Op 10 mei 1940 is deze brug opgeblazen. Tijdens de bezetting in de tweede wereldoorlog is de brug weer hersteld. Op 17 september in het jaar 1944 werden, in het kader van 'Operation Market Garden', duizenden parachutisten van de 82^e (US) Airborne Division 'losgelaten' boven de omgeving van de Maasbrug bij Grave. Dezelfde dag nog is de brug in handen gevallen van de geallieerden waardoor een belangrijke route voor tanks en voertuigen, die nodig waren voor de verdere bevrijding, vrijkwam. Luitenant John S. Thompson heeft samen met 15 andere parachutisten, die vlak bij de Maasbrug geland zijn, de volledige zuidelijk oprit van de brug weten te veroveren, zonder deze te beschadigen. In september 2004, tijdens een herdenking van de tweede wereldoorlog, is de brug door de weduwe van deze luitenant hernoemd tot de 'John S. Thompsonbrug'. (Canon van Nederland, sd)

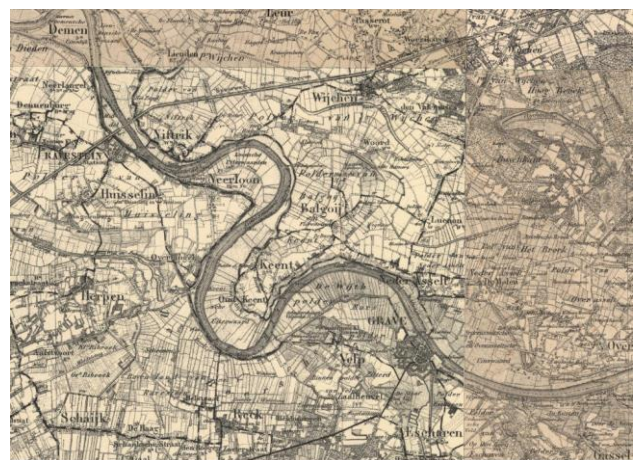
Figuur 18 tot Figuur 21 laten een viertal kaarten zien van de situatie bij de Maas in het gebied nabij Grave tussen 1815 en 2020 (Kadaster). Hierin is de dubbele bochtafsnijding tussen Grave en Ravenstein de meest in het oog springende ingreep. Deze bochtafsnijding is onderdeel van de plannen van meerdere bochtafsnijdingen tussen Grave en Kerkdriel die gemaakt zijn naar aanleiding van de vele overstromingen tussen 1900 en 1927. Ook de aanleg van de stuw bij Lith (in 1936) is onderdeel van deze plannen, gemaakt door Ir. C.W. Lely. (Vorstenbosch, 2011). Figuur 17 laat een overzicht van de geplande bochtafsnijdingen zien. Niet alle afsnijdingen die te zien zijn op dit overzicht zijn uitgevoerd zoals ze getekend staan. Uiteindelijk hebben in het traject tussen Grave en Kerkdriel bochtafsnijdingen plaatsgevonden bij Alem (1933), Alphen (1934), Oijen (1936), Appeltern (1936), Demen (1937), Neerloon (1937) en Balgoij (1937) (N. Asselman, 2018). Verder laten deze kaarten duidelijk de ontwikkeling van het gebied zien. Ook de aanleg van meerdere grote en belangrijke wegen is bepalend geweest voor de regio. Voor de situatie bij Grave is vooral de aanleg van de N324, met de bouw van de bijbehorende Maasbrug, erg van belang geweest.



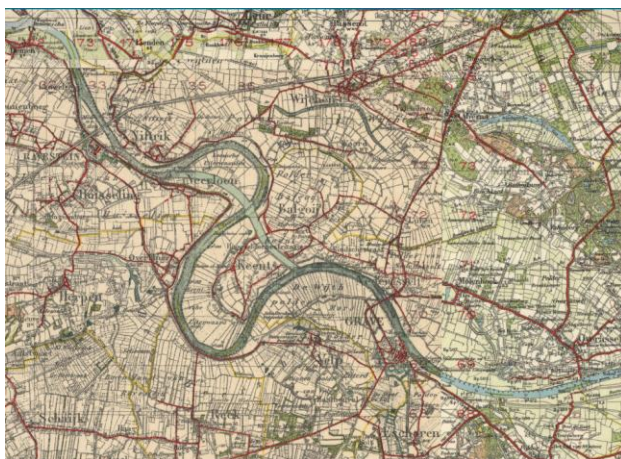
Figuur 17: Overzicht plannen bochtafsnijdingen Maas (Vorstenbosch, 2011).



Figuur 18: Situatie Maas bij Grave 1815 (Kadaster).



Figuur 19: Situatie Maas bij Grave 1907 (Kadaster).



Figuur 20: Situatie Maas bij Grave 1939 (Kadaster).



Figuur 21: Huidige situatie Maas bij Grave (Kadaster).

Geschiedenis stuw

De bouw van de stuw bij Grave had gevolgen voor de omgeving. Zo stroomde, ongeveer 400 m benedenstrooms van de huidige stuw bij Grave, een klein riviertje, de Raam, af in de Maas. Het water van de Raam is onder andere afkomstig uit het hoogveengebied de Peel. Door de bouw van de stuw verhoogde de waterstand van de Maas dermate dat vrije afvoer van de Raam in de Maas niet meer mogelijk was. Om het water van de Raam toch in de Maas te kunnen laten lozen is in 1928 het gemaal van Sasse gebouwd. Dit

gemaal was het eerste elektrische gemaal van het verantwoordelijke waterschap, destijds waterschap De Maaskant. Over de jaren heen is het gemaal meerdere malen gemoderniseerd, gerestaureerd en een vistrap is aangelegd. Momenteel is het gemaal van Sasse een rijksmonument (Wols, Het gemaal Van Sasse, 2009). Figuur 22 (Beeldbank Cultureel Erfgoed) laat het gemaal zien zoals het nu eruit ziet. Figuur 23 (Stichting Willem Smit Historie Nijmegen, 2008) laat het gemaal in aanbouw zien. De Maasbrug, de brug waar de stuw bij Grave aan zit, is hierbij op de achtergrond te zien.



Figuur 22: Gemaal van Sasse hedendaags (Beeldbank Cultureel Erfgoed).



Figuur 23: Gemaal van Sasse in aanbouw (1929) (Stichting Willem Smit Historie Nijmegen, 2008).

De stuw bevindt zich onder de John S. Thompsonbrug. Over deze brug loopt de N324, de N324 is een belangrijke verbinding tussen 's-Hertogenbosch in het zuidwesten van Grave en Nijmegen in het noordoosten van Grave. De John S. Thompsonbrug, gebouwd tussen 1926 en 1929, is een stalen brug die rust op zeven pijlers en twee landhoofden. Dit maakt een totaal van negen overspanningen, waarvan twee over het zomerbed van de Maas gaan. De totale lengte tussen de dagzijden van de landhoofden is 515 m (Rijksmonumenten, 2014). De brug overspant ook een tweetal schutsluizen, de oude schutsluis van 110 x 14 m gebouwd tegelijkertijd met de stuw in 1926 en de nieuwe schutsluis van 142 bij 16 m gebouwd in 1977 (Snel, 1987). Ten zuiden van de stuw is in 2006 een nieuwe vistrap gebouwd.

A3.3 Werking stuw

De stuw bij Grave bevat twee doorstroomopeningen in het zomerbed, waarvan een van 49,70 m en een van 60,74 m. Tussen deze openingen bevindt zich een tussenpijler van 7,08 m breed. Bij hoge debieten vindt ook afvoer over het winterbed plaats. Het maaiveld van de noordelijke oever in het winterbed bevindt zich op 8,5 m +NAP en van de zuidelijke oever op 9,5 m +NAP. In de doorstroomopeningen van de stuw hangen jukken met wielschotten. In de zuidelijke doorstroomopening (49,70 m) zitten negen schotten, in de noordelijke opening (60,74 m) zitten elf schotten. Aan elk juk bevinden zich drie schotten die los van elkaar kunnen bewegen. De stuw reguleert het waterpeil door een schot (of meerdere schotten) te heffen of juist neer te laten. (Jongeling, 2012)



Figuur 24: Fijnregeling van de waterstand door het heffen van schotten (Beeldbank Rijkswaterstaat).

De fijnregeling van de stuw gebeurt door het heffen en neerlaten van de schotten die aan de jukken bevestigd zitten. Dit laat Figuur 24 (Beeldbank Rijkswaterstaat) zien. Op het moment van het nemen van deze foto, op 19 januari 1985, werd het stuwpannd verlaagd in verband met ijsgang.

De hoogte van deze schotten is gelijk voor alle jukken. Het bovenste schot is 2,14 m hoog, de andere twee schotten zijn 1,63 m hoog. De totale hoogte van de schotten is dus 5,4 m. De breedte van elk schot is 5,5 m. Omdat de drempel van de schotten op 2,70 m +NAP ligt, bevindt de bovenkant van de schotten, als alle drie de schotten neergelaten zijn, zich op 8,10 m +NAP. De schotten zijn aan de boven- en onderzijde vrijwel vlak, waardoor ze op elkaar kunnen stapelen. Een dunne rubberen strip dient als horizontale afdichting tussen deze schotten. De schotten zijn 0,22 m dik. Rubberen profielen waarborgen de afdichting van de verticale spleet tussen de verschillende schotten, Figuur 25 (Jongeling, 2012) laat dit zien. De profielen sluiten niet altijd op elkaar aan, waardoor wel sprake is van een lekverlies door de stuw heen. Voor het heffen van de schotten bevat ieder juk een hefinstallatie met een elektromotor. De beheerder kan deze installatie op afstand aansturen. De schotten kunnen over de flens van de jukken rollen. Het bovenste schot hangt direct aan de hefinstallatie. Het middelste schot zit aan het bovenste schot vast door middel van koppelstangen. Het middelste schot kan pas worden geheven als het bovenste schot zich ver boven de waterstand bevindt. Het heffen van het onderste schot gaat door de haken van de hefinstallatie, die normaliter aan het bovenste schot vast zitten, te bevestigen aan het onderste schot. Hiervoor zitten staven met hijsogen, die tot boven de waterspiegel reiken, vast aan het onderste schot. Als door de hefinstallatie het onderste schot heft zullen het middelste en bovenste schot automatisch meebewegen. Voor de handeling van het losmaken van de haken van de hefinstallatie van het bovenste schot en het bevestigen aan het onderste schot is wel handwerk benodigd. (Jongeling, 2012)

Doordat de schotten afzonderlijk van elkaar kunnen heffen zijn meerdere vormen van stroming door de stuw mogelijk. Hierdoor kan de stuw de stroming door de stuw, en daarmee de waterstand bovenstrooms van de stuw, goed reguleren. In tijden van hoge afvoer zal de stuw meestal alle schotten heffen, waardoor een onderstroming onder deze schotten door ontstaat, Figuur 27 laat dit zien. Bij een lagere stroming zal de stuw de schotten in een getande opstelling heffen. Deze opstelling houdt in dat de jukken om-en-om het bovenste schot heffen, hierdoor ontstaat overstrom over een gedeelte van de schotten. De hoeveelheid schotten dat de stuw heft hangt af van de afvoer. Figuur 26 laat dit systeem zien. Als vuistregel in de debietregulatie geldt dat het heffen van één bovenschot een debiettoename van 20 m³/s waarborgt en het heffen van één middenschot een debiettoename van 25 m³/s (Jongeling, 2012). Nog gedetailleerdere regulering is mogelijk door de schotten deels boven de waterlijn te heffen.



Figuur 25: Verticale afdichting tussen schotten (Jongeling, 2012).



Figuur 26: Fijnregeling bij lage waterafvoer (afvoer ca. 150 - 200 m³/s) (Jongeling, 2012).



Figuur 27: Hoge afvoer met onderstroming (afvoer ca. 1300 m³/s) (Jongeling, 2012).

De stuw bij Grave kan opklappen tegen de brug, hierdoor wordt het mogelijk voor scheepvaart om door de stuw, in opgeklapte stand, te varen. In tijden van extreem hoge afvoer kan het namelijk voorkomen dat de schutsluizen bij Grave overlopen en daardoor onbruikbaar zijn voor scheepvaart. Het opklappen van de jukken van de stuw voorkomt dat de schepen moeten omvaren. Omvaren is wel mogelijk via het Maas-Waalkanaal, de Waal en het kanaal van Sint Andries. Daarnaast bespaart het varen door de stuw tijd voor de scheepvaart, het schutten van de sluis bij Grave duurt namelijk gemiddeld een uur.

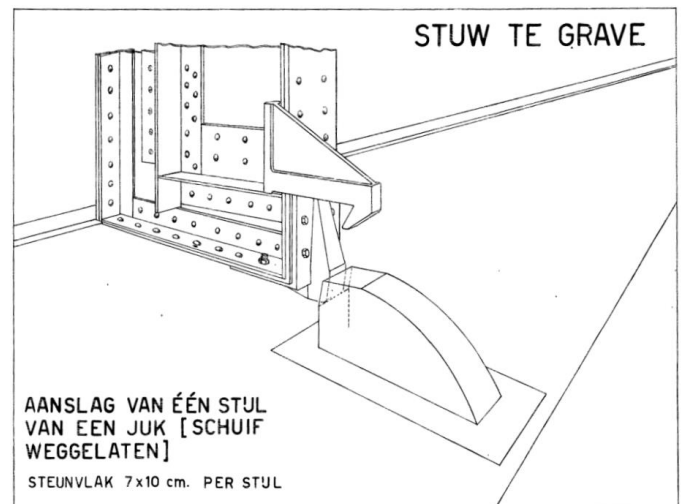
De jukken zitten aan de bovenzijde van het juk scharnierend aan de brug vast. Aan de onderzijde steunen de jukken tegen een nok van een uitsparing in de drempel, Figuur 29 (Rijkswaterstaat, 2008) laat dit zien. Het strijken van de stuwen gaat als volgt: Ten eerste dienen de schuiven die aan de jukken zitten te zijn geheven. In de geheven stand raken deze schuiven het water niet meer. Vervolgens klappen de jukken om de beurt tegen

de brug. Hiervoor moeten de jukken eerst een gedeelte omhooggetild worden, zodat de jukken aan de onderzijde niet meer tegen de nok van de uitsparing steunen. Het klappen van de jukken is mogelijk doordat de bovenzijde van de jukken aan de bovenstroomse kant van de brug aan een scharnier vast zit en de onderzijde van de jukken vastzit aan kettingen aan de benedenstroomse kant van de brug. Deze kettingen rollen over katrollen waardoor ze de jukken omhoog takelen en klappen. Het strijken van de stuw vergt erg veel handwerk. Het strijken van alle jukken van de stuw bij Grave duurt in totaal een dag. Het neerlaten van de jukken gebeurt door de kettingen over de katrollen uit te rollen waardoor de jukken weer naar beneden klappen. Figuur 28 (Beeldbank Rijkswaterstaat) laat zien hoe het strijken van de jukken in zijn werk gaat. Links op deze foto uit 1942 zijn de jukken al tegen de brug geklapt. Voor het strijken en het laten zakken van de jukken wordt gebruik gemaakt van een kraan, die over dubbele rails over de bovenstroomse zijde van de brug loopt.

In de huidige situatie klappen de jukken alleen omhoog wanneer dit strikt noodzakelijk is voor de waterafvoer of scheepvaart. Dit is het geval bij een debiet tussen 1400 en 1600 m³/s. Bij een debiet boven 1000 m³/s zullen alle schuiven geheven zijn, maar is het nog niet noodzakelijk om de jukken te strijken. Bij een waterstand van 8,6 m +NAP komen de onderste geheven schotten in het water te hangen. Deze schotten hangen in geheven stand op een hoogte van 8,6 m +NAP. In dat geval is het noodzakelijk dat de jukken tegen de brug opklappen. (Jongeling, 2012)



Figuur 28: Strijken jukken van de stuw bij Grave (Beeldbank Rijkswaterstaat).



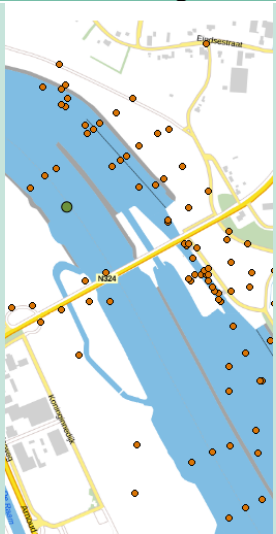
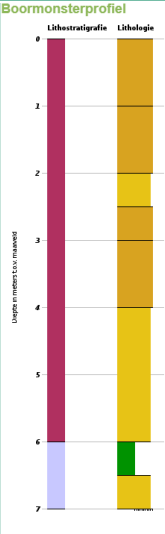
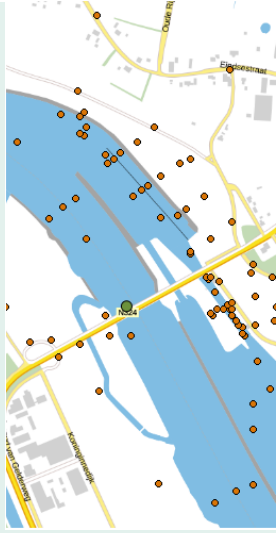
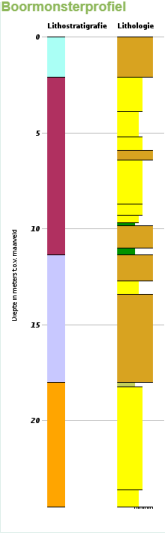
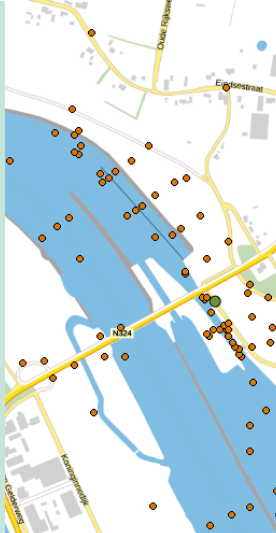
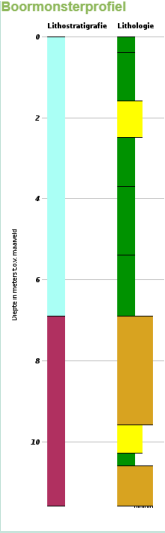
Figuur 29: Detailtekening aanslag jukken tegen drempel (Rijkswaterstaat, 2008).

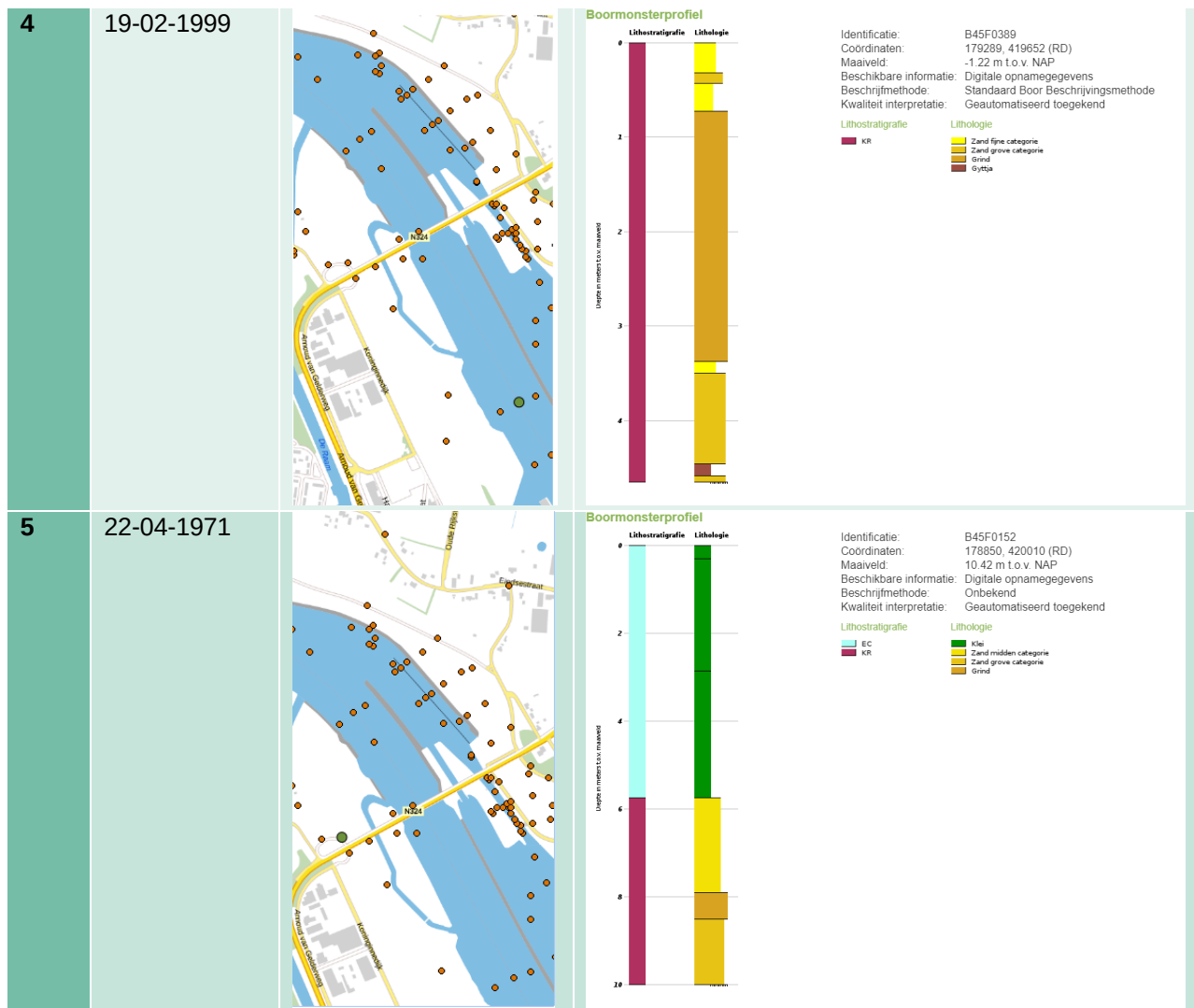
Het lekverlies dat ontstaat doordat de schotten niet volledig op elkaar aansluiten bedraagt bij lage tot gemiddelde debieten, als de stuw in gesloten toestand is, ca. 50 m³/s (Iv-Infra b.v., 2010). De vispassage heeft een regelbare klep en houdt daarmee het debiet op ca. 4 m³/s.

A3.4 Ondergrond

Hieronder staan enkele booronderzoeken, deze geven een beeld hoe de ondergrond op de locatie bij Grave eruitziet. Tabel 6 geeft een overzicht van deze boringen. Hierin is de bodeminformatie van een drietal locaties in de vaarweg van de Maas en een tweetal locaties naast de huidige stuw te zien. (DINOloket, sd)

Tabel 6: Overzicht boringen bij stuw bij Grave (DINOloket, sd).

Nmr.	Datum boring	Locatie boring	Resultaat boring
1	29-01-1999		Boormonsterprofiel  Identificatie: B45F0318 Coördinaten: 178934, 420251 (RD) Maaiveld: -0.70 m t.o.v. NAP Beschikbare informatie: Digitale opnamegegevens Beschrijfmethode: Standaard Boor Beschrijvingsmethode Kwaliteit interpretatie: Geautomatiseerd toegekend Lithostratigrafie - KR - BE Lithologie - Klei - Zand grove categorie - Grind
2	01-01-1921		Boormonsterprofiel  Identificatie: B45F0022 Coördinaten: 179030, 420090 (RD) Maaiveld: 3.32 m t.o.v. NAP Beschikbare informatie: Digitale opnamegegevens Beschrijfmethode: Onbekend Kwaliteit interpretatie: Geautomatiseerd toegekend Lithostratigrafie - EC - KR - BE - WA Lithologie - Leem - Klei - Zand fine categorie - Grind
3	20-07-1995		Boormonsterprofiel  Identificatie: B45F0267 Coördinaten: 179250, 420150 (RD) Maaiveld: 8.59 m t.o.v. NAP Beschikbare informatie: Digitale opnamegegevens Beschrijfmethode: Onbekend Kwaliteit interpretatie: Geautomatiseerd toegekend Lithostratigrafie - EC - KR Lithologie - Klei - Zand fine categorie - Grind



De tabel leidt tot de conclusie dat naast de vaarweg, zoals boring 3 en 5 laten zien, de eerste paar meter onder het maaiveld bestaat uit klei. Locatie 3 bevindt zich net naast de kolk van de nieuwe schutsluis (Maaiveldhoogte is 8,59 m + NAP), locatie 5 is nabij de winterdijk van de Maas (maaiveldhoogte is 10,42 m + NAP). Onder deze kleilaag bevindt zich een zandlaag, met zowel grind als grof en fijn zand. Onder de vaarweg zelf bevindt zich voornamelijk zand en grind, zoals boring 1, 2 en 4 laten zien.

A4 Toekomst

A4.1 Inleiding

Gekeken naar de toekomst van het projectgebied zijn enkele dingen te zeggen en voorspellen omtrent neerslag, temperaturen en debieten van de Maas. Verschillende instanties hebben hier prognoses over gemaakt. Dit rapport houdt rekening met de prognoses die zijn gedaan voor de debieten van de Maas en de groei of krimp van de commerciële sector in het projectgebied.

A4.2 Klimaatverandering

Dit onderzoek houdt in de prognoses over het milieu rekening met temperatuurs- en klimaatveranderingen. Het KNMI heeft voor deze veranderingen vier scenario's opgesteld in de jaren 2006 en 2014. De verhoging van temperatuur is hier het gemiddelde van de wereldwijde temperatuursverhoging. De vier scenario's zijn hieronder opgenoemd en zijn aangeduid met letters:

- **G:** +1°C in 2050 & +2°C in 2100; weinig verandering in atmosferische circulatie;
- **G+:** +1°C in 2050 & +2°C in 2100; veel verandering in atmosferische circulatie;
- **W:** +2°C in 2050 & +4°C in 2100; weinig verandering in atmosferische circulatie;
- **W+:** +2°C in 2050 & +4°C in 2100; veel verandering in atmosferische circulatie.

Als aanvulling geeft Deltares het volgende scenario:

- **W_{dry}:** Waardes overeenkomstig met W+, dit scenario gaat uit van weinig neerslag.

De temperatuur en klimaatveranderingen zoals hierboven beschreven zorgen voor een veranderend neerslagpatroon. De trend die in alle prognoses te zien is, is dat de zomers droger worden en de winters natter. Daarnaast neemt door de temperatuurstijging de intensiteit van buien toe en de frequentie van neerslag in de zomer af. Deltares heeft de verschillende scenario's van het KNMI met modellen doorgerekend naar veranderingen in debiet bij Sint Pieter. Hierbij hanteert Deltares de volgende afkortingen:

- **MQ:** gemiddelde jaarlijkse debiet;
- **NM7Q:** gemiddelde jaarlijks laagste afvoer voor 7 dagen;
- **MHQ:** gemiddelde jaarlijkse maximale afvoeren.

Tabel 7 geeft per scenario de debieten voor de bovenstaande drie situaties. Deze waardes zijn alle drie gemiddelde waardes per jaar en hebben dus een overschrijdingsfrequentie van 1/1 jaar. (Beersma, Bouzaziz, Hegnauer, & Weiland, 2015)

Tabel 7: Prognoses voor veranderingen in debiet bij Sint Pieter van de Maas volgens Deltares (Beersma, Bouzaziz, Hegnauer, & Weiland, 2015).

	Referentie jaar (2015)	2050					2085				
		G	G+	W	W+	W _{Dry}	G	G+	W	W+	W _{Dry}
MQ	290	330	310	320	320	270	320	315	325	330	270
NM7Q	45	45	40	40	35	25	45	40	35	30	20
MHQ	1635	1835	1800	1775	1890	1650	1790	1810	1900	1990	1770

A4.3 Klimaatadaptatie/ probabilistisch ontwerpen

Dijkkringgebieden

De aangrenzende gebieden van de Maas vallen gedeeltelijk binnen dijkkringgebieden. Het gaat hier om de Benedenmaas en de Getijdenmaas (zie Tabel 1 en Figuur 4). Stroomopwaarts van Boxmeer loopt de Maas over hoge gronden en is ze niet meer overal bedijkt. Hier zijn echter wel kleine dijkringen aanwezig bij lokaal relatief lagergelegen gronden. De overheid heeft voor alle dijkkringgebieden een faalkansnorm opgesteld. Ook voor de bedijkte Maas zijn faalkansnormen opgesteld, deze zijn hieronder opgesteld:

- Dijkkring 36: Deze dijkkring omvat de gebieden ten zuiden van de Maas vanaf Boxmeer tot Waalwijk. Binnen deze dijkkring vallen onder andere de plaatsen Den Bosch, Vucht, Oss en Cuijk. De dijkkring heeft een faalkansnorm van 1/1250 jaar.
- Dijkkring 36a: Dit is een afgedamde lus van de Maas stroomafwaarts van Grave. Hiervoor geldt een faalkansnorm van 1/1250 jaar.
- Dijkkring 41: Deze dijkkring omvat de gebieden ten noorden van de Maas vanaf Heumen (ten zuiden van Nijmegen) tot Dreumel. Binnen dit gebied vallen de steden Nijmegen, Druten en Beuningen. De dijkkring is aan de noordelijke zijde ingesloten door de Waal. Deze dijkkring heeft een faalkansnorm van 1/1250 jaar.
- Dijkkring 40: Deze dijkkring omvat een klein gebied waar Maas en Waal parallel en dicht langs elkaar lopen bij Heerwaarden. Sint Andries valt ook binnen dit dijkkringgebied. De dijkkring heeft een faalkansnorm van 1/1250 jaar.
- Dijkkring 38: Deze dijkkring wordt ingesloten door de Maas aan de zuidkant, door de Waal aan de noordkant en door de afgedamde Maas aan de westkant. De dijkkring heeft een faalkansnorm van 1/1250 jaar.

De dijkringen 24 en 35 liggen buiten het invloed gebied voor stuwen in de Maas. De dijkringen 54 tot en met 95 liggen stroomopwaarts van de Bedijkte Maas (stroomopwaarts van Boxmeer) en liggen dus in de hogere gronden. Deze dijkringen hebben allen een faalkansnorm van 1/250 jaar. (Rijkswaterstaat, 2007)

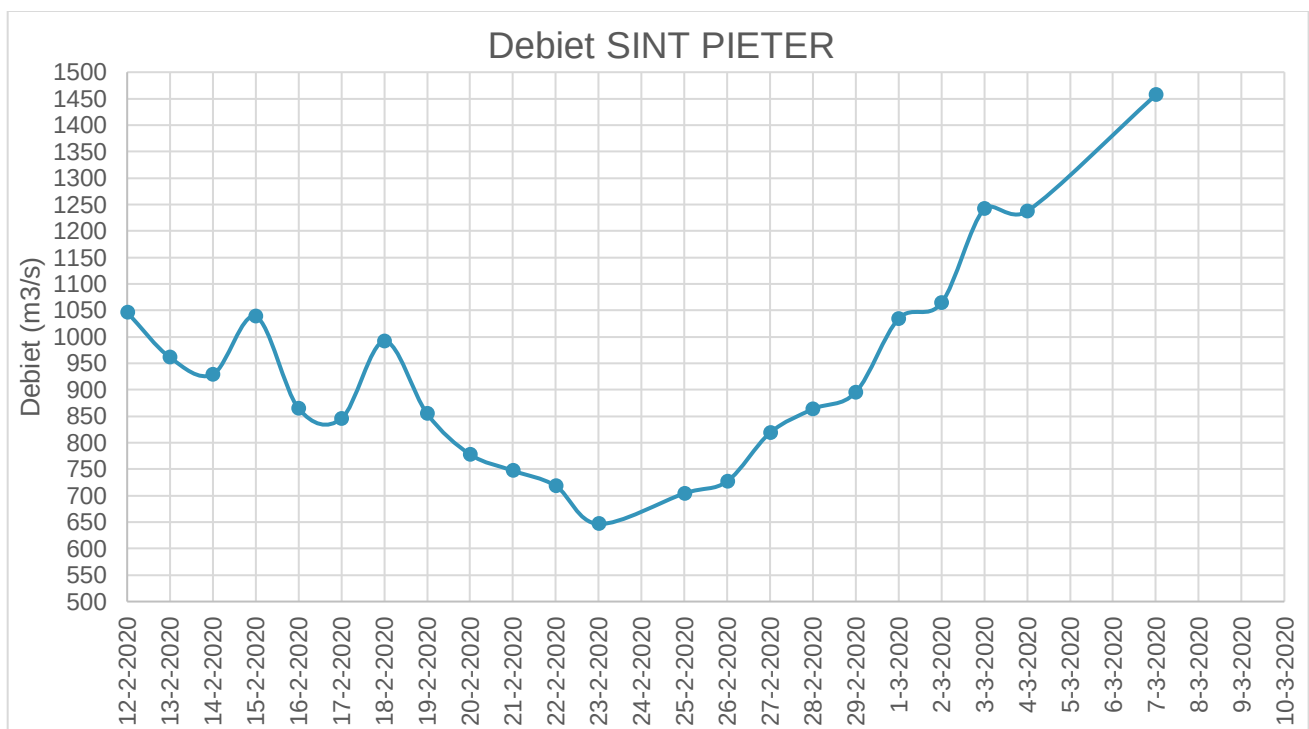
Maatgevend debieten

De bovenstaande informatie leidt tot de conclusie dat de faalkansnorm 1/1250 jaar maatgevend is voor de hoogwaterstand en de maximale afvoer. De prognoses voor het jaar 2050 geven hiervoor voor Sint Pieter een afvoer van maximaal 4450 m³/s. De afvoer met de faalkans 1/1250 jaar, berekend vanuit het jaar 2085, is maximaal 4760 m³/s bij Sint Pieter. (Beersma, Bouzaziz, Hegnauer, & Weiland, 2015)

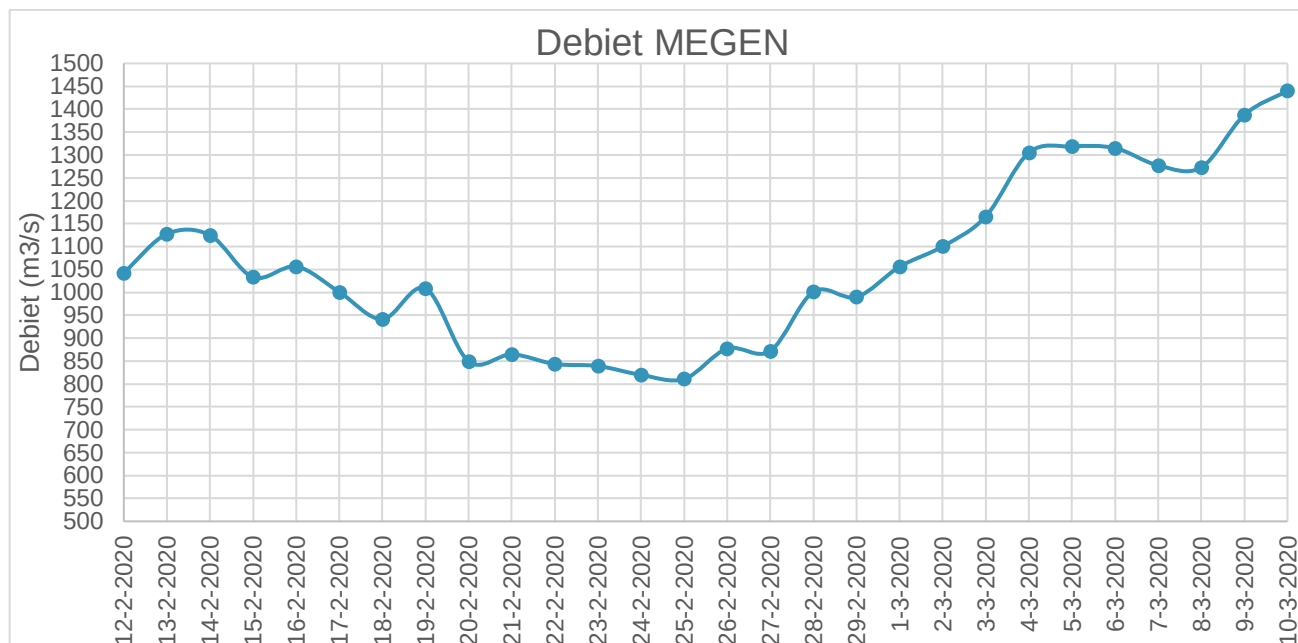
De maatgevende debieten van de Maas zijn altijd gegeven vanuit het meetpunt bij Sint Pieter. Het debiet bij Sint Pieter is niet per definitie hetzelfde als op de andere locaties in de Maas. De oorzaken van verschillen tussen de verschillende zijn hieronder opgenoemd:

- Beken en kleine rivieren zoals de Geul, de Roer, de Niers, de Dommel en de Aa monden uit in de Maas benedenstrooms van Sint Pieter en zorgen voor een hoger debiet (15-17% extra debiet).
- Water verdampt en bezinkt vanuit de Maas, de plassen, uiterwaarden en aangrenzende kanalen.
- Gemalen voegen water toe of nemen water op, bij een hoog debiet wordt meer water toegevoegd dan afgevoerd.
- Drinkwaterbedrijven, agrariërs en de industriële sector nemen relatief kleine hoeveelheden water op uit de Maas.
- Schutsluizen nemen kleine hoeveelheden water op, ongeveer 50 m³/s.
- Uiterwaarden en retentiegebieden nemen water op en voeren water door, dit vermindert de snelheid van de hoogwatergolf in de loop van de Maas.

De bovenstaande vermeerderingen en verminderingen van het debiet in de Maas wegen ongeveer tegen elkaar op. Hieruit volgt dat de maatgevende afvoer bij hoge afvoeren (pieken) op de andere locaties in de Maas hetzelfde zijn als bij Sint Pieter; dit is echter een aanname. Deze aanname is te valideren door de debieten bij Sint Pieter te vergelijken met de debieten bij Megen (nabij Grave). Figuur 30 en Figuur 31 visualiseren twee afvoerkrommes van de debieten bij Sint Pieter en bij Megen. De figuren laten zien dat de pieken overeenkomen met elkaar, met een verwaarloosbare afwijking. Ook visualiseren de figuren dat, bij deze debieten, het ongeveer twee dagen duurt voordat water van Sint Pieter tot Megen is gestroomd. Daarnaast laten de figuren zien dat de afvoerkromme redelijk afvlakt verder benedenstrooms.



Figuur 30: Afvoerkromme Sint Pieter voor tijdsperiode van 12 Februari tot 10 Maart (Rijkswaterstaat, 2020).



Figuur 31: Afvoerkromme Megen voor tijdsspanne van 12 Februari tot 10 Maart (Rijkswaterstaat, 2020).

Ten tijde van extreem lage afvoer kan het voorkomen dat het debiet verder benedenstrooms lager is dan bij Sint Pieter. Bij droogte kan namelijk tot wel 60% van het water verdampen. Daarnaast zullen de agrarische sector en de drinkwaterbedrijven meer water willen afnemen en zullen de gemalen en schutsluizen nog steeds water weghalen van de Maas. Een gesteld maatgevend minimum voor de afvoeren in droge periodes is 10 m³/s voor de benedenstroomse gebieden van de Nederlandse Maas. Dit is gebaseerd op het feit dat voor de Grensmaas een minimale afvoer van 10 m³/s vastgesteld is door de overheid en op het feit dat de Roer (een zijrivier van de Maas) altijd een minimum debiet van 10 m³/s afvoert vanuit stuwmeren bovenstrooms. De stuwen in de Maas reguleren de waterstand volkomen ten tijde van een laag debiet. (Verduijn, 2014) (N. Asselman, 2018)

Waterstanden

Voor de waterstanden in de Maas geldt dat het stuwpeil maatgevend is voor het ontwerpen van stuwen. Stuwen zijn geen primaire waterkeringen en hoeven dus niet op extreme debieten gedimensioneerd te worden (in deze situaties zullen de stuwen open staan). Het ontwerpproces houdt wel rekening met het falen van stuwen bovenstrooms. Ten gevolge van het leegstromen van de stuw bovenstrooms dient water over de stuw heen te kunnen stromen. Tabel 2 geeft de stuwpeilen aan voor de stuwen in de Nederlandse Maas.

A4.4 Commerciële sector

Zoals paragraaf A2.7 schetst gebruiken transportbedrijven de Maas veelvuldig voor het verschepen van goederen. Mede dankzij de stuwen in de Maas is de rivier in zomermaanden een relatief betrouwbare rivier voor scheepvaart. Veel transportbedrijven gebruiken dan ook in de (droge) zomermaanden, als de Rijnwaterstand te laag is voor scheepvaart, de Maas als transportroute. De transportbedrijven transporteren in veel gevallen de vracht eerst per vrachtwagen naar havens zoals bij Venlo. Hier wordt de vracht overgeslagen op schepen die via de Maas hun vracht naar Rotterdam of de zee verschepen. De Maas heeft, door haar vele stuwen, in de zomermaanden dus een hogere betrouwbaarheid dan de Rijn (Rook, Volker, & Volker, 2017). Toekomstscenario's stellen vast dat droogte zal toenemen, dit verhoogt de noodzaak van stuwen. Het onderzoek houdt hierom rekening met een opwaardering van de Maas naar de CEMT-klasse Vb (zie A2.7). Dit zijn langere schepen met een groter laadvermogen.

BIJLAGE B. STUWMIDDELEN

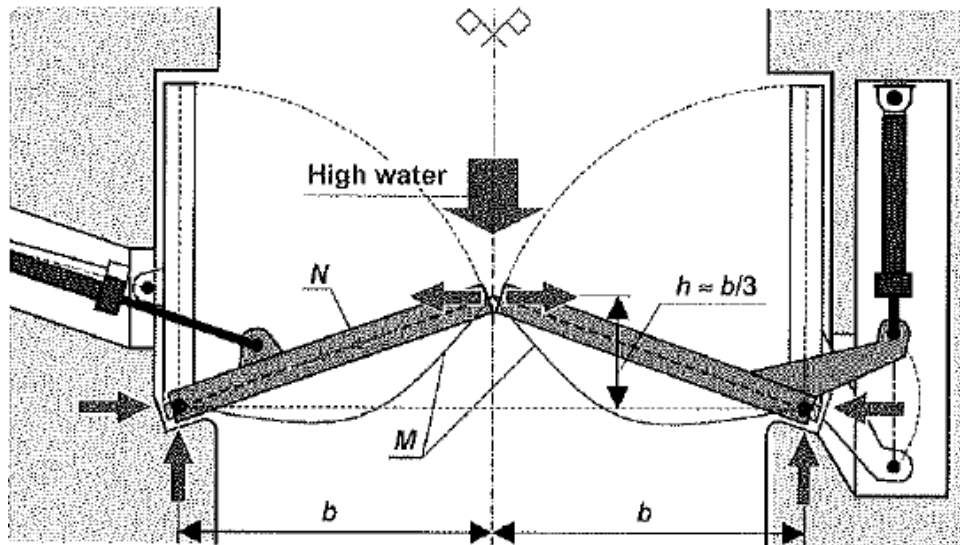
B1 Puntdeuren

Puntdeuren (mitre gate) zijn de meest gebruikte keermiddelen in schutsluizen. Dit keermiddel bestaat uit een tweetal deuren die draaien om een verticale as. In gesloten positie vormen de twee deuren een punt dat wijst in stroomopwaartse richting. Hierbij drukt de waterdruk aan de bovenzijde van het keermiddel de deuren tegen elkaar aan. Figuur 32 (Daniel & Paulus, 2018) is een bovenaanzicht en laat zien hoe deze puntdeuren eruitzien en werken.

De economische breedte van puntdeuren varieert van zes tot veertig meter en de maximale hoogtes van (smalle) puntdeuren kunnen oplopen tot meer dan 25 m (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 8 geeft de voor- en nadelen van puntdeuren.

Tabel 8: Voor- en nadelen van puntdeuren. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Ongelimiteerde doorvaarhoogte	[1]	Grote sponning benodigd	[2]
Korte sluit- en opentijd	[2]	Veel onderhoud	[2]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Niet te openen of sluiten als sprake is van een verval of stroming	[2]
Deuren drukken zichzelf vast door waterdruk	[1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[4]
Goedkoop in onderhoud	[1]	Gevoelige onderdelen onder water	[1]
Eenvoudige civiele constructie	[3]	Niet zomaar te sluiten in geval van nood	[4]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Enkelzijdig kerend	[1]
Weinig materiaalgebruik	[3]	Veel belasting op deuren tijdens beweging: zware aandrijving benodigd	[1]
Eenvoudig te opereren		Zeer gevoelig voor aanvaring in richting van punt	[3]
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)		Geen boven- en onderstroom mogelijk	[5]
Niet gevoelig voor menselijke fouten	[4]	Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	
In stationaire positie geen belasting op aandrijving	[4]	Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)	[3]	Inspectie en onderhoud deels onder water	[4]
		Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
		Kleine afwijkingstolerantie bij installatie	[3]
		Risico op aanvaring in richting van punt	
		Niet goed bestand tegen drijvend ijs & vuil	[1]



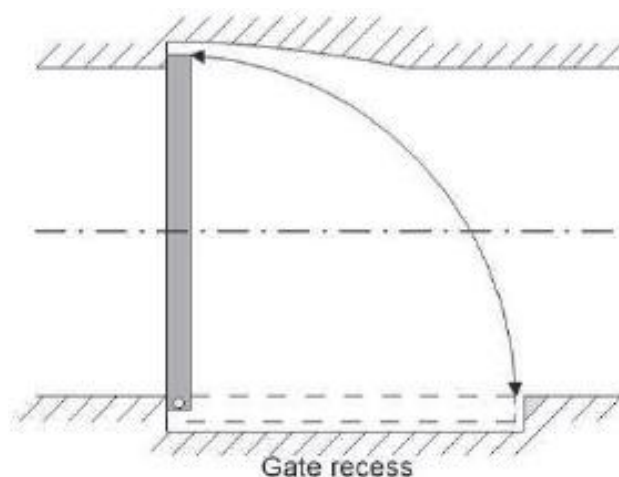
Figuur 32: Werking van puntdeuren (Daniel & Paulus, 2018).

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-9: Het stuwmiddel kan niet openen en sluiten onder een verval.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B2 Enkele draaideur

Enkele draaideuren (single-leaf gate/ swing gate) zijn erg vergelijkbaar met de puntdeuren uit paragraaf B1, het verschil is dat de enkele draaideur niet uit twee deuren bestaat maar uit één deur. Deze deur draait om een verticale as en staat in gesloten stand volledig loodrecht op de doorstroomrichting. Figuur 33 (Molenaar W. , 2011) laat dit keermiddel zien. De economische breedte van enkele draaideuren varieert van twee tot twintig meter en de maximale hoogte is onbeperkt (Molenaar W. , 2011) (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 9 geeft de voor- en nadelen van de enkele draaideur.



Figuur 33: Enkele draaideur (Molenaar W. , 2011).

Tabel 9: Voor- en nadelen van enkele draaideur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987).

