

Universiteit Twente & Provincie Gelderland

Onderzoek naar het meestromen van het Zwarte Schaar met de IJssel

Bachelor eindopdracht



Begeleider Universiteit Twente:

Denie Augustijn

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

Begeleider Provincie Gelderland:

Gert-Jan Gieslink

 provincie
Gelderland

Auteur:

Sander Steenblik (s1581414)

SAMENVATTING

Op dit moment bevindt het project Logistiek Ecopark IJsselvallei Doesburg zich in de planfase. In dit project wordt het bedrijventerrein van de bedrijven Koninklijke Rotra en Ubbink uitgebreid. Binnen het projectgebied valt een oude arm van de IJssel genaamd het Zwarte Schaar. In het kader van de Kaderrichtlijn Water Programma wordt er aan gedacht om deze oude arm weer mee te laten stromen met de IJssel. Hierdoor is de volgende probleemstelling ontstaan:

De Provincie Gelderland wil het Zwarte Schaar weer doorstroombaar maken. De Provincie Gelderland weet echter niet welke mogelijkheden hiervoor zijn en wat de effecten hier van zijn.

Om deze reden is er onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om de dam in het Zwarte Schaar open te maken. Er zijn hiervoor verschillende varianten opgesteld en deze zijn getoetst op de richtlijnen van de KRW en op de effecten van sedimentatie en erosie.

Vanuit de KRW zijn er verschillende richtlijnen die gesteld worden om een meerwaarde te creëren voor de nevengeul. Zo moet er ingezet worden op drie verschillende ecologische doelen: vis, macrofauna en waterplanten. Om dit te doen zijn er enkele vuistregels opgesteld om te toetsen of er wel degelijk een meerwaarde gecreëerd wordt. Zo moet de nevengeul minimaal 300 dagen in het jaar meestromen met de hoofdgeul en moet er minimaal een stroomsnelheid behaald worden van 3 dm/s.

Om zo goed mogelijk aan deze eisen te voldoen zijn er verschillende alternatieven opgesteld om de dam weer doorstroombaar te maken. Binnen deze alternatieven is er nog gevarieerd met de hoeveelheid water dat wordt onttrokken uit de hoofdgeul. Dit heeft geleid tot de volgende alternatieven en varianten:

- Overlaat (1m, 2m en 3m breed)
- Klepstuw (1%, 2%, 3% en combi 1,2,3% onttrekking)
- Duiker (1%, 2%, 3% en combi 1,2,3% onttrekking)
- Brug

De onttrekkingen die hierboven vermeld staan in procenten gaan over de hoeveelheid debiet dat uit de IJssel afvoer wordt onttrokken. Deze varianten zijn vervolgens getoetst aan de eisen vanuit de KRW en de effecten op sedimentatie en erosie in de hoofdgeul en in het Zwarte Schaar. Voor ingrepen in een rivier is er vanuit Rijkswaterstaat een beoordelingskader opgesteld waaraan deze ingreep getoetst kan worden. Het gaat hierbij om de grootte van de dwarsstroming die ontstaat, de hoeveelheid sedimentatie en erosie en de waterstandverhoging/verlaging die zal ontstaan. Vervolgens moeten de alternatieven beoordeeld worden. Dit is gedaan aan de hand van de criteria en wegingsfactoren uit tabel 1.

TABEL 1 CRITERIA EN WEGING

Criteria	Weging	Criteria	Weging
Ecologie	0,6	Sedimentatie/erosie	0,4
Sub-criteria	Weging	Sub-criteria	Weging
Stroomsnelheid	0,35	Waterstandverlaging	0,3
Vis	0,1625	Hoeveelheid sedimentatie	0,7
Macrofauna	0,1625		
Waterplanten	0,1625		
Natura-2000	0,1625		

Deze criteria zijn gebruikt om een Multi-Criteria analyse op te stellen met behulp van een AHP (Analytisch Hiërarchisch Proces) op te stellen. Vanuit de AHP is de conclusie getrokken dat de variant van de duiker met een onttrekking van 2% van de IJsselafvoer het beste is. Deze variant is vervolgens uitgewerkt en verder gespecificeerd. Om er voor te zorgen dat er altijd bijna 2% wordt onttrokken zijn er 7 verschillende duikers nodig met een doorstroom oppervlakte van 2,5 m² per duiker. Deze duikers worden op verschillende hoogtes in de dam geplaatst zodat deze allemaal bij een andere waterhoogte zullen meestromen. Dit zorgt voor de uitkomsten in tabel 2.

TABEL 2 UITKOMSTEN VOORKEURSLATERNATIEF

Aantal dagen meestromen	Stroomsnelheid Zwarte Schaar per minimaal aantal dagen per jaar dat deze behaald wordt	Gemiddelde jaarlijkse sedimentatie aan de bovenzijde van de ingreep in de hoofdgeul	Waterstandverlaging per minimaal aantal dagen per jaar dat deze behaald wordt
302	249: 0,229 dm/s 209: 0,241 dm/s 107: 0,298 dm/s 55: 0,306 dm/s	0,082 m	249: -3,96 mm 209: -4,56 mm 107: -4,59 mm 55: -4,84 mm

De uitkomsten van de Multi-Criteria zijn nog een keer getoetst aan de hand van een gevoeligheidsanalyse. Hieruit is de conclusie getrokken dat de gewichten van de criteria in een vervolgonderzoek objectiever bepaald moeten worden. Vanuit de gevoeligheidsanalyse is de conclusie getrokken dat er meerdere voorkeursalternatieven naar voren kwamen wanneer de gewichten werden gevarieerd.

VOORWOORD

Voor u ligt het onderzoeksverslag dat tot stand is gekomen na aanleiding van mijn onderzoek dat ik heb gedaan als student civiele techniek van de Universiteit Twente. Dit onderzoek is in samenwerking gedaan met de Provincie Gelderland. Voor de provincie heb ik onderzocht wat de verschillende varianten zijn om het Zwarte Schaar weer mee te laten stromen met de IJssel. Voor deze varianten heb ik onderzocht in hoeverre ze voldoen aan de eisen vanuit de Kaderrichtlijn Water en wat de effecten van sedimentatie en erosie zijn. Met mijn bevindingen is het aan de Provincie Gelderland of ze de dam open breken om het Zwarte Schaar weer doorstroombaar te maken. Dit onderzoek is mijn bachelor eindopdracht en is hiermee de afsluiting van mijn bachelor opleiding. .

Met veel plezier heb ik 10 weken lang bij de Provincie Gelderland aan mijn verslag mogen werken. Hierbij heb ik gebruik mogen maken van de faciliteiten in Arnhem en Doesburg en heb ik ook de expertise van verschillende mensen mogen gebruiken. Mijn dank gaat hierbij ook uit naar Rijkswaterstaat die mij voorzien heeft van de nodige informatie en kennis. Bij deze wil ik de volgende personen bedanken voor hun bijdrage aan mijn onderzoek:

Andries Paarlberg: adviseur rivieren en rivierbeheer bij HKV Lijn in Water en Rijkswaterstaat

Susanne Quartel: senior adviseur rivierkunde bij Rijkswaterstaat

Daniel van Putten: rivierkundig specialist bij Rijkswaterstaat

Luc Jans: adviseur waterbeheer bij Rijkswaterstaat

Pepijn Van Denderen: PhD student aan de Universiteit Twente. Doet onderzoek naar de dynamische ontwikkeling van nevengeulen

Jan Bruyn: landschapsarchitect binnen het project Logistiek Ecopark IJsselvallei Doesburg

Ook wil ik graag de personen bedanken die mij de kans hebben gegeven om dit onderzoek te doen en voor de feedback en nuttige tips die mij gegeven zijn gedurende mijn onderzoek:

Denie Augustijn

Gert-Jan Gieslink

Tot slot wens ik u veel plezier bij het lezen van mijn onderzoeksverslag.

Arnhem, 26 juni 2017

Sander Steenblik

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Onderzoeksdoel en vragen.....	3
1.5 Leeswijzer	3
2. Projectkader	4
2. 1 Huidig ontwerp haven	4
2.2 Oude situatie het Zwarte Schaar	4
2.3 Theoretisch kader	5
3. Resultaten.....	8
3.1 Deelvraag 1-1) Welke eisen stelt de Kaderrichtlijn Water aan het Zwarte Schaar?	8
3.2 Deelvraag 1-2) Welke alternatieven zijn er om de dam weer doorstroombaar te maken? ...	12
3.3 Hoofdvraag 1) Welke alternatieven zijn er om het Zwarte Schaar te laten doorstromen in het kader van de Kaderrichtlijn Water?	13
3.4 Deelvraag 2-1) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie in de IJssel?	18
3.5 Deelvraag 2-2) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie in het Zwarte Schaar?	19
3.6 Deelvraag 2-3) Wat zijn eventuele maatregelen tegen sedimentatie en erosie?.....	20
3.7 Hoofdvraag 2) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie?.....	20
3.8 Deelvraag 3-1) Op welke criteria kunnen de alternatieven beoordeeld worden?	22
3.9 Deelvraag 3-2) Hoe worden de alternatieven beoordeeld op de criteria?	22
3.10 Hoofdvraag 3) Wat is het beste alternatief uit hoofdvraag 1?.....	24
4. Discussie	29
5. Conclusie en aanbevelingen	30
Bibliografie	32
Bijlagen	36
Bijlage A.....	37
Bijlage B	39
Bijlage C	40
Bijlage D.....	50
Bijlage E	61
Bijlage F	63

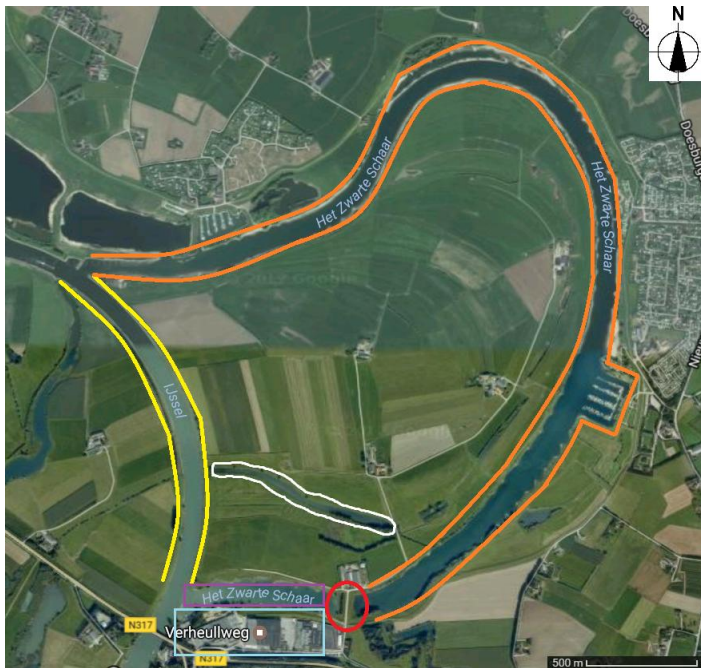
1. INLEIDING

Dit hoofdstuk zal ingaan op de aanleiding van het onderzoek. De probleemstelling wordt hier geïntroduceerd en het doel van het onderzoek wordt toegelicht. Daarna wordt het onderzoek omgezet in hoofd- en deelvragen die beantwoord moeten worden. Aan het einde is er een leeswijzer.

1.1 AANLEIDING

Er is een steeds grotere interesse voor het verbeteren van de waterkwaliteit. Met het verbeteren van de waterkwaliteit is het de bedoeling dat er schoner, voldoende en veiliger water beschikbaar is. De Europese Unie heeft deze doelstellingen vastgelegd en in de Kaderrichtlijn Water programma (KRW). Hierin wordt beschreven dat schoon water een eerste levensvoorwaarde is voor mensen, dieren en planten. Hierdoor is het dus ook van groot belang dat er voldoende schoon water beschikbaar is. Schoon water alleen maakt de leefomgeving van een waterlichaam niet meteen gezond. Het is de bedoeling dat het waterlichaam ook zo natuurlijk mogelijk is ingericht. De aankomende jaren probeert Rijkswaterstaat winst te behalen in het opnieuw inrichten van waterlichamen om het leefgebied van planten en dieren te herstellen (Rijkswaterstaat, 2017).

De Provincie Gelderland is op dit moment bezig met de planfase van het project Logistiek Ecopark IJsselvallei Doesburg. Dit project gaat over de uitbreiding van het bedrijventerrein Verhuellweg in Doesburg. Dit bedrijventerrein is gevestigd aan de IJssel en twee bedrijven zijn hier gevestigd. Dit is de Koninklijke Rotra, dit bedrijf houdt zich bezig met transport en logistiek. Het tweede bedrijf is Ubbink, dit bedrijf is producent van rookgasafvoersystemen, ventilatiesystemen en producten voor lucht- en waterdicht bouwen. Het huidige bedrijventerrein is te klein door de groei van beide bedrijven. Hierdoor is de wens ontstaan om het bedrijventerrein uit te breiden dat afhankelijk is van de aan- en afvoer via water. Het is de bedoeling dat er met de uitbreiding rekening wordt gehouden met natuur, waterhuishouding, waterveiligheid en duurzame ontwikkeling. Hierbij komt dus ook de Kaderrichtlijn Water programma aan bod. De eerste tranche van dit programma wordt nu gerealiseerd en voor het tweede tranche worden nu de plannen uitgewerkt. Bij het bedrijventerrein hier in Doesburg wordt voor de derde tranche gedacht aan een strang of nevengeul door het weer doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar. De eerste tranche behoort tot het stroomgebiedbeheersplan van 2009, de tweede tranche bij het stroomgebiedbeheersplan van 2015 en de derde tranche hoort bij het stroomgebiedbeheersplan van 2021. In een stroomgebiedbeheersplan staan de watersystemen beschreven van een bepaald gebied. Deze watersystemen bestaan uit een oppervlaktewaterlichaam of een grondwaterlichaam. Aan deze watersystemen worden doelen gekoppeld om aan de KRW te kunnen voldoen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015). Elk tranche zorgt er dus voor dat de KRW doelen behaald worden in een stroomgebiedbeheersplan doormiddel van maatregelen (Koninklijke Rotra en Ubbink, 2017).



FIGUUR 1 PLANGEBIED DOESBURG (ORANJE = HET ZWARTE SCHAAR, GEEL = HOOFDGEUL IJSSEL, ROOD = DAM, PAARS = HUIDIGE HAVEN EN BLAUW = BEDRIJVENTERREIN, WIT = GEUL IN DE FRATERWAARD) (GOOGLE EARTH, 2017)

In figuur 1 is een luchtfoto van het plangebied te zien. Het blauwe vierkant is het huidige bedrijventerrein van Koninklijke Rotra en Ubbink. Het is de bedoeling dat dit bedrijventerrein richting het noorden wordt uitgebreid. Het Zwarte Schaar is aan de rechterkant van de haven te zien. De haven en het Zwarte Schaar worden nu gescheiden door een dam met een weg erover zoals te zien is in de afbeelding.