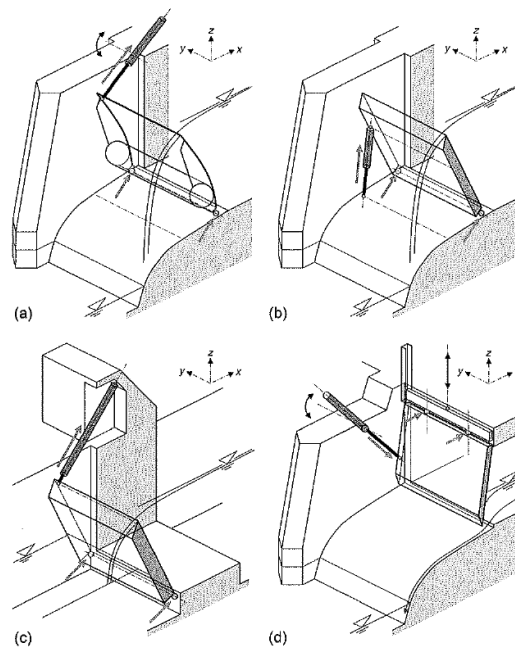
Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Gemakkelijk te construeren	[2]	Grote sponning benodigd	[2]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte & geen horizonvervuiling	[1], [2]	Veel waterverplaatsing bij openen (zware aandrijving nodig)	[1]
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)	[1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[3]
Enkele aandrijving nodig	[1]	Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
Waterdruk zorgt voor goede afsluiting	[1]	Openen en sluiten gaat langzaam	[1]
Robuust systeem	[1]	Meeste gevoelige onderdeel (de taats) erg moeilijk te bereiken voor inspectie en onderhoud	[1]
Dubbelkerend (te maken)	[2]	Zwaar bewegingsmechanisme	[3]
Bekende en bewezen technologie		Niet te bewegen bij stroming & verval	[1]
Goedkoper in onderhoud dan puntdeuren (één aandrijving)	[1]	Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Eenvoudig te opereren	[2]	Boven- en onderstroom niet mogelijk	
In stationaire positie geen belasting op aandrijving	[2]	Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)		Inspectie en onderhoud (deels) onder water, taats slecht bereikbaar	[1]
		Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
		Zware constructie	[2]
		Grote uitsparing benodigd	

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-9: Het stuwmiddel kan niet openen en sluiten onder een verval.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B3 Klepstuw

De klepstuw (flap gate/ hinged crest gate) is het meest bekende stuwmiddel. Daarnaast passen vaak andere stuwmiddelen een combinatie met het principe van een klepstuw toe. Dit principe is een klep die in geopende stand op de bodem ligt en in gesloten stand omhoog klapt om daarmee het water te keren of te stuwen. De klepstuw bestaat uit een klep die aan de onderzijde scharnierend is bevestigd aan de drempel van de stuwconstructie. Door middel van kabels, stangen, hydraulische cilinders of andere aandrijvingen richt de klep zich op, meestal tot een maximale stand van 60 á 70° ten opzichte van de bodem. De klepstuw is ook realiseerbaar met scharnieren aan de bovenzijde van de klep. Hierdoor kan de klep bijvoorbeeld tegen de onderzijde van een brug klappen om te openen. Deze variant is niet van belang voor het vervolg van dit onderzoek omdat de normale klepstuw beter toepasbaar is voor de Maas. Figuur 34 (Daniel & Paulus, 2018) geeft de klepstuw, met meerdere manieren van aandrijving, weer.



Figuur 34: Klepstuw met meerdere manieren van aandrijving (Daniel & Paulus, 2018).

De economische breedte van klepstuwen kan variëren van 6 tot 30 m en de maximale economische hoogte van de klepstuw is 5,5 m. Grotere breedtes zijn mogelijk in combinatie met een relatief lage hoogte en grote hoogtes zijn toepasbaar bij kleinere breedtes (Daniel & Paulus, 2018) (Erbisti, 2004). Tabel 10 geeft de voor- en nadelen van de klepstuw.

Tabel 10: Voor- en nadelen van de klepstuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [4]: (Erbisti, 2004), [6]: (InCom Working Group, 2005), [7]: (Verduijn, 2014).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[4]	Gelimiteerde breedte	[4]
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	[4]	Door gelimiteerde breedte meerdere stuwopeningen, dit zorgt voor een hogere faalkans	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	[1]
Geen pijlers benodigd bij kleine stuwen	[1]	Enkelkerend	[1]
Bij toepassing van pijlers is aandrijving boven water mogelijk		Gelimiteerde keerbare waterhoogte	[1]
Te bewegen bij stroming	[1]	In stationaire positie en bij beweging grote belasting op de aandrijving	[1]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Afdichting van stuwmiddel is complex	[1]
Vispassage over stuw mogelijk (met aangepaste constructie)	[1]	Scharnieren zijn onderhoudsgevoelig en slecht te bereiken	[1]
Redelijk bestand tegen sediment (bij geen uitsparing)	[1]	Transport en (de-)installatie van klep is zwaar en complex	[1]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Gevoelig voor puin en slib op de bodem	[3]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte	[7]	Zeer grote momenten op scharnieren	[7]
Goedkoop in constructie	[6]	Kleine torsiestijfheid	[6]
Eenvoudige civiele onderdelen (geen complex mechanisme)	[6]	Gevoelig voor trillingen	[6]
Hydraulische belasting wordt afgedragen op vloer (stabiel)	[6]	Gevoelig voor slijtage (bij veel sedimenttransport)	[6]
Verwijderen van vuil en andere objecten gaat gemakkelijk	[6]	Kans op corrosie van scharnieren	[6]
Verminderde kans op aanvaring, redelijk bestand tegen aanvaring qua constructie	[6]	Droogzetten stuw gaat alleen met schotten	[6]
Korte sluit- en opentijd		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Weinig materiaalgebruik		Onderstroom niet mogelijk	
Geen uitsparingen benodigd (kleine uitsparingen wel gewenst)	[1]	(Zware) aandrijvingen benodigd	
Eenvoudig te opereren		Visionvriendelijk bij lange overlaten	[1]
Inspectie en klein onderhoud gedeeltelijk mogelijk boven water	[1]	Draaipunt onder water	[3]
Scheepvaart mogelijk	[6]	Veel waterbeweging bij openen	[3]
		Onderhoud & Inspectie moeilijk	[3]

Het stuwmiddel voldoet aan de gestelde eisen. Het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee in de verdere afwegingen.

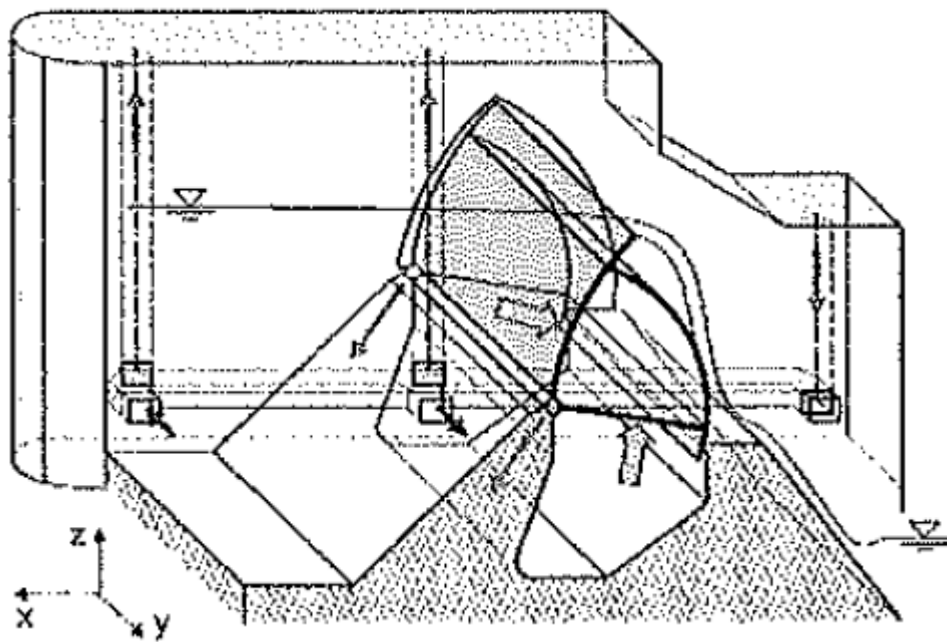
B4 Trommeldeur

De trommeldeur (drum gate) draagt ook wel de naam luchtkistdeur. Deze deur is een stalen constructie die draait om een horizontale as, die op de drempel aan de bovenstroomse zijde van de stuw ligt. De stalen constructie vormt een driehoek en is van binnen volledig hol en afgesloten van het water. Deze constructie valt in een uitsparing in de vloer, deze uitsparing is verbonden met de bovenstroomse zijde van de stuwconstructie. Het stuwmiddel sluit door water in de uitsparing te laten, hierdoor drijft de holle stalen constructie op en draait daardoor open, aangezien de waterdruk tegen de onderzijde van de constructie drukt. Het stuwmiddel opereert dus volledig door waterdruk. De deur opent vervolgens weer door water uit de uitsparing te laten. Figuur 35 geeft de trommeldeur weer. Voor het reguleren van waterstanden is het mogelijk een regelklep toe te passen op het stuwmiddel.

De economische breedte van de trommeldeur varieert van 20 tot 80 m (Daniel & Paulus, 2018). De maximale economische hoogte en het verval van een trommeldeur is van 4 m (Erbisti, 2004). Tabel 11 geeft de voor- en nadelen van de trommeldeur.

Tabel 11: Voor- en nadelen trommeldeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [4]: (Erbisti, 2004).

Voordelen	Bron:	Nadelen	Bron:
Maakt gebruik van waterdruk om te openen en sluiten (geen grote aandrijvingen nodig)	[4]	Grote uitsparing benodigd	[1]
Stabiele constructie	[1]	Zware en complexe constructie, veel materiaalgebruik	[4]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Enkelkerend	[1]
Geen sponningen benodigd	[1]	Grote trekkrachten op scharnieren	[1]
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	[4]	Moeilijk om stalen constructie waterdicht te maken	[1]
Uit te breiden met kleppen op de deur voor nauwkeurigere waterstandregulatie	[1]	Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	[1]
Goed bestand tegen trillingen	[1]	Inspecties en onderhoud in kleine ruimtes en onder water	[1]
Uit zicht en geen doorvaarhoogtebeperking (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Risico op ontstoppingen in de in- en uitstroom voor uitsparing	[1]
Lange levensduur (100 jaar)	[1]	Veel slijtage op afdichtingen aan zijkant stuw	[1]
Verminderde kans op aanvaring		Niet vispasseerbaar	[1]
Bij toepassing van kleppen koppeling van kabels en leidingen van stuwmiddel naar pijlers efficiënt langs draaipunt		Transport en installatie moeilijk en zwaar	[1]
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk		Niet bestand tegen aardbevingen	[1]
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)		Moeilijk te opereren	
Geen kans op olieverontreiniging van water	[1]	In- en uitstroomuitsparing niet te gebruiken bij bevroren water	
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	
Weinig energieverbruik		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
		Onderstroom niet mogelijk	



Figuur 35: Trommeldeur (Daniel & Paulus, 2018).

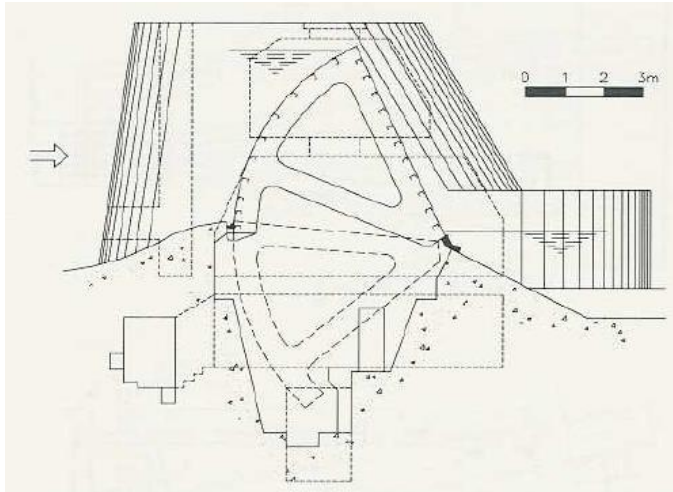
Het stuwmiddel voldoet aan de gestelde eisen mits de trommeldeur een regelklep bevat. Het onderzoek neemt dit stuwtype mee in verdere afwegingen.

B5 Sectordeur

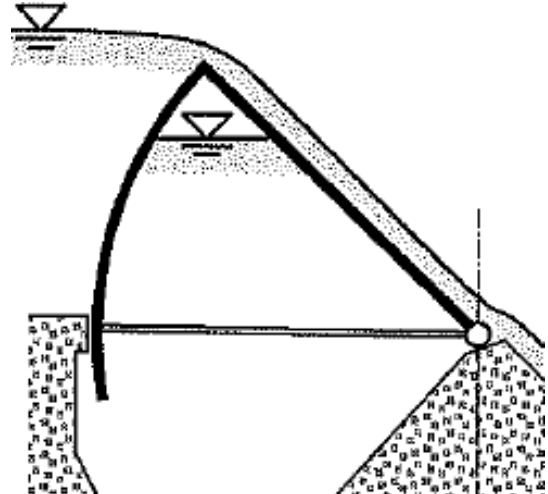
Wat betreft de wijze van aandrijving van de sectordeur (sector gate) bestaan veel overeenkomsten met de trommeldeur. De sectordeur sluit ook doordat een uitsparing onder de deur zich vult met water. Door de waterdruk die hierdoor ontstaat klappt de sectordeur omhoog en sluit daarmee de doorstroombopening. Het verschil tussen de trommeldeur en de sectordeur is de positie van het scharnier en de beplating. Bij de sectordeur bevindt het scharnier zich op de benedenstroomse zijde. Dit zorgt ervoor dat een gebogen stalen plaat de doorvaartopening afsluit. Bij de trommeldeur zit het scharnier aan de bovenstroomse zijde, wat ervoor zorgt dat de bovenkant van de driehoekvormige stalen constructie de doorvaartopening afsluit. De sectordeur bestaat uit een tweetal waterdichte platen, te weten een gebogen plaat die de doorstroombopening kan afsluiten én een plaat die aan de ene kant aan de bovenzijde van de gebogen plaat is verbonden en aan de andere kant aan het scharnier op de drempel. Deze twee platen vormen samen met een uitsparing in de vloer een holle ruimte die zich kan vullen met water. Figuur 37 laat dit principe zien, Figuur 36 geeft de constructie van een sectordeur weer. Het stuwmiddel is uit te breiden met regelkleppen om het reguleren van waterstanden te waarborgen. De economische breedte varieert van 15 tot 40 m volgens (InCom Working Group, 2005). De economische hoogte van de deur is maximaal 8 m (Erbisti, 2004). Tabel 12 geeft voor- en nadelen van de sectordeur.

Tabel 12: Voor- en nadelen van de sectordeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [4]: (Erbisti, 2004), [6]: (InCom Working Group, 2005), [8]: (Frijns, 2019).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	[4]	Lange pijlers noodzakelijk	[1]
Lichte deurconstructie	[1]	Gevoelig voor uitschuring door sediment, veel frictie door sediment in uitsparing	[6]
Bekende en bewezen technologie		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	[1]
Niet kwetsbaar voor trillingen	[1]	Grote en zware drempel nodig met grote uitsparing	[1]
Te bewegen onder stroming en verval	[1]	Enkelkerend	[1]
Geen grote aandrijvingen nodig: geen kans op olieverontreiniging van water	[1]	Uitsparing gevoelig voor sediment	[1]
Geen sponningen benodigd	[1]	Gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	[1]
Uit te breiden met kleppen	[1]	Zeer kleine afwijkingstolerantie	[1]
Lange levensduur (100 jaar)	[1]	In- en uitlaten voor uitsparing kunnen verstopt raken	[1]
Transport van deuren relatief gemakkelijk	[1]	Afsluitingen aan zijkant veel wrijving	[1]
Lage pijlers	[1]	Vispassage door stuw onmogelijk	[1]
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk		Niet bestand tegen aardbevingen	[1]
Geen torsie en buiging in breedterichting	[6]	Gevoelig voor uitschuring door sediment, veel frictie door sediment in uitsparing	[6]
Uit zicht en ongelimiteerde doorvaarthoogte (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[6]	Als in de toekomst waterstand verhoogd wordt moeten de deuren én de uitsparing vervangen worden	[8]
Goedkoop in opereren	[6]	Duur in constructie	[6]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Zware stalen constructie voor scharnieren	[6]
Verminderde kans op aanvaring		Moeilijk te opereren	
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)		In- en uitstroom uitsparing niet te gebruiken bij bevroren water	
Weinig energieverbruik		Geen onderstroom mogelijk	
Maakt gebruik van waterdruk om te openen en sluiten	[4]	Beweegbare delen onder water	[6]
Bij toepassing van kleppen koppeling van kabels en leidingen van stuwmiddel naar pijlers efficiënt langs draaipunt		Bij gebruik van regelkleppen veel onderhoud, kleppen meestal onder water	



Figuur 36: Constructie van een sectordeur (Erbisti, 2004).



Figuur 37: Schematisering sectordeur (Daniel & Paulus, 2018).

Het stuwmiddel voldoet aan de gestelde eisen mits het stuwmiddel regelkleppen bevat. Het onderzoek neemt deze variant op het stuwmiddel mee in verdere afwegingen.

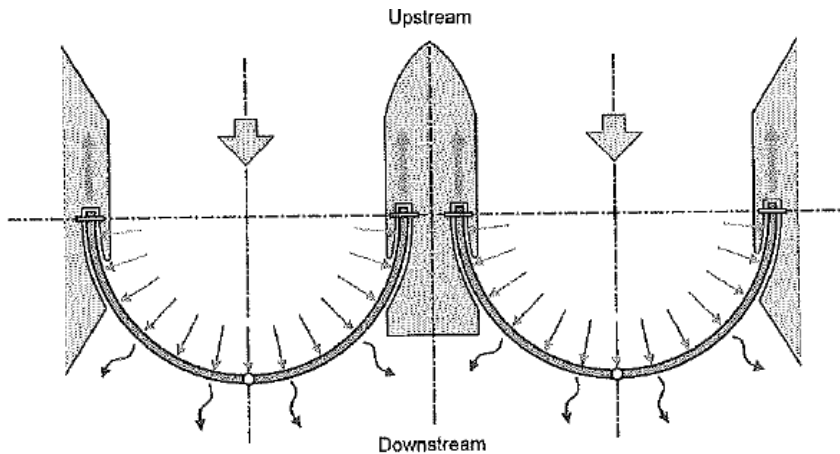
B6 Vizierdeur

Een vizierdeur (visor gate) dankt zijn naam aan het vizier van een ridderhelm. Het heeft daar namelijk veel overeenkomsten mee. Het is een, meestal grote, deur met een semi-cilindrische vorm die draait om een horizontale as. Als de deur gesloten is ligt de deur, van boven bekeken, als een halve cirkel in het water. Het uiterste punt van deze halve cirkel ligt aan de benedenstroomse zijde. De waterdruk oefent dus zijn belasting uit aan de binnenzijde van de halve cirkel. Figuur 38 laat dit principe zien. Zowel boven- als onderstroom is mogelijk. Regelkleppen boven op het stuwmiddel reguleren deze bovenstroom. In geopende stand, meestal een hoek van ca. 60°, kunnen schepen onder deze halve cirkel doorvaren. Figuur 39 geeft een overzicht van de constructie en werking van de vizierstuw.

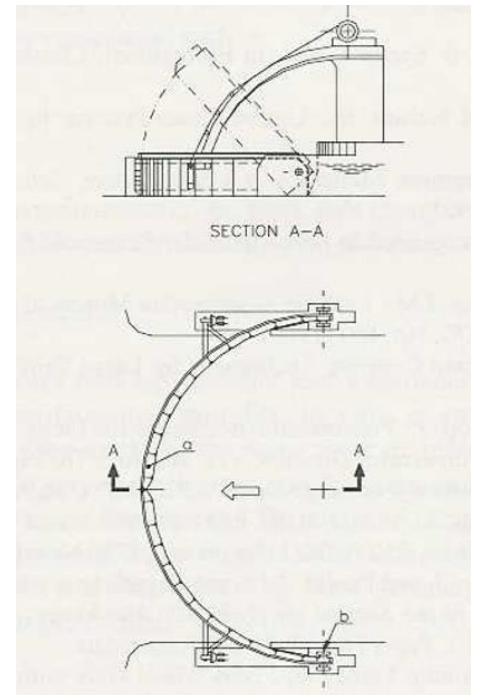
De economische breedte van de vizierstuw varieert van 40 tot 60 m (Verduijn, 2014). De economische hoogte van een vizierstuw is maximaal 10 m (Verduijn, 2014). Tabel 13 geeft de voor- en nadelen van de vizierdeur.

Tabel 13: Voor- en nadelen van de vizierdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987), [8]: (Frijns, 2019).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Scheepvaart tot bepaalde hoogte mogelijk	[4]	Zeer lange sluit- en opentijd (2,5 uur om te sluiten)	[4]
Economisch voordelig voor grote stuwopeningen (door gunstige krachtsafdracht)	[4]	Lange pijlers noodzakelijk	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Veel bodembescherming noodzakelijk	[1]
Lichte deur	[1]	Hoog risico op trillingen bij bewegen	[1]
Geen sponningen benodigd		Risico op aanvaring	
Te bewegen bij stroming (zowel boven- als onderlangs) en verval	[1]	Onderhoud in de uitsparing moeilijk	[1]
Uit te breiden met extra kleppen op deur voor regulatie en/of vispassage	[1]	Onregelmatige belasting zorgt voor problemen	[1]
Dubbelkerend		Veel ruimtebeslag	[1]
Draagt belastingen over in de richting van de stroming (gunstig voor pijlers)	[1]	Dubbele grote aandrijving nodig (aan beide zijdes)	[1]
Pad over deur mogelijk (geen brug of tunnel nodig)	[1]	Niet mogelijk de stuw over te steken in geopende stand	[1]
Te gebruiken bij zowel hoge als lage waterstanden	[1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[1]
Deur kan volledig boven water (ideaal voor inspecties en onderhoud)	[1]	Moeilijk te construeren en transporteren (door vorm deur)	[1]
Weinig energieverbruik	[1]	Slecht bestand tegen (grote) puntbelastingen aan holle zijde van deur	[1]
Bestand tegen zakkingen van de fundering	[1]	Gevoelig voor windkrachten (hoge constructie)	[1]
Voordelig bij grote breedtes (weinig materiaal in verhouding)	[8]	Objecten boven maaiveld (horizonvervuiling en belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]
Bij gebruik van kleppen kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil doorgevoerd worden		Gelimiteerde doorvaarthoogte (bij brede toepassing wel hoog genoeg)	[5]
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)		Niet voordelig bij kleine breedtes (veel materiaal in verhouding)	[8]
Lange levensduur		Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
Bij gebruik van kleppen boven- en onderstroom mogelijk		Afdichting van stuwmiddel is complex	
Bij gebruik van kleppen nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk		Bij toepassing van kleppen meer onderdelen (onderhoud, storingen)	
Bij toepassing van kleppen koppeling van kabels en leidingen van stuwmiddel naar pijlers efficiënt langs draaipunt		Deur kan niet een klein stukje geheven worden, dan ontstaan er trillingen door de grote onderstroom. Bij openen moet de deur meteen tot een relatief grote hoogte geopend worden.	



Figuur 38: Krachtsafdracht waterdruk vizerstuw (Daniel & Paulus, 2018).

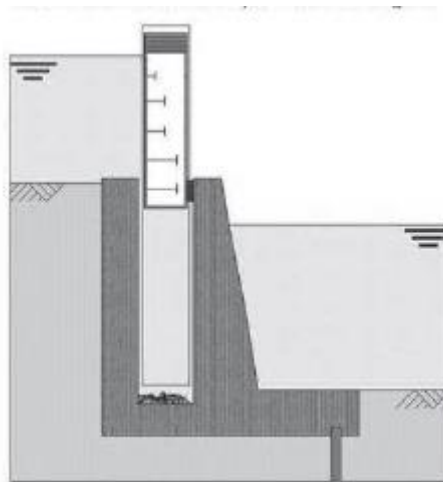


Figuur 39: Constructie vizerstuw (Erbisti, 2004).

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, mits kleppen op de stuw worden toegepast. Het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee in verdere afweging.

B7 Zakdeur

De zakdeur (submersible lift gate) is een stuwmiddel waarbij de deur in een uitsparing in de grond kan zakken, waardoor een overstroom ontstaat. Figuur 40 laat het principe van dit stuwmiddel zien.



Figuur 40: Zakdeur (Molenaar W. , 2011).

Economische breedtes van de zakdeur variëren van 6 tot 60 m (Daniel & Paulus, 2018). De hoogte van de zakdeur is begrensd door de mogelijke diepte van de schacht. Tabel 14 geeft de voor- en nadelen van de zakdeur.

Tabel 14: Voor- en nadelen van de zakdeur. Bronnen: [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [5]: (Snel, 1987).

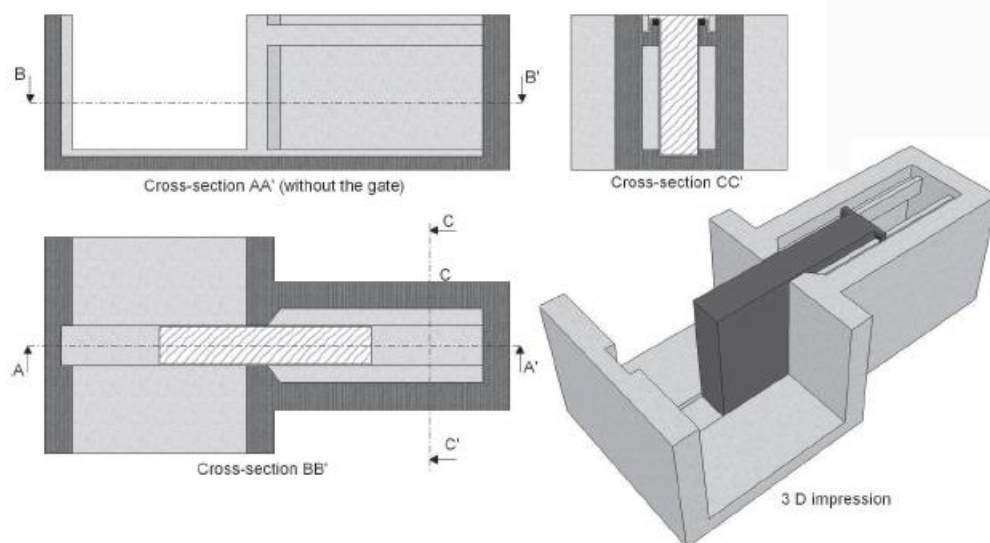
Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Weinig oppervlakte nodig	[2]	Diepe uitsparingen noodzakelijk, diepe onderbouw	[2]
Te bewegen bij verval en stroming	[2]	Rollers waar de deur langs rolt zijn onderhoudsgevoelig	[2]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Afdichting van stuwmiddel is complex	[3]
Dubbelkerend		Gevoelig voor vuil en sediment	[3]
Robuust systeem		Moeilijk te bereiken voor inspectie en onderhoud	[5]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Constructie continu onder water	[5]
Geen kleppen benodigd		Duur in onderhoud & constructie	
Geen kans op aanvaring in geopende stand		Veel materiaalgebruik	
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk		Sponningen benodigd	
Eenvoudig te opereren		Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)		Onderstroom onmogelijk	
		Kans op olieverontreiniging van water (bv. smeermiddelen)	

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eis, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-8: Onderdelen zijn extreem slecht te bereiken voor inspecties en onderhoud.

B8 Roldeur

Bij een roldeur (rolling gate) schuift de deur in horizontale richting in een grote sponning in de wand naast de doorstroomopening om te openen. Hierbij bestaan varianten waarbij de deur over rollers rolt om te openen en sluiten en varianten waarbij de deur glijdt of schuift. Figuur 41 laat de werking van dit stuwmiddel zien.



Figuur 41: Roldeur (Molenaar W. , 2011).

De economische breedte van roldeuren variëren van 12 tot 80 m. De economische hoogte van een roldeur is maximaal 35 m (Daniel & Paulus, 2018).

Tabel 15: Voor- en nadelen van de roldeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [5]: (Snel, 1987), [7]: (Verduijn, 2014).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Toe te passen bij grote breedtes	[2]	Enorme sponning noodzakelijk per deur	[2]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte	[2]	Niet te sluiten als de deur volledig onder water is	[2]
Makkelijk te onderhouden	[2]	Zware constructie	[1]
Dubbelkerend	[3]	Veel betonwerk	[1]
Te gebruiken bij zowel grote als kleine waterhoogtes	[1]	Veel ruimtebeslag in dwarsrichting rivier	[1]
Weinig ruimte in stroomrichting van rivier	[1]	Veel onderhoud voor rolbaan	[1]
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)	[1]	Inspectie en onderhoud veel onder water	[1]
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)	[1]	Veel staalwerk onder water (hoge kosten voor coating en verwijderen biologische aangroei)	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Kosten vervangen rolbaan hoog	[1]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
Weinig wrijving over afsluitingen	[1]	Moeilijk te construeren en transporteren	[1]
Lange levensduur (100 jaar)	[1]	Gevoelig voor horizontale belastingen (aanvaringen & golven)	[1]
			[3]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Moeilijk te bewegen bij stroming en verval	[5]
Eenvoudig te opereren		Boven- en onderstroom niet mogelijk	[5]
In stationaire positie geen belasting op aandrijving		Niet stabiel bij grote momenten	[7]
Verminderde kans op aanvaring		Duur in constructie & onderhoud	[1], [3]
Goed bestand tegen ijsbelasting	[1]	Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Geen/ weinig pijlers nodig	[1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	
Licht bewegingswerk	[3]	Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	
		Afdichting van stuwmiddel is complex	
		Zwaar deurgeleidingssysteem	[3]

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-8: Het stuwmiddel kan niet openen bij een groot verval en sluiten bij grote stroomsnelheden.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan geen regulatie voor het debiet garanderen.

B9 Horizontaal draaiende segmentdeur

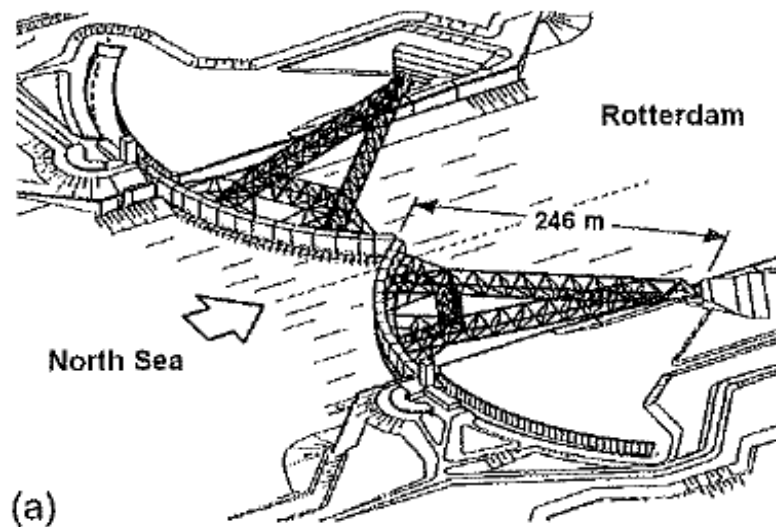
Segmentdeuren (radial gate/ tainter gate/ segment gate) kenmerken zich door een gebogen plaat die het water keert. De horizontaal draaiende segmentdeur draait om een verticale as. De constructie bestaat altijd uit twee deuren die, in geopende stand, elk aan een zijde van de watergang in een sponning zitten. Om te sluiten draaien ze uit deze sponning in de watergang, waarbij ze in het midden van de watergang op elkaar aansluiten. Een erg bekende toepassing van de horizontaal draaiende segmentdeur is de Maeslantkering in Rotterdam. Bij dit

kunstwerk fungeert de horizontaal draaiende segmentdeur als stormvloedkering. Figuur 42 laat een tekening van deze Maeslantkering, die de constructie en werking van de horizontaal draaiende segmentdeur duidelijk maakt, zien.

De economische breedte van de horizontaal draaiende segmentdeuren varieert van 20 tot 300 m (Daniel & Paulus, 2018). De economische hoogte van de horizontaal draaiende segmentdeuren is maximaal 20 m. Tabel 16 geeft de voor- en nadelen van de Horizontaal draaiende segmentdeur.

Tabel 16: Voor- en nadelen van de horizontaal draaiende segmentdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Te bewegen onder stroming en verval	[2]	Onderstroom niet mogelijk	
Gemakkelijk te sluiten	[2]	Grote belastingen op de draaipunten	[2]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Zeer grote sponningen benodigd	[2]
Belasting wordt (alleen) horizontaal afgedragen	[2]	Gevoelig voor ijsgang, sediment en (drijf)vuil bij de afdichting en sponning	[2]
Dubbelkerend	[2]	Zware en complexe constructie (veel materiaalgebruik)	[2] [1]
Verminderde kans op aanvaring		Veel ruimtebeslag, zowel in stroom- als dwarsrichting van de rivier	[1]
Eenvoudig te opereren		Veel componenten (zorgt voor hogere faalkans)	[1]
Bekende en bewezen constructie		Grote drempel noodzakelijk (voor afdichting en bijvoorbeeld een rolbaan)	[1]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Twee zware aandrijvingen noodzakelijk	[1]
Natuurlijk looppad over keermiddel aanwezig (geen brug of tunnel nodig)	[1]	Gevoelige onderdelen onder water of moeilijk te bereiken	[1]
Bestand tegen aanvaringen aan holle kant	[1]	Kans op oliecontaminatie van water (door aandrijving en smeermiddelen)	[1]
Geen pijlers of torens nodig	[1]	Onderhoud alleen mogelijk als de constructie wordt drooggezet	[1]
Lange levensduur (100 jaar)	[1]	Installatie van deuren moet zeer nauwkeurig plaatsvinden	[1]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Veel wrijving op afdichting op de bodem	[1]
Goed bestand tegen ijsbelasting	[1]	Torsie in deuren mogelijk	[1]
		Moeilijk te transporteren en installeren	[1]
		Lange sluit- en opentijd	
		Duur in onderhoud en constructie	[3]
		Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
		Afdichting van stuwmiddel is complex	
		Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	
		Grote belastingen op draaipunten	[1]



Figuur 42: Horizontaal draaiende segmentdeur, Maeslantkering te Rotterdam (Daniel & Paulus, 2018).

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eis, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

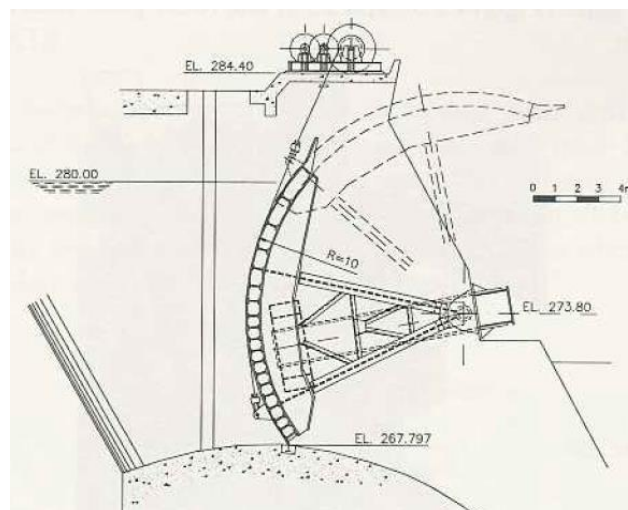
- OpdrEis-4: Het stuwmiddel kan niet 3 doorstroomopeningen waarborgen.

B10 Verticaal draaiende segmentdeur

Net zoals de horizontaal draaiende segmentdeur heeft de verticaal draaiende segmentdeur een gebogen plaat die het water keert. De verticaal draaiende segmentdeur draait om een horizontale as. Figuur 43 geeft een schematisering van dit type stuwmiddel. Dit type keermiddel is in veel verschillende varianten over de jaren heen toegepast. Onderstaande opsomming van varianten op de verticaal draaiende segmentdeur is niet volledig, de meest toegepaste varianten zijn:

- De 'gewone' **verticaal draaiende segmentdeur**: Dit is een enkele deur die, om te openen, naar boven draait om een horizontale as. Deze horizontale as bevindt zich in de meeste gevallen halverwege de te keren waterhoogte. Bij het openen ontstaat een onderstroom.
- De **verticaal draaiende segmentdeur met klep**: Dit is eenzelfde constructie als de gewone verticaal draaiende segmentdeur, maar met het verschil dat zich boven op deze draaibare segmentdeur kleppen bevinden die een bovenstroom over de segmentdeur reguleren.
- De **dubbele verticaal draaiende segmentdeur**: Deze constructie bevat niet een, maar twee deuren die beiden om hetzelfde draaipunt en dezelfde as draaien. De onderste segmentdeur staat het grootste deel van de tijd op de bodem, de bovenste segmentdeur opent en sluit vaker om de afvoeren te reguleren.
- De **omgekeerde verticaal draaiende segmentdeur**: het verschil tussen dit stuwmiddel en de gewone verticaal draaiende segmentdeur is dat bij de omgekeerde segmentdeur de holle kant richting de bovenstroomse zijde staat. Hierdoor ontstaan trekkrachten in de stangen tussen het draaipunt en de gebogen plaat. Dit principe werkt goed in gesloten kokers en duikers.
- De **verticaal draaiende segmentdeur met contragewicht**: Deze variant is een gewone verticaal draaiende segmentdeur met een contragewicht aan de andere zijde van de as die meedraait met de deur;

- De **overstroombare segmentdeur**: Deze verticaal draaiende segmentdeur draait niet naar boven, maar naar onderen. Hierdoor ontstaat een bovenstroom over de deur in geopende stand. Omdat dit stuwmiddel wezenlijk verschilt in vergelijking tot de gewone verticaal draaiende segmentdeur, behandelt paragraaf B11 de overstroombare segmentdeur als apart stuwmiddel.
- De **roterende segmentdeur**: Deze deur kan volledig om zijn as draaien en maakt daarbij meestal gebruik van een contragewicht. Dit stuwtype draagt de naam 'roterende segmentdeur' omdat deze segmentdeur zich onderscheidt van de andere verticaal draaiende segmentdeuren doordat hij volledig kan roteren, waardoor het meerdere functies vervult. De andere varianten van de verticaal draaiende segmentdeuren roteren ook, maar zijn een stuk beperkter in hun rotaties dan de roterende segmentdeur. Ook dit stuwmiddel verschilt wezenlijk van de andere verticaal draaiende segmentdeuren. Hierom behandelt paragraaf B12 dit stuwmiddel als apart stuwmiddel.
- De **sectordeur**: in feite is de sectordeur ook een verticaal draaiende segmentdeur omdat de sectordeur ook met een gebogen blad het water keert. De verschillen zijn echter dermate groot dat paragraaf B5 de sectordeur volledig als ander stuwmiddel behandelt.



Figuur 43: Schematisering verticaal draaiende segmentstuw (Erbisti, 2004).

Combinaties tussen bovenstaande varianten zijn ook mogelijk. Het vervolg van de vergelijking neemt niet alle bovenstaande varianten mee. Voor de locatie bij Grave in de Maas is de verticaal draaiende segmentdeur met klep de meest gunstige variant omdat deze variant het beste voldoet aan de gestelde eisen. Het is bijvoorbeeld de variant die het beste aan OpdrEis-5: 'de stuw dient de waterstanden nauwkeurig te reguleren' voldoet. Ook is bij deze variant, in tegenstelling tot bij de andere varianten, zowel onderstroom als overstort mogelijk, wat vele voordelen met zich meebrengt.

De maximale economische breedte van segmentdeuren kan variëren van 15 tot 30 m (InCom Working Group, 2005). De economische hoogte van segmentdeuren is maximaal 8 m (Dijk & van der Ziel, 2010). Tabel 17 geeft de voor- en nadelen van de verticaal draaiende segmentdeur met klep.

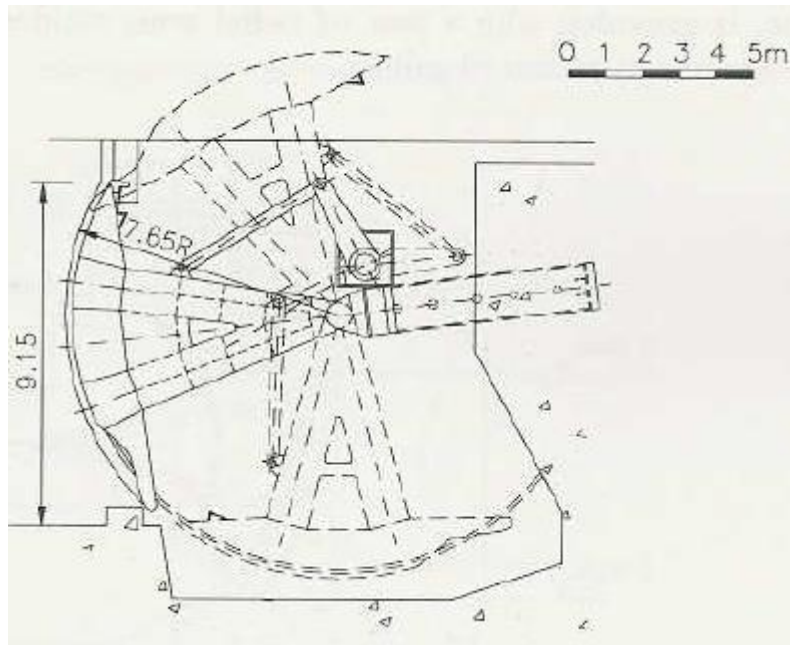
Tabel 17: Voor- en nadelen van de verticaal draaiende segmentdeur met klep. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987), [6]: (InCom Working Group, 2005), [9]: (Molenaar & Voorendt, 2017).

Voordelen	Bron:	Nadelen	Bron:
Lange levensduur		Dure constructie	[2]
Gemakkelijk te openen en sluiten	[4]	Draaipunten moeten het volledige gewicht van de deur kunnen dragen	[2]
Belasting wordt in één richting afgedragen (efficiënte krachtverdeling)	[2] [1]	Gelimiteerde scheepvaartheogte	[2]
Dubbelkerend	[2]	Grote hydraulische krachten op benedenstroomse deel van pijler (slecht voor stabiliteit)	[1]
Gemakkelijk en goedkoop te onderhouden	[1] [4]	Drempels dienen zeer zorgvuldig gedimensioneerd te zijn	[4]
Gemakkelijk te bedienen	[2]	Brede en lange pijlers benodigd	[1], [6]
Te sluiten door eigen gewicht	[4]	Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	[1]
Over het algemeen weinig wrijving	[4]	Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Geen looppad aanwezig (extra brug of tunnel benodigd)	[1]
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[4]	In stationaire stand belasting op aandrijving	[1]
Weinig materiaal benodigd voor deur	[1]	In gesloten stand inspectie en onderhoud vrijwel niet mogelijk	[1]
Gelijkmatige (hijs)belasting op aandrijving	[1]	Veel wrijving op afdichtingen aan de zijkant	[1]
Hydraulische belasting komt niet rechtstreeks op de aandrijving	[1]	Armen van deur gevoelig voor knikken (zware armen benodigd)	[1]
Geen of kleine sponningen en uitsparingen benodigd	[1] [3]	Gevoelig voor gezonken objecten door (grote) onderstroom	[1]
Geen belasting op aandrijving in gesloten stand		Kan trillingen veroorzaken	[6]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Transport en (de-)installatie zwaar en complex	
Te bewegen onder stroming en verval	[2]	Deur kan amper zijdelingse krachten opnemen	[9]
Draaipunt gemakkelijk te bereiken voor inspectie en onderhoud	[1]	Kwetsbaar in geopende stand, hoger risico op aanvaring	[5]
Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil doorvoeren		Objecten boven maaiveld (horizonvervuiling en belemmering van zicht voor scheepvaart)	[6]
Robuust en hoge stijfheid	[6]	Door toepassing van kleppen meer onderhoud	
Korte sluit- en opentijd			
Redelijk visvriendelijk bij onderstroom	[1]		
Bij toepassing van kleppen koppeling van kabels en leidingen van stuwmiddel naar pijlers efficiënt langs draaipunt			

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, mits de verticaal draaiende segmentdeur met klep wordt toegepast. Het vervolg van het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee.

B11 Overstroombare segmentdeur

De overstroombare segmentdeur (submersible segment gate) is een verticaal draaiende segmentdeur die niet naar boven maar naar beneden draait. In volledig geopende stand komt de deur in een uitsparing te liggen en is de doorgang vrij voor grote afvoeren en scheepvaart. De segmentdeur reguleert de waterstand door een overstrom over de deur te laten. Bij de overstroombare segmentdeur die Figuur 44 laat zien, kan de overstroombare segmentdeur ook naar boven, uit het water, draaien. Dit is echter een uitzondering, bij de meeste overstroombare segmentdeuren is dit niet het geval. Het onderzoek gaat uit van een overstroombare segmentdeur die niet uit het water kan draaien.



Figuur 44: Overstroombare verticaal draaiende segmentdeur (Erbisti, 2004).

De maximale economische breedte van overstroombare segmentdeuren kan variëren van 15 tot 30 m (InCom Working Group, 2005) en de economische hoogte van overstroombare segmentdeuren is maximaal 10 m. Tabel 18 geeft voor- en nadelen van de overstroombare segmentdeur.

Tabel 18: Voor- en nadelen van de overstroombare segmentdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987), [6]: (InCom Working Group, 2005), [9]: (Molenaar & Voorendt, 2017).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Gemakkelijk te openen en sluiten	Paragraaf B10, [4]	Duur in constructie	Paragraaf B10, [2]
Belastingen worden in één richting afgedragen (efficiënte krachtverdeling)	Paragraaf B10, [1], [2]	Draaipunten moeten het volledige gewicht van de deur kunnen dragen	Paragraaf B10, [2]
Dubbelkerend	Paragraaf B10, [2]	Inspectie en onderhoud deels onder water, lastig onderhoud	[5]
Eenvoudig te bedienen	Paragraaf B10, [2]	Hydraulische krachten op benedenstroomse zijde van pijler (slecht voor stabiliteit)	Paragraaf B10, [1]
Te openen door eigen gewicht	Paragraaf B10, [4]	Deur kan amper zijlingse krachten opnemen	Paragraaf B10, [9]
Over het algemeen weinig wrijving	Paragraaf B10, [4]	Drempels dienen zeer zorgvuldig gedimensioneerd te zijn	Paragraaf B10, [4]
Niet gevoelig voor menselijke fouten	Paragraaf B10	Brede en lange pijlers benodigd	Paragraaf B10, [1], [6]
Weinig materiaal benodigd voor deur	Paragraaf B10, [1]	Diepe uitsparing in bodem benodigd	[5]
Gelijkmatige (hijs-)belasting	Paragraaf B10, [1]	Kans op olie lekkage uit aandrijving	Paragraaf B10, [1]
Hydraulische belasting komt niet rechtstreeks op de aandrijving	Paragraaf B10, [1]	Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	Paragraaf B10, [1]
Verminderde kans op aanvaring		Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[5]
Robuust en hoge stijfheid	Paragraaf B10, [6]	Veel wrijving op afdichtingen aan de zijkant	Paragraaf B10, [1]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Armen van deur gevoelig voor knikken (zware armen benodigd)	Paragraaf B10, [1]
Ongelimiteerde doorvaarhoogte		Gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	Paragraaf B10, [4]	Transport en (de-)installatie zwaar en complex	Paragraaf B10
Korte sluit- en opentijd	Paragraaf B10		
Te bewegen onder stroming en verval	Paragraaf B10, [2]		
Geen of kleine sponningen benodigd	Paragraaf B10, [1], [3]		
Er hoeven geen kleppen toegepast te worden			
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)			
Lange levensduur	Paragraaf B10		

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen. Het vervolg van het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee.

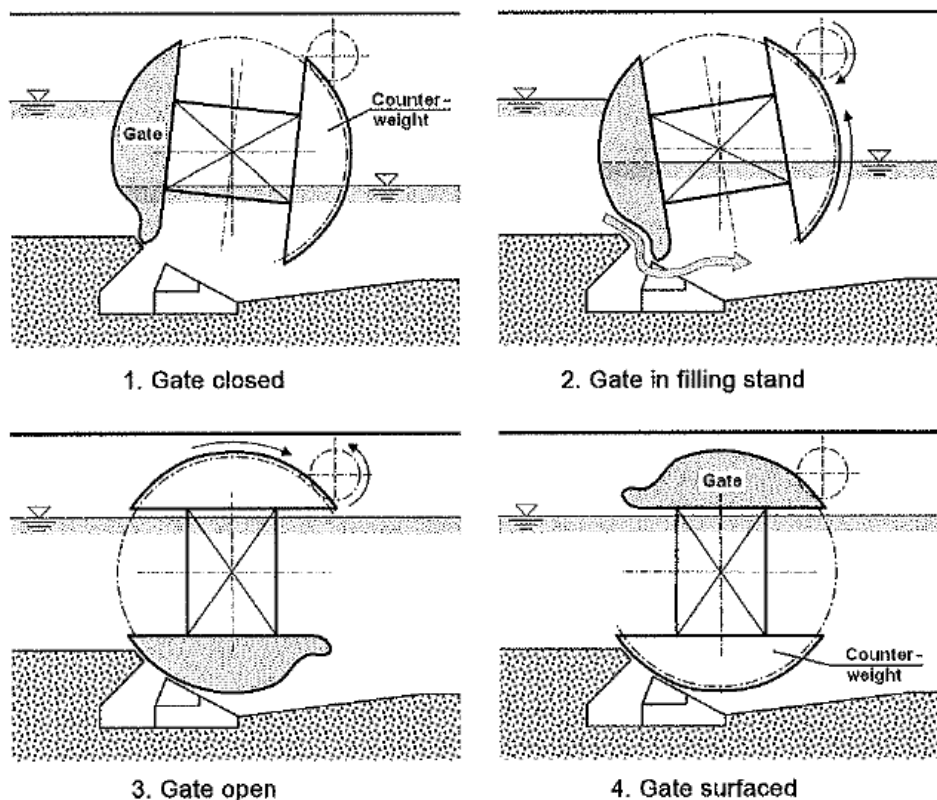
B12 Roterende segmentdeur

De roterende segmentdeur (rotary segmentgate) onderscheidt zich doordat hij volledig om zijn as kan draaien. Hierdoor is deze segmentdeur multifunctioneel. De roterende segmentschuif is vooral van toepassing in sluizen door deze multifunctionele toepassing. Vaak bevat het stuwmiddel een contragewicht waardoor het openen en sluiten van het keermiddel minder energie kost. Figuur 45 maakt de werking van dit stuwmiddel duidelijk. De roterende segmentdeur wijkt af van de overstroombare segmentdeur door het bewegingswerk. De overstroombare segmentdeur is een schuif die met een arm vastzit aan een scharnier. De roterende segmentdeur daarentegen zit vast aan een schijf dat in de pijlers zit en volledig om zijn as kan draaien. Deze schijven zitten in de pijlers aan weerszijden van de roterende segmentdeur.