1.2 PROBLEEMSTELLING

Doordat het bedrijventerrein wordt uitgebreid wil de Provincie Gelderland tijdens dit project meteen kijken naar de mogelijkheden om het Zwarte Schaar te laten voldoen aan de eisen gesteld in de Kaderrichtlijn Water programma. De belangrijkste eis die hierin wordt gesteld is dat het Zwarte Schaar weer doorstroombaar wordt gemaakt om hiermee de ecologische kwaliteit te verbeteren. Er zijn verschillende mogelijkheden om er voor te zorgen dat er weer water stroomt door het Zwarte Schaar.

Als het Zwarte Schaar weer gaat stromen betekent dit dat er ook verschillende effecten zullen optreden. Het is belangrijk om deze effecten in kaart te krijgen omdat er verschillende stakeholders zijn die hier belangen bij hebben.

Dit leidt tot de volgende probleemstelling: *De Provincie Gelderland wil het Zwarte Schaar weer doorstroombaar maken. De Provincie Gelderland weet echter niet welke mogelijkheden hiervoor zijn en wat de effecten hier van zijn.*

Voor de mogelijkheden voor verschillende alternatieven zal er gekeken worden naar de dam die er nu ligt. Het is de bedoeling om deze dam weer doorstroombaar te maken. Voor de effecten zal er gefocust worden op de sedimentatie en erosie. Er zijn meer effecten die zullen optreden maar sedimentatie en erosie vormen de grootste bedreiging voor de scheepvaart en hebben hierdoor een

hogere prioriteit. Ook zullen de effecten op waterstandverandering en de ecologie meegenomen worden.

1.3 ONDERZOEKSDOEL EN VRAGEN

Het doel van dit onderzoek is om de mogelijkheden in kaart te brengen om het Zwarte Schaar weer doorstroombaar te maken. Het is de bedoeling om te gaan kijken naar de verschillende effecten die het alternatief teweeg gaat brengen. Dit leidt tot het volgende onderzoeksdoel:

Het vinden van het beste alternatief om de dam weer doorstroombaar te maken. Hierin moeten de richtlijnen van de KRW worden meegenomen en de effecten op sedimentatie en erosie in kaart gebracht worden.

Om de doelstelling van dit onderzoek te behalen is het van belang de volgende hoofdvragen en deelvragen te beantwoorden:

- 1) Welke alternatieven zijn er om het Zwarte Schaar te laten doorstromen ten behoeve van de KRW?
 - 1-1) Welke eisen stelt de KRW aan het Zwarte Schaar?
 - 1-2) Welke alternatieven zijn er om de dam weer doorstroombaar te maken?
- 2) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie?
 - 2-1) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie in de IJssel?
 - 2-2) Wat zijn de effecten van sedimentatie en erosie in het Zwarte Schaar?
 - 2-3) Wat zijn eventuele maatregelen tegen sedimentatie en erosie?
- 3) Wat is het beste alternatief uit hoofdvraag 1?
 - 3-1) Op welke criteria kunnen de alternatieven beoordeeld worden?
 - 3-2) Hoe worden de alternatieven beoordeeld op de criteria?

Om deze vragen te beantwoorden zal de expertise gebruikt worden van verschillende personen binnen Rijkswaterstaat en de projectgroep. Tevens wordt er gebruik gemaakt van de kennis die binnen de Universiteit Twente al beschikbaar is. Daarnaast zal er ook gebruik gemaakt worden van literatuur. Deze literatuur komt aan bod in §2.3 dat over het theoretisch kader gaat.

1.5 LEESWIJZER

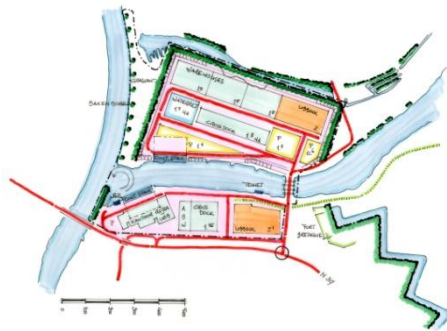
In hoofdstuk 2 wordt het projectkader beschreven. Hierin zal in worden gegaan op de ontwerpen van de haven die er nu al zijn. Tevens wordt er een historisch onderzoek gedaan en ook wordt het theoretisch kader toegelicht. In hoofdstuk 3 wordt antwoord op de onderzoeksvragen gegeven. Het daaropvolgende hoofdstuk 4 vormt de discussie over het onderzoek. Hier worden uitspraken gedaan over de inschattingen en aannames die zijn gedaan binnen het onderzoek. In hoofdstuk 5 wordt het beste alternatief nog een keer toegelicht in de conclusie. Ook worden hier aanbevelingen gedaan over vervolgonderzoeken die nog gedaan kunnen worden.

2. PROJECTKADER

In dit hoofdstuk zal de relevante informatie die nu al bekend is beschreven worden. Deze gegevens helpen bij het zoeken naar een oplossing voor het probleem dat er ligt zoals beschreven in §1.2. Daarnaast is er ook een theoretisch kader opgesteld.

2.1 HUIDIG ONTWERP HAVEN

Op dit moment zijn er vier verschillende varianten bedacht voor een nieuw ontwerp van de haven. Elke van deze varianten heeft een ander soort thema. De vier thema's die zijn bedacht zijn de volgende: rivier, natuur, cultuur en stadsfront. De variant met het thema cultuur is het meest interessant voor dit onderzoek. In deze variant wordt er namelijk gedacht om het Zwarte Schaar mee te laten stromen. Dit wordt gezien als een positieve impuls voor de ecologie van het Zwarte Schaar en tevens zorgt het voor een betere afvoerdeling tijdens hoge pieken. De variant cultuur is weergegeven in figuur 2.



FIGUUR 2 VARIANT CULTUUR (BRUYN, 2016)

Er is in een eerder stadium van de ontwerpfase van de varianten ook nagedacht over het mee laten stromen van de geul in het Fraterwaard. Deze geul is met wit omcirkeld in figuur 1. Dit ontwerp hebben ze echter niet meegenomen aangezien hier niet de focus op ligt van het project. In een later stadium kan hier echter wel over nagedacht worden om eventuele effecten te mitigeren en compenseren.

2.2 OUDE SITUATIE HET ZWARTE SCHAAR

Voor 1954 behoorde het Zwarte Schaar tot de hoofdstroom van de IJssel. In de jaren vijftig zijn veel rivieren in Nederland gekanaliseerd wat er voor zorgde dat veel rivieren recht getrokken werden. Dit is ook bij de IJssel gebeurd. Hierdoor is in 1954 het Zwarte Schaar afgesloten door hier een dam in te leggen en is de hoofdstroom van de IJssel op de huidige locatie gerealiseerd. De oude situatie is weergegeven in figuur 3.



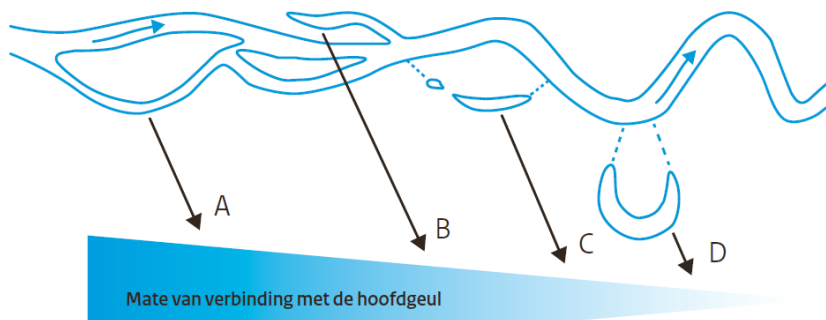
FIGUUR 3 FRATERWAARD IN 1723 (HEUVEL, 1723)

2.3 THEORETISCH KADER

In het theoretisch kader wordt beschreven wat er reeds bekend is over het onderwerp in de literatuur. Hierbij is het eerst van belang om een goede definitie te hebben van een nevengeul zoals het Zwarte Schaar en wat de functie hiervan is.

WAT IS EEN NEVENGEUL?

Zoals beschreven in §2.2 is het Zwarte Schaar de oude loop van de IJssel. Doordat veel rivieren zijn gekanaliseerd is de ecologische kwaliteit omlaag gegaan. De afgelopen jaren zijn de eerste nevengeulen in Nederland aangelegd. Deze aanleg wordt erg gestimuleerd door de Europese Kaderrichtlijn Water, Natura 2000 en het programma Ruimte voor de Rivier. Er bestaan echter veel verschillende type geulen. Daarvoor is het van belang om eerst te gaan kijken wat een nevengeul eigenlijk precies is. Een nevengeul is een geul die beneden- en bovenstrooms is verbonden met de hoofdgeul. Dit is geschematiseerd in figuur 4.



FIGUUR 4 MATE VAN MEE STROMING MET DE HOOFDGEUL, A = MEESTROMENDE GEUL, B = AANGETAKTE STRANG, C = AFGESLOTEN STRANG EN D = GEÏSOLEERDE VERLANDENDE STRANG OF PLAS (PETTS & AMOROS, 1996).

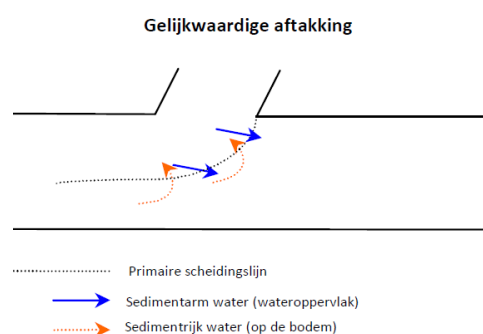
Volgens de schematisatie is het Zwarte Schaar op dit moment van type B qua meestroming met de IJssel. Dit betekent dus dat het Zwarte Schaar op dit moment als een benedenstrooms aangetakte strang gezien kan worden. Het is de bedoeling dat het Zwarte Schaar straks van type A zal zijn, dit houdt in dat het een meestromende geul wordt. Dit wordt dus ook wel een nevengeul genoemd.

KADERRICHTLIJN WATER PROGRAMMA

De KRW heeft als een belangrijk uitgangspunt dat wateren vanaf hun bron tot aan de zee in verbinding staan met andere wateren. Dit moet ervoor zorgen dat de wateren één ondeelbaar systeem vormen. Hierbij heeft de KRW twee hoofddoelen opgesteld. Ten eerste is het de bedoeling dat het water in rivieren, meren, sloten en kanalen een gezonde chemische kwaliteit hebben. Dit betekent dat de wateren aan de normen moeten voldoen die worden gesteld aan de hoeveelheid chemicaliën in de wateren. Ten tweede moeten de wateren van een goede ecologische kwaliteit zijn. Deze goede ecologische kwaliteit houdt in dat de wateren een goede leefomgeving vormen voor planten en dieren. De uitvoering van de KRW wordt door Rijkswaterstaat ingedeeld in drie verschillende thema's. Het eerste thema houdt zich bezig met ruimte creëren voor vissen, het tweede met het zorgen voor schoon water en het derde met het herstel van het leefgebied (Schoor et al. 2011)

EROSIE EN SEDIMENTATIE

Voor erosie en sedimentatie zijn veel modellen beschikbaar. Het nadeel van deze modellen is dat deze zeer complex zijn en erg veel tijd vergen om deze te beheersen. Daarom is er in de literatuur gezocht naar een meer kwalitatieve beschrijving van sedimentatie en erosie. In het verslag van Klop (2009) staan belangrijke parameters beschreven die van invloed zijn op sedimentatie in de nevengeul. De bifurcatiehoek wordt beschreven als de hoek die de nevengeul maakt met de hoofdgeul bij de instroomopening. De invloed van deze hoek kan beschreven worden aan de hand van primaire waterstroming en het Bulle-effect. Om het effect hiervan te beschrijven wordt het watersysteem in drie verschillende delen verdeeld. Deze verdeling bestaat uit moedergeul, hoofdgeul en een aftakking. Het punt waar de moedergeul zich verdeelt in hoofdgeul en de aftakking wordt het splitsingspunt genoemd. De aftakking onttrekt een hoeveelheid water en hierdoor ontstaat een denkbeeldige scheidingslijn wat de primaire stroming wordt genoemd. Door de krachten die er optreden in het water kan er een secundaire stroming ontstaan. Door deze extra stroming ontstaat er een spiraalvormige stroming. Deze spiraalvorming zorgt ervoor dat er een uitwisseling ontstaat tussen de primaire stroming en de stroming naar de hoofdgeul. Deze uitwisseling zorgt ervoor dat er relatief sedimentrijk water richting de aftakking wordt vervoerd en relatief sedimentarm water naar de hoofdgeul stroomt. Een schematisatie van dit proces is te zien in figuur 5.



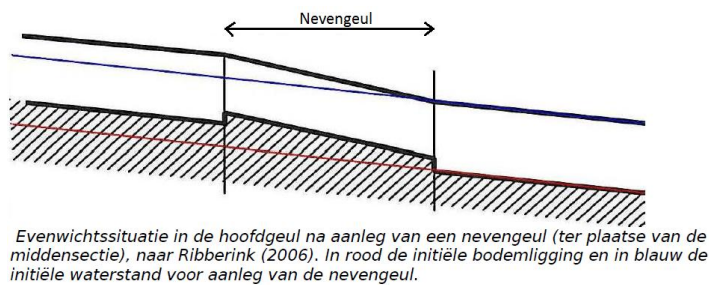
FIGUUR 5 BULLE-EFFECT (KLOP, 2009)

In het rapport van Klop (2009) zijn ook verschillende ontwerpparameters beschreven die effect hebben op het sedimentatieproces. Ten eerste wordt de locatie van de instroomopening van de nevengeul beschreven. In een bocht van een rivier zal sedimenttransport plaatsvinden van de

buitenbocht naar de binnenbocht toe. Dit betekent dus dat als de opening aan het begin van de buitenbocht of in de binnenbocht is gevestigd relatief sedimentrijk water naar de nevengeul zal stromen. Het verhang van een nevengeul is tevens van invloed op de transportcapaciteit van sediment. Het verhang wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de lengte van de nevengeul en de afstand tussen de in- en uitstroom van de nevengeul in de moedergeul. Een groter verhang zorgt ervoor dat de nevengeul een groter debiet zal onttrekken van de moedergeul. Dit leidt er toe dat er dus ook meer sediment getransporteerd zal worden.