De economische breedte van roterende segmentdeuren varieert van 16 tot 80 m. De economische hoogte van de deur is maximaal 8 m (Dijk & van der Ziel, 2010) (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 19 geeft de voor- en nadelen van de roterende segmentdeur.

Tabel 19: Voor- en nadelen roterende segmentdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Multifunctioneel	[1]	Zware deurconstructie	[1]
Ongelimiteerde doorvaarhoogte (zonder contragewicht)	[1]	Lange en grote pijlers/constructie nodig	[1]
Geen regelkleppen benodigd		Bodem van deur gevoelig voor sediment en puin	[1]
Dubbelkerend	[1]	Gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	[1]
Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil doorvoeren		Waterdicht maken van constructie is moeilijk	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Inspectie in kleine ruimtes	[1]
Aandrijving slechts aan één zijde noodzakelijk	[1]	Moeilijk te construeren en transporteren	[1]
Weinig energie nodig om te openen	[1]	Veel materiaalgebruik	
Geen sponningen nodig	[1]	Vispassage door stuw moeilijk	[1]
Te bewegen onder stroming en verval		Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
Boven- en onderstroom mogelijk	[1]		
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk			
Lange levensduur			
In stationaire positie geen belasting op aandrijving			



Figuur 45: Werking roterende segmentdeur (Daniel & Paulus, 2018).

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, dus het vervolg van het onderzoek weegt dit stuwmiddel verder af.

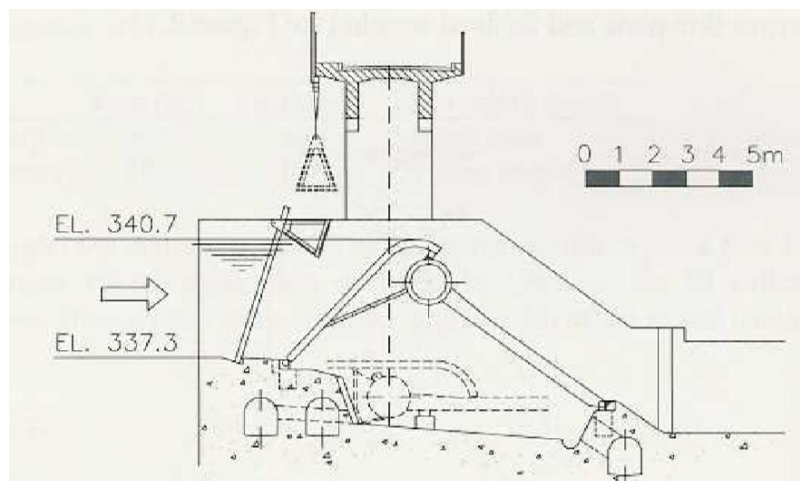
B13 Dakstuw

De dakstuw (roofgate), ook wel dubbelklep genoemd, bestaat uit een tweetal platen die over elkaar heen vallen. Beide platen zijn scharnierend over de horizontale as, dwars op de doorstroomrichting, verbonden met de bodem van de watergang. De ene plaat is aan de bovenstroomse zijde verbonden en de andere plaat aan de benedenstroomse zijde. Aan het uiteinde van de plaat aan de benedenstroomse zijde bevindt zich een roller waar de bovenstroomse plaat overheen kan rollen. Onder de platen bevindt zich een holle ruimte die zich kan vullen met water. Als deze ruimte zich vult zullen de platen gaan 'staan', waardoor de platen een omgekeerde 'V' vormen. Deze omgekeerde 'V' sluit de watergang af waardoor de bovenstroomse klep het water stuwt. Als de met water gevulde ruimte ledigt, zakt de benedenstroomse plaat weer waarna de bovenstroomse plaat over de benedenstroomse plaat heen rolt. Dit stuwmiddel werkt dus volledig door waterdruk, hierdoor is geen aandrijving benodigd. Figuur 46 (Erbisti, 2004) laat het principe van deze dakstuw zien.

De economische breedte van de dakstuw varieert van 12 tot 50 m (Daniel & Paulus, 2018). De economische hoogte van de dakstuw is maximaal 7 m (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 20 geeft de voor- en nadelen van de dakstuw.

Tabel 20: Voor- en nadelen van de dakstuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [4]: (Erbisti, 2004), [5]: (Snel, 1987).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Goedkoop in constructie	[4]	Uitsparingen benodigd	[1]
Maakt gebruik van waterdruk om te openen en sluiten (geen aandrijving benodigd)	[4]	Complexe constructie	[1]
Weinig energieverbruik		Enkelkerend	[1]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Uitsparing in bodem gevoelig voor sedimentatie	[1]
Stabiele constructie	[1]	Afdichting tussen beide platen moeilijk	[1]
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[1]	Inspectie en onderhoud onder water	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Kans op verstopping van in- en uitstroomconstructie van holle ruimte	[1]
Geen sponningen benodigd	[1]	Afdichtingen aan zijkant ondervinden veel slijtage	[1]
Geen kans op olieverontreiniging van water	[1]	Vispassage door stuw onmogelijk	[1]
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	[1]	Omvangrijke onderbouw	[5]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Slijtagegevoelig (scharnieren onder water)	[5]
Te bewegen onder stroming en verval		Lange sluit- en opentijd	
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Duur in onderhoud	
Verminderde kans op aanvaring		In- en uitstroom uitsparing niet te gebruiken bij bevroren water	
Geen regelkleppen voor fijnregulatie benodigd		Onderstroom niet mogelijk	
		Onderhoudsgevoelig	
		Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	
		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	



Figuur 46: Schematisering dakstuw (Erbisti, 2004).

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eis, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-8: Onderdelen onder de kleppen zijn extreem moeilijk te bereiken.

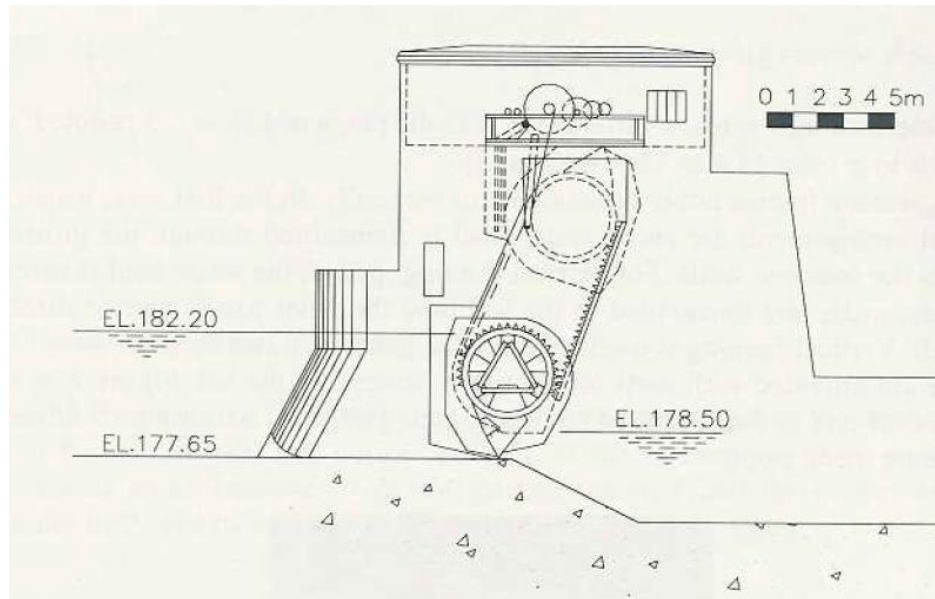
B14 Oprollende cilinderdeur

De oprollende cilinderdeur bestaat uit een grote stalen holle cilinder. De cilinder kan over een tandbaan, die zich in de pijlers bevindt, met kabels omhooggetrokken worden. De oprollende cilinderdeur fungeert goed wanneer sprake is van lage waterhoogtes in combinatie met brede stuwopeningen. Ook fungeert dit stuwtype goed op locaties waar vaak sprake is van grote hoeveelheden drijvend ijs. Water stroomt zowel over de stalen cilinder heen als onder de stalen cilinder door. In gesloten stand rust de stalen cilinder op de bodem, in deze situatie is de watergang dus afgesloten. De stuw opent door de cilinder omhoog te trekken. Omdat de cilinder van binnen hol is, heeft de cilinder een redelijk grote drijfkracht. Dit zorgt ervoor dat de vereiste hefkracht voor het heffen van deze deur niet groot hoeft te zijn. Kleppen op de cilinder kunnen bovenstroom over het stuwmiddel reguleren. Figuur 47 laat het principe van dit stuwmiddel zien.

De economische breedte van de oprollende cilinderdeur varieert van 6 tot 50 m, de economische hoogte is maximaal 5 m (Dijk & van der Ziel, 2010) (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 21 geeft de voor- en nadelen van de oprollende cilinderdeur.

Tabel 21: Voor- en nadelen van de oprollende cilinderdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [5]: (Snel, 1987).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Inspectie en onderhoud voor het grootste gedeelte boven water		Grote pijlers nodig	[1]
Te bewegen onder stroming en verval	[1]	Zware constructie met veel materiaalgebruik	[1]
Zowel onder- als bovenstroom mogelijk	[1]	Enkelkerend	[1]
Bekende en bewezen technologie		Grote waterdrukken op constructie	[1]
Slechts aan één zijde aandrijving nodig		Stalen cilinder dient volledig waterdicht te zijn	[1]
Kleine faalkans (1 aandrijving en door grote breedtes weinig stuwopeningen nodig)	[1]	Intensief en frequent onderhoud	[1]
Enige afwijkingstolerantie bij installatie mogelijk	[1]	Moeilijk te construeren en transporteren	
Geen uitsparingen nodig	[1]	Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	[1]
Nauwkeurig waterstanden te reguleren	[1]	Stuw veroorzaakt gevaarlijke (rollende) stroming benedenstrooms van de stuw	[1]
Weinig kans op trillingen		Afdichting van stuwmiddel is complex, veel wrijving op afdichting aan zijkant	[1]
Lange levensduur (100 jaar)	[1]	Grote heftorens boven maaiveld (horizonvervuiling)	[1]
Korte sluit- en opentijd	[1]	Vispassage door stuw onmogelijk	[1]
Geen uitsparingen benodigd		Gelimiteerde doorvaarthoogte	
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Niet gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[1]	(Zware) aandrijving benodigd	
Uit te breiden met kleppen		Arbeids- en materiaal-intensieve constructie	[5]
Eenvoudig te opereren	[1]	Risico op aanvaring	
Niet gevoelig voor menselijke fouten		(Bij toepassing van) Regelkleppen: verbinding tussen regelklep en vaste land voor kabels en leiding erg ingewikkeld door verticale verplaatsing, extra onderhoud	

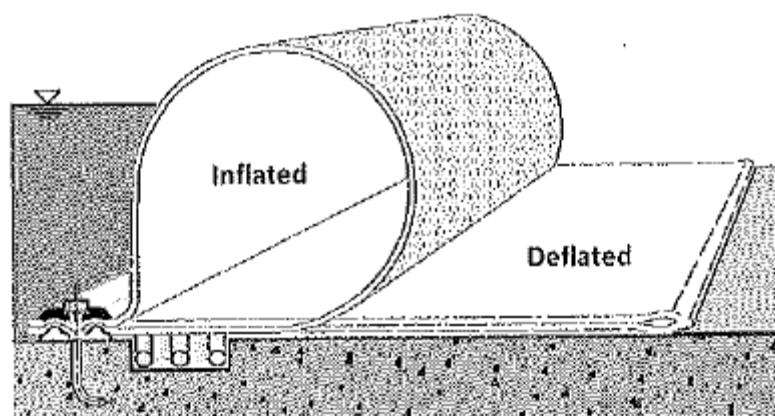


Figuur 47: Schematisering oprollende cilinderdeur (Erbisti, 2004).

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, mits kleppen op de stuw worden toegepast. Het stuwmiddel wordt verder afgewogen in het onderzoek.

B15 Balgstuw

Het principe van een balgstuw (inflatable weir) is simpel, het betreft een rubberen ‘zak’ die zichzelf opblaast. Om het keermiddel te sluiten vult dit rubberen membraan zich met lucht of water. Hierdoor blaast de balg zich op waardoor de doorstroomopening sluit. De doorgang opent door de lucht of het water weer uit te laten. Hierdoor zakt het membraan weer op de bodem en kan het water, en mogelijk ook scheepvaart, de stuw weer passeren. Het is ook mogelijk om de stuw niet volledig te openen door minder lucht of water in te laten, hierdoor is peilregulatie mogelijk. Dit gaat echter niet nauwkeurig. Figuur 48 laat het principe van de balgstuw zien.



Figuur 48: Schematisering balgstuw (Daniel & Paulus, 2018).

De economische breedte van de balgstuw varieert van 20 tot 40 m (InCom Working Group, 2005). De economische hoogte van de balgstuw is maximaal 7 m (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 22 geeft de voor- en nadelen van de balgstuw.

Tabel 22: Voor- en nadelen van de balgstuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [5]: (Snel, 1987), [6]: (InCom Working Group, 2005), [10]: (Ziel, 2009).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Bekende en bewezen technologie	[1]	Enkelkerend	[1]
Eenvoudige civiele constructie (lichte constructie en fundatie)	[1]	Gevoelig voor drijfvuil, aanvaringen en ijsgang (puntbelastingen)	[1]
Weinig ruimtebeslag voor constructie en fundatie	[1]	Niet modulair	[1]
Goedkoop in constructie en onderhoud	[1]	Korte levensduur (tussen 30 en 40 jaar)	[1]
Maakt gebruik van water- of luchtdruk om te openen en sluiten (flexibel)	[1]	Lange sluit- en opentijd	[1]
Geen kans op olieverontreiniging van water	[1]	Vullen met water in tijden van vorst niet altijd mogelijk	[1]
Geen uitsparingen of sponningen benodigd	[1]	Bepaalde gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	[1]
Geen kans op corrosie	[1]	Rubber niet goed bestand tegen ultraviolet licht	[1]
Rubber is uit zichzelf al waterdicht	[1]	Moeilijk om het rubberen membraan in geopende stand goed op te bergen op bodem	[1]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Vispassage door stuw moeilijk	[1]
Traploze regeling van peil mogelijk	[1]	Kans op het veroorzaken van trillingen	[1]
Korte constructietijd	[10]	Stuw veroorzaakt gevaarlijke (rollende) stroming benedenstrooms van de stuw	[1]
Weinig energieverbruik		Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	[5], [10]
Minimaal bewegingswerk benodigd		Gevoelig voor vuur	[1]
Weinig onderdelen (kleinere faalkans en minder onderhoud)	[10]	Gevoelig voor vandalisme	[10]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Doordat het sluiten moeizaam gaat is de bedrijfszekerheid niet altijd te garanderen	[5]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Alleen geschikt bij brede openingen met relatief ondiepe drempels	[10]
Te bewegen onder stroming en verval		Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Licht materiaal	[10]	Nog weinig ervaring met de toepassing van doorvaarbaarheid bij een balgstuw	[6]
Niet gevoelig voor sediment en objecten op de bodem		Risico op lekkage in het rubber	[6]
Niet onderhoudsgevoelig		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Enige afwijkingstolerantie bij installatie mogelijk		Geen onderstroom mogelijk	
Snel te openen in noodsituaties		De mechanische onderdelen liggen onder water	[6]
		Voor inspectie van rubber moet de stuw drooggezet worden	[6]

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

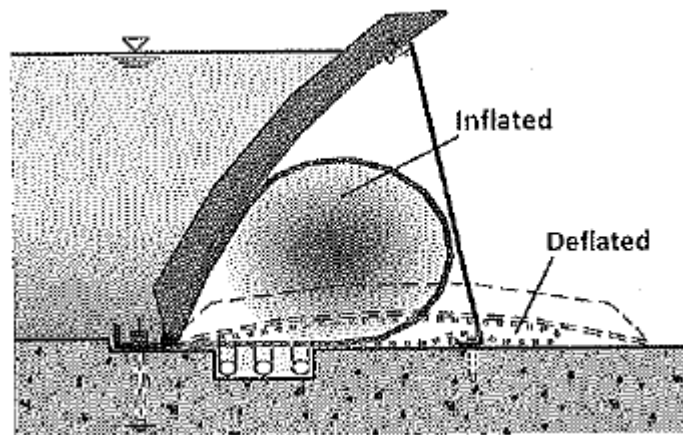
- OntwEis-3: Het stuwmiddel is niet bestand tegen stootkrachten.
- OpdrEis-6: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B16 Klep-balgstuw

De klep-balgstuw (Obermeyer gate) is een combinatie tussen de klepstuw (zie paragraaf B3) en de balgstuw (zie paragraaf B15). Het principe van dit stuwmiddel is een klep met een balg eronder als aandrijving, de klep is scharnierend verbonden aan de drempel en de balg is geplaatst aan de benedenstroomse zijde. Als de stuw geopend is, ligt de klep over de balg heen op de bodem. De stuw sluit vervolgens door water of lucht in het de balg te laten. Hierdoor blaast de balg op en duwt het de klep naar boven. De watergang sluit hierdoor af, het water is nu gestuwd. Figuur 49 maakt dit principe duidelijker. De klep-balgstuw bevat vaak meerdere kleppen naast elkaar en niet slechts één klep over de volledige breedte van de watergang. De economische breedte van de klep-balgstuw varieert van 20 tot 120 m. De economische hoogte is maximaal 8 m (Obermeyer Hydro inc, 2018). Tabel 23 geeft de voor- en nadelen van de klep-balgstuw.

Tabel 23: Voor- en nadelen van de klep-balgstuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [6]: (InCom Working Group, 2005), [7]: (Verduijn, 2014), [10]: (Ziel, 2009).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Niet onderhoudsgevoelig	[7]	Enkelkerend	[7]
Efficiënt en goedkoop ontwerp	[7]	(Ondiepe) uitsparing benodigd	
Geen kans op olieverontreiniging van water		Onbekende technologie	
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	[7]	Korte levensduur balg (tussen 30 en 40 jaar)	Paragraaf B15 , [1]
Rubber is uit zichzelf al waterdicht	Paragraaf B15, [1]	Lange sluit- en opentijd	Paragraaf B15 , [1]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[7]	Bepaalde gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken; Inspectie en onderhoud onder water	
Traploze regeling van peil mogelijk	[7]	Nog weinig ervaring met de toepassing van doorvaarbaarheid bij een klep-balgstuw	Paragraaf B15 [6]
Korte constructietijd	Paragraaf B15 , [10]	Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Maakt gebruik van waterdruk om te openen en sluiten, minimaal bewegingswerk benodigd	Paragraaf B15 , [1]	Onderstroom niet mogelijk	Paragraaf B15
Meerdere kleppen (als één faalt is het gevolg minder groot)		Balg gevoelig voor vuur	Paragraaf B15 ([1])
Klep beschermt het rubberen membraan tegen ijsgang, aanvaringen en drijfvuil		Gevoelig voor vandalisme	Paragraaf B15 , [10]
Klep beschermt het rubberen membraan tegen het schadelijke ultraviolet licht			
Ongelimiteerde doorvaarhoogte	Paragraaf B15		
Te bewegen onder stroming en verval	Paragraaf B15		
Weinig materiaalgebruik, eenvoudige civiele constructie	Paragraaf B15 , [1]		
Geen sponningen benodigd			
Niet gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	Paragraaf B15		
Eenvoudig te opereren			
Niet gevoelig voor menselijke fouten	Paragraaf B15		
Verminderde kans op aanvaring (verdwijnt bij openen onder water)			
Snel te openen in noodsituaties	Paragraaf B15		



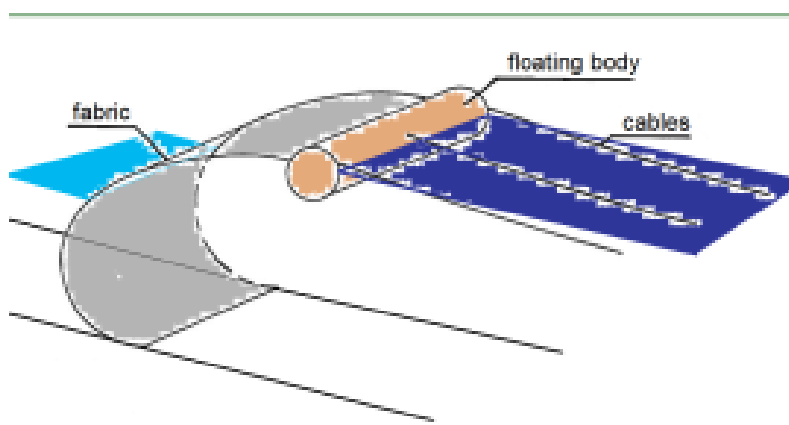
Figuur 49: Schematisering klep-balgstuw (Daniel & Paulus, 2018).

Het stuwmiddel voldoet aan de gestelde eisen, het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee in verdere afwegingen.

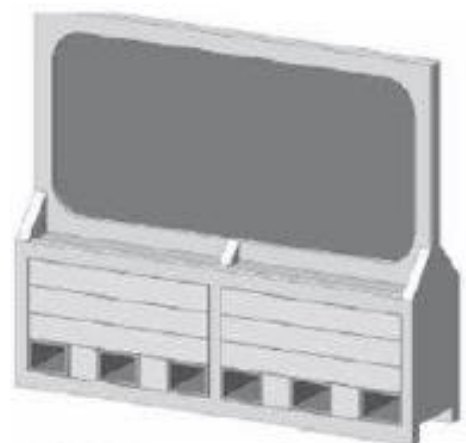
B17 Membraanstuw

Een andere toepassing van een rubberen membraan is te vinden bij de membraanstuw (open fabric water barrier). Dit stuwtype wordt niet veel toegepast. De stuw bestaat uit een enkel rubberen membraan dat aan de onderzijde vast zit aan de drempel van het stuwcomplex. Het membraan zit aan de bovenzijde vast aan een drijvende cilinder, die op het water drijft. Het membraan vormt een soort van parachute. De waterdruk en stroming aan de bovenstroomse zijde zorgen ervoor dat het membraan opbolt. De binnenzijde van het membraan houdt het water tegen. Kabels die aan de drijvende cilinder zitten zorgen ervoor dat deze drijvende cilinder op zijn plek blijft. Figuur 50 laat het principe van de stuw zien.

Van de membraanstuw bestaan meerdere varianten, de hierboven beschreven variant is hier een van. Het principe van al deze varianten, het keren van water met een rubberen membraan, is voor alle varianten gelijk. Een voorbeeld van een andere variant is een raamwerk met een rubberen membraan dat in de watergang schuift. Figuur 51 laat dit systeem zien.



Figuur 50: Schematisering membraanstuw (Ziel, 2009).



Figuur 51: Variant van de membraanstuw (Molenaar W. , 2011).

De economische breedte van de membraanstuw varieert van 10 tot 200 m met een maximale hoogte van 5,5 m met een verval van maximaal 4,5 m (Ziel, 2009). Tabel 24 geeft de voor- en nadelen van de membraanstuw.

Tabel 24: Voor- en nadelen membraanstuw. Bron: [10]: (Ziel, 2009).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Korte bouwtijd	[10]	Enkelkerend	[10]
Weinig en licht materiaal	[10]	Korte levensduur (30 jaar)	[10]
Relatief goedkoop	[10]	Geen (gedetailleerde) regulering van de waterstanden mogelijk	[10]
Weinig onderhoud	[10]	Onbekende technologie	
Weinig bewegingswerken	[10]	Niet bestand tegen puntbelasting door drijfvuil, ijsgang en overige objecten	
Krachten worden deels opgevangen door beweging van membraan	[10]	Kan in gesloten stand moeilijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren	
Goed te combineren met een brug	[10]	Onderstroom niet mogelijk	
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Fragile constructie	
Eenvoudige civiele constructie		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Goedkoop in constructie en onderhoud		Moeilijk te opereren	
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)			
Geen uitsparingen en sponningen benodigd			
Innovatief stuwmiddel			
Verminderde kans op aanvaring			
Gemakkelijk te construeren en transporteren			
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)			
Weinig energieverbruik			
Te bewegen bij stroming en verval			

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom weegt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet verder af:

- OntwEis-3: Het stuwmiddel is niet bestand tegen stootkrachten.
- OntwEis-10: Het stuwmiddel is niet bestand tegen ijsbelasting.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

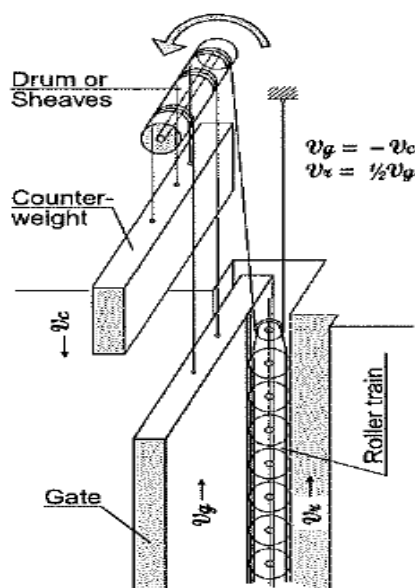
B18 Hefdeur

De hefdeur (liftgate) bestaat uit een grote deur die in verticale richting kan bewegen. Een hefmechanisme, dat zich bevindt in twee heftoren aan beide zijdes van de watergang, kan de deur volledig uit het water tillen. In deze geheven stand stroomt het water vrij door. De stuw sluit door de hefdeur in het water te laten. Hierbij ontstaat een onderstroom onder de hefdeur door, totdat de deur volledig op de drempel staat. Dit stuwmiddel kenmerkt zich door de grote heftoren die nodig zijn om de deur te kunnen heffen. Dit stuwmiddel is door de jaren heen op veel verschillende manieren gebruikt, waardoor momenteel veel verschillende varianten van de hefdeur bestaan. Onderstaande opsomming geeft een verzameling van deze varianten weer. Het beperkt zich tot de meest gebruikelijke varianten van de hefdeur. Combinaties van deze varianten zijn ook mogelijk, deze zijn niet uitgewerkt:

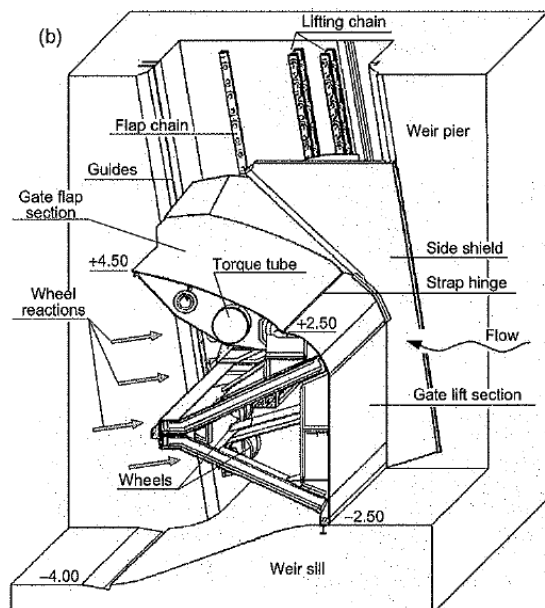
- De **rol-hefdeur**: deze variant gebruikt rollers voor de hefbeweging. Hierbij loopt de deur over grote stalen rollers die aan de deur zitten door een rolbaan in de heftoren. Dit is de meest toegepaste variant van de hefdeur.
- De **glij-hefdeur (slide gate)**: deze variant volgt hetzelfde principe als de rol-hefdeur, echter vindt de beweging bij de glij-hefdeur plaats doordat de deur 'glijdt' over glijders die aan de heftoren zitten.
- De **ketting-hefdeur (caterpillar gate)**: bij deze variant beweegt de deur doordat grote kettingen, die aan de deur vastzitten, in tanden vallen die in het betonwerk van de heftoren zitten. De kettingen

kunnen de deur heffen wanneer de kettingen als een fietsketting gaan lopen. Het principe werkt vergelijkbaar als een fietsketting. Deze variant heeft ook de naam rupsbaan-hefdeur.

- De **Stoneyhefdeur**: de Stoneyhefdeur heeft de naam van degene die deze variant heeft geïntroduceerd. Bij deze variant hangt de hefdeur aan een as, waar ook een contragewicht en een 'roller train' aanhangt. Deze 'roller train' hangt in de sponning en zorgt voor de aandrijving van de deur. De 'roller train' zorgt voor het bewegen van de deur, Figuur 52 laat dit zien.
- De **hefdeur met klep**: met een gewone hefdeur is fijn-regulatie van de waterstanden niet goed mogelijk. Sommige stuwen lossen dit op door het toepassen van kleppen op de deur. Deze kleppen reguleren de waterstand in tijden van lage afvoer met een bovenstroom over de hefdeur heen. Als sprake is van grote afvoer heft de stuw de hefdeur volledig waardoor het water vrij kan doorstromen. Figuur 53 laat de hefdeur met klep zien zoals het is toegepast in de Maas bij Lith.
- De **hef-kanteldeur**: deze hefdeur verschilt met de andere hefdeuren omdat deze variant de hefdeur in de geopende stand volledig horizontaal kantelt. Hierdoor reduceert het onder andere de windbelasting op de hefdeur en realiseert het een grotere doorvaarthoogte;
- De **overheaddeur**: ook de overheaddeur staat in geheven stand horizontaal. Bij deze variant lopen wielstellen aan de onderzijde van de deur over een verticale rolbaan en wielstellen aan de bovenzijde van de deur over een horizontale rolbaan. De open- en sluitbeweging van deze deur is vergelijkbaar met die van een garagedeur;
- De **dubbele hefdeur**: deze hefdeur bestaat uit een tweetal hefdeuren die los van elkaar kunnen bewegen. Dit stuwmiddel verschilt wezenlijk van de andere hefdeuren. Om deze reden behandelt paragraaf B19 dit stuwmiddel apart.



Figuur 52: Werking Stoneyhefdeur (Daniel & Paulus, 2018).



Figuur 53: Hefdeur met klep (Daniel & Paulus, 2018).

Het vervolg van het onderzoek neemt niet al deze varianten mee. Voor de locatie bij Grave is de rol-hefdeur met klep de meest gunstige variant, aangezien deze het meest aansluit bij de eisen en functies die gelden voor een stuw bij Grave. Het is bijvoorbeeld enige variant die aan OpdrEis-5, 'de stuw dient de waterstanden nauwkeurig te reguleren', voldoet. Bovendien is het rolmechanisme als aandrijfmechanisme het meest geschikt omdat deze de minste wrijffweerstand heeft. Hierdoor is het rolmechanisme het meest betrouwbaar.

De maximale economische breedte van hefdeuren kan variëren van 6 tot 40 en de economische hoogte van hefdeuren is maximaal 10 m (Daniel & Paulus, 2018) (InCom Working Group, 2005). Tabel 25 geeft de voor- en nadelen van de rol-hefdeur met klep.

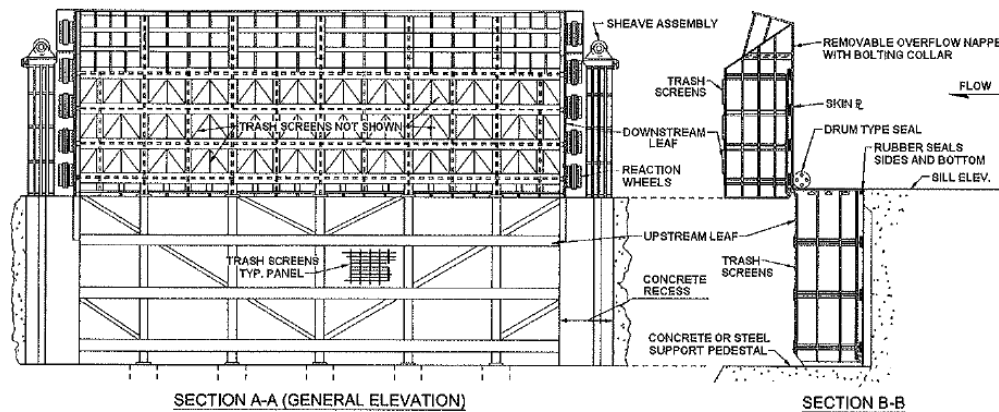
Tabel 25: Voor- en nadelen van de rol-hefdeur met klep. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W. , 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [4]: (Erbisti, 2004), [6]: (InCom Working Group, 2005), [7]: (Verduijn, 2014).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Weinig oppervlakte benodigd	[2]	Gelimiteerde doorvaarthoogte	[2]
Te bewegen onder stroming en verval	[2]	Grote en hoge constructie door heftorens	[2]
Geen uitsparingen benodigd	[1]	Verbinding tussen regelklep en vaste land voor kabels en leiding erg ingewikkeld door verticale verplaatsing, extra onderhoud	
Te bewegen als de deur onder water is	[2]	Grote watersnelheden door onderste kier bij openen	[2]
Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil doorvoeren		Water lekt van de deur af in geopende stand	[2]
Statisch bepaalde constructie	[2]	Rollers van de deur zijn erg onderhoudsgevoelig	[2]
Eenvoudig te opereren		Grote sponning benodigd	[4]
Gelijkmatige overdracht van belastingen op beton	[4]	Grote windbelasting op hefdeur in geheven stand	[1]
Te sluiten door eigen gewicht	[1]	Objecten boven maaiveld (horizonvervuiling en belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]
Bekende en bewezen technologie	[1]	Grote/zware aandrijving benodigd	[1]
Dubbelkerend	[1]	Bij contragewichten is balans gemakkelijk te verstoren door puin en ijs-aangroei	[1], [2]
Relatief goedkoop in onderhoud en constructie	[1]	Risico op aanvaring	
Niet gevoelig voor menselijke fouten		Gecomplceerde deurgeleiding	[3]
Korte sluit- en opentijd	[1]	Transport en (de)-installatie van deur moeilijk/zwaar	[1]
Redelijk bestand tegen sediment en gezonken obstakels	[1]	Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
Inspectie en onderhoud van deur kan boven water	[1]	Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	
Constructie is gemakkelijk te fabriceren	[6]	Grote wrijfkrachten	[6]
Geen lange pijlers nodig	[3]	Bewegende belasting in sponningen	[6]
Lange levensduur		Mechanismes onder water	[6]
Boven- en onderstroom mogelijk			
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[7]		
Weinig onderhoud	[4]		

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, mits kleppen op de stuw worden toegepast. Het vervolg van het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee in verdere afweging.

B19 Dubbele hefdeur

Deze hefdeur (double-section lift Gate) bestaat uit een tweetal hefdeuren die los van elkaar kunnen bewegen. Hierdoor zijn meer soorten van stroming door de stuw mogelijk, zo kunnen beide hefdeuren op de bodem steunen, waardoor een bovenstroom ontstaat. Ook een onderstroom of een stroming tussen de twee delen door is mogelijk. Varianten met meer dan 2 deuren bestaan ook. Verschillende hefmechanismen kunnen worden toegepast, zoals in paragraaf B18 genoemd, te weten een rolsysteem, glijsysteem, kettingsysteem of een Stoneysysteem. Het vervolg van het onderzoek zal het meest gebruikte hefsysteem, het rolsysteem, als hefsysteem van de dubbele hefdeur meenemen. Figuur 54 geeft dit stuwmiddel weer.



Figuur 54: Dubbele hefdeur (Daniel & Paulus, 2018).

De maximale economische breedte van hefdeuren kan variëren van 6 tot 20 en de economische hoogte van hefdeuren is maximaal 5,5 m (Daniel & Paulus, 2018) (InCom Working Group, 2005). Tabel 26 geeft de voor- en nadelen van dubbele hefdeuren.

Tabel 26: Voor- en nadelen van de dubbele hefdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Molenaar W., 2011), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [5]: (Snel, 1987), [6]: (InCom Working Group, 2005).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Bekende en bewezen technologie		Gecompliceerd deurgeleiding en bewegingswerken	[3]
Korte sluit- en opentijd		Relatief duur in constructie en onderhoud	
Te bewegen onder stroming en verval	Paragraaf B18, [2]	Objecten boven maaiveld (horizonvervuiling en belemmering van zicht voor scheepvaart)	[5]
Geen uitsparingen benodigd		Veel materiaalgebruik	[5]
Inspectie en onderhoud kan boven water		Diepe sponningen benodigd	[3]
Doordat de belasting wordt verdeeld over meerdere deuren is kleinere aandrijving voldoende	[1]	Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Dubbelkerend	Paragraaf B18, [1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	
Verminderde kans op aanvaring		Grote kans op lekkage tussen beide deuren	[1]
Boven- en onderstroom mogelijk	[1]	Onderhoudsgevoelig	
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[1]	Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	Paragraaf B18
Deur is relatief gemakkelijk te construeren	Paragraaf B18, [6]	Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	Paragraaf B18
Eenvoudig te opereren	Paragraaf B18	Dubbel bewegingsmechanisme (voor beide deuren) benodigd	[5]
Geen regelkleppen voor fijnregulatie benodigd		Afdichting van stuwmiddel is complex	
Lange levensduur	Paragraaf B18	Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
Niet gevoelig voor menselijke fouten	Paragraaf B18	Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
Ongelimiteerde doorvaarhoogte	[1]	Kans op ongelijke vervorming van beide schuiven	
Lagere heftoren dan de gewone hefdeur benodigd	[1]		

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen, dus het vervolg van het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee.

B20 Schotbalken

Het stuwmiddel 'schotbalken' (stop logs) sluit door schotbalken te plaatsen in daarvoor bestemde sponningen in wanden. Bij veel stuwen plaatst en een kraantje deze schotbalken in de sponningen. Hierbij rijdt de kraan boven de stuw langs over een railbaan om de schotbalken neer te laten of te heffen. Schotbalken vervullen vaak de (tijdelijke) functie van het droogzetten van waterbouwkundige kunstwerken, zoals stuwen en sluizen. Vaak is sprake van meerdere schotbalken boven elkaar.

De geschatte economische breedte van schotbalken als stuwmiddel varieert van 8 tot 40 m. (Daniel & Paulus, 2018) Maximale economische hoogtes en vervallen van schotbalken worden maximaal geschat (bij stapeling) op 10 m. Tabel 27 geeft voor- en nadelen van schotbalken als stuwmiddel.

Tabel 27: Voor- en nadelen schotbalken. Bron: [7]: (Verduijn, 2014).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Eenvoudige constructie		Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	[7]
Weinig ruimtebeslag		Veel handwerk	[7]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Lange sluit- en opentijd	
Bekende technologie		Onderhoud is gevaarlijk	
Goedkoop in onderhoud		Sponningen benodigd	
Goedkoop in constructie		Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Gevoelig voor menselijke fouten	
Te bewegen onder stroming en verval		Korte levensduur	
Weinig materiaalgebruik		Gevoelige onderdelen onder water of moeilijk te bereiken	
Geen uitsparingen benodigd		Onderstroom niet mogelijk	
Enige afwijkingstolerantie bij installatie mogelijk		Moeilijk te opereren	
Dubbelkerend		Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	
Niet onderhoudsgevoelig		Afdichting van stuwmiddel is complex	
Gemakkelijk te construeren en transporteren		Inspectie en onderhoud onder water	
Geen kans op olieverontreiniging van water		Niet te bewegen bij extreme situaties	
Weinig energieverbruik			

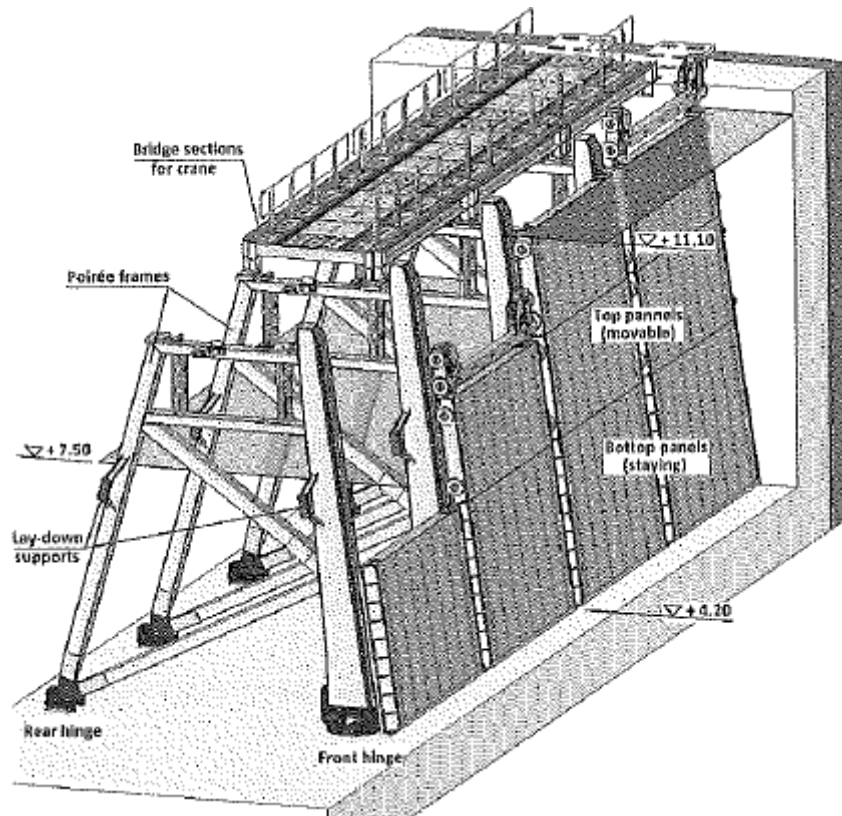
Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-2: Het stuwmiddel voldoet niet aan de betrouwbaarheidsklasse zoals gesteld in de ROK.
- OntwEis-9: Het stuwmiddel is niet te openen en sluiten bij extreme omstandigheden.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B21 Poiréestuw

Paragraaf A2.5 geeft informatie over de Poiréestuwen (needle dam) die zijn toegepast op enkele locaties in de Nederlandse Maas. Het principe van Poiréestuw is vergelijkbaar met het principe van schotbalken. Een Poiréestuw bestaat uit meerdere onderdelen. Ten eerste bestaat het uit jukken die op de bodem van de watergang staan. Deze jukken kunnen tegen de bodem klappen, waarbij ze volledig plat komen te liggen. Als

de jukken omhoog staan kunnen schotten tussen deze jukken schuiven. In vergelijking met de schotbalken vervullen de jukken dus de functie van schotbalksponningen en de schotten tussen deze jukken de functie van de schotbalken. Boven op de jukken bevindt zich een kraanbaan. Over deze kraanbaan rijdt een kraantje die de schotten tussen de jukken uit kan heffen en vervoeren naar een nabijgelegen opslaglocatie. In tijden van hoog water zal deze kraan de schotten weghalen waardoor het water kan doorstromen. Als sprake is van extreem hoog water kan deze kraan ook de kraanbaan in delen optillen en wegbrengen. Hierdoor blijven alleen de jukken in de doorstroomopening over. Deze jukken kunnen neerklappen in dwarsrichting van de watergang. Hierdoor is de doorstroomopening helemaal vrij en kan water, en mogelijk ook scheepvaart, de stuw zonder hinder passeren. Het sluiten van de stuw gaat vervolgens op dezelfde manier, in omgekeerde volgorde. Figuur 55 laat het systeem en de verschillende componenten van de Poiréestuw bij Sambeek zien.



Figuur 55: Poiréestuw Sambeek (Daniel & Paulus, 2018).

Een variant op de Poiréestuw is de brugstuw. De huidige stuw bij Grave maakt gebruik van dit systeem, waarbij de jukken niet naar beneden op de bodem klappen maar omhoog tegen de bovenliggende brug aan. Paragraaf A3.3 beschrijft dit systeem uitgebreider. Het onderzoek neemt deze variant verder niet mee, aangezien de nieuwe stuw geen brug zal bevatten.

De economische breedte van de Poiréestuw varieert van 1 tot 4 m van juk tot juk, de totale breedte is ongelimiteerd (Verduijn, 2014). De economisch maximale hoogte van de Poiréestuw is maximaal 7 m (Daniel & Paulus, 2018) met een maximaal verval van 4 m (Verduijn, 2014). Tabel 28 geeft de voor- en nadelen van de Poiréestuw.

Tabel 28: Voor- en nadelen van de Poiréestuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [5]: (Snel, 1987), [7]: (Verduijn, 2014).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Bekende technologie	[1]	Zeer lange sluit- en opentijd	[1]
Ongelimiteerde breedte	[1]	Enkelkerend	[1]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte		Onderhoudsgevoelig	[1]
Lichte staalconstructie	[1]	Onveilig	[1]
Weinig ruimtebeslag	[1]	Gevoelige onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	[1]
Modulaire constructie (makkelijk voor transport en vervangen van onderdelen)	[1]	Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	[1]
Goedkoop, snel en gemakkelijk te construeren (niet te technisch)	[1]	Afdichting van stuwmiddel is zeer complex	[1]
Weinig energieverbruik	[1]	Kan trillingen veroorzaken	[1]
Geen grote pijlers benodigd	[1]	Geen onderstroom mogelijk	
Bij aanvaring faalt niet de volledige stuw maar slechts enkele onderdelen	[1]	Complex bewegingsmechanisme	[5]
Vispassage door stuw mogelijk (te maken)	[1]	Moeilijk te automatiseren	[5]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Inspectie en onderhoud onder water	
Te bewegen onder stroming en verval		Duur in onderhoud	
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)		Zeer gevoelig voor menselijke fouten	
Geen uitsparingen en sponningen benodigd		Geen nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk	[5]
Geen regelkleppen voor fijnregulatie benodigd		Moeilijk te opereren, veel handwerk en manuren	[7]
Lange levensduur (ca. 100 jaar)		Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	
Eenvoudige civiele constructie (fundatie, pijlers)		Moeilijk waterdicht te maken	[5]
Verminderde kans op aanvaring			
Kan aanpassen aan verschillende situaties	[7]		

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eis, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B22 Afzinkbare-caisson stuw

De naam van dit stuwmiddel beschrijft de werking van de stuw goed: de afzinkbare-caisson stuw (barge gate). De stuw bestaat uit caissons die, om de stuw te sluiten, naar de stuwlocatie drijven en daar afzinken. De caissons zinken af door zich te vullen met ballast. Deze ballast kan water zijn, maar de ballast bestaat in sommige gevallen ook uit zand, stenen of ruwijzer. Het stuwmiddel bevat speciale ruimtes die zich kunnen vullen met deze ballast. Door de ballast te verwijderen zal de deur opdrijven, waarna de deur zal wegdrijven naar een speciale opslaglocatie. Hierna is de doorstroomopening weer vrij voor water en scheepvaart.

De economische breedte van afzinkbare-caisson stuwen varieert van 10 tot 80 m. De hoogte van afzinkbare-caisson stuwen is onbeperkt bij grote breedtes (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 29 geeft voor- en nadelen van de afzinkbare-caisson stuw.

Tabel 29: Voor- en nadelen van de afzinkbare-caisson stuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018).

Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Dubbelkerend	[1]	Niet te gebruiken als sluit-open beweging frequent plaatsvind	[1]
Ongelimiteerde doorvaarthoogte	[1]	Zware constructie met veel materiaalgebruik	[1]
Enige afwijkingstolerantie bij installatie mogelijk		Grote sponningen óf een aparte opslaglocatie benodigd	[1]
Weinig machines/apparaten benodigd	[1]	Dikke deur	[1]
Robuust systeem	[1]	Niet te bewegen bij stroming en verval	[1]
Makkelijk te inspecteren en onderhouden	[1]	Complex pompsysteem	[1]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)	[1]	Lange sluit- en opentijd	[1]
Van nature wandelpad over stuw (in gesloten stand) aanwezig	[1]	Niet te gebruiken als water bevroren is	[1]
Goedkoop in onderhoud		Deur moet volledig waterdicht zijn	[1]
Geen uitsparingen benodigd		Veel staal onder water (extra kosten coating en verwijderen biologische aangroei)	[1]
Lange levensduur		Afdichting erg moeilijk	[1]
Niet onderhoudsgevoelig		Gevoelig voor menselijke fouten	
Gemakkelijk te construeren en transporteren		Duur in constructie	
Weinig onderdelen (kans op falen van de stuw kleiner)		Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	
Geen kans op olieverontreiniging van water		Kan in gesloten stand ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	
Verminderde kans op aanvaring		Bovenstroom en onderstroom niet mogelijk (alles of niets)	
		Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	
		Moeilijk te opereren	
		Vispassage door stuw onmogelijk	
		Afdichting van stuwmiddel is complex	

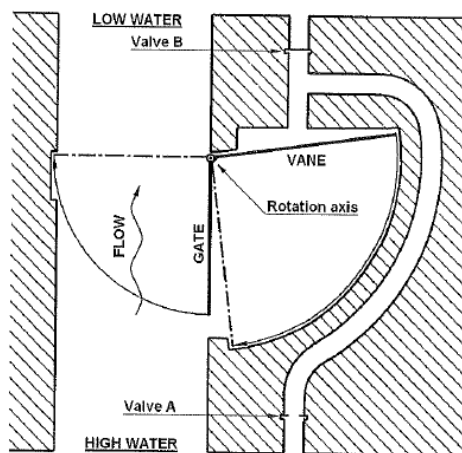
Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OntwEis-9: Het stuwmiddel is niet te sluiten en openen onder extreme omstandigheden.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B23 Waaierdeur

De waaierdeur (vane gate) is een deur die draait om een verticale as. De deur is een constructie die een tweetal bladen bevat. Eén blad kan voor de doorstroomopening draaien om het water te keren, het andere blad bevindt zich in een grote sponning. Als het bovenstroomse water stijgt, maar de waterstand in de sponning gelijk blijft, gaat waterkracht werken op dit blad. Dat zorgt ervoor dat de deur zich zal openen. Als de sponning doormiddel van leidingen vult met water, maar het bovenstroomse water op hetzelfde peil blijft, zal de deur weer sluiten door het verschil in waterdruk. Dit stuwmiddel komt voor in varianten met een enkele deur of met dubbele deuren. Figuur 56 laat een enkele waaierdeur zien.

De economisch maximale breedtes van waaierdeuren varieert van 6 tot 32 m (Daniel & Paulus, 2018). Tabel 30 geeft de voor- en nadelen van de waaierdeur.



Figuur 56: Waaierdeur (Daniel & Paulus, 2018).

Tabel 30: Voor- en nadelen van de waaierdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [3]: (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000), [5]: (Snel, 1987).

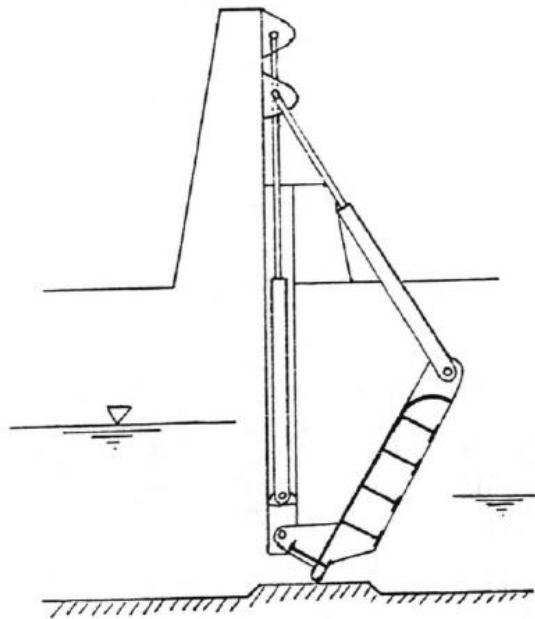
Voordelen:	Bron:	Nadelen:	Bron:
Geen aandrijving benodigd	[1]	Geen nauwkeurige waterstandregulatie mogelijk	[5]
Kan handmatig bediend worden	[1]	Zware constructie	[1]
Weinig energieverbruik	[1]	Veel ruimtebeslag (grote sponningen)	[1]
Dubbelkerend	[1]	Niet te bewegen als er geen verval is	[1]
Te bewegen bij stroming	[1]	Verval heeft invloed op snelheid openen/sluiten	[1]
Ongelimiteerde doorvaarhoogte	[1]	Gevoelig voor ijs/bevriezing van water	[1]
Pad over stuwmiddel te realiseren (geen extra brug of tunnel benodigd)	[1]	Gevoelig voor sediment en objecten op de bodem	[1]
Vul- en ledigingsmechanisme gemakkelijk te bereiken	[1]	Grote belastingen op scharnieren	[1]
Geen kans op olieverontreiniging van het water	[1]	Onderdelen in het water zijn slecht bereikbaar voor inspectie en onderhoud	[1]
Verminderde kans op aanvaring		Duur in constructie	[3]
Bekende en bewezen technologie		Geen bovenstroom mogelijk	[5]
Uit zicht (geen horizonvervuiling of belemmering van zicht voor scheepvaart)		Kan ijsgang en drijfvuil niet doorvoeren	[5]
Niet gevoelig voor menselijke fouten		In- en uitstroom kunnen verstoppen	[1]
Eenvoudig te opereren		Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
Lange levensduur		Bovenstroom en onderstroom niet mogelijk	
Weinig energieverbruik		Onderhoudsgevoelig	
		Moeilijk te construeren en transporteren	[1]
		Veel onderdelen (kans op falen van de stuw groter)	
		Afdichting van stuwmiddel is complex	
		Zware scharnieren	[3]

Het stuwmiddel voldoet niet aan de volgende eisen, hierom neemt het vervolg van het onderzoek dit stuwmiddel niet mee:

- OpdrEis-4: Het stuwmiddel kan niet 3 doorstroomopeningen waarborgen.
- OpdrEis-5: Het stuwmiddel kan niet nauwkeurig waterstanden reguleren.

B24 Van Bochoveschuif

De Van Bochoveschuif is een schuif die zowel aan de boven- als onderzijde van de schuif scharnierend is verbonden met hydraulische cilinders. In gesloten stand staat de schuif vastgedrukt op de drempel. Het stuwmiddel kan de doorstroomopening vervolgens op twee manieren openen. Bij de eerste manier houden de bovenste cilinders de bovenzijde van de schuif op zijn plaats en trekken de onderste cilinders de onderzijde van de stuw omhoog, hierdoor 'klapt' de stuw op en ontstaat een onderstroom. Bij de tweede manier gebeurt het tegenovergestelde. De onderzijde blijft op de bodem en de cilinders duwen de bovenzijde van de schuif naar beneden. Hierdoor 'klapt' de stuw naar beneden en zal een bovenstroom ontstaan. Doordat aan zowel de boven- als de onderzijde hydraulische cilinders zitten zijn nog vele verschillende andere tussenstanden mogelijk, waarbij een boven- én een onderstroom zal ontstaan. Ook kunnen de cilinders de schuif volledig uit het water heffen (Snel, 1987). Figuur 57 geeft een beeld van de werking van dit stuwtype.



Figuur 57: Van Bochoveschuif (Snel, 1987).

Aangenomen wordt dat de economische breedte van de Van Bochoveschuif tussen de 2 en de 10 m ligt. De maximale hoogte van dit stuwtype is vastgesteld op 5 m. Vergelijkbare stuwenmiddelen liggen ten grondslag aan de aannames van deze dimensies. Tabel 31 geeft de voor- en nadelen van de Van Bochoveschuif.

Tabel 31: Voor- en nadelen van de Van Bochoveschuif. Bronnen: [5]: (Snel, 1987).

Voordeel	Bron:	Nadeel:	Bron:
Geen regelkleppen voor fijnregulatie benodigd		Onbekende technologie	
Te bewegen onder stroming en verval		Duur in onderhoud en constructie	
Geen uitsparingen en sponningen benodigd		Kans op olieverontreiniging van water (door aandrijving en smeermiddelen)	
Kan in gesloten stand gemakkelijk ijsgang en drijfvuil doorvoeren		Objecten boven maaiveld (horizonvervuiling en belemmering van zicht voor scheepvaart)	[5]
Niet gevoelig voor sediment en objecten op de bodem		Veel materiaalgebruik	
Boven- en onderstroom mogelijk	[5]	Enkelkerend	
Nauwkeurige waterstandsregulatie mogelijk		Vier zware hydraulische cilinders benodigd, bewegingsmechanisme complex	[5]
Innovatief stuwmiddel		Onderhoudsgevoelig	
Inspectie en onderhoud deur kan boven water		Moeilijk te construeren en transporteren	
Ongelimiteerde doorvaarhoogte (schuif plat op bodem)		Moeilijk te opereren	
Verminderde kans op aanvaring		Ook in stationaire positie belasting op aandrijving	
		Gevoelig voor menselijke fouten	
		Gevoelig voor trillingen	[5]
		Afdichting van stuwmiddel is zeer complex	
		Pad over stuwmiddel niet te realiseren (extra brug of tunnel benodigd)	
		Zeer kleine afwijkingstolerantie bij installatie	
		Veel energieverbruik	
		Onbekende technologie	[5]
		Enkele onderdelen onder water en moeilijk te bereiken	

Dit stuwmiddel voldoet aan alle gestelde eisen. Dus het vervolg van het onderzoek neemt dit stuwmiddel mee.

B25 Overige stuwmiddelen

Naast de hierboven genoemde stuwmiddelen bestaan nog een aantal stuwmiddelen die niet vaak zijn toegepast. Onderstaande opsomming geeft een overzicht van deze stuwmiddelen:

- Toldeur: Dit is een stuwmiddel dat vergelijkbaar is met de enkele draaideur (paragraaf B2). Bij de toldeur bevindt de verticale as zich in het midden van de deur, in tegenstelling tot de enkele draaideur waarbij de as aan een uiteinde van de deur zit. In geopende stand staat de deur in het midden van de doorgang in doorstroomrichting van de watergang, in gesloten stand sluit het de watergang volledig af. Het principe is te vergelijken met een draaibrug.
- Vouwdeur: De vouwdeur bestaat uit een tweetal kleppen die met elkaar zijn verbonden door een (horizontaal) scharnier. Dit scharnier bevindt zich ongeveer halverwege de te keren waterhoogte. Een klep bevindt zich boven het scharnier en een klep onder het scharnier. Deze kleppen kunnen afzonderlijk van elkaar in verticale richting bewegen, waardoor het stuwmiddel een bovenstroom en een onderstroom kan laten ontstaan.
- Vlinderdeur: De vlinderdeur heeft overeenkomsten met de klepstuw en met de vouwdeur. De vlinderdeur is een deur die draait om een horizontale as die zich ongeveer halverwege de te keren waterhoogte bevindt. Een gedeelte van de deur bevindt zich boven de as en een gedeelte onder de as. Hierdoor ontstaat een boven- én een onderstroom als de deur openklapt.

- Cilinderdeur: De cilinderdeur bestaat uit een toren met daarin een cilinder die op en neer kan schuiven. Onder de toren bevindt zich de watergang, meestal is dit een leiding, duiker of sifon. De cilinder sluit deze watergang af als het zich onder in de toren bevindt.

Al de bovenstaande stuwmiddelen voldoen niet aan één of meer eisen, hierom vallen deze stuwmiddelen af in het verdere onderzoek.

BIJLAGE C. TRADE-OFF MATRIX

Deze bijlage geeft de Trade-Off Matrix (TOM). De TOM zelf is gegeven in Bijlage C1. De verschillende stuwmiddelen worden in de TOM onderling vergeleken aan de hand van enkele deelcriteria. Bijlage C2 geeft een toelichting op deze deelcriteria.

C1 Trade-Off Matrix

Tabel 32: Trade-Off Matrix

	Referentie- waarde (ideaal)	Scoort 1 punt	Scoort 0 punt	Scoort -1 punt	3 Hoogste scores								
	Kosten- efficiënte breedte stuwmiddelen	Keerbare waterhoogte	Benodigde ruimte	Benodigd materiaal	Bewezen technologie	Gevoeligheid voor ijs & vuil	Risico's op menselijke fouten, aanvaring & storingen	Horizon- vervuiling	Onderhoud	Innovatie	Esthetica	Totaal Score	
	m		Veel/gemiddeld/weinig		ja/enigszins/nee		Hoog/neutraal/laag						
Referentiewaardes: Ideale waardes Score	30m < b < 50m 1	> 6 m 1	Weinig 1	Weinig 1	Ja 1	Nee 1	Laag 1	Laag 1	Hoog 1	Hoog 1	Hoog 1	11	
Vizierstuw Score	40 < b < 60 m 1	10 m 1	Veel -1	Gemiddeld 0	Ja 1	Enigszins 0	Neutraal 0	Hoog -1	Neutraal 0	Laag -1	Hoog 1	1	
Trommeldeur met klep Score	20 < b < 80 m 1	4 m -1	Weinig 1	Veel -1	Ja 1	Enigszins 0	Laag 1	Laag 1	Laag -1	Neutraal 0	Laag -1	1	
Sectordeur met klep Score	15 < b < 40 m 1	8 m 1	Weinig 1	Veel -1	Ja 1	Enigszins 0	Laag 1	Laag 1	Laag -1	Neutraal 0	Laag -1	3	
Segmentdeur met klep Score	15 < b < 30 m 1	8 m 1	Weinig 1	Weinig 1	Ja 1	Enigszins 0	Laag 1	Neutraal 0	Hoog 1	Neutraal 0	Neutraal 0	7	
Overstroombare segmentdeur Score	15 < b < 30 m 1	8 m 1	Weinig 1	Weinig 1	Enigszins 0	Enigszins 0	Laag 1	Laag 1	Neutraal 0	Hoog 1	Hoog 1	8	
Roterende segmentdeur Score	16 < b < 80 m 1	8 m 1	Gemiddeld 0	Veel -1	Ja 1	Enigszins 0	Neutraal 0	Neutraal 0	Neutraal 0	Neutraal 0	Hoog 1	3	
Oprollende cilinderdeur Score	6 < b < 50 m 1	5 m 0	Gemiddeld 0	Veel -1	Ja 1	Nee 1	Neutraal 0	Neutraal 0	Neutraal 0	Neutraal 0	Laag -1	1	
Hefdeur met klep Score	6 < b < 40 m 1	10 m 1	Weinig 1	Veel -1	Ja 1	Nee 1	Neutraal 0	Hoog -1	Neutraal 0	Laag -1	Neutraal 0	2	
Dubbele hefdeur Score	6 < b < 20 m -1	5,5 m 1	Weinig 1	Gemiddeld 0	Ja 1	Enigszins 0	Hoog -1	Neutraal 0	Laag -1	Laag -1	Neutraal 0	-1	
Van Bochoveschuif Score	2 < b < 10 m -1	5 m 0	Gemiddeld 0	Veel -1	Nee -1	Nee 1	Hoog -1	Neutraal 0	Laag -1	Hoog 1	Neutraal 0	-3	
Klepstuw Score	6 < b < 30 m 1	5,5 m 0	Gemiddeld 0	Weinig 1	Enigszins 0	Enigszins 0	Neutraal 0	Laag 1	Neutraal 0	Laag -1	Neutraal 0	2	
Klep-balgstuw Score	20 < b < 120 m 1	8 m 1	Weinig 1	Gemiddeld 0	Enigszins 0	Nee 1	Laag 1	Laag 1	Laag -1	Neutraal 0	Neutraal 0	5	

C2 Toelichting

De deelcriteria vereisen een korte toelichting. De onderstaande kopjes beschrijven wat de uitgangspunten zijn voor de deelcriteria.

Breedte stuwmiddel

Dit deelcriterium vergelijkt in de TOM op de hoeveelheid meters. Verschillende stuwmiddelen hebben verschillende maximale breedtes. Dit deelcriterium beschouwt de kostenefficiënte breedtes van de stuwmiddelen als de maximale breedtes. Deze kostenefficiënte breedte is de maximale breedte van het stuwmiddel welke nog rendabel is om toe te passen qua kosten. Grotere breedtes dan de kostenefficiënte breedte zouden tot exponentieel hogere kosten leiden. In deze afweging is de literatuur het uitgangspunt. Onderstaande alinea legt uit hoe de referentiebreedte is opgesteld voor de nieuwe stuw bij Grave; deze breedte is dus de ideale toe te passen breedte voor de nieuwe stuw, ongeacht welk stuwmiddel wordt toegepast.

De maatgevende waterstand met betrekking tot de stroomsnelheden en de grootte van het doorstromend oppervlak bij stuw Grave is 8,5 m +NAP. Dit is de waterstand waarbij de stuw het totale debiet doorlaat en de uiterwaarden net niet overstromen. De bronnen: 'Betrekkingslijnen 2019_2020' (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019) en het 'Actueel Hoogtebestand' (Actueel hoogtebestand Nederland, 2020) vormen de input voor deze bepaling. De waterstand van 8,5 m +NAP komt voor bij een debiet van 1803 m³/s. Paragraaf 3.3 van het hoofdrapport en Bijlage A laten zien hoe dit debiet is vastgesteld. Het maatgevende doorstromend oppervlak volgens de eisen is 704,4 m². Deze waarde volgt uit een vermeerdering van het huidige doorstromend oppervlak (640,3) van de stuw met 10%. De stroomsnelheid in deze situatie is 2,0 m/s. Aangenomen is dat deze waarden maatgevend zijn voor de nieuwe situatie. Als het verval over de deur ongeveer gelijk blijft, zal de doorstroombreedte tussen 120 en 150 m zijn. Een schatting is dat een aantal van drie tot vier stuwopeningen het meest geschikt is voor de nieuwe stuw. De eisen stellen een minimum van drie stuwopeningen (OpdrEis-4). Vanuit de betrouwbaarheid van de stuw zal het economisch voordeliger zijn om meer stuwopeningen te hebben, immers: hoe meer stuwopeningen, hoe minder groot de impact als een stuwopening faalt. Vanuit onderhoud en faalkans van onderdelen en systemen is het echter beter om zo weinig mogelijk stuwopeningen te hebben, immers: hoe meer onderdelen, hoe meer onderhoud en kans op falen. Deze uitgangspunten samengenomen geven een ideale breedte van een stuwmiddel tussen de 30 m (120 m doorstroombreedte / 4 stuwopeningen) en 50 m (150 m doorstroombreedte / 3 stuwopeningen). Stuwmiddelen met een kostenefficiënte breedte binnen deze waarden beoordeelt de TOM als goed en met een groene kleur. Wanneer de kostenefficiënte breedte minder dan 5 m van deze waarden afwijkt, beoordeelt de TOM dit met een oranje kleur. De TOM beoordeelt een stuwmiddel dat een kostenefficiënte breedte heeft die meer dan 5 m afwijkt van deze referentiewaarden met een rode kleur.

Keerbare waterhoogte

Dit deelcriterium beschouwt de zomersituatie, waarin het debiet van de Maas erg laag is, als maatgevend. De stuwen keren in de zomersituatie het meeste water en hebben hierdoor ook het meeste verval (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019). Aangenomen is dat de maximaal keerbare waterhoogte gelijk is aan de maximale waterstand aan de bovenstroomse kant (Paragraaf: 3.3: HydrRand-6). De uiterste grenstoestand is dus een waterstand van 8,45 m +NAP met een leeg stuwpeil tussen Grave en Lith. Hieruit volgt dat, vanuit de hydraulische randvoorwaarden, een kerende hoogte benodigd is van ongeveer 6 m. Het is mogelijk om stuwmiddelen toe te passen met een lagere kerende hoogte, echter zal dan de breedte lineair toenemen om het maatgevende debiet te kunnen laten doorvoeren. In het kader van ruimtegebruik en het toepassen van materiaal (hoe breder, hoe meer beton voor de drempel en pijlers) scoort een stuwmiddel met een lagere kerende hoogte dus minder goed. Concluderend volgt dat stuwmiddelen met een kerende hoogte van 6 m of hoger het meest geschikt zijn voor stuw Grave. De TOM beoordeelt stuwmiddelen met een maximaal verval boven de 6 m met een groene kleur. Stuwmiddelen met een maximum verval tussen de 5 m en de 6 m met een oranje kleur en stuwmiddelen met een maximum verval onder de 5 m met een rode kleur.

Benodigde ruimte

Het deelcriterium 'benodigde ruimte' weegt af in hoeverre de stuw met een bepaald stuwmiddel ruimte inneemt in de Maas. Hierbij wordt de eventuele extra breedte ten gevolge van het toepassen van grote sponningen in rekening gebracht, alsmede de lengte van de stuw in de stroomrichting. Veel benodigde ruimte is negatief.

Benodigd materiaal

Het deelcriterium 'benodigd materiaal' weegt af hoeveel materiaal naar verwachting nodig is voor het bouwen van een stuw met een bepaald stuwmiddel. Literatuur vormt hierbij het uitgangspunt. Brede en zware stuwmiddelen zullen meer staal nodig hebben, enkele stuwmiddelen zullen heftorens nodig hebben of lange pijlers. Bij het toepassen van grote of diepe sponningen in de pijlers zullen de pijlers breed en groot zijn. Veel benodigd materiaal is negatief.

Bewezen technologie

Het deelcriterium 'bewezen technologie' beschouwt of stuwmiddelen eerder zijn toegepast en wat de ervaring is met bij de stuwen waar het is toegepast. Hieronder valt ook de mogelijkheid dat een stuwmiddel wel vaak is toegepast, maar niet met dezelfde of grotere dimensies als bij een rivier als de Maas. Een bewezen technologie is positief in de TOM.

Gevoeligheid voor ijs & vuil

Het deelcriterium 'gevoeligheid voor ijs & vuil' weegt af in hoeverre stuwmiddelen bestand zijn tegen bevriezing van water, kruierend ijs, de aangroei van ijs, drijvend vuil en sediment of objecten op de bodem. Hierbij is de belasting ten gevolge van kruierend ijs, aangroeiend ijs of het stoten van objecten tegen het stuwmiddel een aspect. Een ander aspect is in hoeverre het stuwmiddel nog kan functioneren wanneer objecten of sediment op de bodem liggen. Het laatste aspect is hoe goed het stuwmiddel drijvend vuil en ijs kan doorvoeren. Stuwmiddelen met de mogelijkheid tot overstroom scoren hier beter. Stuwen met uitsparingen in de drempel scoren slechter in de TOM, doordat sediment of objecten in de uitsparing kunnen komen. Hierdoor sluit het stuwmiddel niet meer goed.

Risico's op menselijke fouten, aanvaring & storingen

Het deelcriterium 'risico's op menselijke fouten, aanvaring & storingen' weegt af hoe groot de kans is op menselijke fouten, aanvaring van schepen en op storingen. Hierbij geldt het volgende: hoe meer onderdelen de stuw heeft, hoe meer kans op menselijke fouten en storingen. Stuwmiddelen die openen en sluiten doormiddel van waterdruk hebben een voordeel ten opzichte van andere stuwmiddelen. Deze stuwmiddelen hebben namelijk minder onderdelen en zijn minder afhankelijk van (hydraulische) aandrijving. Daarnaast geldt: als het stuwmiddel uit de watergang verdwijnt bij openen, is het risico op aanvaringen minder groot. Hoe kleiner het risico op menselijke fouten, aanvaringen en storingen, hoe positiever het stuwmiddel scoort in de TOM.

Horizonvervuiling

Het deelcriterium 'horizonvervuiling' weegt stuwmiddelen af op eventuele hinder die ervaren kan worden doordat stuwen in het zicht staan. De stuwen kunnen bijvoorbeeld hoge torens of hoge pijlers hebben. Stuwmiddel met heftorens scoren lager op dit deelcriterium. Stuwmiddelen die onder water verdwijnen bij het openen scoren beter op dit deelcriterium.

Onderhoud

Het deelcriterium 'onderhoud' weegt af hoeveel onderhoud naar verwachting nodig is. Daarnaast weegt het deelcriterium de bereikbaarheid van onderdelen en de complexiteit van het onderhoud af. Stuwmiddelen die onder water verdwijnen bij openen scoren slechter op dit deelcriterium. Stuwmiddelen die zich volledig boven water kunnen bevinden scoren beter op dit deelcriterium.

Innovatie

Innovatie is op zichzelf een redelijk subjectief begrip. Daarom beoordeelt de TOM bij het deelcriterium ‘innovatie’ een stuwmiddel dat wereldwijd weinig is toegepast als groen, een stuwmiddel dat wereldwijd veel is toegepast, maar weinig in Nederland als oranje en een stuwmiddel dat in Nederland veel is toegepast als rood.

Het deelcriterium ‘innovatie’ lijkt het tegenovergestelde van het deelcriterium ‘bewezen technologie’. Als een stuwmiddel goed scoort op het deelcriterium ‘bewezen technologie’, zal het stuwmiddel waarschijnlijk niet innovatief zijn. Dit gaat echter niet in alle gevallen op. Zo zijn er stuwmiddelen waarvan de technologie al bewezen is in andere toepassingen in de wereld, maar waarvan de toepassing van het stuwmiddel in Nederland met de dimensies die gelden in de Maas zeker innovatief is. Bij enkele stuwmiddelen zullen deze twee criteria tegen elkaar af te strepen zijn, maar dit is niet bij alle stuwmiddelen het geval. Hierom neemt de TOM wel beide criteria mee in de afweging. Daarnaast is ‘bewezen technologie’ onderdeel van het hoofdcriterium ‘betrouwbaarheid’ en ‘innovatie’ onderdeel van ‘omgeving’.

Esthetica

De TOM beoordeelt stuwmiddelen door middel van het deelcriterium ‘esthetica’ op de mate van mooiheid van het stuwmiddel. Hierbij wordt per stuwmiddel afgewogen hoe mooi het gros van de mensen het stuwmiddel zal vinden. Hoe mooier, hoe positiever in de TOM.

BIJLAGE D. BEREKENING HOEVEELHEDEN

Bepaling Dimensies

Deze bijlage weergeeft de bepaling van de dimensies van de vier stuwmiddelen: Segmentdeur met klep, Overstroombare Segmentdeur, Klep-balgstuw en de Kniestuw. Deze bepaling is gedaan in het programma PTC Mathcad Express Prime 6.0.0.0. Dit programma maakt het mogelijk om formules toe te wijzen aan bepaalde karakters. In onderstaande opsomming staat de inhoud van de bijlage.

Inhoud:

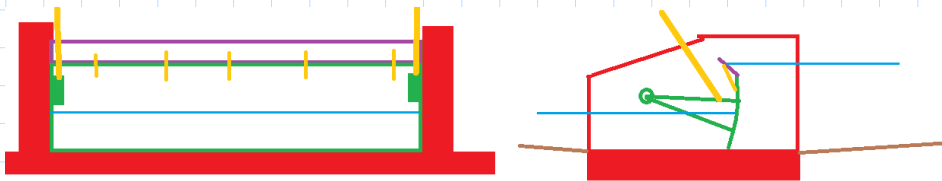
1. Schematisatie deuren
2. Parameters
 - 2.1 Aanduidingen
 - 2.2 Situatie
 - 2.2.1 Huidige situatie
 - 2.2.2 Toekomstige situatie
3. Belastingen
 - 3.1 Hydrostatisch
 - 3.2 Hydrodynamisch
 - 3.3 IJsbelasting
 - 3.4 Combinaties
4. Varianten
 - 4.1 Segmentdeur met Klep
 - 4.2 Overstroombare segmentdeur
 - 4.3 Balg-klepstuw
 - 4.4 Kniestuw

1. Schematisatie deuren

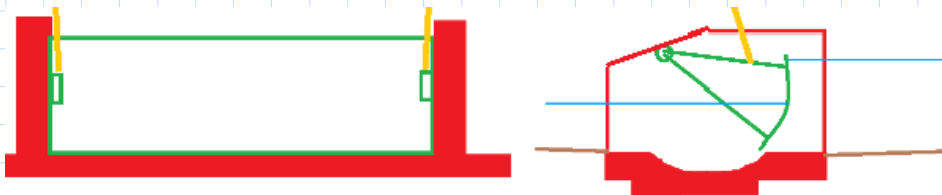
De onderstaande schematisaties weergeven de verschillende varianten. De opsomming hieronder licht de verschillende toegepaste kleuren toe.

Rood:	Beton: pijlers & drempel
Blauw:	Streefpeilen water
Groen:	Contouren van stuwmiddel
Bruin:	Bodem
Geel:	Aandrijving
Zwart:	Balg
Paars:	Bij segmentdeur: klep; bij kniestuw: Horizontale & verticale Gordingen
Lichtgroen & Lila:	Randstaven
Roze:	Stabiliteitsstaven
Oranje/ circel:	Draaipunt

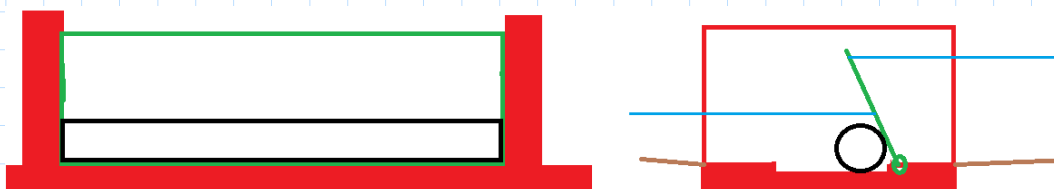
Segmentdeur met klep:



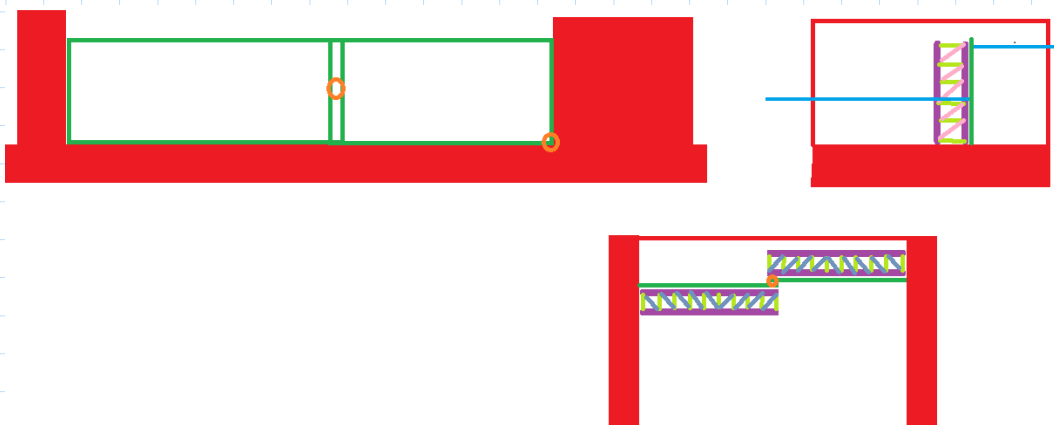
Overstroombare segmentdeur:



Balg-klepstuw:



Kniestuw:



2. Parameters

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende algemene parameters die van belang zijn bij het opstellen van berekeningen, daarnaast beschrijft het de parameters voor de huidige situatie en de belangrijke parameters voor de toekomstige situatie.

2.1 Constanten

Deze paragraaf beschrijft de constanten die gelden voor de toekomstige situatie te Grave en dus voor deze berekeningen. De golfhoogte & golfperiode is berekend met de Bretschneider Calculator (rekentool RWS). De windsnelheid is afgeleid uit het boek: 'Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen' (R. Blok, 2013).

Algemene parameters:

$$\rho_w := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{Dichtheid water}]$$

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad [\text{Graviteitsversnelling}]$$

$$\pi = 3.142 \quad [\text{Constante van Pie}]$$

Parameters voor wind & golven:

$$l_s := 2000 \text{ m} \quad [\text{Strijklengte}]$$

$$u_w := 24.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Windsnelheid op 10 m hoogte}]$$

$$H_s := 0.84 \text{ m} \quad [\text{Significante golfhoogte}]$$

$$T_p := 3.41 \text{ s} \quad [\text{Piekperiode golf}]$$

Constructieve parameters:

$$f_y := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [\text{Vloeigrens staal}]$$

Onderstaande belastingsfactoren zijn van toepassing aangezien de stuw een veiligheidsniveau RC3 heeft en een levensduur van 100 jaar. (Molenaar, 2017)

$$\gamma_{M;S} := 1.0 \quad [\text{Materiaalfactor staal}]$$

$$\gamma_Q := 1.65 \quad [\text{Belastingsfactor}]$$

2.2 Situatie

2.2.1 Huidige situatie

Onderstaande hoogtes en breedtes gelden voor de rivier ten noorden en zuiden van de stuw.

$$h_{sp;G;h} := 7.95 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Huidig streefpeil Sambeek - Grave]

$$h_{sp;L} := 4.9 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Streefpeil Grave - Lith]

$$h_{z;n} := -1 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Gemiddelde bodemdiepte van zomerbed benedenstrooms (noorden) van stuw Grave]

$$b_{z;n} := 120 \text{ m}$$

[Breedte zomerbed benedenstrooms (noorden) van stuw Grave]

$$h_{bd;z;z} := 0 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Gemiddelde bodemdiepte van zomerbed bovenstrooms (zuiden) van stuw Grave]

$$b_{z;z} := 144 \text{ m}$$

[Breedte zomerbed bovenstrooms (zuiden) van stuw Grave]

$$b_{talud;n} := 2 \cdot (h_{sp;L} - h_{z;n}) = 11.8 \text{ m}$$

[Breedte van 1 talud benedenstrooms (noorden) van stuw Grave (1:2)]

$$A_{z;n;h} := (h_{sp;L} - h_{z;n}) \cdot (b_{z;n} - b_{talud;n}) = 638.38 \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak benedenstrooms (noorden) van stuw bij hanteren van stuwpeil]

$$b_{talud;z} := 2 \cdot (h_{sp;G;h} - h_{bd;z;z}) = 15.9 \text{ m}$$

[Breedte van 1 talud bovenstrooms (zuiden) van stuw Grave (1:2)]

$$A_{z;z;h} := (h_{sp;G;h} - h_{bd;z;z}) \cdot (b_{z;z} - b_{talud;z})$$

$$A_{z;z;h} := (1.018 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak ten zuiden van stuw bij hanteren van stuwpeil]

Onderstaande hoogtes en breedtes gelden voor de huidige stuw en de uiterwaarden in lijn met de huidige en toekomstige stuw. Deze denkbeeldige lijn is dus een dwarsdoorsnede van het rivierbed ter hoogte van de huidige en de toekomstige stuw.

$$h_{D;h} := 2.7 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Hoogte bovenkant drempel huidige situatie]

$$h_{u;o} := 8.5 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Minimale hoogte uiterwaarden ten oosten van stuw Grave]

$$h_{u;w} := 9.5 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Minimale hoogte uiterwaarden ten westen van stuw Grave]

$$h_d := 12 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Minimale hoogte winterdijken bij stuw Grave]

$$b_{s;1;h} := 60.7 \text{ m}$$

[Breedte van de eerste stuwopening in huidige situatie]

$$b_{s;2;h} := 49.7 \text{ m}$$

[Breedte van de tweede stuwopening in huidige situatie]

$$A_{s;z;h} := (b_{s;1;h} + b_{s;2;h}) \cdot (h_{u;o} - h_{D;h}) = 640.32 \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak stuw huidige situatie in zomerbed (tot de minimale hoogte van uiterwaarden)]

[Doorstromend oppervlak stuw in huidige situatie voor waterstand bij winterbeddebiët]

$$A_{s;w;h} := (b_{s;1;h} + b_{s;2;h}) \cdot (h_d - h_{D;h}) = (1.027 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak stuw in huidige situatie voor waterstand bij winterbeddebiet]

$$A_{u;o} := (50 \text{ m} \cdot 2 + 60 \text{ m} \cdot 2) \cdot (h_d - h_{u;o}) = 770 \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak van uiterwaarden ten oosten van stuw Grave van winterbed]

$$A_{u;w} := 50 \text{ m} \cdot 3 \cdot (h_d - h_{u;w}) = 375 \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak van uiterwaarden ten westen van stuw Grave van winterbed]

$$A_{w;h} := A_{u;o} + A_{u;w} + A_{s;w;h} = (2.172 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

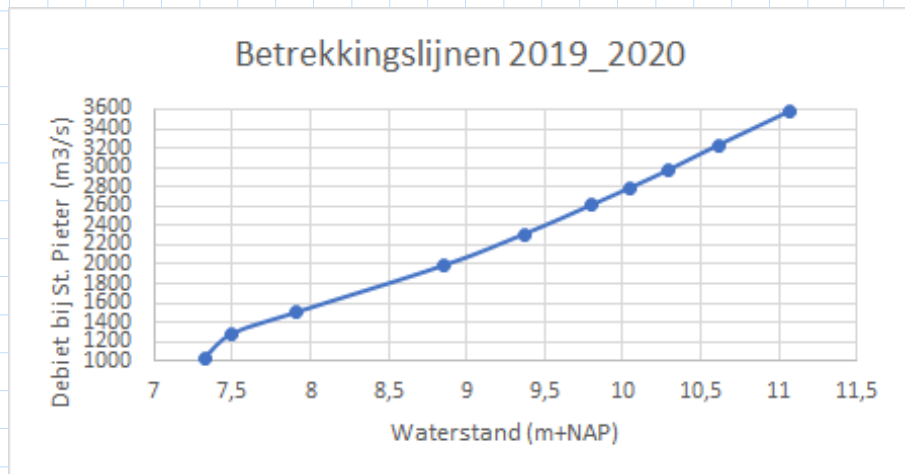
[Totale doorstromend oppervlak in winterbed in huidige situatie]

De onderstaande berekening berekent het maximale debiet wat door het zomerbed stroomt bij een waterstand met een hoogte gelijk aan de uiterwaarden ten oosten van de stuw te Grave (8,5 m +NAP). Dit debiet is maatgevend voor de stuw: het vormt de input voor de berekening van het doorstromend oppervlak en de stroomsnelheden ($Q=v \cdot A$).

De onderstaande waarden zijn ontleend aan het rapport: 'Betrekkingslijnen 2019_2020'.

Onderstaande grafiek is afgeleid uit de tabellen uit dit rapport.

h (m)	Q $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$
7.32	1030
7.5	1280
7.91	1500
8.85	1982
9.37	2308
9.8	2609
10.04	2781
10.29	2969
10.61	3576



Het debiet bij een waterstand van 8,5 m +NAP is te interpoleren uit bovenstaande gegevens. Dit is mogelijk omdat de relatie tussen het debiet en de waterstand ongeveer lineair loopt (zie grafiek).

$$Q_{\text{verschil}} := 1982 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 1500 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 482 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

[Verschil in debiet bij waterstanden 7,91 m +NAP & 8,85 m +NAP]

$$h_{\text{verschil}} := 8.85 \text{ m} - 7.91 \text{ m} = 94 \text{ cm}$$

[Verschil tussen waterstand bij debieten 1982 m³/s en 1500 m³/s]

$$Q_{\text{Toename}} := \frac{Q_{\text{verschil}}}{h_{\text{verschil}}} = \frac{482}{94} = 5.128 \text{ m}^3/\text{s}$$

[Toename van debiet per cm waterstandsverhoging]

$$h_{\text{verschil};2} := 8.5 \text{ m} - 7.91 \text{ m} = 59 \text{ cm}$$

[Verschil in waterstand het gevraagde debiet en 1500 m³/s]

$$Q_z := 1500 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + Q_{\text{Toename}} \cdot h_{\text{verschil};2}$$

[Maximale zomerbeddebiet]

$$Q_z = (1.803 \cdot 10^3) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Parameters voor huidige situatie zijn gebaseerd op volgende formule: $Q = A \cdot v$

$$A_{s;z,h} = 640.32 \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak huidige stuw Grave (zomerbed)]

$$Q_z = (1.803 \cdot 10^3) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

[Zomerbeddebiet]

$$v_{z,h} := \frac{Q_z}{A_{s;z,h}} = 2.815 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Stroomsnelheid bij het huidige maatgevende doorstromend oppervlak en het zomerbeddebiet]

$$A_{w,h} = (2.172 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

[Doorstromend oppervlak huidige stuw Grave (winterbed)]

$$Q_w := 4760 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

[Maatgevend winterbeddebiet]

$$v_{w,h} := \frac{Q_w}{A_{w,h}} = 2.192 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Stroomsnelheid bij het huidige maatgevende winterbeddebiet]

2.2.2 Toekomstige situatie:

Voor de toekomstige situatie verandert het stuwpeil tot de onderstaande waarde:

$$h_{sp;G;t} := 8.45 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Verwacht toekomstig streefpeil voor stuwband Sambeek - Grave]

De uitgangspunten (Hoofdstuk 4) stellen vast dat de toekomstige stuw een doorstromend oppervlak moet hebben van 10% meer dan de huidige stuw. Hierbij loopt de maatgevende waterhoogte van de drempel tot een peil van 8,5 m +NAP. Dit peil zal in het vervolg maatgevend zijn voor het doorstromend oppervlak en het debiet. Hieronder zijn de parameters weergegeven voor de toekomstige situatie, waarin de toekomstige stuw 200 m ten zuiden (stroomopwaarts) van de huidige stuw gesitueert is.

$$b_{s,t} := b_{z,z} = 144 \text{ m}$$

[Breedte toekomstige stuw (inclusief pijlers)]

$$A_{s,t} := A_{s;z,h} \cdot 1.1 = 704.352 \text{ m}^2$$

[Minimaal doorstromend oppervlak toekomstige stuw (1,1 * huidig doorstromend oppervlak) bij h=8,5 m+NAP]

$$v_{s,t;z} := \frac{Q_z}{A_{s,t}} = 2.559 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Stroomsnelheid bij zomerbeddebiet in toekomstige stuw]

$$A_{w,t} := A_{u;o} + A_{u;w} + b_{s,t} \cdot (h_d - h_{u;o}) + A_{s,t}$$

[Doorstromend oppervlakte voor nieuwe stuw voor waterstand 12 m +NAP (winterbeddebiet) (hetzelfde als huidig winterbed)]

$$A_{w,t} = (2.353 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

$$v_{s,t;w} := \frac{Q_w}{A_{w,t}} = 2.023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Stroomsnelheid voor nieuwe stuw bij waterstand 12 + NAP (winterbeddebiet) (hetzelfde als snelheid in winterbed ten zuiden van stuw)]

3. Belastingen

Dit hoofdstuk berekent de belastingen voor de nieuwe stuw te Grave. De locatie van de nieuwe stuw is vastgezet op 200 meter bovenstrooms van de huidige stuw, met een bijbehorende rivier- en stuwbreedte van 144 m. De significante golfhoogte zoals paragraaf 2.1 beschrijft is afgeleid uit de Bretschneider calculator (rekentool van RWS). De ingevoerde waarden zijn de volgende: waterdiepte van 6 meter, strijklengte van 2000 meter en een windsnelheid van 24,5 m/s. De windsnelheden die paragraaf 2.1 beschrijft zijn afgeleid uit het boek: 'Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen' (R. Blok, 2013).

Belastingen worden berekend voor de drie 'normale' varianten (segmentdeuren en Klep-balgstuw) en apart voor de innovatieve variant (kniestuw). Dit is gedaan omdat de drempels bij de drie 'normale' varianten gelijk zijn maar de Kniestuw afwijkt qua drempelhoogte.

$$h_{wd;s;t} := h_{sp;G;t} - (h_{bd;z;z} + 2 \text{ m}) = 6.45 \text{ m}$$

[Segmentdeuren: Waterdiepte bij segmentdeuren bij drempel op 2 m +NAP]

$$h_{wd;s;t;kn} := h_{sp;G;t} - (h_{bd;z;z} + 1.9 \text{ m}) = 6.55 \text{ m}$$

[Kniestuw: Waterdiepte bij deur, bij drempel op 1,9 m +NAP]

3.1 Hydrostatisch:

Segmentdeuren & Klep-Balgstuw:

$$P_{hyd.stat} := \rho_w \cdot g \cdot (h_{wd;s;t} + H_s) = 71.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

[Maximale hydrostatische waterdruk]

$$q_{hyd.stat} := 0.5 \cdot P_{hyd.stat} \cdot (h_{wd;s;t} + H_s)$$

[Kracht per meter (b) ter gevolge van hydrostatische waterdruk]

$$q_{hyd.stat} = 260.583 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{hyd.stat;kar} := q_{hyd.stat} \cdot \gamma_Q = 429.962 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maximale kracht ter gevolge van hydrostatische waterdruk inclusief veiligheidsmarge]

$$a_{hyd.stat} := \frac{h_{wd;s;t} + H_s}{3} = 2.43 \text{ m}$$

[Aangrijpingspunt hydrostatische belasting vanaf bodem]

Kniestuw:

$$P_{hyd.stat;kn} := \rho_w \cdot g \cdot (h_{wd;s;t;kn} + H_s) = 72.471 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

[Maximale hydrostatische waterdruk]

$$q_{hyd.stat;kn} := 0.5 \cdot P_{hyd.stat;kn} \cdot (h_{wd;s;t;kn} + H_s)$$

[Kracht per meter (b) ter gevolge van hydrostatische waterdruk]

$$q_{hyd.stat;kn} = 267.781 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{hyd.stat;kar;kn} := q_{hyd.stat;kn} \cdot \gamma_Q = 441.838 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maximale kracht ter gevolge van hydrostatische waterdruk inclusief veiligheidsmarge]

$$a_{hyd.stat;kn} := \frac{h_{wd;s;t;kn} + H_s}{3} = 2.463 \text{ m}$$

[Aangrijpingspunt hydrostatische belasting vanaf bodem]

3.2 Hydrodynamisch:

$$L_s := \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T_p^2 = 18.149 \text{ m}$$

[Significante golflengte]

Segmentdeuren & Klep-balgstuw:

$$P_{\text{hyd.dyn}} := \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_s}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_{\text{wd};s;t}}{L_s}\right)} = 1.746 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

[Hydrodynamische waterdruk ter gevolge van windgolven]

$$q_{\text{hyd.dyn}} := 0.5 \cdot P_{\text{hyd.dyn}} \cdot (h_{\text{wd};s;t}) = 5.631 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Hydrodynamische waterkracht per meter (b)]

$$q_{\text{hyd.dyn.kar}} := q_{\text{hyd.dyn}} \cdot \gamma_Q = 9.292 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Hydrodynamische waterkracht per meter (b) inclusief veiligheidsmarge]

$$\delta_0 := \frac{\pi \cdot H_s^2}{L_s \cdot \coth\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h_{\text{wd};s;t}}{L_s}\right)} = 0.119 \text{ m}$$

[Verhoging waterstand ten gevolge van golven op verticaal vlak]

$$a_{\text{hyd.dyn}} := \frac{h_{\text{wd};s;t} + H_s + \delta_0}{3} = 2.47 \text{ m}$$

[Aangrijpingspunt hydrodynamische belasting vanaf bodem]

Kniestuw:

$$P_{\text{hyd.dyn;kn}} := \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_s}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_{\text{wd};s;t;kn}}{L_s}\right)} = 1.688 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

[Hydrodynamische waterdruk ter gevolge van windgolven]

$$q_{\text{hyd.dyn;kn}} := 0.5 \cdot P_{\text{hyd.dyn;kn}} \cdot (h_{\text{wd};s;t;kn}) = 5.528 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Hydrodynamische waterkracht per meter (b)]

$$q_{\text{hyd.dyn.kar;kn}} := q_{\text{hyd.dyn;kn}} \cdot \gamma_Q = 9.122 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Hydrodynamische waterkracht per meter (b) inclusief veiligheidsmarge]

$$\delta_{0;kn} := \frac{\pi \cdot H_s^2}{L_s \cdot \coth\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h_{\text{wd};s;t;kn}}{L_s}\right)} = 0.12 \text{ m}$$

[Verhoging waterstand ter gevolge van golven op verticaal vlak]

$$a_{\text{hyd.dyn;kn}} := \frac{h_{\text{wd};s;t;kn} + H_s + \delta_{0;kn}}{3} = 2.503 \text{ m}$$

[Aangrijpingspunt hydrodynamische belasting vanaf bodem]

3.3 IJsbelasting:

Onderstaande belasting geldt voor IJs, hieronder valt zowel expansie, opstuwing als aangroei. Het uiterste van deze belastingen is in onderstaande waarde gegeven (R.O.K.).

$$q_{\text{IJs}} := 50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{\text{IJs;kar}} := q_{\text{IJs}} \cdot \gamma_Q = 82.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maximale lijnbelasting ijs per meter (b), zie uitgangspunten]

3.4 Combinaties:

De onderstaande combinaties van belastingen kunnen optreden bij de deur.