In het rapport van Klop (2009) zijn verschillende bestaande nevengeulen gemonitord die in de Waal liggen. Er is in deze nevengeulen gekeken naar de processen die optreden en deze te vergelijken met het verhang, bifurcatiehoek en de ligging. Zo blijkt dat in de nevengeul bij Beneden Leeuwen, die een duiker heeft, vrijwel geen sedimentatie heeft plaatsgevonden. De nevengeul bij Opijnen heeft ook geen last van sedimentatie doordat deze een gunstige bifurcatiehoek heeft van negentig graden. Tevens onttrekt deze nevengeul minder dan 1% van de totale afvoer wat er voor zorgt dat er relatief sedimentarm water naar de nevengeul wordt getransporteerd. Dit komt ook door de drempelconstructie die is geplaatst bij de in- en uitstroom van de nevengeul.

Sedimentatie die zal plaatsvinden in de hoofdgeul wordt beschreven in het rapport van Van Putten (2011). Aanbevolen wordt om niet meer dan 3% van het debiet uit de hoofdgeul naar de nevengeul te onttrekken. Bij het aanleggen van een nevengeul kan de hoofdgeul in 3 verschillende trajecten verdeeld worden. Dit is geschematiseerd in figuur 6.



FIGUUR 6 EVENWICHTSSITUATIE (RIBBERINK, 2006)

De drie trajecten worden onderverdeeld in een benedenstrooms gedeelte, een middengedeelte, het gedeelte waar de nevengeul is aangelegd en een bovenstrooms gedeelte. Normaal gesproken verandert er benedenstrooms vrijwel niets wat ook te zien is in figuur 6. Bovenstrooms is door de sedimentatie de initiële bodemligging en de initiële waterstand omhoog gegaan. In het middengedeelte is door de debietonttrekking een lagere evenwichtsdiepte ontstaan en een groter verhang.

3. RESULTATEN

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de deel- en hoofdvragen van het onderzoek uitgewerkt.

3.1 DEELVRAAG 1-1) WELKE EISEN STELT DE KADERRICHTLIJN WATER AAN HET ZWARTE SCHAAR?

Al vrij snel bleek dat er meer speelt dan alleen de richtlijnen uit de KRW. Ook dient er rekening gehouden te worden met de Natura 2000 en zo bleken er ook al plannen te zijn vanuit Rijkswaterstaat. Vanuit de KRW zijn aandachtspunten opgesteld waar rekening mee moet worden gehouden bij het inrichten van een nevengeul. Dat zijn de volgende aandachtspunten (Schoor et al. 2011):

- Kies ecologische doelen die passen bij de kenmerken van de rivier.
- Laat een nevengeul tenminste 300 dagen per jaar meestromen met de hoofdgeul.
- Zet in gestuwde trajecten niet in op stroomminnende vis en macrofauna, maar op een rijke waterplantenbegroeiing.
- Vermijd grote variaties in waterstanden en stroomsnelheden gedurende het jaar.
- Zorg voor een gevarieerd habitat binnen de geul, door variatie in stroomsnelheid, substraat en oevers.
- Bied ruimte voor natuurlijke sedimentatie- en erosieprocessen.
- Geef de nevengeul de kans om zelf een natuurlijke oever te ontwikkelen.

Wat blijkt is dat het type ecologie waarop gefocust moet worden sterk afhangt van het type alternatief. Dit is te zien in de eerder genoemde aandachtspunten. Zo wordt er bij één aandachtspunt ingezet op variabele stroomsnelheden en sedimentatie en bij een ander juist op constante stroomsnelheden en weinig waterstandfluctuaties. Bij een overlaat en stuw is het bijvoorbeeld slim om in te zetten op een rijke waterplanten begroeiing en niet op stroomminnende vis en macrofauna.

ECOLOGISCHE DOELEN

De ecologische doelen voor een nevengeul kunnen grofweg gezegd in drie verschillende categorieën worden ingedeeld. Dit zijn vis, kleine ongewervelde waterdieren en waterplanten. Er moet dus per alternatief bekeken gaan worden op welke categorie ingezet moet worden en hoe dit gedaan kan worden.

BESTAANDE NEVENGEULEN

Langs de Rijntakken zijn er de afgelopen jaren al verschillende nevengeulen gerealiseerd in het kader van de KRW en Ruimte voor de Rivier. Elk van deze geulen heeft zijn eigen morfologie, hydrologie en opbouw. Dit komt doordat iedere nevengeul een andere mate van verbinding heeft, stroomsnelheid, waterdiepte en het soort regelwerk. Dit zijn de eigenschappen die te zien zijn in tabel 3.

TABEL 3 KENMERKEN BESTAANDE NEVENGEULEN RIJNTAKKEN (SCHOOR ET AL., 2011)

	Gameren Oostgeul	Gameren Grote geul	Gameren Westgeul	Klompewaard	Bakenhof	Vreugderijker waard
Kritieke afvoer bij Lobith voor meestromen (m³/s)	2700	1000	1100	3000	1150	Altijd
Gemiddeld aantal dagen meestromen/jaar	85	352	347	55	308	364
Gemiddelde stroomsnelheid (cm/s, standaarddeviatie tussen haakjes)						
voorjaar (2650 m ³ /s Lobith)	-	14 (16)	22 (12)	-	10 (20)	8 (7)
zomer (2000 m ³ /s Lobith)	-	15 (23)	20 (17)	-	3 (12)	6 (6)

In tabel 3 zijn de verschillende stroming eigenschappen te zien. Ook kunnen de geulen gekarakteriseerd worden door de manier waarop deze meestromen (Schoor et al., 2011) .

- Gameren (Waal)
 - Oost- en Westgeul hebben een drempelconstructie voor de instroom
 - Oostgeul gesedimenteerd door hoog water
 - Grote geul heeft in het midden een brug die het debiet reguleert door middel van een drempel
 - Achter de brug is een kolk uitgesleten
- Klompewaard (Waal, nabij splitsingspunt)
 - Instroomopening is een stortstenen drempel
 - Beperkte meestroming doordat de hoofdgeul gevoelig is voor sedimentatie
- Bakenhof (Neder-Rijn, nabij splitsingspunt)
 - Instroom is een drempel die ook als brug functioneert
 - Uitstroom is ook een brug met drempel
 - Achter de instroomopening is zand en klei geërodeerd wat zich waarschijnlijk verderop in de geul heeft afgezet
- Vreugderijkerwaard (IJssel)
 - Instroom is geregeld door duikers, hierdoor stroomt de geul het gehele jaar mee
 - Door de continue afvoer worden de morfologische effecten in de hoofdgeul beperkt.

Nu al deze verschillende karakteristieken van de nevengeulen bekend zijn is het ook van belang om te kijken wat nu de ecologische toegevoegde waarde is. Dit wordt gedaan door te kijken naar de drie ecologische doelen die hiervoor zijn beschreven: vis, macrofauna en waterplanten. Het eerste waarop de nevengeulen uit tabel 3 gecontroleerd worden is de categorie vis. Het blijkt dat in alle nevengeulen er een meerwaarde voor vis is gecreëerd. In elke nevengeul zijn er meer vissoorten

aanwezig dan in de kribvakken van de hoofdgeul. Er zijn wel een paar specifieke verschillen te zien tussen de nevengeulen:

- Vreugderijkerwaard: hoge dichtheid reofiele vis
- Klompenwaard en Bakenhof: hoge dichtheid eurytope vis

Reofiele vis heeft een voorkeur voor stromend water. De Vreugderijkerwaard stroomt het gehele jaar mee dus dit is een ideale plek voor stroomminnende vis. Eurytope vis is een vis die in een zeer brede range van omstandigheden kan voorkomen.

Wat er te zien is in de nevengeulen is dat deze een meerwaarde opleveren ten opzichte van de hoofdgeul voor de macrofauna. Er komen meer soorten voor en vooral positief kenmerkende taxa. Dit betekent dus dat het water van een goede kwaliteit is. Uit de uitkomsten blijkt dat in Gameren en de Vreugderijkerwaard de meeste positieve taxa aanwezig zijn. Negatieve taxa worden beschreven als soorten die duiden op een slechte waterkwaliteit zoals pissebedden en bloedzuigers, positieve taxa duiden op een goede waterkwaliteit en kunnen bijvoorbeeld driehoeksmosselen zijn (Schoor et al., 2011).

Voor de waterplanten blijkt de Vreugderijkerwaard het meest geschikt. Het water is hier helder en er zijn maar weinig waterstandfluctuaties. In de geulen van Bakenhof en Klompenwaard is er niet echt een ontwikkeling van waterplanten te ontdekken. Beide geulen zijn troebel wat duidt op een slechtere waterkwaliteit en hebben ook vrij veel waterstandfluctuaties. Dit is dus ook de reden dat er weinig ontwikkeling van waterplanten heeft plaatsgevonden. De troebele kleur van het water kan ook verklaard worden door de erosie die heeft plaatsgevonden en dat dit zich nog niet heeft afgezet.

PLANNEN RIJKSWATERSTAAT

Uit het gesprek dat gevoerd is met Luc Jans (adviseur waterbeheer bij Rijkswaterstaat) is gebleken dat er bij Rijkswaterstaat al ideeën zijn voor het Zwarte Schaar maar dat deze nog niet uitgewerkt zijn. Het idee vanuit Rijkswaterstaat is om de Fraterwaard weer doorstroombaar te maken. Aangezien deze geul die er al ligt smaller is dan het Zwarte Schaar, is het makkelijker om hier snellere stroomsnelheden te krijgen. Het Zwarte Schaar zal dus wel mee gaan stromen maar de geul in de Fraterwaard zal vooral gericht zijn op de doelen van de KRW. Hiervoor worden verschillende vuistregels toegepast door Rijkswaterstaat. Zo wordt voor de stroomsnelheid in de nevengeul 3 dm/s aangehouden. Om dit te behalen heeft de Fraterwaard dus de voorkeur vanuit Rijkswaterstaat. Normaal gesproken blijkt dat drie procent van de debietonttrekking naar de nevengeul te veel is. Vaak wordt vanuit nautische redenen de debietonttrekking naar beneden bijgesteld. Het blijkt vaak dat er niet genoeg ruimte is voor sedimentatie in de hoofdgeul wat ervoor zorgt dat er maar een beperkt debiet naar de nevengeul kan stromen.

NATURA 2000

Het is ook van belang om te kijken naar de Natura 2000 die geldt in het gebied van het Zwarte Schaar. De KRW en de Natura 2000 zijn twee projecten die nauw met elkaar samenwerken. Voor de Natura 2000 is er een speciaal gebied opgesteld genaamd de Rijntakken. Hiervan zijn de uiterwaarden van de IJssel een deelgebied. Tijdens hoge afvoeren van de Rijn neemt de IJssel 1/9 hiervan op zich (Ministerie van Economische Zaken, z.j.). Dit zorgt ervoor dat de uiterwaarden van de IJssel bij hoog water kunnen inunderen. Deze uiterwaarden hebben een hoge natuurlijke kwaliteit en

het is de bedoeling dat dit behouden blijft. Hierdoor zijn sommige delen hiervan als beschermd aangewezen. Wat er bij het Zwarte Schaar te zien is, is dat de gehele Fraterwaard bestempeld is als uiterwaarden van de IJssel en dus als Natura 2000 gebied.



FIGUUR 7 BESCHERMD NATURA 2000 GEBIED, GROEN = "GLANSHOVER- EN VOSSENSTAARTHOOILANDEN (GLANSHOVER)", BRUIN = VOCHTIGE ALLUVIALE BOSSEN (ZACHTHOUTOOIBOSSEN) (RIJKSWATERSTAAT, 2015)

In figuur 7 zijn er een aantal gebieden die beschermd worden door de Natura 2000. Het gaat hierbij om twee verschillende soorten gebieden. In deze gebieden zijn beschermde soorten aanwezig en hier dient rekening mee gehouden te worden. In dit gebied gaat het om glanshaver en zachthout hooibossen.

Bij glanshaver gaat het om type A in dit gebied. Dit type wordt beschreven als glanshaver hooiland dat aanwezig is in de hoge delen van de uiterwaarden, op dijken, op oeverwallen langs beken en op hellingen en droogdalen in het heuvelland (Ministerie van Economische Zaken, 2008). Voor dit type glanshaver zijn ook een aantal kwaliteitseisen opgesteld (zie figuur 8). Zo kan er gekeken worden of de omgeving van het glanshaver een positief of negatief effect heeft op het voortbestaan.

H6510_A Glanshaver- en vossenstaarthooilanden (glanshaver)										
Zuurgraad	basisch	neutraal-a	neutraal-b	zwak zuur-a	zwak zuur-b	matig zuur-a	matig zuur-b	zuur-a	zuur-b	
Vochttoestand	diep water	ondiep permanent water	ondiep droog-vallend water	's winters inunderend	zeer nat	nat	zeer vochtig	vochtig	matig droog	droog
Zoutgehalte	zeer zoet	(matig) zoet	zwak brak	licht brak	matig brak	sterk brak	zout			
Voedselrijkdom	zeer voedselarm	matig voedselarm	licht voedselrijk	matig voedselrijk-a	matig voedselrijk-b	zeer voedselrijk	uiterst voedselrijk			
Overstromings-tolerantie	dagelijks lang		dagelijks kort		regelmatig ²		incidenteel		niet	

FIGUUR 8 KWALITEITSEISEN GLANSHOVER (MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN, 2008)

De vochttoestand van het gebied waar het nu staat gaat hoogst waarschijnlijk veranderen gekeken naar het gebied waar het nu staat. Doordat de waterstand van het Zwarte Schaar zal gaan stijgen, zal ook de kweldruk omhoog gaan. Dit betekent dus dat het grondwater hoger zal komen te staan. Dit zorgt ervoor dat de grond waar het glanshaver nu op staat vochtiger zal worden. Dit zal leiden tot een minder gunstige situatie voor glanshaver. Dit effect is echter maar heel klein aangezien het debiet dat door het Zwarte Schaar zal gaan stromen (max. 3%) maar voor een beperkte verhoging van de waterstand zal zorgen.

Ook bij de vochtige alluviale bossen gaat het om type A. Dit type wordt beschreven als bossen die groeien op beek- of rivierafzettingen (Ministerie van Economische Zaken, 2008). Deze staan direct of indirect onder invloed van het water. In het Zwarte Schaar gaat het hierbij om alluviale bossen die worden gedomineerd door smalbladige wilgen en zich hebben genesteld in de natte en dynamische plekken van de arm. Voor de alluviale bossen is er net zoals voor het glanshaver een aantal kwaliteitseisen opgesteld (zie figuur 9).

H91E0 A Vochtige alluviale bossen (zachthoutoibossen)									
Zuurgraad	basisch	neutraal-a	neutraal-b	zwak zuur-a	zwak zuur-b	matig zuur-a	matig zuur-b	zuur-a	zuur-b
Vochttoestand	diep water	ondiep permanent water	ondiep droog-vallend water	's winters inunderend	zeer nat	nat	zeer vochtig	vochtig	matig droog
Zoutgehalte	zeer zoet	(matig) zoet	zwak brak	licht brak	matig brak	sterk brak	zout		
Voedselrijkdom	zeer voedselarm	matig voedselarm	licht voedselrijk	matig voedselrijk-a	matig voedselrijk-b	zeer voedselrijk		uiterst voedselrijk	
Overstromings-tolerantie	dagelijks lang		dagelijks kort		regelmatig	incidenteel		niet	

FIGUUR 9 KWALITEITSEISEN VOCHTIGE ALLUVIALE BOSSEN (MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN, 2008).