Segmentdeuren & Klep-balgstuw:

$$q_{\text{max;tot}} := q_{\text{hyd.stat;kar}} + q_{\text{hyd.dyn.kar}} = 439.253 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maximale lijnbelasting per strekkende meter in de deur aangrijpend onderin de deur]

$$q_{\text{IJs;stat}} := q_{\text{IJs;kar}} + q_{\text{hyd.stat;kar}} \cdot \frac{0.2 \text{ m}}{h_{\text{wd};s;t}} = 95.832 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Lijnbelasting per strekkende meter ter gevolge van ijs- en hydrostatische krachten aangrijpend bovenin de deur]

Kniestuw:

$$q_{\max;\text{tot};\text{kn}} := q_{\text{hyd.stat};\text{kar};\text{kn}} + q_{\text{hyd.dyn.kar};\text{kn}} = 450.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maximale lijnbelasting per strekkende meter in de deur aangrijpend onderin de deur]

$$q_{\text{IJs;stat};\text{kn}} := q_{\text{IJs};\text{kar}} + q_{\text{hyd.stat};\text{kar};\text{kn}} \cdot \frac{0.2 \text{ m}}{h_{\text{wd;s;t};\text{kn}}}$$

[Lijnbelasting per strekkende meter ter gevolge van ijs- en hydrostatische krachten aangrijpend bovenin de deur]

$$q_{\text{IJs;stat};\text{kn}} = 95.991 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4. Varianten

Hoofdstuk 4 beschrijft de afmetingen van de vier varianten. Hieronder zijn enkele uitgangspunten gezet voor de vier varianten in het algemeen. Enkele van deze waarden zijn toegelicht in het rapport.

$S_{d;seg} := 0.2 \text{ m}$	[Diepte sponningen voor segmentdeuren]
$S_{d;sb} := 0.5 \text{ m}$	[Diepte & breedte schotbalksponningen]
$d_D := 3 \text{ m}$	[Dikte drempel (zie rapport voor onderbouwing)]
$d_{P;seg} := 4 \text{ m} + 2 \cdot S_{d;seg} = 4.4 \text{ m}$	[Dikte pijlers bij segmentdeuren]
$d_{P;kl.b} := 4 \text{ m}$	[Dikte pijlers bij balg-klepstuw]
$b_{s;t} = 144 \text{ m}$	[Totale breedte stuw inclusief pijlers (totaal beschikbare ruimte)]
$n_{seg} := 4$	[Aantal stuwopeningen bij segmentdeuren (zie rapport voor onderbouwing)]
$n_{P;seg} := n_{seg} + 1 = 5$	[Aantal pijlers bij segmentdeuren]
$n_{kl.b} := 3$	[Aantal stuwopeningen bij Klep-balgstuw (zie rapport voor onderbouwing)]
$n_{P;kl.b} := n_{kl.b} + 1 = 4$	[Aantal pijlers bij Klep-balgstuw]
$n_{kn} := 3$	[Aantal stuwopeningen bij kniestuw]
$n_{P;kn;1} := n_{kn} = 3$	[Aantal brede pijlers bij kniestuw]
$n_{P;kn;2} := 1$	[Aantal smalle pijlers bij kniestuw]

4.1 Segmentdeur met klep

Paragraaf 4.1 beschrijft de afmetingen van de Segmentdeur met klep.

$$b_{op;seg.kl} := \frac{(b_{s;t} - d_{P;seg} \cdot n_{P;seg})}{n_{seg}} = 30.5 \text{ m} \quad [\text{Breedte stuwopening}]$$

$$h_{D;seg.kl} := 2 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte drempel}]$$

$$h_{seg.kl} := h_{u;o} - h_{D;seg.kl} = 6.5 \text{ m} \quad [\text{Hoogte deur}]$$

$$b_{seg.kl} := b_{op;seg.kl} + S_{d;seg} \cdot 2 = 30.9 \text{ m} \quad [\text{Breedte deur}]$$

$$R_{seg.kl} := h_{seg.kl} = 6.5 \text{ m} \quad [\text{Radius deurarm; is gelijk aan keerbare hoogte (Erbisti, 2004)}]$$

$$h_{Dr;seg.kl} := h_{sp;L} + 0.5 \text{ m} = 5.4 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte van draaipunt}]$$

$$L_{P;seg.kl} := R_{seg.kl} + 5 \text{ m} + 0.25 \text{ m} = 11.75 \text{ m} \quad [\text{Lengte pijlers en drempel, 25 cm extra}]$$

$$h_{P;seg.kl} := h_{u;o} + 1 \text{ m} = 9.5 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte pijlers}]$$

$$A_{s;t;seg.kl} := (h_{u;o} - h_{D;seg.kl}) \cdot b_{op;seg.kl} \cdot n_{seg} \quad [\text{Doorstromend oppervlak stuw}]$$

$$A_{s;t;seg.kl} = 793 \text{ m}^2$$

$$v_{s;t;b.kl} := \frac{Q_z}{A_{s;t;seg.kl}} = 2.273 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Stroomsnelheid bij zomerbeddebiet}]$$

De bovenstaande afmetingen kunnen getoetst worden met de onderstaande Unity check, bij een waarde onder de 1 is het doorstromend oppervlak groot genoeg:

$$\frac{A_{s;t}}{A_{s;t;seg.kl}} \leq 1 \quad \frac{A_{s;t}}{A_{s;t;seg.kl}} = 0.888 \quad [\text{Unity check}]$$

Staal:

Onderstaande berekeningen geven grofweg de hoeveelheden van staal en beton weer. De vuistregels voor de hoeveelheid staal zijn afgeleid uit het handboek: Design of Hydraulic Gates (Erbisti, 2004).

$$G_{seg} := \left(0.64 \cdot (b_{seg.kl}^2 \cdot h_{seg.kl} \cdot (h_{sp;G;t} - h_{D;seg.kl}))^{0.682} \right) \cdot n_{seg}$$

$$G_{seg} = (3.524 \cdot 10^3) \text{ kN} \quad [\text{Gewicht van staal in deuren in kN (Erbisti, 2004)}]$$

Beton:

Onderstaande berekeningen berekenen de hoeveelheid benodigd beton. De pijlers zijn aan de benedenstroomse kant afgeschuind om zo beton te besparen. De sponningen zijn even diep als breed.

$$I_{D;seg.kl} := d_D \cdot L_{P;seg.kl} \cdot b_{s;t} = (5.076 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Volume van drempel}]$$

$$I_{schuin;seg.kl} := 7 \text{ m} \cdot (h_{P;seg.kl} - h_{sp;L}) \cdot 0.5 \cdot d_{P;seg} \quad [\text{Schuine deel van pijler}]$$

$$I_{schuin;seg.kl} = 70.84 \text{ m}^3$$

$$I_{P;seg.kl} := \left((L_{P;seg.kl} \cdot d_{P;seg} - 2 \cdot S_{d;seg}^2 - 4 \cdot S_{d;sb}^2) \cdot (h_{P;seg.kl} - h_{D;seg.kl}) - I_{schuin;seg.kl} \right) \cdot n_{P;seg}$$

$$I_{P;seg.kl} = (1.544 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Inhoud pijlers}]$$

$$I_{tot;seg.kl} := I_{D;seg.kl} + I_{P;seg.kl} = (6.62 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Totaal volume beton}]$$

Palen:

De onderstaande berekening berekent de hoeveelheid palen vanuit de gestelde uitgangspunten in het rapport. Aangenomen wordt dat er 450 x 450 betonpalen worden toegepast van 10 meter lang in een raster van 2 bij 2 meter over de gehele lengte en breedte van de drempel.

$$L_{Pa} := 10 \text{ m}$$

[Lengte palen]

$$A_{Pa;seg.kl} := \frac{b_{s;t}}{2 \text{ m}} \cdot \frac{L_{P;seg.kl}}{2 \text{ m}} = 423$$

[Aantal benodigde palen]

$$n_{Pa;seg.kl} := A_{Pa;seg.kl} \cdot L_{Pa} = (4.23 \cdot 10^3) \text{ m}$$

[Totaal benodigde paallengte]

Wapening:

De onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheid benodigde wapening vanuit de uitgangspunten uit het rapport. Aangenomen wordt dat 160 kg betonstaal wordt toegepast per m3 beton (RWS- kostenpool).

$$W_k := 160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

[Kengetal voor wapening (bron: Hydraulic structures - Cassoins)]

$$W_{B;seg.kl} := W_k \cdot I_{tot;seg.kl} = (1.059 \cdot 10^6) \text{ kg}$$

Bekisting:

De onderstaande berekening berekent het totaal benodigde oppervlak aan bekisting.

$$L_{B;P;seg.kl} := (L_{P;seg.kl} + (S_{d;seg} \cdot 3) + (S_{d;sb} \cdot 3 \cdot 2))$$

[Lengte van pijlers inclusief sponningen]

$$L_{B;P;seg.kl} = 15.35 \text{ m}$$

$$O_{B;P;seg.kl} := 2 \cdot L_{B;P;seg.kl} + 2 \cdot d_{P;seg} = 39.5 \text{ m}$$

[Omtrek Pijlers]

$$A_{B;P;seg.kl} := O_{B;P;seg.kl} \cdot h_{seg.kl} = 256.75 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte per pijler]

$$A_{B;D;seg.kl} := b_{s;t} \cdot d_D \cdot 2 + L_{P;seg.kl} \cdot d_D = 899.25 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte drempel]

$$A_{B;seg.kl} := A_{B;P;seg.kl} \cdot n_{P;seg} + A_{B;D;seg.kl}$$

[Bekistingsoppervlakte totale stuw]

$$A_{B;seg.kl} = (2.183 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

Bodembescherming:

De onderstaande formule berekent de bodembeschermingslengte zoals gegeven in de bron: Ontwerp van Schutsluizen.

$$L_B > 8 \cdot h_{wd;s;t}$$

[Minimale lengte bodembescherming]

$$L_{B;be} := 10 \cdot h_{wd;s;t} = 64.5 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming benedenstrooms]

$$L_{B;bo} := 8 \cdot h_{wd;s;t} = 51.6 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming bovenstrooms]

$$A_B := L_{B;be} \cdot b_{s;t} + L_{B;bo} \cdot b_{s;t} = (1.672 \cdot 10^4) \text{ m}^2$$

[Oppervlak toe te passen met bodembescherming]

Krachten:

Hieronder zijn de totale krachten op de deur uitgewerkt. Aangenomen is dat de maximale waterdruk niet gelijktijdig optreedt met de maximale belasting ter gevolge van hydrostatische en hydrodynamische waterdruk.

$$F_{max;seg.kl} := q_{max;tot} \cdot b_{op;seg.kl} = (1.34 \cdot 10^4) \text{ kN}$$

[Totale maximale kracht op deur]

$$M_{max;seg.kl} := \frac{1}{8} q_{max;tot} \cdot b_{op;seg.kl}^2 = (5.108 \cdot 10^4) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Maximaal moment over gehele deur]

4.2 Overstroombare Segmentdeur

Paragraaf 4.2 beschrijft de afmetingen van de overstroombare segmentdeur. Deze variant heeft vier stuwoopeningen. De deuruitsparing in de vloer zorgt voor een plaatselijke verdikking aan de onderzijde van de drempel, aangenomen is dat deze verdikking de volume vermindering van de uitsparing opheft.

$$b_{op;ov.seg} := \frac{(b_{s;t} - d_{P;seg} \cdot n_{P;seg})}{n_{seg}} = 30.5 \text{ m} \quad [\text{Breedte stuwoopening}]$$

$$h_{D;ov.seg} := 2 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte drempel}]$$

$$h_{ov.seg} := h_{u;0} - h_{D;ov.seg} = 6.5 \text{ m} \quad [\text{Hoogte deur (0,3 m marge)}]$$

$$b_{ov.seg} := b_{op;ov.seg} + S_{d;seg} \cdot 2 = 30.9 \text{ m} \quad [\text{Breedte deur}]$$

$$R_{ov.seg} := h_{ov.seg} = 6.5 \text{ m} \quad [\text{Radius deurarm; is gelijk aan keerbare hoogte (Erbisti, 2004)}]$$

$$h_{Dr;ov.seg} := h_{D;ov.seg} - 1.3 \text{ m} + R_{ov.seg} = 7.2 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte van draaipunt}]$$

$$L_{P;ov.seg} := 1.5 \cdot R_{ov.seg} + 5 \text{ m} + 0.375 \text{ m} = 15.125 \text{ m} \quad [\text{Lengte pijlers en drempel (deur klapt onder het draaipunt in pijlers)}]$$

$$h_{P;ov.seg} := h_{u;0} + 1 \text{ m} = 9.5 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte pijlers}]$$

$$A_{s;t;ov.seg} := (h_{u;0} - h_{D;ov.seg}) \cdot b_{op;ov.seg} \cdot n_{seg} \quad [\text{Doorstromend oppervlak stuw}]$$

$$A_{s;t;ov.seg} = 793 \text{ m}^2$$

$$v_{s;t;ov.seg} := \frac{Q_z}{A_{s;t;ov.seg}} = 2.273 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Stroomsnelheid bij zomerbeddebiet}]$$

De bovenstaande afmetingen kunnen getoetst worden met de onderstaande Unity check, bij een waarde onder de 1 is het doorstromend oppervlak groot genoeg volgens de eisen:

$$\frac{A_{s;t}}{A_{s;t;ov.seg}} \leq 1 \quad \frac{A_{s;t}}{A_{s;t;ov.seg}} = 0.888 \quad [\text{Unity check}]$$

Staal:

Onderstaande berekeningen geven grofweg de hoeveelheden van staal en beton weer. De vuistregels voor de hoeveelheid staal zijn afgeleid uit het handboek: Design of Hydraulic Gates (Erbisti, 2004).

$$G_{ov.seg} := \left(3.688 \cdot (b_{ov.seg}^2 \cdot h_{ov.seg} \cdot (h_{sp;G;t} - h_{D;ov.seg}))^{0.521} \right) \cdot n_{seg} \quad [\text{Gewicht van staal in deuren in kN (Erbisti, 2004)}]$$

$$G_{ov.seg} = (3.687 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Beton:

Onderstaande berekeningen berekenen de hoeveelheden benodigd beton. De pijlers zijn aan de benedenstroomse kant afgeschuind om zo beton te besparen.

$$I_{D;ov.seg} := d_D \cdot L_{P;ov.seg} \cdot b_{s;t} = (6.534 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Volume van drempel}]$$

$$I_{schuin;ov.seg} := 9 \text{ m} \cdot (h_{P;ov.seg} - h_{sp;L}) \cdot 0.5 \cdot d_{P;seg} \quad [\text{Volume van schuine deel}]$$

$$I_{P;ov.seg} := \left((L_{P;ov.seg} \cdot d_{P;seg} - 2 \cdot S_{d;seg}^2 - 4 \cdot S_{d;sb}^2) \cdot (h_{P;ov.seg} - h_{D;ov.seg}) - I_{schuin;ov.seg} \right) \cdot n_{P;seg}$$

$$I_{P;ov.seg} = (2 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Inhoud pijlers}]$$

$$I_{tot;ov.seg} := I_{D;ov.seg} + I_{P;ov.seg} = (8.534 \cdot 10^3) \text{ m}^3 \quad [\text{Totaal volume beton}]$$

Palen:

De onderstaande berekening berekent de hoeveelheid palen vanuit de gestelde uitgangspunten in het rapport. Aangenomen wordt dat er 450 x 450 betonpalen worden toegepast van 10 meter lang in een raster van 2 bij 2 meter over de gehele lengte en breedte van de drempel.

$$L_{Pa} := 10 \text{ m}$$

[Lengte palen]

$$A_{Pa;ov.seg} := \frac{b_{s;t}}{2 \text{ m}} \cdot \frac{L_{P;ov.seg}}{2 \text{ m}} = 544.5$$

[Aantal benodigde palen]

$$n_{Pa;seg.kl} := A_{Pa;ov.seg} \cdot L_{Pa} = (5.445 \cdot 10^3) \text{ m}$$

[Totaal benodigde paallengte]

Wapening:

De onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheid benodigde wapening vanuit de uitgangspunten uit het rapport. Aangenomen wordt dat 160 kg betonstaal wordt toegepast per m3 beton (R.O.K.).

$$W_k := 160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

[Kengetal voor wapening (bron: Hydraulic structures - Cassoins)]

$$W_{B;ov.seg} := W_k \cdot I_{tot;ov.seg} = (1.365 \cdot 10^6) \text{ kg}$$

[Hoeveelheid benodigde wapening]

Bekisting:

De onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheden bekisting van de Overstroombare Segmentdeur.

$$L_{B;P;ov.seg} := (L_{P;ov.seg} + (S_{d;seg} \cdot 3) + (S_{d;sb} \cdot 3 \cdot 2))$$

$$L_{B;P;ov.seg} = 18.725 \text{ m}$$

[Lengte van pijlers inclusief sponningen]

$$O_{B;P;ov.seg} := 2 \cdot L_{B;P;ov.seg} + 2 \cdot d_{P;seg} = 46.25 \text{ m}$$

[Omtrek Pijlers]

$$A_{B;P;ov.seg} := O_{B;P;ov.seg} \cdot h_{ov.seg} = 300.625 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte per pijler]

$$A_{B;D;ov.seg} := b_{s;t} \cdot d_D \cdot 2 + L_{P;ov.seg} \cdot d_D = 909.375 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte drempel]

$$A_{B;ov.seg} := A_{B;P;ov.seg} \cdot n_{P;seg} + A_{B;D;ov.seg}$$

[Bekistingsoppervlakte totale stuw]

$$A_{B;ov.seg} = (2.413 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

Bodembescherming:

De onderstaande formule bepaalt de bodembeschermingslengte zoals gegeven in de bron: Ontwerp van Schutsluizen.

$$L_B > 8 \cdot h_{wd;s;t}$$

[Minimale lengte bodembescherming]

$$L_{B;be} := 10 \cdot h_{wd;s;t} = 64.5 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming benedenstrooms]

$$L_{B;bo} := 8 \cdot h_{wd;s;t} = 51.6 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming bovenstrooms]

$$A_B := L_{B;be} \cdot b_{s;t} + L_{B;bo} \cdot b_{s;t} = (1.672 \cdot 10^4) \text{ m}^2$$

[Oppervlak toe te passen met bodembescherming]

Krachten:

Hieronder zijn de totale krachten op de deur uitgewerkt.

$$F_{max;ov.seg} := q_{max;tot} \cdot b_{op;ov.seg} = (1.34 \cdot 10^4) \text{ kN}$$

[Totale maximale kracht op deur]

$$M_{max;ov.seg} := \frac{1}{8} \cdot q_{max;tot} \cdot b_{op;ov.seg}^2 = (5.108 \cdot 10^4) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Maximaal moment over gehele deur]

4.3 Klep-balgstuw

Paragraaf 4.3 beschrijft de afmetingen van de Klep-balgstuw zoals deze bepaald zijn. Deze variant heeft drie stuwopeningen.

$$b_{op;kl.b} := \frac{(b_{s;t} - d_{p;kl.b} \cdot n_{p;kl.b})}{n_{kl.b}} = 42.667 \text{ m} \quad [\text{Breedte stuwopening}]$$

$$h_{D;kl.b} := 2 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte drempel}]$$

$$h_{kl.b} := h_{wd;s;t} = 6.45 \text{ m} \quad [\text{Hoogte deur (0,3 m marge)}]$$

$$b_{kl.b} := b_{op;kl.b} = 42.667 \text{ m} \quad [\text{Breedte deur}]$$

$$\angle_{klep} := 60^\circ \quad [\text{Hoek klepstuw (aannname)}]$$

$$L_{kl.b} := \frac{h_{kl.b}}{\sin(\angle_{klep})} = 7.448 \text{ m} \quad [\text{Lengte Klep}]$$

$$L_{p;kl.b} := L_{kl.b} + 5.5 \text{ m} = 12.948 \text{ m} \quad [\text{Lengte pijlers en drempel}]$$

$$h_{p;kl.b} := h_{u;o} + 1 \text{ m} = 9.5 \text{ m} + \text{NAP} \quad [\text{Hoogte pijlers}]$$

$$A_{s;t;kl.b} := (h_{u;o} - h_{D;kl.b}) \cdot b_{op;kl.b} \cdot n_{kl.b} = 832 \text{ m}^2 \quad [\text{Doorstromend oppervlak stuw}]$$

$$v_{s;t;kl.b} := \frac{Q_z}{A_{s;t;kl.b}} = 2.167 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Stroomsnelheid bij zomerbeddebiet}]$$

De bovenstaande afmetingen kunnen getoetst worden met de onderstaande Unity check, bij een waarde onder de 1 is het doorstromend oppervlak groot genoeg volgens de eisen:

$$\frac{A_{s;t}}{A_{s;t;kl.b}} \leq 1 \quad \frac{A_{s;t}}{A_{s;t;kl.b}} = 0.847 \quad [\text{Unity check}]$$

Staal:

Onderstaande berekeningen geven grofweg de hoeveelheden van staal weer. Beginnend bij het plaatwerk. De klep bevat om de meter een gording die de krachten opneemt. De gordingen lopen in dikte af over de hoogte van de deur.

$$b_{g;kl.b} := 100 \text{ mm} \quad [\text{Breedte gording}]$$

$$b_{p;kl.b} := 1 \text{ m} - b_{g;kl.b} = 0.9 \text{ m} \quad [\text{Maximale overspanning voor plaatwerk}]$$

$$M_{p;b,kl} := \frac{1}{8} \cdot q_{\max;tot} \cdot b_{p;kl.b}^2 = 44.474 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad [\text{Maximaal moment in plaatwerk}]$$

De onderstaande formules berekenen de dikte van de plaat. Dit wordt gedaan door het moment te substitueren in de formule voor het weerstandsmoment en deze daarna om te schrijven.

$$W_p := \frac{1}{6} b_{p;kl.b} \cdot d_{p;\min}^2 \quad [\text{Weerstandsmoment}]$$

$$\sigma_p := f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [\text{Maximaal toegestane spanning in plaat}]$$

$$\sigma_p := \frac{M_{cRd}}{W_p} \rightarrow W_p := \frac{M_{cRd;p}}{\sigma_p} \quad [\text{Spanning in materiaal}]$$

$$d_{p;\min} := \sqrt{\frac{\left(\frac{M_{p;b,kl}}{f_y}\right)}{\frac{1}{6} \cdot b_{p;kl.b}}} = 35.52 \text{ mm} \quad [\text{Minimale dikte plaatwerk}]$$

$$\rho_s := 47 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \quad [\text{Volumiek gewicht staal}]$$

$$G_{p;kl.b} := d_{p;\min} \cdot L_{kl.b} \cdot b_{kl.b} \cdot n_{kl.b} \cdot \rho_s = (1.592 \cdot 10^3) \text{ kN} \quad [\text{Gewicht plaatmateriaal kleppen}]$$

$$G_{p;kl,b} := d_{p;min} \cdot L_{kl,b} \cdot b_{kl,b} \cdot n_{kl,b} \cdot \rho_S = (1.592 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

De onderstaande berekening neemt aan dat de maximale kracht op de klep opgenomen en afgedragen moet worden door de gordingen tot de hoogte van de balg in staande stand. De klep steunt tot een hoogte van 3 meter op de balg. Vanaf de bovenkant balg tot bovenin de deur zullen de gordingen taps toelopen tot een lengte van de gording waarbij de gording alleen de ijsbelasting hoeft op te nemen. Vanaf de balg naar beneden lopen de gordingen even dik naar het draaipunt. Voor de gordingen wordt aangenomen dat de hydrostatische en de hydrodynamische belastingen allebij op 1/3 van de hoogte tussen de balg en het maximum waterpeil aangrijpen. De figuur hiernaast visualiseert de dimensionering van de gordingen. De gordingen dienen te voldoen aan de volgende Unity check:



$$\frac{M_{g;kl,b}}{M_{cRd;g;kl,b}} \leq 1$$

[Unity check (optredend moment/ op te nemen moment)]

$$h_{g;kl,b} := (h_{u;o} - h_{D;kl,b}) - 3 \text{ m} = 3.5 \text{ m}$$

[Hoogte vanaf maximum waterspiegel tot bovenkant balg]

$$L_{g;kl,b} := \frac{h_{g;kl,b}}{\sin(\angle_{klep})} = 4.041 \text{ m}$$

[Lengte gording vanaf bovenkant balg]

$$q_{g;kl,b} := q_{max;tot} \cdot \frac{h_{g;kl,b}}{h_{kl,b}} = 238.355 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maatgevende lijnbelasting ter hoogte van bovenkant balg]

$$F_{g;hyd;kl,b} := 0.5 \cdot q_{g;kl,b} \cdot h_{g;kl,b} \cdot b_{p;kl,b} = 375.408 \text{ kN}$$

[Maatgevende belasting door te voeren per gording]

$$a_{g;kl,b} := \frac{\left(\frac{h_{g;kl,b}}{3}\right)}{\sin(\angle_{klep})} = 1.347 \text{ m}$$

[Aangrijpingspunt belasting (boven balg) over lengte van klep vanaf balg]

$$M_{g;hyd;kl,b} := F_{g;hyd;kl,b} \cdot a_{g;kl,b} = 505.732 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Maatgevend moment in gording ter gevolge van waterdrukken]

$$q_{IJs;kar} = 82.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Maatgevende ijsbelasting bovenin de klep]

$$F_{g;ijs;kl,b} := b_{p;kl,b} \cdot q_{IJs;kar} = 74.25 \text{ kN}$$

[Ijsbelasting per gording]

$$M_{g;ijs;kl,b} := F_{g;ijs;kl,b} \cdot 0.2 \text{ m} = 14.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Moment ter gevolge van ijsbelasting in gording (grijpt vlak onder waterspiegel aan)]

De gordingen worden gedimensioneerd als massieve balken. Onderstaande berekeningen toetsen de gordingen voor bovenin de balk (ijsbelasting) en ter hoogte van de bovenkant balg (onderin). In de bovenstaande schematisatie is een gording geschetst in een langsdoorsnede.

$$d_{g;b;kl,b} := 65 \text{ mm}$$

[Dikte gording bovenin]

$$W_{g;b;kl,b} := \frac{1}{6} b_{g;kl,b} \cdot d_{g;b;kl,b}^2 = (7.042 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

[Weerstandsmoment bovenin de balk]

$$M_{cRd;g;b;kl,b} := f_y \cdot W_{g;b;kl,b} = 16.548 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Op te nemen moment door gording bovenin de balk]

$$\frac{M_{g;ijs;kl,b}}{M_{cRd;g;b;kl,b}} \leq 1 \quad \frac{M_{g;ijs;kl,b}}{M_{cRd;g;b;kl,b}} = 0.897$$

[Unity check gording voor ijsbelasting]

$$d_{g;o;kl.b} := 360 \text{ mm}$$

[Dikte gording onderin]

$$W_{g;o;kl.b} := \frac{1}{6} b_{g;kl.b} \cdot d_{g;o;kl.b}^2 = (2.16 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

[Weerstandsmoment onderin de balk]

$$M_{cRd;g;o;kl.b} := f_y \cdot W_{g;o;kl.b} = 507.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Op te nemen moment door gording onderin de blak]

$$\frac{M_{g;hyd;kl.b}}{M_{cRd;g;b;kl.b}} \leq 1 \quad \frac{M_{g;hyd;kl.b}}{M_{cRd;g;o;kl.b}} = 0.996 \text{ m}$$

[Unity check gording voor hydraulische belasting]

Het gewicht van de gordingen is hieronder berekend.

$$n_{g;kl.b} := \frac{b_{kl.b}}{b_{p;kl.b} + b_{g;kl.b}} \cdot n_{kl.b} = 128$$

[Aantal gordingen]

$$I_{g;kl.b;65} := L_{kl.b} \cdot b_{g;kl.b} \cdot d_{g;b;kl.b}$$

[Inhoud: gehele lengte gording* minimale dikte bovenin (65 mm)]

$$I_{g;kl.b;balg} := (L_{kl.b} - L_{g;kl.b}) \cdot (d_{g;o;kl.b} - d_{g;b;kl.b}) \cdot b_{g;kl.b}$$

[Inhoud verdikking onderste deel bij balg]

$$I_{g;kl.b;schiin} := \frac{L_{g;kl.b} \cdot (d_{g;o;kl.b} - d_{g;b;kl.b}) \cdot b_{g;kl.b}}{2}$$

[Inhoud gording schuine deel vanaf bovenkant balg]

$$I_{g;kl.b} := I_{g;kl.b;65} + I_{g;kl.b;balg} + I_{g;kl.b;schiin} = 0.209 \text{ m}^3$$

[Inhoud gehele gording]

$$G_{g;kl.b} := I_{g;kl.b} \cdot n_{g;kl.b} \cdot \rho_S = (1.254 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

[Totale gewicht gordingen]

Het totale gewicht van het staalwerk is hieronder weergeven:

$$G_{S;kl.b} := G_{p;kl.b} + G_{g;kl.b} = (2.846 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

[Totale gewicht staalwerk]

Beton:

Onderstaande berekeningen berekenen de hoeveelheid benodigd beton. Sponningen zijn even breed als diep.

$$I_{D;kl.b} := d_D \cdot L_{P;kl.b} \cdot b_{s;t} = (5.593 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

[Volume van drempel]

$$I_{P;kl.b} := (L_{P;kl.b} \cdot d_{P;kl.b} - 4 \cdot S_{d;sb}^2) \cdot (h_{P;kl.b} - h_{D;kl.b}) \cdot n_{P;kl.b}$$

$$I_{P;kl.b} = (1.524 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

[Inhoud pijlers]

$$I_{tot;kl.b} := I_{D;kl.b} + I_{P;kl.b} = (7.117 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

[Totaal volume beton]

Palen:

Onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheid palen vanuit de gestelde uitgangspunten in het rapport. Aangenomen wordt dat er 450 x 450 betonpalen worden toegepast van 10 meter lang in een raster van 2 bij 2 meter over de gehele lengte en breedte van de drempel.

$$L_{Pa} := 10 \text{ m}$$

[Lengte palen]

$$A_{Pa;kl.b} := \frac{b_{s;t}}{2 \text{ m}} \cdot \frac{L_{P;kl.b}}{2 \text{ m}} = 466.121$$

[Aantal benodigde palen]

$$n_{Pa;kl.b} := A_{Pa;kl.b} \cdot L_{Pa} = (4.661 \cdot 10^3) \text{ m}$$

[Totaal benodigde paallengte]

Wapening:

Onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheid benodigde wapening vanuit de uitgangspunten uit het rapport. Aangenomen wordt dat 160 kg betonstaal wordt toegepast per m3 beton.

$$W_k := 160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

[Kengetal voor wapening (bron: Hydraulic structures - Cassoins)]

$$W_{B;kl.b} := W_k \cdot I_{\text{tot};kl.b} = (1.139 \cdot 10^6) \text{ kg}$$

[Hoeveelheid benodigde wapening]

Bekisting:

Onderstaande berekening berekent de hoeveelheden benodigde bekisting voor de Klep-balgstuw.

$$L_{B;P;kl.b} := (L_{P;kl.b} + (S_{d;sb} \cdot 3 \cdot 2))$$

[Lengte van pijlers inclusief sponningen]

$$L_{B;P;kl.b} = 15.948 \text{ m}$$

$$O_{B;P;kl.b} := 2 \cdot L_{B;P;kl.b} + 2 \cdot d_{P;kl.b} = 39.896 \text{ m}$$

[Omtrek Pijlers]

$$A_{B;P;kl.b} := O_{B;P;kl.b} \cdot h_{kl.b} = 257.327 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte per pijler]

$$A_{B;D;kl.b} := b_{s;t} \cdot d_D \cdot 2 + L_{P;kl.b} \cdot d_D = 902.843 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte drempel]

$$A_{B;kl.b} := A_{B;P;kl.b} \cdot n_{P;kl.b} + A_{B;D;kl.b} = (1.932 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte totale stuw]

Bodembescherming:

Onderstaande formule bepaalt de bodembeschermingslengte zoals gegeven in de bron: Ontwerp van Schutsluizen.

$$L_B > 8 \cdot h_{wd;s;t}$$

[Minimale lengte bodembescherming]

$$L_{B;be} := 10 \cdot h_{wd;s;t} = 64.5 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming benedenstrooms]

$$L_{B;bo} := 8 \cdot h_{wd;s;t} = 51.6 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte bodembescherming bovenstrooms]

$$A_B := L_{B;be} \cdot b_{s;t} + L_{B;bo} \cdot b_{s;t} = (1.672 \cdot 10^4) \text{ m}^2$$

[Oppervlak toe te passen met bodembescherming]

Krachten:

Hieronder zijn de totale krachten op de deur uitgewerkt.

$$F_{\text{max};kl.b} := q_{\text{max};\text{tot}} \cdot b_{\text{op};kl.b} = (1.874 \cdot 10^4) \text{ kN}$$

[Totale maximale kracht op deur]

$$M_{\text{max};kl.b} := \frac{1}{8} \cdot q_{\text{max};\text{tot}} \cdot b_{\text{op};kl.b}^2 = (9.995 \cdot 10^4) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Maximaal moment over gehele deur]

4.4 Kniestuw

Paragraaf 4.4 beschrijft de afmetingen van de kniestuw zoals deze bepaald zijn. Deze variant heeft drie stuwopeningen.

$$S_{d;kn} := \frac{8 \text{ m} + 1 \text{ m}}{2} = 4.5 \text{ m}$$

[Gemiddelde diepte sponning voor kniestuw, de helft van de sponningen is 8 m, de andere helft 1 m diep]

$$S_{b;kn} := 1 \text{ m}$$

[Breedte sponning voor kniestuw]

$$d_{P;kn;1} := 10 \text{ m}$$

[Dikte brede pijlers bij kniestuw]

$$d_{P;kn;2} := 6 \text{ m}$$

[Dikte smalle pijlers bij kniestuw]

$$L_{P;kn} := 20 \text{ m}$$

[Lengte pijlers (& drempels)]

$$b_{op;kn} := \frac{(b_{s;t} - d_{P;kn;1} \cdot n_{P;kn;1} - d_{P;kn;2} \cdot n_{P;kn;2})}{n_{kn}} = 36 \text{ m}$$

[Breedte stuwopening]

$$h_{D;kn} := 1.9 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Hoogte drempel]

$$h_{kn} := h_{u;o} - h_{D;kn} = 6.6 \text{ m}$$

[Hoogte deur (0,3 m marge)]

$$b_{kn} := b_{op;kn} + 2 \cdot 1 \text{ m} = 38 \text{ m}$$

[Breedte deur (inclusief 1 m extra breedte aan beide zijden waar deur in sponningen valt)]

$$O_{kn} := 1 \text{ m}$$

[Overlap van platen bij draaipunt in het midden van deur]

$$h_{P;kn} := h_{u;o} + 1 \text{ m} = 9.5 \text{ m} + \text{NAP}$$

[Hoogte pijlers]

$$A_{s;t;kn} := (h_{u;o} - h_{D;kn}) \cdot b_{op;kn} \cdot n_{kn}$$

[Doorstromend oppervlak stuw]

$$A_{s;t;kn} = 712.8 \text{ m}^2$$

$$v_{s;t;kn} := \frac{Q_z}{A_{s;t;kn}} = 2.529 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Stroomsnelheid door stuw]

De bovenstaande afmetingen kunnen getoetst worden met de onderstaande Unity check.

$$\frac{A_{s;t}}{A_{s;t;kn}} \leq 1$$

$$\frac{A_{s;t}}{A_{s;t;kn}} = 0.988$$

[Unity check]

Staal:

Onderstaande berekeningen geven grofweg de hoeveelheden van staal weer. Beginnend bij het plaatwerk.

De volgende formules bepalen de dikte (in stroomrichting) van de plaat. Dit wordt gedaan door het moment te substitueren in de formule voor de weerstandsmoment.

$$b_{p;kn} := 2 \text{ m}$$

[Maximale overspanning voor plaatwerk]

$$M_{p;kn} := \frac{1}{8} \cdot q_{\max;tot;kn} \cdot b_{p;kn}^2 = 225.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[Maximaal moment in plaatwerk]

$$W_p := \frac{1}{6} b_{p;kn} \cdot d_{p;\min}^2$$

[Weerstandsmoment]

$$\sigma_p := f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

[Maximaal toegestane spanning in plaat]

$$\sigma_p := \frac{M_{cRd;p}}{W_p} \rightarrow W_p := \frac{M_{cRd;p}}{\sigma_p}$$

[Spanning in materiaal]

$$d_{p;min} := \sqrt{\frac{\left(\frac{M_{p;kn}}{f_y}\right)}{\frac{1}{6} \cdot b_{p;kn}}} = 53.651 \text{ mm}$$

[Minimale dikte plaatwerk]

$$\rho_S := 47 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

[Volumiek gewicht staal]

$$G_{p;kn} := d_{p;min} \cdot h_{kn} \cdot (b_{kn} + O_{kn}) \cdot n_{kn} \cdot \rho_S$$

$$G_{p;kn} = (1.947 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

[Gewicht plaat materiaal]

Voor het overige staalwerk wordt het volgende aangenomen:

- Een vakwerk wordt toegepast met vakken van 2 (h) bij 2 (b) bij 1 (d) meter
- De vakken zullen bestaan uit 8 ribben bestaande uit vierkante holle buizen van 250 * 250 * 12.5 mm warmgewalst staal. De horizontale en verticale gordingen aan de uiterste zijden bestaan uit deze buizen. De staven die diagonaal en in de stroomrichting lopen zijn rand- en wandstaven.
- Per vak zullen daarnaast 10 ronde rand- en wandstaven worden toegepast met een diameter van 168,3 mm en een wanddikte van 8 mm.
- De rotatiepunten wegen per stuk 10 ton (100 kN).

De Kniestuw bestaat uit twee vakwerken die gedeeltelijk overlappen. Voor deze berekening wordt aangenomen dat het 1 lang vakwerk is waarin de overlapping is meegerekend.

$$G_{v;g;kn} := 112 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot g = 1.098 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Gewicht vakwerkgordingen (Tabellenboek)]

$$G_{v;rw;kn} := 39 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot g = 0.382 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

[Gewicht vakwerk rand- & wandstaven (Tabellenboek)]

$$G_{R;kn} := 100 \text{ kN}$$

[Gewicht rotatiepunt]

$$n_{v;g;h;kn} := \left(\frac{6 \text{ m}}{2 \text{ m}} + 1\right) \cdot 2 = 8$$

[Aantal horizontale gordingen voor vakwerk per 'knie' (h = +/- 6 m, 2 rijen gordingen)]

$$l_{v;g;h;kn} := b_{kn} + O_{kn} = 39 \text{ m}$$

[Lengte horizontale gordingen van vakwerk]

$$n_{v;g;v;kn} := \left(\frac{l_{v;g;h;kn}}{2 \text{ m}} + 1\right) \cdot 2 = 41$$

[Aantal verticale gordingen voor vakwerk per 'knie']

$$l_{v;g;v;kn} := h_{kn} = 6.6 \text{ m}$$

[Lengte verticale gordingen van vakwerk]

$$n_{v;w;kn} := \frac{l_{v;g;h;kn}}{2 \text{ m}} \cdot 2 \cdot 7 = 273$$

[Aantal wandstaven (horizontaal)]

$$l_{v;w;kn} := \frac{1.21 \text{ m} + 0.45 \text{ m}}{2} = 0.83 \text{ m}$$

[Gemiddelde lengte wandstaven]

$$n_{v;r;kn} := \frac{6 \text{ m}}{2 \text{ m}} \cdot 2 \cdot 39 = 234$$

[Aantal randstaven (verticaal)]

$$l_{v;r;kn} := \frac{1.21 \text{ m} + 0.45 \text{ m}}{2} = 0.83 \text{ m}$$

[Gemiddelde lengte randstaven]

$$G_{v;g;tot;kn} := G_{v;g;kn} \cdot (l_{v;g;v;kn} \cdot n_{v;g;v;kn}) + G_{v;g;kn} \cdot (l_{v;g;h;kn} \cdot n_{v;g;h;kn})$$

$$G_{v;g;tot;kn} = 639.896 \text{ kN}$$

[Gewicht van alle gordingen]

$$G_{v;rw;tot;kn} := G_{v;rw;kn} \cdot (l_{v;w;kn} \cdot n_{v;w;kn}) + G_{v;rw;kn} \cdot (l_{v;r;kn} \cdot n_{v;r;kn})$$

$$G_{v;rw;tot;kn} = 160.943 \text{ kN}$$

[Gewicht van alle rand- & wandstaven]

$$G_{v;tot;kn} := G_{v;g;tot;kn} + G_{v;rw;tot;kn} = 800.838 \text{ kN}$$

[Totale gewicht vakwerk]

$$G_{S;kn} := G_{p;kn} + G_{v;tot;kn} \cdot n_{kn} + G_{R;kn} \cdot 2 \cdot n_{kn}$$

[Totale gewicht staal in alle stuwopeningen]

$$G_{S;kn} = (4.95 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Beton:

Onderstaande berekeningen berekenen de hoeveelheid benodigd beton voor de kniestuw. Schotbalksponningen zijn even diep als breed.

$$I_{D;kn} := d_D \cdot L_{P;kn} \cdot b_{s;t} = (8.64 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

[Volume van drempel]

$$I_{P;kn;1} := (L_{P;kn} \cdot d_{P;kn;1} - (2 \cdot S_{d;kn} \cdot S_{b;kn}) - 4 \cdot S_{d;sb}^2) \cdot (h_{P;kn} - h_{D;kn}) \cdot n_{P;kn;1}$$

$$I_{P;kn;1} = (4.332 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

[Inhoud brede pijlers]

$$I_{P;kn;2} := (L_{P;kn} \cdot d_{P;kn;2} - (2 \cdot S_{d;kn} \cdot S_{b;kn}) - 4 \cdot S_{d;sb}^2) \cdot (h_{P;kn} - h_{D;kn}) \cdot n_{P;kn;2}$$

$$I_{P;kn;2} = 836 \text{ m}^3$$

[Inhoud smalle pijlers]

$$I_{tot;kn} := I_{D;kn} + I_{P;kn;1} + I_{P;kn;2} = (1.381 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

[Totaal volume beton]

Palen:

Onderstaande berekening bepalen de hoeveelheid palen vanuit de gestelde uitgangspunten in het rapport. Aangenomen wordt dat er 450 x 450 betonpalen worden toegepast van 10 meter lang in een raster van 2 bij 2 meter over de gehele lengte en breedte van de drempel.

$$L_{Pa} := 10 \text{ m}$$

[Lengte palen]

$$A_{Pa;kn} := \frac{b_{s;t}}{2 \text{ m}} \cdot \frac{L_{P;kn}}{2 \text{ m}} = 720$$

[Aantal benodigde palen]

$$n_{Pa;kn} := A_{Pa;kn} \cdot L_{Pa} = (7.2 \cdot 10^3) \text{ m}$$

[Totaal benodigde paallengte]

Wapening:

Onderstaande berekening bepalen de hoeveelheid benodigde wapening vanuit de uitgangspunten uit het rapport. Aangenomen wordt dat 160 kg betonstaal wordt toegepast per m3 beton.

$$W_k := 160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

[Kengetal voor wapening (bron: Hydraulic structures - Cassoins)]

$$W_{B;kn} := W_k \cdot I_{tot;kn} = (2.209 \cdot 10^6) \text{ kg}$$

[Hoeveelheid benodigde wapening]

Bekisting:

De onderstaande berekening bepaalt de hoeveelheden benodigde bekisting voor de Kniestuw.

$$L_{B;P;kn} := L_{P;kn} + (S_{d;kn} \cdot 2 + S_{b;kn}) + (S_{d;sb} \cdot 3 \cdot 2) = 33 \text{ m}$$

[Lengte van pijlers inclusief sponningen]

$$O_{B;P;kn;1} := 2 \cdot L_{B;P;kn} + 2 \cdot d_{P;kn;1} = 86 \text{ m}$$

[Omtrek Brede Pijlers]

$$O_{B;P;kn;2} := 2 \cdot L_{B;P;kn} + 2 \cdot d_{P;kn;2} = 78 \text{ m}$$

[Omtrek Smalle Pijlers]

$$A_{B;P;kn;1} := O_{B;P;kn;1} \cdot h_{kn} = 567.6 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte brede pijler]

$$A_{B;P;kn;2} := O_{B;P;kn;2} \cdot h_{kn} = 514.8 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte smalle pijler]

$$A_{B;D;kn} := b_{s;t} \cdot d_D \cdot 2 + L_{P;kn} \cdot d_D = 924 \text{ m}^2$$

[Bekistingsoppervlakte drempel]

$$A_{B;kn} := A_{B;P;kn;1} \cdot n_{P;kn;1} + A_{B;P;kn;2} \cdot n_{P;kn;2} + A_{B;D;kn}$$

[Bekistingsoppervlakte totale stuw]

$$A_{B;kn} = (3.142 \cdot 10^3) \text{ m}^2$$

Bodembescherming:

Onderstaande formule berekent de bodembeschermingslengte zoals gegeven in de bron: Ontwerp van Schutsluizen.

$$L_B > 8 \cdot h_{wd;s;t;kn}$$

[Minimale lengte
bodembescherming]

$$L_{B;be} := 10 \cdot h_{wd;s;t;kn} = 65.5 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte
bodembescherming
benedenstrooms]

$$L_{B;bo} := 8 \cdot h_{wd;s;t;kn} = 52.4 \text{ m}$$

[Toegepaste lengte
bodembescherming bovenstrooms]

$$A_B := L_{B;be} \cdot b_{s;t} + L_{B;bo} \cdot b_{s;t} = (1.698 \cdot 10^4) \text{ m}^2$$

[Oppervlak toe te passen met
bodembescherming]

Krachten:

Hieronder zijn de totale krachten op de deur uitgewerkt.

$$F_{\max;kn} := q_{\max;tot;kn} \cdot b_{op;kn} = (1.623 \cdot 10^4) \text{ kN}$$

[Totale maximale kracht op
deur]

$$M_{\max;kn} := \frac{1}{8} \cdot q_{\max;tot;kn} \cdot b_{op;kn}^2$$

[Maximaal moment over gehele
deur]

$$M_{\max;kn} = (7.306 \cdot 10^4) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

BIJLAGE E. LOCATIESTUDIE

Een tweetal eisen zijn leidend voor het bepalen van de exacte locatie van de nieuwe stuw bij Grave. Dit zijn:

- 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.
- OpdrEis-3: Stuw Grave blijft op het huidige stuwcomplex (binnen de strekdammen). De nieuwe stuw dient los van de brug te staan.

Daarnaast zijn enkele aanvullende randvoorwaarden van belang voor het bepalen van de locatie van de nieuwe stuw. Onderstaande opsomming geeft deze randvoorwaarden met het gevolg ervan op de locatie van de stuw:

- Ca. 700 m bovenstrooms van de huidige stuw bevindt zich de ingang van de haven van Grave. Het is van belang dat de waterstand in deze haven gelijk blijft. De nieuwe stuw mag dus niet bovenstrooms van deze haven komen.
- Benedenstrooms van de huidige stuw loost het gemaal van Sasse het water van de Raam uit op de Maas. Om het gemaal zonder aanpassingen werkende te houden, is het van belang dat de waterstand van de Maas bij dit gemaal gelijk blijft. De nieuwe stuw mag dus niet benedenstrooms van dit gemaal komen.
- Naast de huidige stuw bevindt zich een vistrap die de vissen om de stuw heen leidt. De instroom van de vistrap bevindt zich ca. 300 m bovenstrooms van de huidige stuw, de uitstroom ca. 40 m benedenstrooms van de huidige stuw. Wanneer de nieuwe stuw zich binnen deze afmetingen zal bevinden, kan de vistrap zonder aanpassingen dienst blijven doen. Aanpassingen van de vistrap hebben relatief kleine kosten ten opzichte van het nieuw te bouwen stuwcomplex. Toch heeft het wel de voorkeur om gebruik te blijven maken van de huidige vistrap.
- Benedenstrooms van de huidige stuw, ca. 150 m, bevindt zich een diepe kuil in de bodem van de Maas met een diepte tot $-10\text{ m} + \text{NAP}$ (Paans van Oord, 2017). De bodem van de Maas zelf ligt op $0\text{ m} + \text{NAP}$. Deze diepe kuil zorgt ervoor dat het bouwen van een stuw op de locatie van de kuil veel extra kosten en onzekerheid met zich meeneemt. Het heeft dus niet de voorkeur om de stuw op de locatie van deze kuil te bouwen.