Voor deze situatie geldt eigenlijk hetzelfde als voor het glanshaver. Het water in het Zwarte Schaar zal gaan stijgen maar dit is minimaal. Dit zal er af en toe voor kunnen zorgen dat er ondiep, permanent water is maar op dit moment is dit ook al het geval. Hierdoor kan dus geconcludeerd worden dat het doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar waarschijnlijk niet veel effecten zal hebben op het Natura 2000 gebied. Het doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar kan ook voor positieve effecten zorgen. Zo kan het bijvoorbeeld ook zijn dat er hierdoor nieuwe beschermde soorten zich gaan nestelen in het Zwarte Schaar of de Fraterwaard.

3.2 DEELVRAAG 1-2) WELKE ALTERNATIEVEN ZIJN ER OM DE DAM WEER DOORSTROOMBAAR TE MAKEN?

Uit het projectoverleg zijn verschillende ideeën naar voren gekomen over hoe de dam doorgebroken kan worden. De volgende ideeën zijn besproken:

- Overlaat/drempelconstructie
- Verstelbare stuw/klepstuw
- Brug
- Duiker

Het is de bedoeling dat van deze varianten de voor- en nadelen in kaart worden gebracht. Zo kunnen deze in een later stadium vergeleken worden met de criteria die gesteld worden in de KRW en de scheepvaart met betrekking tot sedimentatie en erosie. Ook heeft er bezoek aan de locatie van de dam plaatsgevonden om een idee te krijgen van hoe de situatie er nu uitziet. Foto's van het bezoek aan de locatie zijn te vinden in bijlage A.

OVERLAAT

Een overlaat is een vaste constructie die bij hoogwater van nut is. Als er hoogwater is dan zorgt de overlaat ervoor dat er water over de constructie heen stroomt. Bij laagwater zal de overlaat juist niet meestromen. Deze constructies komen vaak voor in dammen en kanalen. Deze constructie kan dus

van nut zijn in de dam bij het Zwarte Schaar. Dit zou betekenen dat het Zwarte Schaar periodiek gaat meestromen en niet continu. Een voorbeeld van een vaste stuw is te zien in figuur 10 linksboven.

KLEPSTUW

Een klepstuw heeft vrijwel dezelfde werking als een overlaat. Het voordeel van een klepstuw is dat deze verstelbaar is. Een klepstuw kan ervoor zorgen dat er in verschillende periodes een ander peil gehanteerd kan worden. Bij hoogwater kan de stuw meer mee stromen en bij laagwater kan de stuw omhoog gezet worden zodat deze niet meestroomt. voorbeeld van een stuw is te zien in figuur 10 linksonder.

BRUG

Bij een brug zal er geen regulatie zijn over het water dat er door stroomt richting het Zwarte Schaar. Dit betekent dus dat het Zwarte Schaar aan beide kanten permanent in verbinding komt te staan met de IJssel. Een voorbeeld van een verbinding door een burg is te zien in figuur 10 rechtsboven.

DUIKER

Een duiker kan in verschillende vormen gerealiseerd worden. De meest gangbare vormen zijn ronde, rechthoekige of ovaalvormige leidingen. Vierkante leidingen zorgen voor lagere snelheden binnen in de pijp. Ronde leidingen zorgen ervoor dat er gemiddelde tot hoge stroomsnelheden gerealiseerd worden en ovale pijpen zorgen voor snelle stroomsnelheden. Door de leiding wordt water getransporteerd van de ene naar de andere waterloop. Vaak zitten deze duikers voor een groot deel onder water en zorgen deze ervoor dat er een debiet afhankelijk van het drukverschil richting de nevengeul stroomt. Een voorbeeld van drie duikers op een rij is te zien in figuur 10 rechtsonder.



FIGUUR 10 REFERENTIEBEELDEN: LINKSBOVEN OVERLAAT (PLATTELANDSVERENIGING HEI, 2015), RECHTSBOVEN BRUG (VOBI BETON- EN WATERBOUW, 2013), LINKSONDER KLEPSTUW (GIVERBO, 2014) EN RECHTSONDER DUIKER (STIMULAR, 2015)

3.3 HOOFDVRAAG 1) WELKE ALTERNATIEVEN ZIJN ER OM HET ZWARTE SCHAAR TE LATEN DOORSTROMEN IN HET KADER VAN DE KADERRICHTLIJN WATER?

Met de informatie uit de deelvragen 1-1 en 1-2 kan er een groot gedeelte van deze hoofdvraag beantwoord worden. Eerst worden de verschillende alternatieven beschreven en hoe ze functioneren op de drie aspecten van de KRW, vis, macrofauna en waterplanten. Daarna wordt er gekeken naar de verschillende stroomsnelheden die behaald worden in de haven en in het Zwarte Schaar.

OVERLAAT

Het eerste punt dat belangrijk is voor deze constructie is het aantal dagen van meestromen zoals eerder vermeld. De waterstand van de IJssel zal geanalyseerd moeten worden om de drempelwaarde zo te bepalen dat deze tenminste 300 dagen meestroomt met de IJssel. Het is hierbij echter wel van belang om na te gaan of de scheepvaart in de haven hier geen hinder van gaat ondervinden. Het is ook van belang om in te zetten op een rijke waterbeplanting. Waterplanten kunnen erg lastig ontwikkelen in de hoofdgeul. Hierdoor biedt de nevengeul een ideale oplossing. Het is bewezen dat waterplanten zich het best ontwikkelen in wateren met weinig waterstandfluctuaties. Er zit echter ook één groot nadeel aan een overlaat/drempelconstructie. Dit nadeel is dat vissen geen vrij spel hebben om deze constructie zo maar te passeren. Dit zorgt er dus voor dat de visstand niet erg gestimuleerd wordt in deze variant. Wat echter wel gedaan kan worden met de drempelconstructie is om hier een vistrap in te maken. Dit houdt in dat de drempelconstructie uit allemaal verschillende kleine drempels bestaat achter elkaar.

KLEPSTUW

Een verstelbare klepstuw geeft wat meer vrijheid dan een overlaat. Ze hebben echter beide hetzelfde probleem doordat het voor de vis geen goede constructie is om te passeren.

BRUG

Een brug zal ervoor zorgen dat er altijd een stroming is richting het Zwarte Schaar. Dit zal een gunstige situatie zijn voor de vis aangezien deze vrij spel hebben. Hetzelfde geldt voor de macrofauna en waterplanten.

DUIKER

Een duiker kan onder water geplaatst worden wat er voor zorgt dat deze een continu debiet zal afleveren aan het Zwarte Schaar. Dit kan er dus voor zorgen dat er een min of meer constante stroom ontstaat. Wat er echter wel gebeurt bij een duiker is dat de stroomsnelheden binnenin de duiker erg hoog zijn. Dit is niet heel erg positief voor de vis doordat het lastig is om de duiker te passeren als er sprake is van hoge stroomsnelheden. De stroomsnelheid is weer afhankelijk van de grootte van de duiker. Vaak wordt aanbevolen om de onderkant van de duiker van een ruwheid te voorzien (Jans, 2017). Vaak wordt hier gebruikt gemaakt van de plaatsing van stenen aan de onderkant. Hierdoor wordt de stroming gunstiger voor vissen om te passeren.