Tussen de huidige stuw en de uitstroom van de vistrap is niet voldoende ruimte beschikbaar om een nieuwe stuw te bouwen. Bovenstrooms van de huidige stuw, tussen de stuw en de instroom van de vistrap is wel voldoende ruimte om de nieuwe stuw te bouwen. De Maas loopt hier recht en aan de westzijde is veel ruimte op het land beschikbaar voor een eventuele bouwplaats. Daarnaast voldoet deze locatie aan de gestelde eisen. Voor het uitwerken van de varianten is de locatie van de nieuwe stuw, 200 m bovenstrooms van de huidige stuw, het uitgangspunt. Figuur 58 laat deze locatie zien. Het rapport: 'Investeringsraming vervanging stuwen Maas' neemt dezelfde locatie aan voor de nieuwe stuw bij Grave (Jong, 2014). Tabel 33 laat enkele maatgevende dimensies zien die gelden ter plaatse van de locatie van de nieuwe stuw. Informatie over de ondergrond op de locatie is te vinden in Bijlage A3.4.



Figuur 58: Overzicht locatie stuw Grave (1= ingang haven van Grave, 2= in- en uitstroom vispassage huidige stuw, 3= uitstroom Gemaal van Sasse, 4= Locatie kuil, groene lijn= toekomstige stuw) (Google Earth, sd).

Tabel 33: Dimensies ter plaatse van nieuwe stuw. Bronnen: [1]: (Nationaal Georegister), [2]: (Actueel hoogtebestand Nederland, 2020), [3]: (Paans van Oord, 2017).

Dimensie:	Waarde:	Bron:
Breedte zomerbed	144,4 m	[1]
Breedte winterbed	887,16 m	[1]
Maaiveldhoogte uiterwaarde west	8,5 m + NAP	[2]
Hoogte strekdam	8,5 m + NAP	[2]
Maaiveldhoogte uiterwaarde oost	8,5 m + NAP	[2]
Doorstroombreedte winterbed onder brug	Ca.500 m	[1]
Hoogte winterdijk west	12,0 m	[2]
Hoogte winterdijk oost	12,5 m	[2]
Bodemhoogte Maas	0,0 m + NAP	[3]

BIJLAGE F. UITWERKING VARIANTEN

F1 Inleiding:

Deze bijlage gaat in op de vier varianten zoals beschreven in paragraaf 6.3 van het hoofdrapport. Deze bijlage licht de vier varianten toe aan de hand van de vijf hoofdcriteria van de MCA en geeft dus een kwalitatieve beoordeling per variant. In paragraaf F2 worden enkele aspecten van tevoren behandeld die gelden voor alle varianten. Paragrafen F3, F4, F5 en F6 behandelen per paragraaf een variant aan de hand van de verschillende hoofdcriteria.

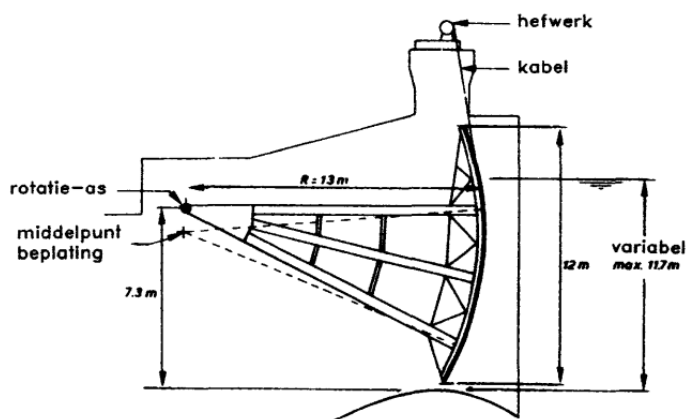
F2 Algemeen:

F2.1 Trillingen:

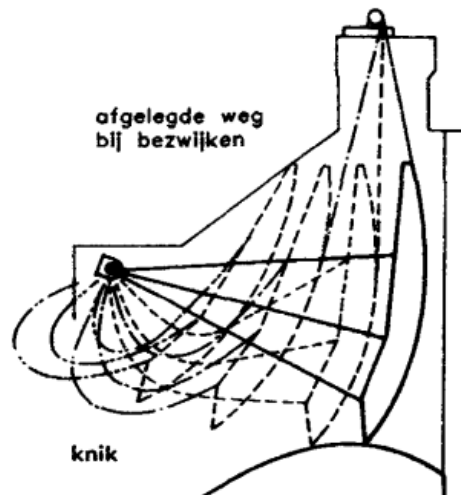
Het deelonderwerp trillingen bij stuwen is dermate complex, dat enkele dingen op voorhand gezegd dienen te worden over trillingen. In de afgelopen eeuw is vanuit beheer- en onderhoudsopgaven van civiele natte kunstwerken gebleken dat trillingen erg schadelijk kunnen zijn voor constructies. Trillingen kunnen onder andere ontstaan door waterstroming en kunnen zorgen dat bepaalde onderdelen op vermoeiing belast worden en uiteindelijk hierdoor zelfs bezwijken. Aangezien het ontstaan en voorkomen van trillingen erg complex is, staat op voorhand vast dat trillingen nooit geheel in beeld gebracht kunnen worden en dat theoretisch niet volledig onderbouwd kan worden dat een bepaald ontwerp trillingvrij zal zijn. Wel zijn verschillende aspecten te duiden waarbij een verhoogd risico op trillingen is, deze paragraaf behandelt een deel van deze aspecten.

Trillingen kunnen optreden bij stuwmiddelen als ze water doorlaten of als ze gesloten zijn. De hoge stroomsnelheden van water kunnen het gehele stuwmiddel in trilling brengen als de eigen frequentie van het stuwmiddel gelijk is aan de frequentie die wordt opgewekt door het stromende water. Een ander mogelijkheid is dat het stuwmiddel trilt door externe oorzaken zoals golven. Trillingen kunnen vaak voorkomen worden door een nauwkeurige vormgeving van onderranden, bovenranden of afdichtingen van het stuwmiddel. Dit onderzoek gaat niet in op deze detailleringsverschillen aangezien het ontwerp in dit onderzoek zeer globaal is. De gevolgen ten aanzien van trillingen die voortkomen uit het globale ontwerp zijn wel onderzocht en afgewogen in dit onderzoek. De opsomming hieronder geeft enkele aspecten en oorzaken met betrekking tot de gevoeligheid voor trillingen zoals deze zijn gevonden door P.A. Kolkman en T.H.G. Jongeling na jarenlang onderzoek naar trillingen (Kolkman & Jongeling, 2000):

- Bredere afsluitmiddelen hebben over het algemeen meer kans op trillingen (Kolkman & Jongeling, 2000).
- Afsluitmiddelen met een onderstroom zijn over het algemeen gevoeliger voor trillingen. Kritieke trillingen ontstaan over het algemeen als het stuwmiddel een klein stuk geheven is (Kolkman & Jongeling, 2000).
- Stuwmiddelen die evenwijdig geheven of neergelaten worden, zodat de spleet of overstroom overal even hoog is, zijn over het algemeen gevoeliger voor trillingen (Kolkman & Jongeling, 2000).
- Stuwmiddelen met een dunne afsluiting (bijvoorbeeld een dunne plaat) zijn over het algemeen gevoeliger voor trillingen, dit is echter erg afhankelijk van de detaillering van de afsluiting (Kolkman & Jongeling, 2000).
- Afdichtingen of afsluitingen die over de gehele breedte van het afsluitmiddel hetzelfde en recht zijn gedimensioneerd zonder onderbrekingen, veroorzaken over het algemeen sneller kritieke trillingen. Afdichtingen die krom lopen, onderbrekingen hebben of niet uniform zijn gedimensioneerd veroorzaken over het algemeen minder trillingen (Kolkman & Jongeling, 2000).
- Voor segmentdeuren geldt dat het risico op trillen kleiner is als het middelpunt en de radius van de buiging van de plaat gelijk zijn aan het draaipunt van de deur. Als dit niet het geval is kunnen schadelijke en kritieke trillingen ontstaan. Belastingen op de deur kunnen zorgen voor vervormingen waardoor het middelpunt van de gebogen plaat verschuift en alsnog sterke trillingen kunnen ontstaan (Kolkman & Jongeling, 2000). Figuur 59 en Figuur 60 geven een mogelijk risico op verplaatsing weer van het middelpunt van de plaat door belastingen met het mogelijke gevolg: het uitknikken van de onderste arm.



Figuur 59: Verplaatsing van de het middelpunt van beplating door kleine vervormingen (door belasting) (Kolkman & Jongeling, 2000).



Figuur 60: Uitknikken van onderste arm ten gevolge van trilling (Kolkman & Jongeling, 2000).

- Klepstuwen die gedeeltelijk drijven of enigszins elastisch belasting opvangen, zijn gevoelig voor trillingen ten gevolge van golven. Aangezien golven niet langdurig optreden met eenzelfde golfperiode is het risico op schade niet erg groot (Kolkman & Jongeling, 2000).

F2.2 Vispasseerbaarheid

De Maas is naast een vaarweg ook een route voor vissen. Stuwen vormen een ernstig obstakel voor vissen wanneer het stuwmiddel gesloten is. Over het algemeen zwemmen drie soorten vissen door de Maas: opwaarts trekkende (migrerende) vissen, neerwaarts migrerende vissen en stationaire vissen. De Zalm is de meest voorkomende opwaarts migrerende vissoort. In bovenstroomse gebieden van de Maas legt de Zalm eitjes, terwijl de vis zich voor het grootste gedeelte van zijn leven in zeewater bevindt. Paling is de meest voorkomende neerwaarts migrerende vis, deze vis paait juist in de zee. De stationaire vissen hebben over het algemeen een vast leefgebied, maar kunnen zich op kleine schaal verplaatsen. Voor de opwaartse trek zijn bij de stuwen in de Maas vistrappen aangelegd, de neerwaartse trek gebeurt echter grotendeels door de stuwen zelf. Opwaartse trek kan in sommige gevallen ook door de stuw zelf plaatsvinden, als deze deels of geheel geopend is. Dit onderzoek weegt vispassage enkel af als voor- of nadeel als deelcriterium.

Een aantal zaken spelen mee in de bepaling van de score ten aanzien van vispasseerbaarheid voor de vier varianten. De volgende aspecten zijn van toepassing op stuwen ten aanzien van vispassage:

Opwaartse migratie:

- Visverliezen ten gevolge van stuwen zijn geschat op 10% (de Jong, Kramer, & Ruijgh, 2020). De vindbaarheid van vistrappen of nevengeulen is hierbij een cruciale factor. Het juist aanleggen van vistrappen en/ of nevengeulen voor vispassage is daarom van groot belang voor opwaartse migratie van vissen. Voor neerwaartse migratie spelen de vistrappen en nevengeulen bijna geen rol (de Jong, Kramer, & Ruijgh, 2020). Vistrappen en nevengeulen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek.
- Vissen kunnen eventueel onder stuwmiddelen door zwemmen als sprake is van onderstroom. Een lage stroomsnelheid is hierbij gunstig. Dit onderzoek classificeert stuwmiddelen met mogelijke onderstroom daarom ook als gunstiger voor vispassering (Ruijgh, 2020).

Neerwaartse migratie:

- Vissen kunnen zowel bij onder-, boven- en zijstromen de stuw passeren (Vriese, 2017) (de Jong, Kramer, & Ruijgh, 2020).
- Waterkrachts centrales vormen de grootste reden van vissterfte (de Jong, Kramer, & Ruijgh, 2020). Dit valt buiten de scope van dit onderzoek.

- Turbulentie van water kan de reden zijn dat vissen verdoofd of verward worden, waardoor ze significant vaker ten prooi vallen aan predatoren (Vriese, 2017). Daarnaast kan grote turbulentie de reden zijn van visverliezen doordat vissen tegen objecten geslagen worden. De grootste oorzaken van turbulentie, en daarmee visverliezen, zijn de dimensionering van de woeldrempel en van verspringen in het beton benedenstrooms van het stuwmiddel (Ruijgh, 2020). Dit onderzoek voert de dimensionering van de woeldrempel en benedenstroomse aspecten niet uit. Een aspect dat wel meespeelt is dat woeldrempels of beton-verspringen vooral worden toegepast bij stuwen met onderstroom, om zo de stroomsnelheid van het water te verminderen. Concluderend kan gesteld worden dat onderstroom daarom minder geschikt is voor de neerwaartse migratie van vissen.
- Bij overstort is een belangrijk aspect, voor neerwaartse migratie, de turbulentie en de waterdiepte benedenstrooms. De waterdiepte dient niet ondiep te zijn zodat bij overstort vissen niet tegen de bodem klappen. Daarnaast kunnen vissen in de war raken of verdoofd raken. Dit zal zorgen voor een iets hogere predatie van de vissen (Vriese, 2017).

Samengevat is onderstroom bij een stuw iets minder geschikt dan overstort voor neerwaartse vismigratie van vissen. Dit komt door de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de hoge waterdruk bij de onderstroom, waardoor de energie in het water moet worden afgeremd door een woeldrempel of verspringingen in het beton. Dit zorgt voor meer turbulentie dan overstort. Voor opwaartse migratie is een onderstroom een voordeel omdat vissen een extra weg hebben om bovenstrooms van de stuw te komen. Dit aspect weegt echter niet op tegen de nadelen van onderstroom bij neerwaartse vismigratie. Dit onderzoek classificeert stuwen met de mogelijkheid tot zowel overstort als onderstroom als meest geschikt voor vismigratie, omdat hier flexibele aanpak mogelijk is ten aanzien van vismigratie.

F2.3 Aanvaringen

Weinig stuwmiddelen zijn bestand tegen de belastingen die een aanvaring met een schip veroorzaken. Een stuwmiddel hierop dimensioneren zou daarbij onevenredig veel materiaal, en daarmee kosten, met zich meebrengen. Dit onderzoek beschouwt de kans op aanvaringen, in plaats van hoeveel kracht een stuwmiddel kan opnemen bij een aanvaring. Hieronder zijn enkele factoren opgesomd die het risico op aanvaring vergroten:

- Grote rivierdebieten: Bij hoge rivierdebieten, en de daarbij horende grote watersnelheden, is het voor schepen moeilijker manoeuvreren.
- De doorvaarbaarheid van enkele stuwen: Enkele stuwen in de Maas zijn momenteel bij grote waterafvoeren doorvaarbaar. Voor schippers is het verwarrend als enkele stuwen wel doorvaarbaar zijn en andere niet.
- Slechte weersomstandigheden (en daardoor slecht zicht).

Het risico op aanvaring blijkt erg reëel te zijn door verschillende aanvaringen in de afgelopen jaren. De aanvaring van de stuw bij Grave op 29 december 2016 en de aanvaring van stuw Linne op 10 Februari 2020 zijn voorbeelden van stuwaanvaringen. Deze gebeurtenissen laten zien dat de kans op aanvaringen reëel is. Figuur 61 geeft de doorgevaren stuw bij Grave weer (Schuttevaer, 2018).



Figuur 61: Doorgevaren stuw bij Grave (Schuttevaer, 2018).

Bij enkele varianten verdwijnt het stuwmiddel volledig uit de doorstroomopening als sprake is van hoge debieten. Deze stuwmiddelen hebben een verlaagde kans op aanvaring in vergelijking tot stuwmiddelen die zich wel in de doorstroomopening bevinden bij grote waterafvoeren. De MCA geeft de stuwmiddelen die onder het water of uit de doorstroomopening verdwijnen daarom een hogere score.

F2.4 Doorvaarbaarheid

De doorvaarbaarheid van stuwen wordt niet meegerekend in de MCA maar alleen in de kosten-batenanalyse. Bijlage I2 gaat verder in op de baten ten gevolge van doorvaarbaarheid. Doorvaarbaarheid is niet opgenomen in de MCA omdat in gesprekken met de opdrachtgever en andere instanties bleek dat er geen duidelijke visie was op doorvaarbaarheid. Daarnaast zou de stuw ook maar een tiental dagen per jaar doorvaarbaar zijn. Dit is de reden dat de baten van de doorvaarbaarheid meegenomen worden in de kosten-batenanalyse en niet in de MCA.

F3 Variant 1: Segmentdeur met klep

Deze paragraaf behandelt de variant: de verticaal draaiende segmentdeur met klep (segmentdeur met klep) met betrekking tot de MCA. De vijf hoofdcriteria zoals in paragraaf 4.2.2 van het hoofdrapport beschreven vormen het uitgangspunt bij de kwalitatieve beschrijving van de variant.

F3.1 Uitvoering

De segmentdeur met klep is gedeeltelijk modulair in constructie: de regelklep kan los getransporteerd worden en later, op locatie, aan de segmentdeur gemonteerd worden. Dit betekent dat de rest van de segmentdeur in een stuk getransporteerd en geïnstalleerd wordt. De totale breedte van de verticale segmentdeur is 30,9 m. Transport van het stuwmiddel over de weg is hierdoor moeilijk. De segmentdeur kan wel over de Maas op een ponton of schip naar de stuwlocatie verscheept worden.

Wat betreft de bouwmethode is het toepassen van vier stuwopeningen voordeliger dan het toepassen van drie stuwopeningen. Met vier stuwopeningen zijn bijvoorbeeld de bouwuipen kleiner, is meer flexibiliteit mogelijk in fasering en is een groter deel van de rivier nog beschikbaar voor de afvoer van water. Hierin hebben de segmentdeur met klep en de overstroombare segmentdeur een voordeel ten opzichte van de klep-balgstuw en de kniestuw.

De installatie van de constructie dient redelijk nauwkeurig plaats te vinden, gezien de afdichting van het stuwmiddel (Daniel & Paulus, 2018). Hetzelfde geldt voor de dimensionering van de drempels (Erbisti, 2004). De kans op lekverliezen door onnauwkeurige installatie van het stuwmiddel is redelijk groot. Over het algemeen zal de segmentdeur met klep een relatief nieuw soort constructie zijn voor zowel ingenieurs als uitvoerders in Nederland. Hierdoor kunnen mogelijk meer onvoorziene omstandigheden en risico's optreden, in vergelijking met bekende stuwmiddelen. In vergelijking tot de andere varianten is dit echter geen groot nadeel omdat alle varianten redelijk onbekend zijn in Nederland. Een uitdaging wat betreft de maakbaarheid van de segmentdeur met klep is de regelklep die aan de segmentdeur gemonteerd dient te worden. Dit dient nauwkeurig plaats te vinden. Daarnaast zal het aantal aandrijvingen en bijhorende systemen bij toepassing van regelkleppen hoger zijn in vergelijking met het niet toepassen van de kleppen. Dit maakt de installatie complexer. Het installeren van regelkleppen met de bijbehorende systemen zorgt ervoor dat de segmentdeur met klep minder hoog scoort, op het deelcriterium 'maakbaarheid', dan de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw.

De segmentdeur met klep zal een redelijke korte constructietijd hebben in vergelijking met de andere varianten. De materiaalhoeveelheden zijn relatief klein, waardoor deze variant beter zal scoren op constructietijd dan de overstroombare segmentdeur en de kniestuw. Daarnaast kunnen de segmentdeuren en kleppen geprefabriceerd worden waardoor de deuren enkel gehesen geïnstalleerd dienen te worden en de kleppen gemonteerd dienen te worden; dit versnelt het bouwproces. De precieze afstelling van de deur en de grote installaties voor het bewegen van de deur zullen wel veel aandacht, precisie en tijd vragen (Daniel & Paulus, 2018).

F3.2 Betrouwbaarheid

Boven op de segmentdeur met klep zitten logischerwijs regelkleppen. Naast het reguleren van de waterstand hebben deze regelkleppen nog een andere functie. Als sprake is van grote hoeveelheden drijfvuil of ijsgang zullen de kleppen dit doorvoeren, doordat het vuil en ijs over de kleppen stroomt of schuift. Omdat de kleppen niet haaks op het water staan maar schuin in de stroomrichting, zal het drijfvuil en ijs over de klep heen drijven, schuiven of kruien. Voor het stuwmiddel zal dus minder snel ophoping van ijs of vuil ontstaan. Hierdoor zullen dus geen grote ijsbelastingen op het stuwmiddel werken.

Een gevaar dat bij stuwmiddelen kan ontstaan is dat een ophoping van sediment ontstaat op de drempel van het stuwmiddel (InCom Working Group, 2005). Dit kan ervoor zorgen dat een stuwmiddel bijvoorbeeld niet goed kan afsluiten. De verticaal draaiende segmentdeur kan, zoals eerder benoemd, een onderstroom waarborgen. Deze onderstroom kan dermate sterk zijn dat het de drempel 'schoonspoelt'. Het overtollige sediment zal met het water mee stromen. Hierbij ontstaat wel een risico op beschadiging van de onderzijde van het stuwmiddel, doordat objecten met een hoge snelheid over de bodem en onderlangs het stuwmiddel gaan.

De segmentdeur met klep is door de jaren heen veel toegepast buiten Nederland en is daarom een bewezen als technologie. Tabel 34 geeft een overzicht van toepassingen van de segmentdeur met klep. De vele eerdere toepassingen van de segmentdeur met klep hebben aangetoond dat de beschikbaarheid en bedrijfszekerheid redelijk hoog liggen. De beschikbaarheid van de segmentdeur met klep is naar verwachting groter dan die van de andere stuwmiddelen. De frequentie van het onderhoud van de segmentdeur met klep is gelijk aan de frequentie van het onderhoud van de overstroombare segmentdeur, en is relatief laag. Daarnaast is de verwachting dat het niet-beschikbaar zijn van het stuwmiddel door storingen en calamiteiten bij de segmentdeur met klep het kleinst is. Daarnaast kan de segmentdeur met klep goed vuil en ijs doorvoeren en is het stuwmiddel niet gevoelig voor vuil of sediment op de bodem. Met name dit aspect resulteert in een hoge score op het deelcriterium 'beschikbaarheid'.

Tabel 34: Toepassingen segmentdeuren met klep (Erbisti, 2004).

Year	Project	Quantity	Span (m)	Height (m)	Area (m ²)	Hydrostatic load (MN)	Manufacturer
1968	Regua	1	26.00	15.73	408.98	31.56	Sorefame
1972	Valeira	1	26.00	15.73	408.98	31.56	Sorefame
1967	Carrapateiro	2	26.00	15.23	395.98	29.58	Sorefame
1966	Paldang	2	20.00	16.75	335.00	27.52	ALSTOM
1975	Altienwörth	2	24.00	15.00	360.00	26.49	Thyssen-Klönne
1977	Pocinho	1	26.00	14.13	367.38	25.46	Sorefame
1983	Greifenstein	6	24.00	14.50	348.00	24.75	VA TECH Hydro
1966	Carbonne	4	18.00	16.20	291.60	23.17	ALSTOM
1993	Freudenau	4	24.00	13.85	332.40	22.58	VA TECH Hydro
1960	Edling	3	15.00	17.00	255.00	21.26	VA TECH Hydro
1973	Ferlach	1	15.00	16.70	250.50	20.52	VA TECH Hydro
1980	Melk	6	24.00	13.00	312.00	19.89	VA TECH Hydro
1976	Song Loulou	7	14.00	17.00	238.00	19.85	Sorefame
1968	Weyer	3	18.00	14.80	266.40	19.34	VA TECH Hydro
1949	Donzère-Mondragon	1	45.00	9.15	411.75	18.48	ALSTOM
1978	Abwinden-Asten	1	24.00	12.50	300.00	18.39	Thyssen-Klönne
1976	Vaugris	4	21.00	12.8	268.80	16.88	ALSTOM
1965	Bourg-les-Valence	6	22.00	11.70	257.40	14.77	ALSTOM
1964	Villeneuve-sur-Lot	4	15.00	13.60	204.00	13.61	ALSTOM
1949	Donzère-Mondragon	4	31.50	9.15	288.23	12.94	ALSTOM
1963	St-Julien-Labrieulette	4	20.00	11.40	228.00	12.75	ALSTOM
1967	Azurán	1	20.00	11.30	226.00	12.53	ALSTOM
	Golfich	6	25.00	10.00	250.00	12.26	
1963	Gerstheim	3	20.00	10.30	206.00	10.41	ALSTOM

Over de gehele levensduur van de stuw zijn de mogelijkheden voor het opwaarderen van de stuw of van bepaalde systemen, in vergelijking met andere varianten, beperkt.

Het bewegen van de segmentdeuren is afhankelijk van de aandrijvingen met bijbehorende besturing of geautomatiseerde systemen. Het stuwmiddel kan bij uitval van stroom of bij het falen van systemen op eigen gewicht zakken (Erbisti, 2004). Doordat de segmentdeur met klep meer onderdelen heeft, namelijk verschillende aandrijvingen voor de segmentdeur zelf en voor de regelkleppen, is de faalkans hoger dan bij de overstroombare segmentdeur en de balg-klepstuw.

Paragraaf F2.4 beschrijft hoe dit onderzoek de mogelijkheid op aanvaring van stuwmiddelen meeneemt: namelijk door de kans op aanvaring te beschrijven. Aangezien de segmentdeur met klep naar boven draait bij hoge debieten, bestaat de kans dat dit stuwmiddel door een schip geraakt wordt (Snel, 1987). Dit in tegenstelling tot andere stuwmiddelen die volledig uit de stuwopening verdwijnen bij grote afvoeren. De kans op een aanvaring is bij de segmentdeur met klep een stuk groter dan bij de andere varianten. De segmentdeur met klep is, in tegenstelling tot de kniestuw, relatief ongevoelig voor menselijke fouten. De segmentdeur met klep heeft echter wel veel onderdelen, dit zorgt ervoor dat de kans op menselijke fouten toeneemt. Samengevat is de segmentdeur met klep het meest gevoelig voor menselijke fouten en aanvaringen in vergelijking met de andere varianten.

De segmentdeur met klep is in bepaalde opzichten gevoelig voor trillingen (InCom Working Group, 2005). Zoals paragraaf F2.1 beschrijft zijn stuwmiddelen met een onderstroom gevoelig voor kritieke trillingen. Daarnaast beschrijft de paragraaf dat horizontale rechte en brede stuwmiddelen gevoelig kunnen zijn voor trillingen. Deze aspecten zijn van toepassing op de segmentdeur met klep omdat de deur naar boven kan draaien en relatief breed is. Over het algemeen zal het stuwmiddel water afvoeren door overstroom over de kleppen en zal het stuwmiddel dus niet frequent geheven worden, dit is gunstig ten aanzien van trillingen. Een risico ten aanzien van trillingen is dat door belasting het middelpunt van de gebogen plaat niet meer op dezelfde plaats zit als het draaipunt. Dit fenomeen kan kritieke trillingen veroorzaken bij heffen (Kolkman & Jongeling, 2000). De uniforme vormgeving van de segmentdeuren, het feit dat de deur gelijkmatig heft en de mogelijkheid tot onderstroom, maken dat de segmentdeur met klep in vergelijking met de andere varianten het meest gevoelig is voor trillingen.

De krachtwerking van de deur op de pijlers verloopt redelijk efficiënt door de draaipunten. Dit krachtsverloop gaat min of meer in één richting. Dit is gunstig voor het dimensioneren van het stuwmiddel (Molenaar W. , 2011) (Daniel & Paulus, 2018). In gesloten stand worden de aandrijvingen niet belast doordat de draaipunten al de krachten opnemen (Daniel & Paulus, 2018). De draaipunten moeten dus wel groot uitgevoerd worden en moeten het gehele gewicht van de deur kunnen dragen (Molenaar W. , 2011). Doordat de draaipunten het gewicht en de hydraulische waterdruk opnemen, werkt alle kracht op het benedenstroomse deel van de pijlers. Dit zorgt voor een inefficiënte stabiliteitswerking (Daniel & Paulus, 2018). Als de segmentdeur opent of open staat zal de aandrijving belast worden, tenzij een grendel toegepast wordt. De belasting op de aandrijvingen is zeer gelijkmatig (Daniel & Paulus, 2018). Segmentdeuren kunnen op zichzelf slecht zijdelingse krachten opnemen (Molenaar & Voorendt, 2017). Ten opzichte van de andere stuwmiddelen scoort de segmentdeur met klep qua krachtswerking redelijk goed en tevens ook gelijk met de overstroombare segmentdeur.

F3.3 Beheer & onderhoud

De segmentdeur met klep kan volledig boven het water draaien. Dit zorgt ervoor dat inspectie en onderhoud aan de deur zelf niet altijd onder water of bij droogzetting plaats hoeft te vinden. In gesloten stand kan zonder droogzetting namelijk geen onderhoud of inspectie gedaan worden (Daniel & Paulus, 2018). Onderhoud aan bijvoorbeeld de stalen plaat of de stalen ondersteuningsconstructie of bijvoorbeeld het verwijderen van biologische aangroei, zal vanaf een boot of ponton op het water plaats kunnen vinden. Ook onderhoud aan de regelklep, die zich boven op het stuwmiddel bevindt, kan boven water plaatsvinden. Onderhoud vanaf het water is echter mogelijk niet veilig, zeker niet als sprake is van sterke stroming. De segmentdeur zal namelijk alleen open kunnen bij hogere afvoeren. Hierom is het aan te bevelen het drijvende onderhoud zo min mogelijk uit te voeren en dit te bundelen met het onderhoud dat tijdens droogzettingen plaatsvindt, of om oplossingen te

bedenken voor onderhoud aan de geopende segmentdeur. De veiligheid van het beheer en onderhoud van het stuwmiddel heeft veel te maken met de bereikbaarheid van de verschillende onderdelen. Over het stuwmiddel zelf is van nature geen looppad mogelijk (Daniel & Paulus, 2018). Voor het bereiken van de middenpijlers bevat de stuw een loopbrug die de verschillende pijlers met elkaar verbindt. Dit zorgt voor een goede bereikbaarheid van de middenpijlers. Het draaipunt van de segmentdeur met klep bevindt zich bij grote afvoeren onder water. In de normale situatie, waarbij de gebruikelijke stuwpeilen worden gehanteerd, bevindt het draaipunt zich boven het water en is het goed te bereiken (Daniel & Paulus, 2018). Samengevat zijn over het algemeen onderdelen van de segmentdeur met klep wel beter bereikbaar dan de onderdelen bij andere varianten, door de mogelijkheid om de deur omhoog te draaien en de loopbrug. Veiligheid is echter mogelijk lager door de onveilige inspectie- en onderhoudsmogelijkheden.

Voor het droogzetten van het stuwmiddel, bij groot onderhoud, bevinden zich schotbalksponningen in de pijlers. In deze sponningen vallen schotbalken, zodat het gedeelte tussen de schotbalken afgesloten is van het water. Deze schotbalken worden op de kant opgeslagen en kunnen doormiddel van een bok (grote kraan op een ponton) op hun plaats gehesen worden in de schotbalksponningen. Voorbeelden hiervan zijn de Soo sluizen in Michigan, V.S. (Daniel & Paulus, 2018). Figuur 62 laat dit zien. Het stuwmiddel zelf kan de afdichting van de bovenstroomse zijde verzorgen, mits geen onderhoud aan de gebogen stalen plaat nodig is. In dat geval waarborgen schotbalken aan zowel de bovenstroomse zijde als de benedenstroomse zijde de droogzetting.



Figuur 62: Schotbalken bij de Soo Sluizen, Michigan, VS (Gmiter, 2020).

Tabel 35 geeft de hoofdonderdelen voor de segmentdeur weer in hun onderhoud en inspecties met de hoeveelheid onderdelen. Doordat de verschillende onderdelen in de meeste gevallen goed te bereiken zijn en het onderhoud enigszins beperkt is, is het stuwmiddel relatief gemakkelijk en goedkoop te onderhouden (Daniel & Paulus, 2018) (Erbisti, 2004).

Tabel 35: Onderhoud hoofdonderdelen segmentdeur met klep. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Rijkswaterstaat PPO Techniek Zuid-Nederland, 2020).

Onderdeel	Actie	Frequentie (per x jaar)	Aantal onderdelen:	Bron:
Staalwerk	Coating bijwerken	10-15	4 deuren	[1]
Staalwerk	Coating vervangen	20-30	4 deuren	[1]
Hoofddraaipunten	Vervangen	30-40	8	[1]
Klepdraaipunten	Vervangen	30-40	16	
Afdichting	Vervangen	20	+/- 180 m	[1]
Elektrische systemen	Vervangen	30	-	[1]
Elektrische systemen	Updaten	8	-	[1]
Gehele constructie	Grondige inspectie	5	-	[2]
Gehele constructie	Toestand inspectie	1	-	[2]
Werktuigbouwkundige systemen	Bijvullen/smeren	0,5 (gemiddeld)	+/- 40	[2]

De afdichtingen aan de zijkant van het stuwmiddel, tussen de gebogen plaat en de pijlers, ondervinden veel wrijving (Daniel & Paulus, 2018). Het stuwmiddel draait namelijk vaak over deze afdichting open. Bovendien kunnen grote stroomsnelheden ontstaan in de kleine kier onder het stuwmiddel tijdens het openen. Ook dat zorgt voor wrijving over de afdichtingen, zowel aan de zijkant als aan de onderkant van de doorstroomopening. Onderhoud aan deze afdichtingen is niet gemakkelijk. Een groot gedeelte ervan bevindt zich onder water. Droogzetten, met schotbalken aan zowel de boven- als benedenstroomse zijde, is noodzakelijk. Het stuwmiddel zelf kan vervolgens bij het onderhoud volledig open staan, waardoor veel ruimte aanwezig is voor het onderhoud onder het stuwmiddel. Een ander voordeel is de situering van kabels en leidingen voor de regelkleppen. De regelkleppen zijn met kabels en leidingen verbonden aan pijlers of het vaste land. Een voordeel van de segmentdeur met klep is dat deze kabels langs het draaipunt kunnen lopen. Hierdoor is geen ingewikkelde constructie benodigd die verticale verplaatsingen van de kabels en leidingen opvangt. Dit is bijvoorbeeld wel het geval bij hefdeuren, hier moeten kabels en leidingen verticaal meebewegen met de deur. De kabels en leidingen bevinden zich vaak onder water, wat extra onderhoud met zich meebrengt. De regelkleppen zorgen voor meer onderhoud door een vergroting van het aantal onderdelen.

De bediening van het stuwmiddel kan op afstand plaatsvinden. Het stuwmiddel waarborgt de fijnregeling van de waterstand met regelkleppen die zich boven op het stuwmiddel bevinden. Tot welke waterhoogte deze regelkleppen het waterpeil kunnen reguleren is afhankelijk van de hoogte van de regelkleppen. In deze variant kunnen de regelkleppen de waterstand reguleren tussen 6,95 m en 8,45 m + NAP. Een onderstroom én een overstort tegelijk door de stuw is mogelijk. Hierbij stroomt water over de kleppen én draait het gehele stuwmiddel omhoog, waardoor ook water onder de segmentdeur door stroomt. De segmentdeur met klep kan goed openen onder verval en doet dit bij grote afvoeren volledig uit het water (Molenaar W. , 2011). Het openen en sluiten van het stuwmiddel gaat gemakkelijk (Daniel & Paulus, 2018), mede doordat het openen van het stuwmiddel deels door het eigen gewicht van de deur plaatsvindt. Bij het sluiten van het stuwmiddel is de hijsbelasting op het stuwmiddel erg gelijkmatig (Daniel & Paulus, 2018). Door de vele mogelijkheden en voordelen ten aanzien van gebruik van het stuwmiddel is het stuwmiddel gemakkelijk te bedienen (Molenaar W. , 2011) en kan het nauwkeurig waterstanden reguleren (Erbisti, 2004).

Vandalisme is altijd een aandachtspunt. De kwetsbare onderdelen van de segmentdeur met klep zijn over het algemeen goed verscholen en niet bereikbaar voor derden. Echter scoort de overstroombare segmentdeur beter op dit aspect omdat die deur volledig onder verdwijnt. De segmentdeur met klep draait boven water en heeft daarom een iets hoger risico op vandalisme. In tegenstelling tot de klep-balgstuw is de segmentdeur met klep goed bestand tegen vandalisme.

F3.4 Duurzaamheid

De segmentdeur met klep heeft in verhouding tot de andere varianten een constructie met relatief weinig materiaal. Hierdoor zal, naast dat de directe materiaal- en uitvoeringskosten laag zijn, ook de milieu-impact tijdens uitvoering relatief laag zijn. Door minder materiaal zullen minder schadelijke stoffen uitgestoten worden door transportvoertuigen, zullen leveranciers en betoncentrales minder schadelijke stoffen uitstoten en zal minder uitgestoten worden door materieel op de bouwplaats. Bijlage I3 beschrijft dat het energieverbruik van de segmentdeur met klep over de gehele levensduur iets lager is dan het energieverbruik van de overstroombare segmentdeur. De kniestuw heeft een hoger energieverbruik en de klep-balgstuw een lager energieverbruik.

Zowel het beton- als het staalwerk zal naar verwachting een levensduur van 100 jaar hebben. Na de levensduur zal het staal een kleine restwaarde hebben als oud ijzer waarna het eventueel omgesmolten kan worden en hergebruikt kan worden. Het beton kan worden hergebruikt worden als betongranulaat. Doordat voor de segmentdeur met klep relatief weinig materiaal benodigd is, scoort de variant relatief laag in de MCA.

F3.5 Omgeving

De segmentdeur met klep kan gezien worden als een schoon kunstwerk door de bolle deuren en goed zichtbare bewegingswerken. De stuw is echter in geopende stand mogelijk storend als het gaat om horizonvervuiling. Het staalwerk van de stuw is dan namelijk goed zichtbaar en komt meer dan 5 m boven de pijlers uit (InCom Working Group, 2005). Omdat de stuw in de huidige situatie samenvalt met de John S. Thompsonbrug, valt de huidige stuw niet op. Het verschil tussen de huidige situatie met een stuw die amper opvalt, en de toekomstige situatie waarbij de stuw in geopende stand prominent in het landschap staat, is groot. Vergeleken met de andere stuwmiddelen is het ruimtebeslag in de rivier relatief klein bij de segmentdeur met klep. De totale breedte is van alle stuwmiddelen gelijk, de lengte van de pijlers en drempel varieert. De pijlerlengte van de segmentdeur met klep zijn met 11,75 m minder lang dan de pijlerlengtes bij de andere stuwmiddelen. Het ruimtebeslag van de segmentdeur met klep is dus het kleinst van alle vier de stuwmiddelen.

Over de stuw is een voetgangersbrug aan te leggen waardoor een extra verbinding ontstaat tussen Nederasselt en Grave. Daarnaast stimuleert een voetgangersbrug mogelijk de bezienswaardigheid van het stuwcomplex. Het naar boven draaien van de segmentdeuren en de beperkte toepassing van segmentdeuren in Nederland stimuleren de bezienswaardigheid van het complex. Door de beperkte toepassing in Nederland scoren de segmentdeuren redelijk goed op innovatie, de segmentdeuren zijn echter in het buitenland wel veelvuldig toegepast. Om deze reden scoren de klep-balgstuw en de kniestuw beter op innovatie dan de segmentdeuren.

De segmentdeur met klep kan overstroom en onderstroom waarborgen; dit resulteert in een flexibel inzetbare stuw als het gaat om vispassage. Paragraaf F2.2 vermeldt dat stuwen met overstort iets geschikter zijn voor neerwaartse vismigratie bij stuwen. Verdere detaillering van de variant zal de woeldrempel en benedenstroomse drempel dimensioneren; dit heeft namelijk het meeste effect op de neerwaartse migratie. Deze verdere detaillering is echter niet opgenomen in dit onderzoek. De variant scoort redelijk hoog op vispasseerbaarheid aangezien zowel boven- als onderstroom te faciliteren zijn (Daniel & Paulus, 2018). Dit zorgt voor een flexibel inzetbare stuw ten opzichte van vismigratie.

Bij het opereren van de segmentdeur met klep bestaat een risico op olieverontreiniging op het water van de Maas. Zo kan olie lekken uit de aandrijving (Daniel & Paulus, 2018). Bij de segmentdeur met klep is het risico groter dan bij andere stuwmiddelen, aangezien de regelkleppen zelf ook aandrijvingen bevatten naast de hoofdaandrijvingen. Tegenwoordig zijn oliën beschikbaar die minder schadelijk en biologisch afbreekbaar zijn (Verwoolde, 2018). Toch blijft het gebruik van smeermiddelen en oliën voor kunstwerken bij water een aandachtspunt.

F4 Variant 2: Overstroombare segmentdeur

Deze paragraaf licht de overstroombare segmentdeur toe in het licht van de MCA. Deze paragraaf geeft dus een kwalitatieve toelichting op de overstroombare segmentdeur wat betreft de volgende hoofdcriteria: uitvoering, beheer & onderhoud, omgeving, betrouwbaarheid en duurzaamheid. Onder elk hoofdcriterium worden de deelcriteria toegelicht zoals beschreven in paragraaf 4.3.3.

F4.1 Uitvoering

De overstroombare segmentdeur is een niet-modulaire constructie. Dit betekent dat de volledige segmentdeur in één stuk getransporteerd en geïnstalleerd wordt. De totale breedte van de overstroombare segmentdeur is 30,9 m. Transport van het stuwmiddel over de weg is hierdoor moeilijk. De segmentdeur kan wel over de Maas op een ponton of schip naar de stuwlocatie drijven. Ook de installatie van zo'n grote constructie is moeilijk.

Het bouwproces van de constructie van de overstroombare segmentdeur is relatief eenvoudig. De deur is in één stuk te transporteren en te installeren en de constructie is relatief eenvoudig. Het maken van de uitsparing waar de deur in zakt zal extra tijd en moeite kosten in de ruwbouw (Snel, 1987). Daarnaast zullen de deuren nauwkeurig geïnstalleerd en verankerd moeten worden in de pijlers. De kans op lekverliezen door het stuwmiddel door onnauwkeurige installatie van het stuwmiddel is redelijk groot. In vergelijking met de andere varianten is de overstroombare segmentdeur het meest maakbaar, ook al zijn enkele haken en ogen te onderscheiden zoals de uitsparingen, de verankering van de deur en de kans op lekverliezen.

De stuw zal in den droge gebouwd moeten worden door middel van bouwkuipen en een bijbehorende fasering. Dit onderzoek gaat verder niet in op de uitvoeringsmethodes. Wel is op te merken dat een viertal stuwopeningen positieve effecten kan hebben op de fasering en uitvoering van het project. Meerdere stuwopeningen staan garant voor meer mogelijkheden wat betreft de bouwkuipen en meer doorstromend oppervlak in het niet afgedamde deel van de Maas tijdens de bouw. In vergelijking met drie stuwopeningen zijn vier stuwopeningen dus praktischer voor de fasering en mogelijkheden tijdens de uitvoering. Hierin hebben de segmentdeur met klep en de overstroombare segmentdeur een voordeel ten opzichte van de klep-balgstuw en de kniestuw.

Te verwachten is dat de overstroombare segmentdeur wat betreft de constructietijd slechter scoort dan de klep-balgstuw en de segmentdeur met klep maar beter dan de kniestuw. Dit heeft alles te maken met de grootte van de pijlers en de complexiteit van het stuwconcept.

F4.2 Betrouwbaarheid

Aangezien geen regelkleppen toegepast zijn op de overstroombare segmentdeur en het bovenste deel van de deur niet schuin loopt, waardoor ijsgang en vuil niet over het stuwmiddel kan schuiven, kan de overstroombare segmentdeur minder goed ijs en vuil doorvoeren in gesloten stand. Wanneer de deur gedeeltelijk open staat kan ijs en vuil wel doorstromen. IJs en vuil zullen echter eerder blijven haken voor de deur en daardoor kracht uitoefenen op de deur. Een ander risico is dat vuil of sediment zal blijven liggen in de uitsparing in de drempel. Dit risico is echter kleiner doordat water met veel kracht over de deur stroomt en eventueel vuil of sediment grotendeels wegspoelt. Als vuil of sediment wel blijft liggen zal dit zich in de uitsparing ophopen en kan het zorgen voor hindering bij openen of sluiten van het stuwmiddel. Over het algemeen is te zeggen dat de overstroombare segmentdeur redelijk gevoelig is voor ijs en vuil (Snel, 1987).

Over het algemeen heeft de overstroombare segmentdeur minder kritieke onderdelen in vergelijking met de segmentdeur met klep. De radiale deur beweegt doormiddel van hydraulische cilinders en heeft geen regelkleppen. De vermindering van werktuigbouwkundige onderdelen in vergelijking met de segmentdeur met klep maken dat de overstroombare segmentdeur beter scoort op het gebied van de afhankelijkheid van systemen. De klep-balgstuw is daarentegen wel betrouwbaarder op dit vlak. De kniestuw heeft meer onderdelen dan de genoemde drie varianten en is dus het minst betrouwbaar als het gaat om de afhankelijkheid van systemen.

Overstroombare segmentdeuren zijn buiten Nederland vaak toegepast. Tabel 36 laat enkele toepassingen zien van de overstroombare segmentdeuren met de toegepaste dimensies (Erbisti, 2004). Uit de vele toepassingen blijkt dat de overstroombare segmentdeur qua technologie vrij bekend is. In Nederland zijn nog weinig toepassingen, een voorbeeld is de sluis bij Eefde (Bouman, 2019).

Tabel 36: Overzicht toepassingen van de overstroombare segmentdeur (Erbisti, 2004).

	Year	Project	Span B (m)	Height h (m)	Head on sill H (m)	B^2Hh (m ⁴)	Weight G (kN)	Manufacturer
1	1979	Jebba	12.00	9.50	36.00	49248	908	Mitsubishi
2	1974	Sobradinho	9.80	7.50	33.87	24397	734	Voith
3	1962	Roseires	10.00	13.00	17.53	22789	954	Sorefame
4	1973	Moxotó	10.00	8.00	28.00	22400	675	Bardella/Sorefame
5	1958	Macagua	10.00	11.00	17.00	18700	571	VA TECH Hydro
6	1969	Dez	12.80	5.60	16.30	14955	419	Krupp
7		Aguieira	9.50	8.86	15.56	12442	476	Sorefame
8		Kariba	4.90	6.17	51.89	7687	305	Sorefame
9	1970	Midorikawa	6.20	6.30	31.40	7604	566	Mitsubishi
10		Picote	4.30	5.00	57.20	5288	265	Sorefame
11		Régua	5.00	5.80	35.15	5097	373	Sorefame
12	1969	Matsubara	4.40	4.40	51.60	4395	279	Hitachi-Zosen
13	1970	Lower Tachien	5.00	7.00	23.30	4078	333	Mitsubishi
14	1964	Tsuruta	4.30	4.15	45.60	3499	237	Hitachi-Zosen
15	1977	Oishi	3.63	5.43	45.63	3265	383	Hitachi-Zosen
16	1975	Palagnedra	5.10	4.30	26.00	2908	181	ZWAG
17		Valeira	4.20	3.80	36.57	2451	282	Sorefame
18	1971	Rio Prado	3.50	3.50	54.70	2345	176	VA TECH Hydro
19		Oguchigawa	4.62	3.40	20.80	1509	171	Hitachi-Zosen
20	1966	Tinajones	3.60	2.83	40.00	1467	147	M.A.N.
21	1969	Capivari-Cachoeira	2.50	4.45	45.00	1252	107	Ishibrás
22		Yado	2.82	2.82	49.70	1115	178	Hitachi-Zosen

De beschikbaarheid van de overstroombare segmentdeur is naar verwachting redelijk hoog. Zo is onderhoud goed in te schatten en is de betrouwbaarheid van de overstroombare segmentdeur hoog. De kans op aanvaringen is laag en het stuwmiddel heeft niet veel kritieke onderdelen. Wel dient het stuwmiddel drooggezet te worden bij onderhoud aan de deur of de afdichtingen. In vergelijking met de segmentdeur met klep heeft de overstroombare segmentdeur echter een groot nadeel, en dat is dat de overstroombare segmentdeur gevoelig is voor ijs en vuil. Door dit verhoogde risico zal naar verwachting de beschikbaarheid van de overstroombare segmentdeur lager liggen dan bij de segmentdeur met klep. De overstroombare segmentdeur scoort beter op het deelcriterium 'beschikbaarheid' dan de klep-balgstuw en de kniestuw.

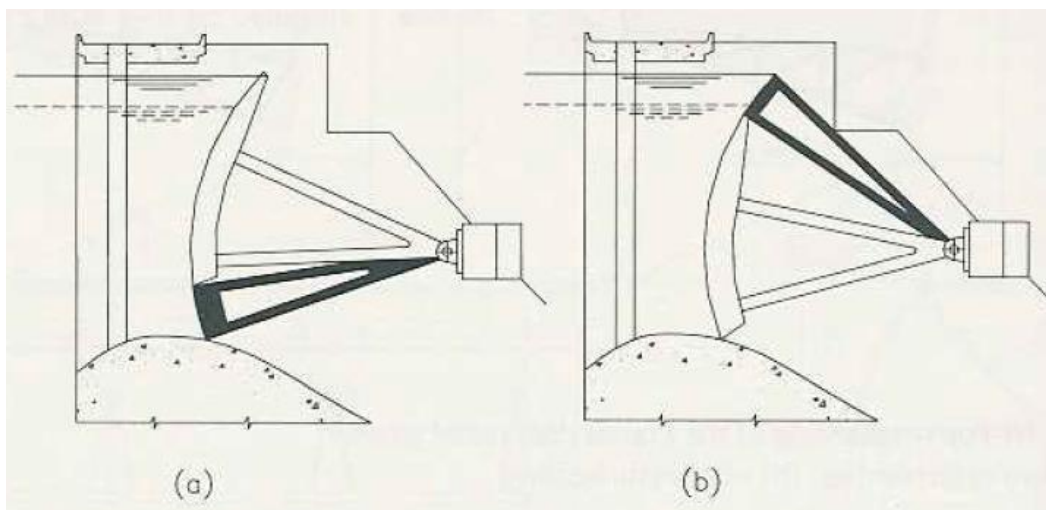
Paragraaf F2.3 beschrijft de kans op aanvaringen van de stuwmiddelen. In tijden van grote afvoeren, als de kans op een aanvaring het grootst is, bevindt de overstroombare segmentdeur zich niet in de doorstroomopening. De overstroombare segmentdeur draait namelijk naar beneden in een uitsparing. De kans op aanvaringen van de overstroombare segmentdeur is een stuk kleiner dan bij de verticaal draaiende segmentdeur met klep. De overstroombare segmentdeur is enkele dagen in het jaar doorvaarbaar, zoals beschreven in paragraaf F2.4. Daarnaast is de overstroombare segmentdeur, in tegenstelling tot de kniestuw, relatief ongevoelig voor menselijke fouten. Doordat de overstroombare segmentdeur-variant vier stuwopeningen bevat en de aandrijvingen volledig aangestuurd dienen te worden en niet het voordeel hebben van het gebruiken van waterdruk, zoals bij de klep-balgstuw, scoort de overstroombare segmentdeur iets lager in de MCA.

Een voordeel van het niet kunnen waarborgen van onderstroom is dat het stuwmiddel hierdoor minder gevoelig is voor trillingen. Wel is het stuwmiddel horizontaal gezien recht en relatief breed, dit verhoogt het risico op trillingen. Boven op de deur kunnen zogenoemde 'haaienvinnen' toegepast worden om het risico op trillingen te verminderen. Deze vinnen onderbreken de stroom over de deur en waarborgen dat geen onder- of overdruk ontstaat onder de stroom, dit kan namelijk de kans op trillingen verhogen. Grote belastingen kunnen zorgen

voor een verschuiving van het middelpunt van de gebogen plaat, dit kan ernstige trillingen veroorzaken, echter is dit risico minder groot bij overstort dan bij onderstroom. (Kolkman & Jongeling, 2000). Figuur 59 en Figuur 60 geven dit fenomeen weer.

De belasting die optreedt bij het sluiten van het stuwmiddel is een erg gelijkmatige belasting (Daniel & Paulus, 2018). Daarnaast is het stuwmiddel door de gunstige krachtsafdracht (Daniel & Paulus, 2018) in het stuwmiddel relatief licht (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000). De benodigde aandrijvingen, de hydraulische cilinders, kunnen relatief licht uitgevoerd worden door de gunstige en gelijkmatige belastingen. De hydraulische krachten die op de deur werken drukken niet direct op de aandrijvingen maar komen op het draaipunt (Daniel & Paulus, 2018). Het draaipunt van het stuwmiddel is hierdoor zwaar gedimensioneerd, het volledige gewicht van het stuwmiddel werkt namelijk op dit draaipunt. Doordat het draaipunt alle krachten afdraagt aan de pijlers, zijn de pijlers aan de benedenstroomse kant zwaarbelast. Dit zorgt voor een instabiliteitswerking op de pijlers (Daniel & Paulus, 2018). Een ander aandachtspunt is het vastzetten van het stuwmiddel. In gesloten stand zweeft de overstroombare segmentdeur in de uitsparing. Een grendel kan het stuwmiddel in gesloten stand vastzetten, hiermee voorkomt de grendel dat een continue belasting op de aandrijving zal werken. Hetzelfde geldt voor tussenstanden van het stuwmiddel, waarbij de stuw niet volledig geopend of gesloten is. Als laatste kunnen segmentdeuren niet goed zijwaartse krachten opnemen. Al deze aspecten samen zorgen ervoor dat de beide segmentdeuren redelijk goed scoren in de MCA op het deelcriterium Krachtsafdracht. De kniestuw scoort een stuk lager en de klep-balgstuw iets beter.

De mogelijkheden tot opwaardering van de deur zijn vrij beperkt doordat het stuwmiddel als één geheel beweegt en onderdelen over de levensduur niet vaak vervangen moeten worden. Wel kan de deur opgewaardeerd worden door een extra stuk toe te voegen boven of onder de radiale deur. Figuur 63 geeft een voorbeeld van een ophoging van een deur weer (Erbisti, 2004).



Figuur 63: Opwaardering van radiale deur door verhoging (Erbisti, 2004).

F4.3 Beheer & onderhoud

De bereikbaarheid van veel onderdelen van de overstroombare segmentdeur is in vergelijking met de segmentdeur met klep minder goed. Zo is geen looppad over het stuwmiddel mogelijk en is het plaatsen van een brug over alle stuwopeningen geen optie als scheepvaart door de stuw toegestaan is. Een optie is wel om over enkele van de stuwopeningen een brug te plaatsen en bijvoorbeeld één stuwopening vrij te houden voor scheepvaart. Ook kunnen de middenpijlers per schip bereikt worden, dit is echter onwenselijk gezien de veiligheid. De overstroombare segmentdeur kan niet boven water gedraaid worden. Dit zorgt ervoor dat onderhoud en inspectie aan de deur altijd onder water plaatsvindt óf dat de stuw droog moet staan bij onderhoud en inspectie (Snel, 1987). Een groot voordeel van de overstroombare segmentdeur is dat een groot gedeelte van de kritieke onderdelen zich een groot gedeelte van de tijd boven water bevinden. Hieronder vallen de

aandrijvingen, de draaipunten en de bovenrand. Inspecties en klein onderhoud aan de draaipunten kan dus vanaf een boot of een ponton plaatsvinden of eventueel vanaf een balustrade aan de pijler. Schotbalken die in sponningen vallen waarborgen het droogzetten van het stuwmiddel. Deze schotbalken worden op de kant opgeslagen en kunnen door middel van een bok (grote kraan op ponton) op plaats gehesen worden en in de schotbalksponningen worden gegleden. Voorbeelden van toepassing van schotbalken met vergelijkbare afmetingen zijn de Soo sluizen in de V.S., Michigan (Daniel & Paulus, 2018). Figuur 62 laat dit zien. Bij onderhoud dat alleen aan de benedenstroomse zijde van het stuwmiddel plaatsvindt voldoen de schotbalken aan benedenstroomse zijde als waterkering en hoeven schotbalken aan de bovenstroomse zijde niet geplaatst te worden. De gebogen plaat van het stuwmiddel waarborgt de afdichting aan de bovenstroomse zijde in dat geval. Bij onderhoud aan bijvoorbeeld deze gebogen plaat of de afdichtingen dienen schotbalken aan zowel de bovenstroomse als de benedenstroomse zijde geplaatst te zijn.

De overstroombare segmentdeur is veilig te onderhouden en te bedienen als voorzieningen toegepast worden om de bereikbaarheid te verhogen, risico's te verkleinen en het gemak te verhogen. Zoals hierboven beschreven is, is de bereikbaarheid bij de overstroombare segmentdeur een aandachtspunt. Onderhoud vanaf het water aan de benedenstroomse zijde van de stuw is alleen veilig als een overstort volledig uitgesloten is gedurende de onderhoudsperiode. Om deze reden zal snel gekozen worden om de volledige deur droog te zetten met schotbalken. Doordat het stuwmiddel geheel drooggezet moet worden bij veel onderhoud is de kans op onveilige situaties kleiner dan bij varianten die boven het water draaien. Dit is de voornaamste reden dat de overstroombare segmentdeur op veiligheid hoger scoort dan de andere varianten, hierbij wordt aangenomen dat de bereikbaarheid van de middenpijlers wordt verhoogd.

De overstroombare segmentdeur reguleert de waterstand door naar beneden, in een uitsparing, te draaien. Hierdoor is dus alleen een overstort over het stuwmiddel heen mogelijk. Doordat geen onderstroom aanwezig is worden sediment en objecten op de bodem niet direct weggespoeld. Een extra onderhoudsaspect is dus het verwijderen van dit sediment en de objecten. In vergelijking met de segmentdeur met klep heeft de overstroombare segmentdeur geen regelkleppen en dus minder onderhoud in zijn totaliteit. Daarnaast bevat de overstroombare segmentdeur geen aandrijvingen, kabels en andere onderdelen ten behoeve van regelkleppen, dit scheelt in kosten en in onderhoud. Tabel 37 geeft de hoofdonderdelen voor de overstroombare segmentdeur in hun onderhoud en inspecties weer.

Tabel 37: Onderhoud hoofdonderdelen overstroombare segmentdeur. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Rijkswaterstaat PPO Techniek Zuid-Nederland, 2020).

Onderdeel	Actie	Frequentie (per x jaar)	Aantal onderdelen	Bron
Staalwerk	Coating bijwerken	10-15	4 deuren	[1]
Staalwerk	Coating vervangen	20-30	4 deuren	[1]
Draaipunten	Vervangen	30-40	8	[1]
Afdichting	Vervangen	20	+/- 180 m	[1]
Elektrische systemen	Vervangen	30	-	[1]
Elektrische systemen	Updaten	8	-	[1]
Gehele constructie	Grondige inspectie	5	-	[2]
Gehele constructie	Toestand inspectie	1	-	[2]
Werktuigbouwkundige systemen	Bijvullen/smeren	0,5 (gemiddeld)	+/- 40	[2]
Drempel	Vuil verwijderen	1	4 stuwopeningen	

De overstroombare segmentdeur is op afstand bedienbaar en eenvoudig te bedienen door de simpele en uniforme werking (Molenaar W. , 2011) (Erbisti, 2004). Doordat alleen een overstort mogelijk is, kan de stuw de

waterstand alleen reguleren door naar boven of beneden te draaien. Het openen en sluiten van het stuwmiddel kan deels op eigen gewicht of op opdrijving plaatsvinden, wat een voordeel is aangezien dan minder energie nodig is voor het open- en sluitproces (Erbisti, 2004). Het open- en sluitproces gaat relatief snel en overzichtelijk. Dat het stuwmiddel alleen op en neer kan bewegen, zorgt voor minder opties in bediening en flexibiliteit in vergelijking met de segmentdeur met klep. De overstroombare segmentdeur is wel beter bedienbaar en flexibeler inzetbaar dan de balg-klepstuw en de kniestuw.

Vandalisme is altijd een aandachtspunt. De kwetsbare onderdelen van de overstroombare segmentdeur zijn echter goed verscholen en niet bereikbaar voor derden. In tegenstelling tot de klep-balgstuw is de overstroombare segmentdeur goed bestand tegen vandalisme.

F4.4 Duurzaamheid

De constructie van de overstroombare segmentdeur is in vergelijking met de segmentdeur met klep en de klep-balgstuw zwaarder gebouwd. De zware constructie is vooral te danken aan de lange pijlers. Meer materiaal heeft naar verwachting een grotere milieu-impact door bijvoorbeeld de productie en het transport van materialen zoals beton en staal. Dit zal voor uitstoot van broeikasgassen zorgen. Daarnaast zal de constructietijd langer zijn bij de overstroombare segmentdeur, dit resulteert in langer gebruik van (zwaar) materieel en in meer afvalstoffen door de bouw. Deze aspecten zullen eveneens zorgen voor een grotere uitstoot van broeikasgassen en afvalstoffen.

De materialen voor de segmentdeur zijn niet optimaal te hergebruiken. Zowel het beton- als het staalwerk zal naar verwachting een levensduur van 100 jaar hebben. Na de levensduur zal het staal een kleine restwaarde hebben als oud ijzer waarna het eventueel omgesmolten kan worden en hergebruikt kan worden. Het beton kan worden hergebruikt als betongranulaat. Dit is dus down-cycle: de materialen worden minder waard. Omdat de overstroombare segmentdeur bestaat uit meer materiaal zal de restwaarde en daarmee het hergebruik ook hoger liggen dan bij de segmentdeur met klep en de klep-balgstuw.

Het energieverbruik over de gehele levensduur is naar verwachting gelijk aan het energieverbruik van de segmentdeur met klep. De milieu-impact ten gevolge van het energieverbruik is dus ook gelijk. De kniestuw heeft een hoger energieverbruik dan de segmentdeuren en de klep-balgstuw heeft een lager energieverbruik.

F4.5 Omgeving

Het staalwerk van de overstroombare segmentdeur is te allen tijde grotendeels uit zicht. In gesloten stand bevindt het zich tussen de pijlers en in geopende stand in een uitsparing in de bodem. De pijlers van de stuw zijn wel in zicht, deze steken echter maar 1 m boven het maaiveld uit. De overstroombare segmentdeur zorgt dus voor een minimale horizonvervuiling. De overstroombare segmentdeur draagt niet substantieel bij aan een verhoging of verlaging van de esthetica van het landschap doordat de deur vaak uit het zicht is. Door de relatief lange pijlers zal de overstroombare segmentdeur wat meer ruimte innemen in het landschap dan de segmentdeur met klep en de klep-balgstuw. De overstroombare segmentdeur draagt verder niet direct bij aan maatschappelijke belangen in vergelijking met de andere varianten. Wel is de toepassing van een overstroombare segmentdeur in een stuw een grote innovatie. De stuw zou daarom als bezienswaardigheid gezien kunnen worden. Dit is een maatschappelijk belang.

De overstroombare segmentdeur kan enkel bovenstroom waarborgen. Zoals paragraaf F2.2 beschrijft is bovenstroom gunstig voor neerwaarts migrerende vissen. De overstroombare segmentdeur kan niet geheven worden, dit maakt de overstroombare segmentdeur minder geschikt voor opwaarts migrerende vissen en maakt de stuw minder flexibel inzetbaar in het kader van vismigratie. Om deze reden scoort de overstroombare segmentdeur wat minder goed op vismigratie dan de segmentdeur met klep.

Bij het opereren van de overstroombare segmentdeur bestaat een risico op olieverontreiniging van het water van de Maas. Zo kan er olie lekken uit de aandrijving (Daniel & Paulus, 2018). Tegenwoordig zijn oliën beschikbaar die minder schadelijk en biologisch afbreekbaar zijn (Verwoolde, 2018). Toch blijft het gebruik van

smeermiddelen en oliën bij kunstwerken bij water een aandachtspunt. De overstroombare segmentdeur heeft minder aandrijvingen dan de segmentdeur met klep en de kniestuw, dus het waterverontreinigingsrisico is ook lager dan bij die varianten.

F5 Variant 3: Klep-balgstuw

Deze paragraaf behandelt de klep-balgstuw op kwaliteit in de MCA. In deze paragraaf is de klep-balgstuw uitgewerkt aan de hand van de hoofdcriteria uit de MCA: uitvoering, betrouwbaarheid, beheer & onderhoud, duurzaamheid en omgeving.

F5.1 Uitvoering

De klep-balgstuw is een gedeeltelijk modulaire constructie: verschillende onderdelen kunnen geprefabriceerd worden en op locatie op elkaar aangesloten worden. Zo kunnen per stuwopening verschillende kleppen naast elkaar geplaatst worden met relatief smalle breedtes. Een kanttekening hierbij is dat de verschillende kleppen in deze situatie dan wel waterdicht op elkaar moeten kunnen aansluiten. Dit vereist een nauwkeurige installatie. De balgen onder de kleppen en de kleppen zelf kunnen geprefabriceerd aangevoerd worden per schip. Momenteel zijn echter weinig bedrijven gespecialiseerd in het produceren van balgen.

De installatie van de balg en de kleppen is relatief simpel en eenvoudig (Daniel & Paulus, 2018): nadat de balgen geplaatst en geïnstalleerd zijn kunnen de kleppen gehesen worden en in liggende stand gemonteerd worden aan de drempel. Hierbij hoeft de klep niet staand gemonteerd te worden, dit is een voordeel ten opzichte van deuren die in staande stand gemonteerd moeten worden. Afdichting van de kleppen tegen de pijlers en tegen elkaar is tijdens de uitvoering kritiek, dit dient erg nauwkeurig te gebeuren. De klep-balgstuw heeft drie stuwopeningen, dit heeft in vergelijking met de segmentdeuren het nadeel dat de uitvoering minder flexibel is, de bouwkuipen groter zijn en minder afvoer gegarandeerd kan worden tijdens de bouw door het overgebleven deel van de Maas. Het deelcriterium bouwmethode weegt af hoeveel flexibiliteit en afvoer gegarandeerd kan worden in de bouwfase. De segmentdeuren (vier stuwopeningen) scoren dus beter dan de klep-balgstuw en de kniestuw (drie stuwopeningen).

Het bouwproces van de constructie van de klep-balgstuw is relatief eenvoudig door de kleine onderdelen en de goede transporteerbaarheid van de onderdelen. Complicaties in het bouwproces kunnen echter ontstaan door de hoeveelheid aan onderdelen, aangezien veel onderdelen waterdicht moeten aansluiten op elkaar. Daarnaast bevat de klep-balgstuw enkele complexe onderdelen zoals het vul- en ledigingsmechanisme en een systeem dat het netjes opbergen van de balg in geopende stand waarborgt. De civiele constructie is daarentegen eenvoudig en bevat relatief weinig materiaal. Aangezien nog niet veel ervaring is in het construeren van klep-balgstuw kunnen complicaties en onvoorziene omstandigheden optreden tijdens het bouwen (InCom Working Group, 2005).

Het gehele stuwcomplex bestaat uit drie stuwopeningen met relatief korte en dunne pijlers. In vergelijking met de andere varianten heeft deze variant dus het minste materiaal nodig. Dit resulteert in minder constructietijd voor het bouwen van de totale constructie (Ziel, 2009). In vergelijking met de andere drie varianten zal de klep-balgstuw dus de kortste constructietijd hebben.

F5.2 Betrouwbaarheid

De schuine stand van de klep en de relatief niet-starre constructie van de balg zorgt voor een goede doorvoer van ijs en vuil over de klep heen (Verduijn, 2014). Kruiend ijs en drijvende objecten worden onder de stuwdruk van het ijs of met een aanvaarkracht over de klep heen gedrukt. De klep-balgstuw is relatief ongevoelig voor sediment en objecten op de bodem. De balg onder de klep zal naar verwachting de meeste objecten wegdrukken bij het leeglopen van de klep. Daarnaast zorgt de overstort van water over de klep voor het schoonspoelen van de ondiepe uitsparing. Objecten of sediment die wel blijven liggen kunnen schade leveren aan de balg of ervoor zorgen dat de klep niet volledig sluit. De klep-balgstuw scoort dus relatief goed op het deelcriterium: 'gevoeligheid voor ijs en vuil', alleen de segmentdeur met klep is hier nog minder gevoelig voor.

De klep-balgstuw opereert doormiddel van water- of luchtdruk in de balg (Daniel & Paulus, 2018). Dit maakt dat de stuw minder gevoelig is falen van bewegingsmechanismen. Vul- en ledigingsystemen kunnen zo gedimensioneerd worden dat ofwel de balg volloopt als de systemen falen ofwel dat de balg leegloopt. Dit zou het geval kunnen zijn bij stroomuitval of een storing. De klep staat met een hoek van ongeveer 60° over de balg heen in de benedenstroomse richting. Dit zorgt voor bescherming van de balg voor ijs en vuil en voor ultraviolette straling, hier is de balg namelijk niet goed tegen bestand (Daniel & Paulus, 2018). De klep-balgstuw verdwijnt onder water als de stuw geopend is, dit maakt dat de klep-balgstuw minder kans heeft op aanvaring. Verwacht wordt dat de klep-balgstuw niet gevoelig is voor menselijke fouten.

De afdracht van krachten en de werking van de stuw is redelijk simpel. Krachten worden door gordingen en de balg afgedragen aan de drempel. De drempel draagt deze direct over aan de fundering. Deze manier van krachtsafdracht is te verkiezen boven krachtsafdracht via pijlers. Krachtsafdracht via pijlers zorgt namelijk voor hogere belasting in de pijlers wat weer resulteert in bredere pijlers en meer wapening.

Doordat per stuwopening meerdere kleppen toegepast worden zijn de gevolgen van schade, bijvoorbeeld bij een aanvaring, minder groot. Daarnaast zijn de relatief smalle kleppen gemakkelijker te vervangen, te prefabriceren en te transporteren. Doordat de balg en de kleppen relatief gemakkelijk vervangen te zijn is de klep-balgstuw een goed voorbeeld van een opwaardeerbare stuw. Grotere balgen of kleppen kunnen worden toegepast in de toekomst en de hoek van de klep kan eventueel aangepast worden in de loop van de levensduur. Doordat de balgen vervangen moeten worden (elke 30 tot 40 jaar) zijn er relatief eenvoudige mogelijkheden tot opwaardering.

De klep-balgstuw is relatief ongevoelig voor trillingen. Naast het feit dat geen onderstroom door de stuw mogelijk is, wat trillingen kan veroorzaken, zijn per stuwopening meerdere kleppen. Dit zorgt voor een kleiner risico op trillingen en de trillingen kunnen niet van de ene klep naar de andere doorgegeven worden. De klep-balgstuw is wel gevoelig voor trillingen van golven doordat de balg enigszins elastisch is. Door golven kan de klep met de golfrequentie (golfperiode) namelijk meetrillen. Golfperiodes verschillen echter over het algemeen erg in periode, hoogte, lengte en komen niet vaak langere tijd voor in dezelfde vorm. Daarom vormen golven geen groot risico op vermoeiing (Kolkman & Jongeling, 2000).

De klep-balgstuw is als stuwmiddel nog niet vaak toegepast met vergelijkbare dimensies en waterhoogtes. Dit resulteert in onvoldoende bedrijfszekerheid en voorspelbaarheid over het functioneren van de stuw in de totale levensduur. Dit is een risico en onzekerheid. Balgstuwen en klepstuwen zijn afzonderlijk van elkaar wel veelvuldig toegepast. Bij toepassing van een combinatie van een klepstuw en een balgstuw, met dimensies zoals benodigd in de Maas, moeten aannames gedaan worden over de combinatie van de twee systemen. Een voorbeeld van een klep-balgstuw, met vergelijkbare dimensies, die wel is toegepast, is de klep-balgstuw in de Nanming rivier. Deze klep-balgstuw is geproduceerd door het bedrijf Obermeyer (Obermeyer Hydro inc, 2018). Figuur 64 laat deze stuw zien.



Figuur 64: Klep-balgstuw in de Nanming rivier, China (Obermeyer Hydro inc, 2018).

F5.3 Beheer & onderhoud

De klep-balgstuw opent en sluit door middel van waterdruk en luchtdruk binnen in de balg (Daniel & Paulus, 2018). De klep-balgstuw heeft geen hydraulische cilinders nodig om te sluiten, hierdoor is het aantal en de grootte van de onderdelen voor regulier onderhoud relatief klein in vergelijking tot de andere varianten. Dit maakt de klep-balgstuw relatief gezien niet onderhoudsgevoelig (Verduijn, 2014). Wel zullen de leidingen van en naar de balg en hun afsluitmiddelen onderhouden moeten worden. Daarnaast zal de balg en het staalwerk van de klep onderhouden moeten worden. Een nadeel van het toepassen van balgen is dat ze een levensduur van 30 tot 40 jaar hebben. Dit betekent dat over de levensduur van de stuw (100 jaar) de balg twee tot drie keer vervangen moet worden en dus per stuwmiddel drie tot vier balgen gemaakt moeten worden (Daniel & Paulus, 2018). Daarnaast is het mogelijk dat vuil of ijs zich ophoopt aan de benedenstroomse zijde en zo schade of hinder levert aan de balg bij het neerlaten van de klep. Vuil en ijs zullen verwijderd moeten worden om zo schade te voorkomen. Bij het openen en sluiten van de stuw moeten de vul- en ledigingsystemen van de balg vrij zijn van vuil en ijs. Tijdens de levensduur van de stuw kan het nodig zijn om de openingen van deze leidingen of de leidingen zelf schoon te maken en vuil of ijs te verwijderen. Bij het verstopping van een leiding zal de klep in de desbetreffende stuwopening minder goed of geheel niet kunnen functioneren. Tabel 38 geeft de hoofdonderdelen voor de klep-balgstuw in hun onderhoud en inspecties weer. Over het algemeen is dus te zeggen dat de klep-balgstuw relatief veel frequent onderhoud nodig heeft maar dat de hoeveelheid onvoorzien onderhoud waarschijnlijk relatief laag is.

Tabel 38: Onderhoud hoofdonderdelen klep-balgstuw. Bronnen: [1]: (Ziel, 2009), [2]: (Daniel & Paulus, 2018), [3]: (Rijkswaterstaat PPO Techniek Zuid-Nederland, 2020).

Onderdeel	Actie	Frequentie (per x jaar)	Hoeveelheid	Bron:
Balg	Vervangen	30	3 grote of 9 kleine	[1]
Staalwerk	Coating bijwerken	10-15	+/- 9 kleppen	[2]
Staalwerk	Coating vervangen	20-30	+/- 9 kleppen	[2]
Draaipunten	Vervangen	30-40	3	[2]
Afdichting	Vervangen	20	+/- 162 m	[2]
Elektrische systemen	Vervangen	30	-	[2]
Elektrische systemen	Updaten	8	-	[2]
Gehele constructie	Grondige inspectie	5	-	[3]
Gehele constructie	Toestand inspectie	1	-	[3]
Werktuigbouwkundige systemen	Bijvullen/smeren	0,5 (gemiddeld)	-	[3]
Vul- en ledigingssysteem	Schoonmaken	2	+/- 18	

Over het stuwmiddel is geen pad aan te leggen voor onderhoud. Bruggen of tunnels moeten dus aangelegd worden op eenzelfde manier als bij de overstroombare segmentdeur. Voor vrijwel al het onderhoud wordt de gehele klep drooggezet door middel van schotbalken aan beide zijden van de stuw omdat de kritische onderdelen zich onder water bevinden. Deze schotbalken worden op kant opgeslagen en kunnen door middel van een bok (grote kraan op ponton) op plaats worden gehesen in de schotbalksponningen. Inspecties kunnen mogelijk gedaan worden door duikers mits de stuw gesloten is en het bovenstroomse water keert. Ten behoeve van de veiligheid kunnen de duikinspecties echter niet grondig gebeuren omdat er risico is op falen van het stuwmiddel tijdens de inspectie. Qua veiligheid scoort de klep-balgstuw samen met de overstroombare segmentdeur het hoogst in de MCA, aangezien vrijwel al het onderhoud gebeurt tijdens een droogzetting. Door deze ingrijpende maatregel is veiligheid voor een groot deel gewaarborgd.

Het stuwmiddel is relatief eenvoudig te bedienen door middel van het openen of sluiten van de vul- en ledigingleidingen. Een nadeel is dat bij bediening slecht zicht is op het stuwmiddel omdat deze zich onder water bevindt. De brede openingen en afstellingsmogelijkheden zijn van een minder hoog detailniveau dan bij de segmentdeur met klep. Dit in combinatie met het slechte zicht op het stuwmiddel zorgen voor een relatief lage score op het deelcriterium bedienbaarheid.

Een aandachtspunt bij de klep-balgstuw is vandalisme; de balg van de stuw is namelijk erg kwetsbaar, onder andere voor vandalisme, vuur (Daniel & Paulus, 2018) en ultraviolet licht (Ziel, 2009). Het is van belang dat de balg niet bereikbaar is voor derden. Een voordeel is dat de klep over de balg heen valt en zo de balg vrij goed beschermt tegen schade. Als schade wordt toegebracht aan de balg kunnen de gevolgen erg groot zijn. Vergeleken met de andere stuwmiddelen is de klep-balgstuw dus het minst bestand tegen vandalisme.

F5.4 Duurzaamheid

De klep-balgstuw heeft in vergelijking met de segmentdeuren en de kniestuw vrij weinig materiaal nodig. De hoeveelheden materiaal zijn vergelijkbaar met de materiaalhoeveelheden van de segmentdeur met klep. Wat betreft het beton liggen deze hoeveelheden echter iets hoger. Weinig materiaal resulteert voor de uitvoeringsfase in minder uitstoot. De productie en het transport van materialen, zoals beton en staal, zullen namelijk voor uitstoot van broeikasgassen zorgen. Bij weinig materiaal zal de uitstoot dus lager liggen. De klep-balgstuw zal in vergelijking met de andere varianten de kortste constructietijd hebben aangezien de constructie weinig pijlers bevat en een redelijk simpel is. Dit resulteert ook weer in minder uitstoot door materieel en afvalstoffen. Een aspect dat wel negatieve effecten heeft op de milieu-impact is dat de balg meerdere keren vervangen moet worden in de levensduur. De balg moet namelijk elke 30 tot 40 jaar vervangen worden. De productie van de balg en de vervanging van de balg zal resulteren in een verhoging van de uitstoot over de gehele levensduur. Over het algemeen is dus te zeggen dat de milieu-impact bij de klep-balgstuw wat hoger zal zijn dan bij de segmentdeur met klep, voornamelijk door het grote onderhoud bij de klep-balgstuw.

Het energieverbruik voor het opereren van de klep-balgstuw is over de gehele levensduur naar verwachting lager dan bij de andere varianten. De reden dat het energieverbruik naar verwachting lager is, is dat de balg gedeeltelijk door middel van bovenstroomse waterdruk kan zwellen. Om deze reden zal ook de milieu-impact ten gevolge van het energieverbruik relatief laag zijn.

De materialen voor de klep-balgstuw zijn niet gunstig te hergebruiken. Zowel het beton- als het staalwerk zal naar verwachting een levensduur van 100 jaar hebben. Na de levensduur zal het staal een kleine restwaarde hebben als oud ijzer. Het ijzer kan eventueel omgesmolten worden en hergebruikt worden. Het beton kan worden hergebruikt worden als betongranulaat. Het materiaal van de balg is naar verwachting niet goed te hergebruiken.

F5.5 Omgeving

De klep-balgstuw bevindt zich in zowel gesloten als open stand vrijwel helemaal onder water. De klep klappt bij opengaan van de stuw naar beneden, waardoor water over de klep stroomt. Horizonvervuiling is bij de klep-balgstuw dus geen probleem (Verduijn, 2014). Het ontwerp van de klep-balgstuw past goed in de omgeving en

doet bijna geen afbreuk aan de omgeving. De stuw heeft relatief weinig ruimte nodig in het zomerbed van de Maas door relatief korte lengte van pijlers (13,0 m) en een breedte die gelijk staat aan de breedte van het huidige zomerbed. Alleen de segmentdeur met klep heeft een kleiner ruimtebeslag in de rivier. De klep-balgstuw scoort dus goed op het deelcriterium: 'ruimtebeslag', maar de segmentdeur met klep scoort hier best. De klep-balgstuw draagt niet direct bij aan maatschappelijke belangen, in tegenstelling tot de andere varianten. De klep-balgstuw is op deze schaal een grote innovatie: wereldwijd zijn er weinig klep-balgstuwten toegepast met een grotere waterdiepte dan 5 m.

De klep-balgstuw is over het algemeen redelijk goed te passeren voor vissen. Zoals paragraaf F2.2 beschrijft is overstroom voor neerwaartse migratie iets gunstiger. Voor neerwaartse migratie is echter de dimensionering van woeldrempels of andere obstakels maatgevend. De klep-balgstuw is wat betreft opwaartse migratie iets minder geschikt voor vissenpassage omdat onderstroom niet mogelijk is. De mogelijkheid om zowel onderstroom als bovenstroom toe te passen geeft de meeste mogelijkheden voor vissen en voor verandering van beleid in de toekomst. Samenvattend scoort de klepbalgstuw op vispasseerbaarheid gelijk aan de overstroombare segmentdeur, lager dan de segmentdeur met klep en hoger dan de kniestuw, waar alleen onderstroom mogelijk is.

Doordat balgen de kleppen aandrijven, en niet hydraulische cilinders, blijft het waterverontreinigingsrisico klein door een minimale hoeveelheid aan bewegingswerk (Daniel & Paulus, 2018). In vergelijking met de andere varianten scoort de klep-balgstuw dus het beste op dit aspect.

De klep-balgstuw klapt op de bodem in geopende stand, in dat geval is scheepvaart door de stuw mogelijk. Hierbij dient gewaarborgd te zijn dat de klep vastzit en niet, door bijvoorbeeld door scheepvaart veroorzaakte stromingen, naar boven kan klappen. Een grendel kan dit waarborgen, hier is echter nog weinig ervaring mee (InCom Working Group, 2005). De kans op aanvaringen van de klep-balgstuw is kleiner dan de kans op aanvaringen bij stuwmiddelen die zich wel in de doorstroomopeningen bevinden bij grote afvoeren. Daarnaast is de klep-balgstuw, in tegenstelling tot de kniestuw, relatief ongevoelig voor menselijke fouten doordat de stuw gedeeltelijk kan openen en sluiten door waterdruk.

F6 Variant 4: Kniestuw

Deze paragraaf behandelt de kniestuw op kwaliteit, aan de hand van de hoofdcriteria van de MCA. De hoofdcriteria zijn: uitvoering, betrouwbaarheid, beheer & onderhoud, duurzaamheid en omgeving.

F6.1 Uitvoering

De kniestuw is een nieuwe constructie van erg grote afmetingen. Het vakwerk van de deur, de draaipunten en de verankeringen kunnen geprefabriceerd worden maar zullen ter plaatste gemonteerd en gelast worden. Naar verwachting zal hiervoor veel mankracht en materieel nodig zijn. Daarnaast zullen veel grote onderdelen getransporteerd moeten worden over water en land. Door de grote deuren en de grote waterdiepte zullen grote en lange pijlers gemaakt moeten worden en zal de fundering en bouwkuip fors uitgevoerd moeten worden. Daarnaast zal veel en groot materieel nodig zijn. Door al deze aspecten zal de bouwperiode van deze variant naar verwachting erg lang zijn en zijn de risico's omvangrijk door de vele afhankelijkheden van leveranciers en materieeldiensten. Pijlers van 10 m breed en een waterdiepte van 6,55 m maken dat dit project uitzonderlijk is en dat de maakbaarheid van de totale constructie een stuk lager is dan de andere varianten.

Daarnaast is wat betreft de bouwmethode het toepassen van drie stuwopeningen minder voordelig dan het toepassen van vier stuwopeningen. Met vier stuwopeningen zijn bijvoorbeeld de bouwkuipen kleiner, is meer flexibiliteit mogelijk in fasering en is een grote deel van de rivier nog beschikbaar voor de afvoer. Hierin hebben klep-balgstuw en de kniestuw een nadeel ten opzichte van de segmentdeur met klep en de overstroombare segmentdeur.

F6.2 Betrouwbaarheid

De kniestuw is nog nooit eerder toegepast, dit heeft zijn weerslag op de betrouwbaarheid, beschikbaarheid en de bedrijfszekerheid van dit stuwmiddel. Aannames gebaseerd op conclusies van andere stuwmiddelen vormen de basis van de aangenomen betrouwbaarheid. De beschikbaarheid van het stuwmiddel is zoals gesteld onbekend aangezien het stuwmiddel een innovatie is. De verwachting is dat de beide segmentdeuren een hogere beschikbaarheid hebben dan de kniestuw en dat de klep-balgstuw een lagere beschikbaarheid heeft. Dit heeft vooral te maken met de hoeveelheid onderhoud en de hoeveelheid onderdelen. Aangezien de deur aangedreven wordt door de combinatie van hydraulische cilinders en gespannen kabels en doordat grendels de deur vastzetten in geopende stand, zijn veel deelsystemen te onderscheiden binnen deze variant. De vele onderdelen maken dat de kans op falen aanzienlijk toeneemt, aangezien alle deelsystemen apart van elkaar een faalkans hebben die bij elkaar opgeteld wordt. Het gehele open- en sluitproces is afhankelijk van aandrijvingen en dient nauwkeurig gemonitord te worden. Dit maakt dat, relatief gezien, het stuwmiddel gevoelig is voor menselijke fouten en storingen. Naar verwachting is het stuwmiddel niet goed opwaardeerbaar door zijn forse afmetingen en zware uitvoering.

Naar verwachting is de kniestuw gevoelig voor ijs en vuil. De grote sponningen, de uitsparingen in de drempel en het ongelijke heffen van de deur maken dat vuil en ijs kan blijven steken of ophopen. Hiernaast kan drijvend ijs en vuil achter de deur blijven steken en krachten uitoefenen aan de bovenstroomse zijde van de stuw. Bij openen en sluiten zal een erg groot moment op de deuren komen zodra het rollende deel van de deur de sponning verlaat. Verwacht wordt dat de deur niet kan openen bij een te groot verval. Wel kan de deur een klein stuk geheven worden om onderstroom te waarborgen. De forse constructie maakt dat de deur in gesloten stand veel kracht kan opnemen en afdragen aan de drempel en pijlers.

De kniestuw draait naar boven en opzij open, hierbij bevindt een klein gedeelte van het stuwmiddel zich nog in de doorstroomopening, een groot deel van de doorstroomopening is wel vrij voor scheepvaart. De kniestuw kan het doorvaren van schepen faciliteren, echter is de doorvaartbreedte van de stuw en de bescherming van het stuwmiddel in geopende stand een aandachtspunt. De kans op aanvaringen van de kniestuw is kleiner dan bij de segmentdeur met klep en groter dan de stuwmiddelen die volledig uit de doorstroomopening verdwijnen. Omdat de kniestuw uit de stuwopening verdwijnt is de kans dat vallende ankers schade leveren aan de deur erg klein, de overstroombare segmentdeur en de klep-balgstuw hebben dit risico wel. De kniestuw is in bepaalde

opzichten gevoelig voor menselijke fouten. Over het stuwmiddel bevindt zich een looppad. Het kan voorkomen dat het stuwmiddel geopend wordt als iemand zich op dit looppad bevindt. Dit heeft natuurlijk grote gevolgen. Daarnaast heeft de kniestuw een groot aantal onderdelen en systemen en kan de bediening enigszins complex zijn. Dit verhoogt het risico op menselijke fouten. Andere stuwmiddelen zijn minder gevoelig voor menselijke fouten. De verminderde kans op aanvaring doet de kniestuw echter beter scoren op het deelcriterium: 'gevoeligheid op menselijke fouten & aanvaringen' dan de segmentdeur met klep.

De kniestuw scoort naar verwachting gemiddeld op trillingen. Doordat de kniestuw niet evenredig geheven wordt maar ter plaatse van het knie-draaipunt sneller heft dan aan de uiteinden zullen minder snel trillingen optreden. De breedte van het stuwmiddel is wel een aspect wat het risico op trillingen verhoogt. Daarnaast stroomt water onder de deur door, wat een hoger risico op trillingen heeft dan overstroom (Kolkman & Jongeling, 2000).

F6.3 Beheer & onderhoud

De kniestuw is naar verwachting over het algemeen niet gemakkelijk te onderhouden. Het stuwmiddel staat in gestreken stand in het water en staat in geopende stand recht omhoog. Dit maakt dat de draaipunten slecht bereikbaar zijn, hierdoor zijn de draaipunten niet gemakkelijk te inspecteren en te onderhouden. Bij inspectie en onderhoud van het staalwerk zal ook al snel de stuwopening drooggezet moeten worden door schotbalken. Deze schotbalken worden op kant opgeslagen en kunnen door middel van een bok (grote kraan op ponton) op plaats gehesen worden en in de schotbalksponningen worden gegleden. Een mogelijkheid voor inspectie en onderhoud is het toepassen van een looppad over het stuwmiddel. Dit maakt de pijlers goed bereikbaar, echter geeft het niet genoeg mogelijkheden voor grondige inspecties. Doordat een looppad over het stuwmiddel toegepast kan worden en dat het stuwmiddel niet onder water verdwijnt, scoort de kniestuw beter op het aspect bereikbaarheid dan de klep-balgstuw. Mogelijke onveiligheid kan ontstaan als mensen het looppad gebruiken als de stuw (deels) geheven wordt. Door de grote maatregelen die getroffen worden om onderhoud en inspectie mogelijk te maken is de veiligheid tijdens inspectie en onderhoud goed gewaarborgd.

Tabel 39 geeft de hoofdonderdelen voor de kniestuw in hun onderhoud en inspecties weer.

Tabel 39: Onderhoud hoofdonderdelen kniestuw. Bronnen: [1]: (Daniel & Paulus, 2018), [2]: (Rijkswaterstaat PPO Techniek Zuid-Nederland, 2020).

Onderdeel:	Actie	Frequentie (per x jaar)	Hoeveelheid	Bron:
Staalwerk	Coating bijwerken	10-15	6 vakwerken	[1]
Staalwerk	Coating vervangen	20-30	6 vakwerken	[1]
Draaipunten	Vervangen	30-40	6	[1]
Afdichting	Vervangen	20	+/- 162 m	[1]
Elektrische systemen	Vervangen	30	-	[1]
Elektrische systemen	Updaten	8	-	[1]
Gehele constructie	Grondige inspectie	5	-	[2]
Gehele constructie	Toestand inspectie	1	-	[2]
Werktuigbouwkundige systemen	Bijvullen/smeren	0,5 (gemiddeld)	+/- 50	[2]
Rolwielen	Vervangen	30	3	[1]
Kabels	Vervangen	20-25	6	[1]

Het bedienen van de kniestuw zal naar verwachting niet makkelijk zijn. Complexe systemen moeten zowel kabels laten trekken als hydraulische cilinders laten drukken. De kans dat systemen falen is daardoor groot en dat maakt dat bij bedienen complicaties kunnen optreden. Daarnaast moet tijdens bewegen van de stuw continu goed opgelet worden of het looppad niet gebruikt wordt en of het heffen van de knieën goed en veilig verloopt. Bedienen op afstand is naar verwachting niet mogelijk.

Vandalisme is voor stuwmiddelen een aandachtspunt. De kwetsbare onderdelen van de kniestuw zijn echter goed verscholen. Over het stuwmiddel kan wel een loopbrug liggen, hierdoor is het stuwmiddel wel bereikbaar voor derden. In tegenstelling tot de klep-balgstuw is de kniestuw goed bestand tegen vandalisme, maar door

de bereikbaarheid van bepaalde onderdelen door het looppad is de kniestuw wel gevoeliger voor vandalisme dan de segmentdeur met klep en de overstroombare segmentdeur.

F6.4 Duurzaamheid

De kniestuw is opgebouwd uit brede en lange pijlers, grote vakwerken en veel bewegingswerk. Paragraaf 6.3.4 geeft een grove schatting van de hoeveelheden materiaal weer die benodigd zijn voor het construeren van de kniestuw. In vergelijking tot andere varianten heeft de kniestuw verreweg het meeste materiaal nodig. Hierdoor is de milieu-impact ten gevolge van materiaalproductie, -transport en constructie erg groot. Daarnaast zorgen de grote dimensies en de hoeveelheid van materiaal voor een lange constructietijd, wat ook impact heeft op de totale uitstoot door materieel en de hoeveelheid afvalmateriaal wat vrijkomt. De verwachting is dat het onderhoud aan de kniestuw niet gering is; dit verhoogt de totale milieu-uitstoot. Daarnaast zal in vergelijking met de andere varianten veel energie verbruikt worden bij het bewegen van het stuwmiddel (Bijlage I3).

Het staalwerk van de vakwerken kan mogelijk herbruikbaar zijn aan het einde van de levensduur van de stuw. Het betonwerk zal eventueel na de levensduur gebruikt worden voor een andere constructie die tegen of op de pijlers gebouwd kan worden. Dit aspect bevordert de score van de kniestuw op het deelcriterium: 'hergebruik'. De kniestuw scoort dan ook het hoogst op dit criterium.

F6.5 Omgeving

De kniestuw is een erg innovatief stuwmiddel; nog nooit zijn kniestuwen toegepast. De kniestuw zal als technische bezienswaardigheid kunnen gelden en als een opwaardering van de omgeving. Wel zullen de deuren hoog geheven zijn bij een open stand. Dit is een relatief grote vorm van horizonvervuiling aangezien de deuren niet alleen hoog geheven worden maar ook erg breed zijn. De brede en lange pijlers beslaan veel ruimte in de watergang van de Maas. Dit is niet gunstig voor scheepvaart en verhoogt de stroomsnelheden ter plaatse van de pijlers. Eventueel kan de kniestuw fungeren als een voetgangersbrug in gesloten stand. Dit is een maatschappelijk belang en bevordert tegelijkertijd de stuw als bezienswaardigheid.

De kniestuw heeft alleen de mogelijkheid tot onderstroom en niet tot bovenstroom. Dit maakt dat kniestuw minder goed scoort op vispasseerbaarheid. Zoals paragraaf F2.2 beschrijft, zijn stuwen met zowel de mogelijkheid op bovenstroom als onderstroom het best inzetbaar voor het passeren van vissen. Opwaartse migratie kan wel plaatsvinden als de knie (deels) geheven is.

Bij het opereren van de kniestuw bestaat een risico op olieverontreiniging van het water van de Maas. Zo kan olie lekken uit de hydraulische cilinders en het kabeltreksysteem (Daniel & Paulus, 2018). Daarnaast heeft de kniestuw zes grote draaipunten die vaak onder water staan en gesmeerd dienen te worden. Dit maakt dat de kniestuw in vergelijking tot de andere varianten het grootste risico heeft op verontreiniging van water. Tegenwoordig zijn oliën beschikbaar die minder schadelijk en biologisch afbreekbaar zijn (Verwoolde, 2018). Toch blijft het gebruik van smeermiddelen en oliën bij kunstwerken bij water een aandachtspunt.

BIJLAGE G. POLL WEGING

G1 Memo criteriaweging

MEMO CRITERIAWEGING

Inleiding

Deze memo is opgesteld om de weging van de criteria te bepalen voor het afstudeeronderzoek 'Het meest geschikte stuwmiddel voor de Maas'. Het doel van deze memo is om de lezers van deze memo mee te nemen in het bepalen van de weging van verschillende criteria. Ten eerste legt de memo kort uit hoe het afstudeeronderzoek en keuzeproces is ingericht en wat het doel van het onderzoek is. Daarnaast verduidelijkt deze memo de verschillende criteria kort.

Het onderzoek

Het afstudeeronderzoek richt zich op de keuze wat het meest geschikte stuwmiddel (beweegbaar keermiddel voor stuwen) voor de stuwen in de Nederlandse Maas is. Het onderzoek richt zich op deze vraag door middel van een case study naar stuw Grave, de stuw in de Maas die het eerst vervangen moet worden. Na het onderzoek voor Grave zal het onderzoek zich richten op de vraag hoe het gekozen stuwmiddel op de andere locaties in de Nederlandse Maas toegepast zou kunnen worden. Literatuurstudie en een afgewogen keuzeproces spelen de hoofdrol in dit afstudeeronderzoek.

Het keuzeproces

Verschiede keuzetools helpen bij de keuze voor het meest geschikte stuwmiddel. Onderstaande opsomming geeft de verschillende methodes die gebruikt zullen worden in het keuzeproces van het meest geschikte stuwmiddel:

1. Gestelde eisen en randvoorwaarden vormen de eerste filtering van stuwmiddelen. Stuwmiddelen die niet voldoen aan de uitgangspunten zijn niet geschikt voor verder onderzoek;
2. Binnen bepaalde stuwmiddeltypes onderscheiden verschillende varianten zich onderling in beweging, vorm en mogelijkheden. Per stuwmiddeltype is een variant gekozen op basis van de functies waaraan het stuwmiddel dient te voldoen en een vakkundig oordeel. Dit type filtering filtert dus de overgebleven varianten van de stuwmiddeltypes uit het onderzoek;
3. Een Trade Off Matrix (TOM) filtert op een grove schaal de overgebleven stuwmiddeltypes tot vier stuwmiddelen. Deze TOM is gebaseerd op enkele criteria die de basisfuncties van de stuwen waarborgen;
4. Een Multi Criteria Analyse (MCA) filtert uit de vier stuwmiddelen een uiteindelijke voorkeursvariant. Ten grondslag van de MCA worden de varianten eerst uitgewerkt en onderzocht.

Het keuzeproces met de MCA vormt de belangrijkste schakel in het keuzeproces. Enkele criteria zijn naar aanleiding van een uitgebreid literatuuronderzoek opgesteld om de MCA af te wegen, deze zijn hieronder opgenoemd:

- Kosten;
- Uitvoering;
- Betrouwbaarheid;
- Beheer & Onderhoud;
- Duurzaamheid;
- Omgeving.

Voor bovenstaande criteria dient vastgesteld te worden wat de onderlinge balans van wegeningen is. De verschillende criteria zullen in de MCA afgewogen worden met een weging van 0 tot 1. De MCA rekent scores toe aan varianten op basis van de volgorde waarin ze voldoen aan de gestelde criteria. De variant die het beste voldoet aan het gestelde criterium zal een score van 4 krijgen, de variant die het slechtst voldoet krijgt een score van 1 en de twee overgebleven varianten zullen een score van 2 en 3 krijgen op basis van volgorde.

Uitleg criteria

Per criterium zijn hieronder enkele kernwoorden gegeven als nadere toelichting. De criteria vullen de eisen en randvoorwaarden verder aan, echter zijn de eisen en randvoorwaarden het uitgangspunt (zie: 'het keuzeproces').

Kosten:

Alle kosten van bouw tot sloop (LCC); inclusief materiaal, onderhoud, vervanging, opereren van stuwmiddel en baten zoals het geld dat de stuw oplevert/bespaart wanneer het doorvaarbaar is voor schepen.

Uitvoering: Constructietijd, Bouwmethode, Maakbaarheid (ervaring & kunde), Transporteerbaarheid.

Betrouwbaarheid:

Gevoeligheid voor: ijs, puin, menselijke fouten, aanvaringen, storingen, trillingen; Bedrijfszekerheid, Beschikbaarheid, Afhankelijkheid van andere systemen, Bewezen technologie, Complexiteit afdracht krachten, Opwaardeerbaarheid stuw.

Beheer & Onderhoud:

Onderhoudsgemak, Veiligheid, Bereikbaarheid van onderdelen, Onderhoudsfrequentie, Bedienbaarheid, Bestandheid tegen vandalisme.

Duurzaamheid:

Milieu-impact, Mogelijkheid tot hergebruik, Energieverbruik, Toekomstvastheid.

Omgeving:

Esthetica, Maatschappelijke belangen, Innovatie en prestige, Horizonvervuiling, Vispasseerbaarheid, Risico op waterverontreiniging, Ruimtebeslag.

Weging criteria

In bijgestuurde poll kunt u naar aanleiding van bovenstaande toelichting per criterium aangeven hoe belangrijk u dit criterium vindt, in relatie tot de andere criteria, voor een nieuwe stuw in de Maas.

We danken u hartelijk voor u medewerking! Voor vragen en/of opmerkingen kunt onderstaande personen benaderen:

A.M. (Aron) Braakman

aron.braakman@windesheim.nl

06-29018898

K.M. (Matthias) Polinder

matthias.polinder@windesheim.nl

06-12336497

G2 Resultaten Poll

Onderstaande resultaten zijn ontleend aan de poll en zijn door de onderstaande 48 mensen ingevuld. Tabel 40 geeft de geanonimiseerde resultaten van de poll. Tabel 41: 'Resultaten Poll zonder kosten' geeft de resultaten weer in het geval dat de kosten geen rol meer spelen in de weging van de MCA (zoals het geval is). In Tabel 42: 'Wegfactoren aan de hand van Poll' is de bepaling van de weging bepaald door de totalen per criterium te delen door het totaalhoeveelheid scores.

Tabel 40: Resultaten Poll.

Resultaten Poll							
Datum:	Functie:	Kosten	Uitvoering	Betrouw- baarheid	Beheer & Onderhoud	Duurzaam- heid	Omgeving
18-3-2020	Projectleider Kunstwerken	6	3	6	4	4	3
18-3-2020	Student	4	4	6	4	5	3
18-3-2020	Constructeur	3	5	6	5	5	4
18-3-2020	Sales director Benelux bij Agrovision	2	2	6	5	5	3
18-3-2020	Kwaliteitsmedewerker ziekenhuis	3	1	6	4	5	2
18-3-2020	Hoofd Calculatie bij Beens Groep	2	4	6	4	2	2
19-3-2020	Specialist waterbouwkundige kunstwerken	1	4	5	6	5	4
19-3-2020	Jr. Constructeur waterbouw	2	3	6	5	4	3
19-3-2020	Geotechnisch adviseur	5	6	5	4	2	2
19-3-2020	Calculator BNRS	6	6	6	6	4	4
19-3-2020	Hydraulisch Adviseur	1	3	6	5	5	3
19-3-2020	Kostprijsdeskundige	4	5	6	4	4	3
19-3-2020	Student Civiele Techniek	5	5	6	6	4	4
19-3-2020	Tendermanager	3	2	6	4	5	1
19-3-2020	Technisch manager Rijkswaterstaat (PPO ZN)	6	6	6	6	6	6
19-3-2020	Senior Rivierkundige bij RWS Zuid Nederland	1	4	6	5	2	3
19-3-2020	Consultant Asset Management	6	1	6	4	4	3
20-3-2020	Afstudeerder bij Waterschap Noorderzijlvest	4	3	4	4	6	5
20-3-2020	Civiel ontwerper	5	5	4	4	3	5
22-3-2020	Projectleider architectenbureau	1	2	6	4	5	3
24-3-2020	Betonconstructeur	5	4	6	3	1	2
24-3-2020	Directeur ingenieursbureau	4	2	6	5	5	3
25-3-2020	Constructeur	4	3	6	5	5	2
25-3-2020	Constructief adviseur	2	3	6	4	5	5
25-3-2020	Constructeur	3	4	6	5	1	2
25-3-2020	projectleider	4	3	6	5	5	5
25-3-2020	Bouwkundig ingenieur / projectleider	4	5	6	3	4	4
26-3-2020	Constructeur	2	5	6	3	1	3
26-3-2020	tekenaar	4	1	5	6	2	3
27-3-2020	RWS Senior specialist waterbouw	4	6	6	6	5	5
29-3-2020	Student leerkracht basisonderwijs	5	4	6	4	5	5
30-3-2020	Technisch Manager	5	2	6	6	3	5
30-3-2020	Adviseur Waterbouw	5	6	4	3	2	1
31-3-2020	Modelleur	1	4	6	5	2	3
1-4-2020	Senior adviseur Assetmanagement	5	3	6	5	4	5
2-4-2020	Adviseur techniek (beton constructeur)	2	5	6	4	1	3
2-4-2020	Adviseur Hoogwaterveiligheid	2	1	6	3	5	4
2-4-2020	Afstudeerder	6	4	6	5	6	3
7-4-2020	Adviseur WTB & Staal (RWS)	4	5	6	6	5	5
8-4-2020	Aankomend constructeur	5	4	6	5	3	3
9-4-2020	sr adviseur onderhoud vaarwegen en natte kunstwerken	5	5	5	6	4	4
13-4-2020	Grafisch vormgever	1	5	6	3	5	4
14-4-2020	Logopedist	1	2	6	4	5	4
15-4-2020	Constructeur	4	3	6	5	3	4
28-4-2020	Constructeur/stagebegeleider	1	6	2	3	4	5
28-4-2020	Constructeur	6	3	5	5	4	2
28-4-2020	Afstudeerder	5	3	6	4	2	1
28-4-2020	Afstudeerder	1	3	6	5	4	2

Tabel 41: Resultaten Poll zonder kosten.

Resultaten - kosten							
Datum:	Functie:		Uitvoering	Betrouw- baarheid	Beheer & Onderhoud	Duurzaam- heid	Omgeving
18-3-2020	Projectleider Kunstwerken		2	5	3	3	2
18-3-2020	Student		3	5	3	4	2
18-3-2020	Constructeur		4	5	4	4	3
18-3-2020	Sales director Benelux bij Agrovision		1	5	4	4	2
18-3-2020	Kwaliteitsmedewerker ziekenhuis		1	5	3	4	2
18-3-2020	Hoofd Calculatie bij Beens Groep		3	5	3	1	1
19-3-2020	Specialist waterbouwkundige kunstwerken		3	4	5	4	3
19-3-2020	Jr. Constructeur waterbouw		2	5	4	3	2
19-3-2020	Geotechnisch adviseur		5	4	3	1	1
19-3-2020	Calculator BNRS		5	5	5	3	3
19-3-2020	Hydraulisch Adviseur		2	5	4	4	2
19-3-2020	Kostprijsdeskundige		4	5	3	3	2
19-3-2020	Student Civiele Techniek		4	5	5	3	3
19-3-2020	Tendermanager		2	5	3	4	1
19-3-2020	Technisch manager Rijkswaterstaat (PPO ZN)		5	5	5	5	5
19-3-2020	Senior Rivierkundige bij RWS Zuid Nederland		3	5	4	1	2
19-3-2020	Consultant Asset Management		1	5	3	3	2
20-3-2020	Afstudeerder bij Waterschap Noorderzijlvest		2	3	3	5	4
20-3-2020	Civil ontwerper		4	3	3	2	4
22-3-2020	Projectleider architectenbureau		1	5	3	4	2
24-3-2020	Betonconstructeur		4	5	3	1	2
24-3-2020	Directeur ingenieursbureau		2	5	4	4	3
25-3-2020	Constructeur		3	5	4	4	2
25-3-2020	Constructief adviseur		2	5	3	4	4
25-3-2020	Constructeur		3	5	4	1	2
25-3-2020	projectleider		2	5	4	4	4
25-3-2020	Bouwkundig ingenieur / projectleider		4	5	2	3	3
26-3-2020	Constructeur		4	5	2	1	2
26-3-2020	tekenaar		1	4	5	2	3
27-3-2020	RWS Senior specialist waterbouw		5	5	5	4	4
29-3-2020	Student leerkracht basisonderwijs		3	5	3	4	4
30-3-2020	Technisch Manager		1	5	5	2	4
30-3-2020	Adviseur Waterbouw		5	4	3	2	1
31-3-2020	Modelleur		3	5	4	1	2
1-4-2020	Senior adviseur Assetmanagement		2	5	4	3	4
2-4-2020	Adviseur techniek (beton constructeur)		4	5	3	1	2
2-4-2020	Adviseur Hoogwaterveiligheid		1	5	2	4	3
2-4-2020	Afstudeerder		3	5	4	5	2
7-4-2020	Adviseur WTB & Staal (RWS)		4	5	5	4	4
8-4-2020	Aankomend constructeur		3	5	4	2	2
9-4-2020	sr adviseur onderhoud vaarwegen en natte kunstwerken		4	4	5	3	3
13-4-2020	Grafisch vormgever		4	5	2	4	3
14-4-2020	Logopedist		1	5	3	4	3
15-4-2020	Constructeur		2	5	4	2	3
28-4-2020	Constructeur/stagebegeleider		5	1	2	3	4
28-4-2020	Constructeur		3	5	5	4	2
28-4-2020	Afstudeerder		3	5	4	2	1
28-4-2020	Afstudeerder		2	5	4	3	1

Tabel 42: Weegfactoren aan de hand van Poll.

Totaal van scores:		813	Uitvoering	Betrouw- baarheid	Beheer & Onderhoud	Duurzaamheid	Omgeving
Totaalscore per criterium:			140	227	175	146	125
Weging bij totaalscores:		(Totaalscore per criterium/Totaal van scores)	0,17	0,28	0,22	0,18	0,15

BIJLAGE H. MULTICRITERIA ANALYSE

H1 Deelcriteria scores

Onderstaande tabellen geven de score per deelcriterium per variant. De onderbouwing van de varianten uit Bijlage F ligt ten grondslag aan deze scores. De uiteindelijke hoofdcriteriumscores zijn de scores die de Multicriteria analyse meeneemt.

H1.1 Uitvoering

Tabel 43: Deelcriteriumscores uitvoering.

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Transporteerbaarheid	2	1	4	3
Bouwmethode	4	4	2	2
Maakbaarheid	2	4	3	1
Constructietijd	3	2	4	1
Totaal	11	11	13	7
Hoofdcriteriumscore	2,75	2,75	3,25	1,75

H1.2 Betrouwbaarheid

Tabel 44: Deelcriteriumscores betrouwbaarheid.

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Gevoeligheid voor ijs & vuil	4	1	3	2
Bewezen technologie	4	3	2	1
Afhankelijkheid van andere systemen	2	3	4	1
Beschikbaarheid	4	3	1	2
Gevoeligheid op menselijke fouten en aanvaringen	1	3	4	2
Trillingen	1	3	4	2
Afdracht krachten	3	3	4	1
Opwaardeerbaarheid	2	3	4	1
Totaal	21	22	26	12
Hoofdcriteriumscore	2,63	2,75	3,25	1,50

H1.3 Beheer & onderhoud

Tabel 45: Deelcriteriumscores beheer & onderhoud.

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Veiligheid	3	4	4	2
Bereikbaarheid	4	3	1	2
Hoeveelheid onderhoud	3	4	2	1
Bedienbaarheid	4	3	2	1
Bestand tegen vandalisme	3	4	1	2
Totaal	17	18	10	8
Hoofdcriteriumscore	3,40	3,60	2,00	1,60

H1.4 Duurzaamheid

Tabel 46: Deelcriteriumscore duurzaamheid.

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Milieu-impact	4	2	3	1
Hergebruik	2	3	1	4
Energieverbruik	3	2	4	1
Totaal	9	7	8	6
Hoofdcriteriumscore	3,00	2,33	2,67	2,00

H1.5 Omgeving

Tabel 47: Deelcriteriumscores omgeving.

	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Benodigde ruimte	4	2	3	1
Maatschappelijke belangen	3	1	1	2
Innovatie	2	2	3	4
Horizonvervuiling	3	4	4	2
Vispasseerbaarheid	4	3	3	2
Waterverontreinigingsrisico	2	3	4	1
Totaal	18	15	18	12
Hoofdcriteriumscore	3,00	2,50	3,00	2,00

H2 Multicriteria analyse

Onderstaande tabellen geven de ingevulde Multicriteria analyse, Tabel 48 met de weging volgens de matrix, Tabel 49 met de weging volgens de poll.

Tabel 48: Multicriteria analyse met weging volgens matrix.

Weging volgens Matrix					
	Variant	Segment met klep	Overstroombare segment	Klep-balgstuw	Kniestuw
Criterium					
Uitvoering		2,8	2,8	3,3	1,8
Weging:	0,20	0,6	0,6	0,7	0,4
Betrouwbaarheid		2,6	2,8	3,3	1,5
Weging:	0,33	0,9	0,9	1,1	0,5
B & O		3,4	3,6	2,0	1,6
Weging:	0,27	0,8	0,8	0,4	0,4
Duurzaamheid		3,0	2,3	2,7	2,0
Weging:	0,13	0,4	0,3	0,4	0,3
Omgeving		3,0	2,5	3,0	2,0
Weging:	0,07	0,2	0,2	0,2	0,1
Totaalscore		14,8	13,9	14,2	8,9
Met weging:	1,00	2,93	2,90	2,82	1,68

Tabel 49: Multicriteria analyse met weging volgens poll.

Weging volgens poll					
	Variant	Segment met klep	Overstroombare segment	Klep-balgstuw	Kniestuw
Criterium					
Uitvoering		2,8	2,8	3,3	1,8
Weging:	0,17	0,5	0,5	0,6	0,3
Betrouwbaarheid		2,6	2,8	3,3	1,5
Weging:	0,28	0,7	0,8	0,9	0,4
B & O		3,4	3,6	2,0	1,6
Weging:	0,22	0,6	0,7	0,4	0,3
Duurzaamheid		3,0	2,3	2,7	2,0
Weging:	0,18	0,5	0,4	0,5	0,4
Omgeving		3,0	2,5	3,0	2,0
Weging:	0,15	0,5	0,4	0,5	0,3
Totaal		14,8	13,9	14,2	8,9
Met weging:	1,00	2,94	2,82	2,83	1,73

BIJLAGE I. KOSTEN-BATEN ANALYSE

Deze bijlage vergelijkt de vier varianten op basis van kosten en baten. Vier soorten kosten en baten in deze vergelijking zijn:

- constructiekosten (paragraaf I1);
- baten ten gevolge van doorvaarbaarheid (paragraaf I2);
- gebruikskosten (paragraaf I3);
- onderhoudskosten (paragraaf I4).

Alle kosten zijn gebaseerd op kostenkengetallen, voorbeeldprojecten of gegronde aannames. Bij voorbaat is te zeggen dat de kostenbatenraming slechts een schatting is en het vooral de verschillen in kosten tussen de varianten aantoont. De totale kosten zijn berekend door een gedeelte van de uitvoeringskosten te vermenigvuldigen met een factor, plus de onderhouds- en gebruikskosten, minus de baten voor doorvaarbaarheid.

I1 Constructiekosten

Deze paragraaf geeft inzicht in de kengetallen en uitgangspunten die ten grondslag liggen aan de gedeeltelijke kostenberekening voor uitvoering. De kengetallen betreffen de materiaalkosten, manuurkosten, transportkosten, montagekosten en bijkomende kosten. De algemene kosten, algemene bouwplaats kosten, engineeringskosten en de winst & risico worden als een percentage van de berekende uitvoeringskosten bepaald.

- directe bouwkosten;
 - €12,- per kg staal (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
 - €90,- per m³ beton (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
 - €1,- per kg wapening (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
 - €70,- per m² bekisting (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
 - €36,- per m betonpaal (fundering) (Dukers, 2003); daarnaast de funderingsploeg per dag (manuren, materieel, opstellen machines, onderhoud & brandstof machines). De funderingsploeg heit gemiddeld 100 m heipaal per dag. Per dag kost de heiploeg €1120,- (Dukers, 2003). Hierbij worden palen van 10 m geheid (DINOloket, sd);
 - €75,- per m² bodembescherming (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020).
- algemene kosten: 6% van de directe bouwkosten (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
- algemene bouwplaats kosten: 3% van de directe bouwkosten (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
- engineeringskosten: 30% van de voorziene bouwkosten (Directe bouwkosten, Algemene kosten en algemene bouwplaats kosten (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020);
- winst en risico: 5% van de constructiekosten (Kostenpool Rijkswaterstaat, 2020).

Paragrafen I1.1, I1.2, I1.3 en I1.4 geven de constructiekosten weer vanuit de bovenstaande uitgangspunten voor de vier varianten.

11.1 Segmentdeur met klep

Tabel 50: Gedeeltelijke uitvoeringskosten voor variant 1: segmentdeur met klep. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Betonpalen	Bodem- bescherming
Hoeveelheid	3524 kN		160 kg/m ³		423 van 10m	
Hoeveelheid	359.000 kg	6.620 m ³	1.059.000 kg	2184 m ²	4.230 m ¹	16.720 m ²
Kengetal	€12,- per kg	€90,- per m ³	€1,- per kg	€70,- per m ²	€36,- per m ¹	€75,- per m ²
Vaste kosten					€0,05 M (voor 42,3 dagen)	
Directe bouwkosten	€4,31 M	€0,60 M	€1,06 M	€0,15 M	€0,20 M	€1,25 M

Tabel 51: Berekening van gedeeltelijke constructiekosten voor variant 1: segmentdeur met klep. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

Kostenpost volledige naam	Afkorting:	Opbouw:	Bedrag:
Directe bouwkosten	D.B.	Tabel 51	€7,56 M
Algemene Kosten	A.K.	6% D.B.	€0,45 M
Algemene bouwplaats kosten	A.B.K.	3% D.B.	€0,23 M
Voorziene bouwplaats kosten	V.B.K.	D.B. + A.K + A.B.K	€8,25 M
Engineerings-kosten	E.K.	30% V.B.K.	€2,48 M
Subtotaal	S.T.	V.B.K. + E.K.	€10,72 M
Winst & Risico (5% Subtotaal)	W.R.	5% S.T.	€0,54 M
Constructiekosten	C.K.	S.T. + W.R.	€11,27 M

11.2 Overstroombare segmentdeur

Tabel 52: Gedeeltelijke uitvoeringskosten voor variant 2: overstroombare segmentdeur. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Betonpalen	Bodem- bescherming
Hoeveelheid	3687 kN		160 kg/m ³		545 van 10m	
Hoeveelheid	376.000 kg	8534 m ³	1.365.000 kg	2.112 m ²	5445 m ¹	16.720 m ²
Kengetal	€12,- per kg	€90,- per m ³	€1,- per kg	€70,- per m ²	€36,- per m ¹	€75,- per m ²
Vaste kosten					€70.000,- (voor 54,45 dagen)	
Directe bouwkosten	€4,51 M	€0,77 M	€1,37 M	€0,15 M	€0,26 M	€1,25 M

Tabel 53: Berekening van gedeeltelijke constructiekosten voor variant 2: overstroombare segmentdeur. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

Kostenpost volledige naam	Afkorting:	Opbouw:	Bedrag:
Directe bouwkosten	D.B.	Tabel 52	€8,31 M
Algemene Kosten	A.K.	6% D.B.	€0,50 M
Algemene bouwplaats kosten	A.B.K.	3% D.B.	€0,25 M
Voorziene bouwplaats kosten	V.B.K.	D.B. + A.K + A.B.K	€9,05 M
Engineerings-kosten	E.K.	30% V.B.K.	€2,72 M
Subtotaal	S.T.	V.B.K. + E.K.	€11,77 M
Winst & Risico (5% Subtotaal)	W.R.	5% S.T.	€0,59 M
Constructiekosten	C.K.	S.T. + W.R.	€12,36 M

11.3 Klep-balgstuw

Tabel 54: Gedeeltelijke uitvoeringskosten voor variant 3: klep-balgstuw. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Betonpalen	Bodem- bescherming
Hoeveelheid	2.846 kN		160 kg/m ³		467 van 10 m	
Hoeveelheid	290.112 kg	7117 m ³	1.139.000 kg	1.932 m ²	4661 m ¹	16.720 m ²
Kengetal	€12,- per kg	€90,-	€1,- per kg	€70,- per m ²	€36,- per m ¹	€75,- per m ²
Vaste kosten					€52.203,- (voor 47 dagen)	
Directe bouwkosten	€3,48 M	€0,64 M	€1,14 M	€0,14 M	€0,17	€1,25 M

Tabel 55: Berekening van gedeeltelijke constructiekosten voor variant 3: klep-balgstuw. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

Kostenpost volledige naam	Afkorting:	Opbouw:	Bedrag:
Directe bouwkosten	D.B.	Tabel 54	€1,25 M
Algemene Kosten	A.K.	6% D.B.	€0,41 M
Algemene bouwplaats kosten	A.B.K.	3% D.B.	€0,21 M
Voorziene bouwplaats kosten	V.B.K.	D.B. + A.K + A.B.K	€7,49 M
Engineerings-kosten	E.K.	30% V.B.K.	€2,25 M
Subtotaal	S.T.	V.B.K. + E.K.	€9,74 M
Winst & Risico (5% Subtotaal)	W.R.	5% S.T.	€0,49 M
Constructiekosten	C.K.	S.T. + W.R.	€10,22 M

11.4 Kniestuw

Tabel 56: Gedeeltelijke uitvoeringskosten voor variant 4: kniestuw. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

	Staal	Beton	Wapening	Bekisting	Betonpalen	Bodem- bescherming
Hoeveelheid	4950 kN					
Hoeveelheid	504.588 kg	13.810 m ³	2.209.000 kg	3.142 m ²	7.200 m ¹	16.230 m ²
Kengetal 1	€12,- per kg	€90,-	€1,- per kg	€70,- per m ²	€36,- per m ¹	€75,- per m ²
Vaste kosten					€80.640,- (voor 72 dagen)	
Directe bouwkosten	€6,06 M	€1,24 M	€2,21 M	€0,22	€0,26	€1,22 M

Tabel 57: Berekening van gedeeltelijke constructiekosten voor variant 4: kniestuw. Kosten zijn afgerond op tienduizendtallen en gegeven in miljoenen euro's.

Kostenpost volledige naam	Afkorting:	Opbouw:	Bedrag:
Directe bouwkosten	D.B.	Tabel 56	€11,28 M
Algemene Kosten	A.K.	6% D.B.	€0,68 M
Algemene bouwplaats kosten	A.B.K.	3% D.B.	€0,34 M
Voorziene bouwplaats kosten	V.B.K.	D.B. + A.K + A.B.K	€12,30 M
Engineerings-kosten	E.K.	30% V.B.K.	€3,69 M
Subtotaal	S.T.	V.B.K. + E.K.	€15,99 M
Winst & Risico (5% Subtotaal)	W.R.	5% S.T.	€0,80 M
Constructiekosten	C.K.	S.T. + W.R.	€16,79 M

Aangezien de kostenberekeningen voor elektrische systemen, werktuigbouwkundige systemen, bouwplaats voorzieningen, bouwkuipen en andere kleine kostengroepen niet zijn meegenomen, zal het totaalbedrag voor de constructiekosten vermenigvuldigd worden met een factor. Voor de klep-balgstuw is aangenomen dat de kosten voor de balg met bijbehorende systemen een even groot deel vormen als de aandrijvingen bij de segmentdeuren en de kniestuw. Aangenomen wordt dat het berekende bedrag een goede indicatie vormt voor de totale kosten. Hierbij geldt namelijk dat hoe groter de constructie, hoe hoger de bijkomende kosten ook zullen zijn.

Het prognoserapport Vervanging en Renovatie 2016 (Klatter, 2017) geeft aan dat €65 miljoen beschikbaar is voor het vervangen van de stuw bij Grave. Tabel 58 geeft een kostenraming voor stuw Sambeek weer, hierbij zijn de totale kosten geschat tussen de €45 miljoen en €55 miljoen (Daniel, Rigo, & Dembicki, 2008). De bron geeft daarbij aan dat de constructiekosten tussen de €32 miljoen en €37 miljoen liggen. Het rapport 'Grip de Maas' (Jütte & Maarten, 2017) schat de investeringskosten (engineering & uitvoering) voor stuw en sluis Grave op €33 miljoen. Uit deze bronnen blijkt dat de uiteindelijke kosten naar verwachting tussen de €45 miljoen en €65 miljoen zullen liggen. Dit geeft een indicatie voor de uiteindelijke kosten voor de vier varianten. De totale constructiekosten bestaan uit de berekende constructiekosten maal een factor die bepaald is aan de hand van een variant die vergelijkbaar is met een variant uit Tabel 58. De overstroombare segmentdeur is het uitgangspunt voor de factor waarmee de kosten verhoogd worden omdat deze variant de meeste overeenkomsten heeft met de stuwen zoals weergegeven is in Tabel 58. De constructiekosten voor een sectordeur voor de stuw bij Sambeek zijn volgens Tabel 58 €37 miljoen. Aangenomen wordt dat de constructiekosten van de overstroombare segmentdeur ongeveer hetzelfde zouden moeten zijn als van de sectordeur. Tabel 53 geeft de gedeeltelijk uitvoeringskosten voor de overstroombare segmentdeur, deze zijn €12,36 miljoen. Tussen €12,36 miljoen en €37 miljoen zit grofweg een factor van 3. De factor waarmee de

constructiekosten worden bepaald is dus 3. De onderstaande opsomming geeft de totale constructiekosten voor de vier varianten:

- segmentdeur met klep: €11,27 miljoen * 3 = 33,81 miljoen
- overstroombare segmentdeur: €12,36 miljoen * 3 = 37,08 miljoen
- klep-balgstuw: €10,22 miljoen * 3 = 30,66 miljoen
- kniestuw: €16,79 miljoen * 3 = 50,37 miljoen

Tabel 58: Kostenraming stuw Sambeek (Daniel, Rigo, & Dembicki, 2008).

Option Criterion (€)	Vertical lift gate (a)	Sector gate (b)	Suspended flap gate (c)	Bottom flap gate (d)
Construction	36,000,000,-	37,000,000,-	34,000,000,-	32,000,000,-
Maintenance:				
- per year	340,000,-	447,000,-	365,000	421,000,-
- capitalized	7,596,000,-	9,987,000,-	8,155,000,-	9,406,000,-
Operation:				
- per year	246,000,-	246,000,-	246,000,-	246,000,-
- capitalized	5,496,000,-	5,496,000,-	5,496,000,-	5,496,000,-
Totally (€)	49,092,000,-	52,483,000,-	47,651,000,-	46,902,000,-

I2 Doorvaarbaarheid

Als een stuwmiddel uit de doorstroomopening draait of schuift in tijden van grote afvoeren, ontstaat het grote voordeel dat in deze periode scheepvaart door de stuwopening mogelijk is. Hierdoor hoeven sluizen niet te schutten, wat wachttijd, en daarmee geld scheelt. Het scheelt dus veel tijd en daardoor geld als de stuw doorvaarbaar is. Deze paragraaf beschrijft en berekent de baten van het doorvaarbaar zijn van de stuw bij Grave.

De baten ten gevolge van de doorvaarbaarheid van de stuw zijn berekend door de kosten van de totale passeertijd van de schepen over de tijd dat de stuw doorvaarbaar is te berekenen. De volgende uitgangspunten vormen de basis van de berekening:

- Levensduur van 100 jaar voor de stuw.
- Beroepsvaart (binnenvaart) vormt de basis van de berekening. Baten voor recreatievaart worden niet berekend.
- De spreiding van het aantal schepen per maand over het gehele jaar is nagenoeg gelijk (Veenstra, 2003). Aangenomen wordt dat het gemiddelde aantal schepen per maand kan worden afgeleid door het totaal aantal schepen of tonnages te delen door het aantal maanden.
- De passeertijd voor de sluis bij Grave was ongeveer 45 minuten in 2003 (15 minuten nivelleertijd) (Veenstra, 2003).
- De wachttijd kan bij sluis Grave erg oplopen (tot 8 uur) doordat sluis Grave maar één sluiskolk gebruikt. Dit maakt sluis Grave de bottleneck in de Maas wat betreft de scheepvaart (Rook, Volker, & Volker, 2017). Verwacht kan worden dat de sluis ofwel opgewaardeerd gaat worden in de toekomst (groter), of dat een extra sluiskolk aangelegd gaat worden. Om deze reden is de gemiddelde passeertijd op 1 uur vastgesteld.
- 2,5% van de schepen vaart zonder vracht door de sluis (Rook, Volker, & Volker, 2017).
- Het aantal passages van beroepsvaartschepen in het jaar 2018 is 12.352 schepen met een totaal vervoerd tonnage van 9.687.734 ton (Binnenvaartcijfers, 2018). Voor de gehele levensduur is vastgesteld dat een gemiddelde van 12.000.000 ton per jaar de sluis zal passeren. Dit getal is een stuk groter dan het huidige getal maar zal naar verwachting groter worden door de opwaardering van de sluis bij Grave. De schepen zonder vracht zijn ingerekend in dit getal.
- Aangenomen wordt dat de sluis doorvaarbaar is vanaf een debiet van 1000 m³/s bij Grave. In de huidige omstandigheden zal dit betekenen dat de stuw acht dagen per jaar doorvaarbaar is (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2019). Voor de toekomst wordt een aantal van tien dagen vastgesteld met het oog op het veranderende klimaat.
- Gemiddelde wachtkosten zijn €0,09 per ton per uur voor bulk-, container-, en tankschepen. Voor de gehele levensduur wordt een prijs van € 0,10 aangehouden per ton per uur (TU Delft, 2010).

Tabel 59 geeft toelichting over de doorvaarbarkheidsbaten.

Tabel 59: Baten ten gevolge van de doorvaarbarkheid van een stuw bij Grave. Kosten zijn afgerond op duizenden en tienduizenden.

ID	Toelichting	Kwantiteit	SOM
A	Levensduur stuw	100 jaar	
B	Gemiddeld te vervoeren tonnen vracht per jaar	12 Megaton	-
C	Wachtkosten per ton	€ 0,10	-
D	Gemiddelde passeertijd	1 uur	-
E	Wachtkosten per jaar	€ 1,2 Miljoen	C x D
F	Totale wachtkosten voor gehele levensduur	€ 120 miljoen	A x B x C
G	Aantal dagen dat stuw doorvaarbark is per jaar	10 dagen	-
H	Aantal dagen per jaar	365,25 dagen	-
I	Baten doorvaarbarkheid per jaar	€ 33.000,-	(G / H) x E
J	Totale baten doorvaarbarkheid over gehele levensduur	€ 3.290.000,-	(G / H) x F

I3 Gebruikskosten

Deze paragraaf behandelt de gebruikskosten van de verschillende varianten. Naar aanleiding van het rapport: 'Multi-criteria selection of hydraulic gates' (Daniel, Rigo, & Dembicki, 2008) is een aanname gemaakt over de operatiekosten per jaar. Tabel 58 geeft een kostenraming voor de vervangingsopgave bij stuw Sambeek. In deze kostenraming is voor elke variant eenzelfde bedrag gereserveerd voor het opereren, namelijk €246.000,-. Aangezien de deuren zo gedimensioneerd worden dat ze optimaal gebruik maken van zwaartekracht en de opdrijvende kracht van water, kan van de varianten in de kostenraming van stuw Sambeek inderdaad gezegd worden dat de kosten voor opereren bij schatting gelijk moeten zijn. Voor de vier varianten uit dit onderzoek gelden echter uitzonderingen. De overstroombare segmentdeur zal naar schatting eenzelfde energieverbruik als de varianten uit het onderzoek naar stuw Sambeek hebben. De segmentdeur met klep zal een lager energieverbruik hebben. Het lagere energieverbruik is vooral te danken aan het feit dat vaak alleen de klep bewogen kan worden in plaats de hele deur. Voor de segmentdeur met klep wordt een prijs van €220.000,- per jaar aangenomen. De kniestuw en de klep-balgstuw zijn daarnaast ook uitzonderingen op het bedrag dat in Tabel 58 is vastgesteld. De kniestuw moet namelijk door verschillende aandrijvingen volledig omhoog geklapt worden en kan niet optimaal gebruik maken van opdrijving of zwaartekracht (contragewichten). De klep-balgstuw vult gedeeltelijk door middel van waterdruk uit het bovenstroomse stuwpan, hierdoor zijn zware aandrijvingen niet nodig. Resultierend is voor de overstroombare segmentdeur een bedrag vastgesteld van €246.000,- per jaar (Daniel, Rigo, & Dembicki, 2008), voor de segmentdeur met klep een bedrag van €220.000,- per jaar, voor de klep-balgstuw €150.000,- per jaar en voor de kniestuw €350.000,- per jaar. Bij deze kostenposten wordt een rentepercentage van 4,5% per jaar vastgesteld (Steunpunt Economische Expertise, 2016).

Vergelijking 1: De formule voor het bepalen van de te reserveren kosten voor een jaarlijks frequente vaste kostenpost. Hierin zijn C_c de totale te reserveren kosten, C_y de te investeren kosten per jaar, i het rentepercentage en n het aantal jaren.

$$C_c = C_y \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{1 - (1 + i)^{-1}}$$

Dit geeft de volgende operatiekosten over een levensduur van 100 jaar:

- segmentdeuren met klep: €220.000,- per jaar: €5.046.000,- voor 100 jaar.
- overstroombare segmentdeur: €246.000,- per jaar: €5.643.000,- voor 100 jaar.
- klep-balgstuw: €150.000,- per jaar: €3.441.000,- voor 100 jaar.
- kniestuw: €350.000,- per jaar: €8.028.000,- voor 100 jaar.

I4 Onderhoudskosten

De onderhoudskosten zijn vastgesteld op basis van aannames. De aannames zijn gebaseerd op de kostenraming uit 'Multi-criteria selection of hydraulic gates' (Daniel, Rigo, & Dembicki, 2008) (Tabel 58) en uit de informatie die staat samengevat in het overzicht van stuwmiddelen in Bijlage B. De kosten zijn naar aanleiding van het voorbeeld uit Tabel 58 als volgt opgebouwd: het startbedrag voor onderhoud is €300.000,- per jaar en voor een aantal aspecten is €50.000,- per jaar opgeteld. De aspecten die voor een verhoging van kosten zorgen zijn de volgende:

- stuwmiddel grotendeels onder water;
- draaipunten onder water;
- regelkleppen aanwezig;
- vervanging balg noodzakelijk;
- significant meer staalwerk;
- meerdere grote aandrijvingen benodigd;
- onderhoudsgevoelig volgens Bijlage F.

Tabel 60 geeft de waardes volgende uit deze aspecten. Als de bovenstaande aspecten worden toegepast op de totale onderhoudskosten per jaar met een rente van 4,5% (Steunpunt Economische Expertise, 2016), zijn de volgende kosten per variant maatgevend:

- segmentdeur met klep: €350.000,- per jaar, €8.028.000,- voor 100 jaar.
- overstroombare segmentdeur: €350.000,- per jaar, €8.028.000,- voor 100 jaar
- klep-balgstuw: €450.000,- per jaar, €10.320.000,- voor 100 jaar.
- kniestuw: €550.000,- per jaar, €12.620.000,- voor 100 jaar.

Tabel 60: Bepaling onderhoudskosten per variant.

Variant	Segmentdeur met klep	Overstroombare segmentdeur	Klep-balgstuw	Kniestuw
Stuwmiddel grotendeels onder water		X	X	X
Draaipunten onder water			X	X
Regelkleppen aanwezig	X			
Vervanging balg noodzakelijk			X	
Significant meer staalwerk				X
Meerdere grote aandrijvingen benodigd				X
Onderhoudsgevoelig				X
Eindbedrag	€350.000,- per jaar	€350.000,- per jaar	€450.000,- per jaar	€550.000,- per jaar

I5 Totale kosten

Paragraaf I1, I2, I3, en I4 beschrijven de constructiekosten, de baten ten gevolge van scheepvaart, de gebruikskosten en de onderhoudskosten. Deze paragraaf geeft de totale kosten per variant weer in Tabel 61. Hierbij worden de geschatte constructiekosten, de kosten voor gebruik en de kosten voor onderhoud bij elkaar opgeteld waarna de eventuele baten voor doorvaarbaarheid van het bedrag af gehaald worden.

Tabel 61: Totale kosten voor de vier varianten. Bedragen in miljoenen euro's en afgerond op honderdduizendtallen.

Kostenpost:	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	-
Totaal	46,8	47,9	41,1	67,7	=

BIJLAGE J. VALIDATIE VOORKEURSARIANT

In onderstaande tabellen (Tabel 62, Tabel 63 en Tabel 64) wordt de voorkeursvariant, de klep-balgstuw, gevalideerd. In de tabellen staat aangegeven of de klep-balgstuw voldoet aan de eisen en randvoorwaarden. Deze eisen en randvoorwaarden zijn beschreven in hoofdstuk 3 van het hoofdrapport.

Tabel 62: Validatie van de hydraulische randvoorwaarden. Bronnen: [1]: Figuur 35 (hoofdrapport), [2]: (Actueel hoogtebestand Nederland, 2020), [3]: Figuur 36 (hoofdrapport).

Nummer:		Validatie
HydrRand-1	Stuwen dienen streefpeilen plus een marge van 0,5 m te kunnen waarborgen.	Het stuwmiddel waarborgt het toekomstige streefpeil bij Grave (8,45 m +NAP) en Lith (4,9 m + NAP [1].
HydrRand-2	Minimale hoogte stuwmiddel: streefpijhoogte + windgolfhoogte + waakhoogte (0,3 m). Als de minimale hoogte van de uiterwaarden lager is dan deze waarde, dient deze hoogte toegepast te worden.	De minimale hoogte van het maaiveld bij Grave is 8,5 m + NAP [2]. Het stuwmiddel kan tot een hoogte van 8,5 m + NAP al het bovenstroomse water kan keren [1].
HydrRand-3	Het winterbed dient een afvoercapaciteit van 4760 m ³ /s te kunnen afvoeren.	Bijlage D berekent het doorstromend oppervlak van de stuw en geeft een winterbeddebet van 4760 m ³ /s. Bij dit debiet komt een stroomsnelheid van 2,0 m/s voor. Dit is een aanvaardbare stroomsnelheid.
HydrRand-3	Het lekdebet door de stuw dient afgerond 0 m ³ /s te zijn.	De verwachting is dat een lekdebet door dit stuwmiddel niet mogelijk is. Dit dient in een latere fase onderzocht te worden.
HydrRand-4	Het stuwmiddel dient een overstort met een hoogte van 0,5 m te kunnen waarborgen.	Het stuwmiddel is ontworpen op overstort. Bijlage D beschrijft de berekening van de waterdruk op het stuwmiddel en gaat uit van het toekomstige streefpeil (8,45 m +NAP) plus de significante golfhoogte (0,84 m). 0,5 m overstort is dus gewaarborgd.
HydrRand-5	Het maximale verval van een stuw staat gelijk aan de hoogte zoals gegeven in HydrRand-2.	Bijlage D gaat uit van een verval van 7,29 m. Hiermee is de waterhoogte van 6,5 m, volgend uit HydrRand-2, gewaarborgd.
HydrRand-6	Het maximaal door te voeren zomerbeddebet is gelijk aan het debiet wat voorkomt bij de waterstanden zo hoog als de minimale hoogte van de aangrenzende uiterwaarden.	De berekening van het zomerbeddebet (Bijlage D) gaat uit van een waterhoogte van 8,5 +NAP (minimale hoogte uiterwaarden). Het debiet bij deze waterstand is 1803 m ³ /s.
HydrRand-7	Nieuwe stuwen dienen een doorstromend oppervlak hebben wat minimaal 10% groter is dan het doorstromende oppervlak van de bestaande stuw.	Bijlage C2 geeft weer dat dit doorstromend oppervlak 704 m ² is. De breedte van één doorstroomopening is 42,7 m [3]. De drempelhoogte is 2,0 m + NAP en een maaiveldhoogte is 8,5 m + NAP. Het doorstromend oppervlak van de stuw is 832,0 m ² . Dit is groter dan de vereiste 704 m ² .
HydrRand-8	De netto breedte van de stuw dient gelijk of groter te zijn dan de breedte van de bestaande stuw.	Bijlage A geeft de netto breedte van de bestaande stuw: 110,44 m. De breedte van één doorstroomopening is 42,67 m [3]. Met drie stuwopeningen is dus de totale netto breedte 128,0 m.

Tabel 63: Validatie ontwerpeisen. Bronnen: [1]: Tabel 3 (hoofdrapport), [2]: Figuur 36 (hoofdrapport), [3]: Tabel 4 (hoofdrapport), [4]: Figuur 34 (hoofdrapport).

Eisnummer		Validatie
OntwEis-1	Het kunstwerk dient te zijn getoetst aan NEN-EN normen 1990 tot 1999.	De NEN-EN normen vormen deels de uitgangspunten van het ontwerp. Het toetsen van het kunstwerk aan de normen is onderdeel van een volgende fase van het ontwerp.
OntwEis-2	Betrouwbaarheidsklasse RC3, levensduur van 100 jaar.	De voorkeursvariant is ontworpen op een levensduur van 100 jaar en betrouwbaarheidsklasse RC3.
OntwEis-3	Het kunstwerk dient te zijn ontworpen op stootkrachten van schepen die het kunstwerk aanvaren.	De bestandheid tegen stootkrachten van het stuwmiddel dient in een later stadium bepaald te worden. Zoals bijlage F beschrijft is de verwachting dat het stuwmiddel aan deze eis zal voldoen, aangezien de klep de balg beschermt. Daarnaast ligt het stuwmiddel in tijden van hoge debieten volledig op de bodem.
OntwEis-4	Het kunstwerk dient te zijn ontworpen op buitengewone belastingen door scheepvaart, te weten vallende ankers, slepende ankers en gezonken schepen.	De bestandheid tegen buitengewone belastingen op het stuwmiddel dient in een later stadium bepaald te worden. Zoals bijlage F beschrijft is de verwachting dat het stuwmiddel aan deze eis zal voldoen, aangezien de klep de balg beschermt.
OntwEis-5	Bij een doorvaarbare stuw is de minimale breedte uit 'Richtlijnen Vaarwegen' maatgevend, een reductie tot 95% is mogelijk.	Bij de toepassing van een krap profiel, inclusief de reductie van 95%, dient de doorvaarbreedte minimaal 32,5 m te zijn [1]. De stuwopening van de klep-balgstuw is 41,7 m breed [2].
OntwEis-6	Stuwdiepte is minimaal 4,9 m als sprake is van doorvaarbaarheid.	De minimale diepgang voor scheepvaart door de stuw, inclusief kielspeling, is 3,90 m. De maatgevende hoogte van de klep in open stand is 2,71 m + NAP [4]. Uitgaande van het huidige streefpeil: 7,95 m + NAP, is de diepgang bij de stuw 5,24 m.
OntwEis-7	Bij een doorvaarbare stuw is de doorvaarhoogte voor vaste bruggen maatgevend	De stuw heeft geen maximale doorvaarhoogte [4].
OntwEis-8	Onderdelen van de stuw dienen goed bereikbaar te zijn.	Bijlage F geeft aan dat de stuw goed droog te zetten is, waarna de onderdelen van de stuw goed bereikbaar zijn.
OntwEis-9	Stuwmiddel dient onder alle hydraulische omstandigheden te gebruiken zijn.	Bijlage F geeft aan dat de stuw onder alle hydraulische omstandigheden te gebruiken is.
OntwEis-10	Stuw dient bestand te zijn tegen ijs(belastingen)	Bijlage F geeft aan dat de stuw ijsgang kan doorvoeren. Hierdoor is het kunstwerk bestand tegen de aanwezigheid van (drijf)ijs.
OntwEis-11	De bodembescherming dient te voldoen aan de eisen uit het handboek: Ontwerp van schutsluizen.	De bodembescherming dient in een later stadium van het ontwerp uitgewerkt te worden.

Tabel 64: Validatie eisen van de opdrachtgever. Bron: [1]: Figuur 25 (hoofdrapport).

Eisnummer	Eistekst	Validatie
OpdrEis-1	Stuwafmetingen dienen conform de huidige zomerbedafmetingen en het hele huidige dwarsprofiel (met uiterwaarden) van de rivier gedimensioneerd te worden.	De stuw bevindt zich binnen de breedte van het zomerbed (144 m breed). De uiterwaarden blijven onveranderd. [1]
OpdrEis-2	De inrichting van de Maas met de zeven stuwen blijft onveranderd.	De nieuwe stuw is een 1-op-1 vervanging van de huidige stuw en neemt de functies van de huidige stuw volledig over.
OpdrEis-3	Stuw Grave blijft op het huidige stuwcomplex. De nieuwe stuw dient los van de brug te worden beschouwd.	Bijlage E beschrijft de locatie van de nieuwe stuw. De stuw bevindt zich 200 meter bovenstrooms van de huidige stuw en staat daarmee los van de brug maar bevindt zich wel binnen het huidige stuwcomplex.
OpdrEis-4	Er dienen minimaal drie stuwopeningen te zijn in de nieuwe stuw bij Grave.	De stuw bevat drie stuwopeningen [1].
OpdrEis-5	De stuw dient de waterstanden nauwkeurig te reguleren.	Bijlage F beschrijft dat de nieuwe stuw de waterstanden nauwkeurig kan reguleren.
OpdrEis-6	Maatgevende schepen zijn de schepen van de CEMT-klasse Vb.	De CEMT-Klasse heeft alleen invloed op de diepgang en stuwbreedte. Wat betreft de diepgang is het sluiscomplex maatgevend en is de diepgang volgens de CEMT-klasse niet van belang. Het ontwerp is gedimensioneerd op een CEMT-klasse Vb.