KWANTITATIEVE TOETSING ALTERNATIEVEN AAN DE KRW

Om te zien of de alternatieven ook aan de kwantitatieve eisen/vuistregels van de KRW voldoen is er verschillende informatie nodig. Te beginnen worden maatregelen die uitgevoerd worden in het kader

van de KRW altijd getoetst op het beoordelingskader van Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat is de beheerder van de grote rivieren in Nederland, zo ook de IJssel. Rijkswaterstaat is tevens het bevoegd gezag van de Waterwet. De Waterwet (Rijksoverheid, 2009) bestaat uit een achttal wetten die samengekoppeld zijn tot één. Deze wet zorgt voor het waterbeheer van oppervlakte- en grondwater. Tevens verbetert deze wet de samenhang tussen waterbeleid en de ruimtelijke ordening. Het vergunningenstelsel van de Waterwet heeft verschillende doelen, één hiervan gaat over waterveiligheid. Het gaat hierbij om het veilig afvoeren van water, sediment en ijs. Om een aanvraag voor een vergunning te toetsen heeft Rijkswaterstaat een beoordelingskader opgesteld. Dit kader beschrijft verschillende criteria die gebruikt worden om de effecten te analyseren die de ingreep van de aanvraag veroorzaakt. Deze criteria kunnen worden ingedeeld in drie verschillende thema's: hoogwaterveiligheid, hinder of schade door hydraulische effecten en morfologische effecten. Niet alle criteria zullen behandeld hoeven te worden aangezien de ingreep op deze criteria geen effect zal hebben. De volgende criteria zullen meegenomen moeten worden voor de KRW (Rijkswaterstaat, 2017):

- De ingreep mag niet resulteren in een te grote dwarsstroming:
 - Geen dwarsstroming groter dan 0,3 m/s bij een debiet kleiner dan 50 m³/s.
 - Geen dwarsstroming groter dan 0,15 m/s bij een debiet groter dan 50 m³/s.
- Stroomsnelheid in de haven (dit is een wens vanuit de projectgroep om te zien wat het effect hiervan is).

Vanuit de KRW zijn er 3 vuistregels die gehanteerd zullen worden bij het ontwerp voor het Zwarte Schaar:

- Minimaal 300 dagen meestromen per jaar.
- Stroomsnelheid realiseren van 3 dm/s in het Zwarte Schaar.
- Debiet onttrekking vanuit de hoofdgeul tussen de 0 en 3% i.v.m. sedimentatie en erosie. (dit wordt verder behandeld in hoofdstuk 3.4)

Met deze vuistregels vanuit de KRW over de debietonttrekking en het aantal dagen van meestromen kunnen de alternatieven verder gespecificeerd worden en getoetst worden op de criteria vanuit het beoordelingskader. Dit zorgt voor de alternatieven te zien in tabel 4 hieronder.

TABEL 4 ALTERNATIEVEN MET DE BIJBEHORENDE VARIANTEN

Alternatief	Drempel van meestromen	Varianten
Overlaat	5.27 m+ Nap (gemiddelde onderscheiding van 62 dagen per jaar)	• 1 meter brede overlaat* • 2 meter brede overlaat • 3 meter brede overlaat
Klepstuw	5.27 m+ NAP	• 1% onttrekking** • 2% onttrekking • 3% onttrekking • 1% onttrekking bij laagwater, 2% onttrekking bij normale waterstand en 3% onttrekking bij hoogwater
Duiker	5.27 m+ NAP	Zelfde als klepstuw.
Brug	Geen	Geen

* Bij de breedte van de overlaat gaat het om de breedte in dezelfde richting als de breedte van de rivier.

** Bij de onttrekking gaat het over de hoeveelheid debiet die van de IJssel afvoer wordt onttrokken.

Voor het ontwerpen van deze alternatieven is het erg belangrijk om te weten wat de waterstanden en afvoeren zijn in de IJssel. Dit is belangrijk om te weten om later de effecten van sedimentatie en erosie te kunnen bepalen. Ook is het van belang om te weten wanneer er sprake is van hoogwater om bijvoorbeeld de stuwen los te zetten. Voor de IJssel zijn de volgende waterstanden +NAP gedefinieerd op de as van de rivier (Rijkswaterstaat, z.j.):

- Verlaagde waterstand (< 445cm)
- Normaal (445 tot 910cm)
- Verhoogde waterstand (> 910cm)
- Hoogwater (> 1010cm)
- Extreem hoogwater (> 1060cm)

Een duurlijn van de IJssel bij Doesburg is te vinden in bijlage B. Hierin is te zien dat er normaal gesproken een paar dagen in het jaar zijn dat de waterstand boven de 910 cm stijgt. In dit soort situaties kan het Zwarte Schaar een uitkomst bieden door een deel van het debiet op zich te nemen en hierdoor voor een verlaagde waterstand zorgen.

Voor de duiker zijn vaste onttrekkingen gekozen tussen de 1 en 3% van de IJssel afvoer. Dit is gedaan zodat later het oppervlakte van de duikers berekend kan worden om de desbetreffende onttrekking te realiseren. Nu de alternatieven verder gespecificeerd zijn kunnen er berekeningen gedaan worden om de criteria te toetsen. De berekeningen om het debiet te bepalen dat naar het Zwarte Schaar zal stromen is bepaald aan de hand van verhanglijnen. Ook is hiermee de waterstand bepaald en zijn de stroomsnelheden afgeleid. De berekeningen hiervan zijn te vinden in bijlage C. De uitkomsten zijn weergegeven in tabel 6. De stroomsnelheden zijn weergegeven per aantal dagen dat de bijbehorende afvoer wordt overschreden. Deze afvoeren zijn te vinden in tabel 5.

TABEL 5 AFVOER BIJ LOBITH EN DE IJSSEL MET BIJBEHORENDE OVERSCHRIJDING IN AANTAL DAGEN PER JAAR

Gemiddelde overschrijding van de afvoer per jaar in aantal dagen	Afvoer bij Lobith [m³/s]	Afvoer IJssel [m³/s]
249	1608	249
209	1813	181
107	2457	381
55	3108	482

TABEL 6 UITKOMSTEN BEREKENINGEN CRITERIA

Alternatief	Variant	Stroomsnelheid het Zwarte Schaar per aantal dagen per jaar dat deze overschreden wordt in dm/s.	Stroomsnelheid in de haven per aantal dagen per jaar dat deze overschreden wordt in dm/s
Overlaat	1 meter breed	249: 0,039 209: 0,058 107: 0,089 55: 0,164	249: 0,062 209: 0,092 107: 0,138 55: 0,249
	2 meter breed	249: 0,077 209: 0,117 107: 0,177 55: 0,328	249: 0,123 209: 0,184 107: 0,275 55: 0,498
	3 meter breed	249: 0,116 209: 0,175 107: 0,266 55: 0,490	249: 0,184 209: 0,275 107: 0,413 55: 0,745
Klepstuw/duiker	1% onttrekking	249: 0,114 209: 0,120 107: 0,149 55: 0,153	249: 0,182 209: 0,189 107: 0,231 55: 0,232
	2% onttrekking	249: 0,229 209: 0,241 107: 0,298 55: 0,306	249: 0,364 209: 0,378 107: 0,463 55: 0,464
	3% onttrekking	249: 0,343 209: 0,361 107: 0,448 55: 0,458	249: 0,545 209: 0,567 107: 0,695 55: 0,696
	1% bij laag 2% bij normaal 3% bij hoog	249: 0,229 209: 0,241 107: 0,298 55: 0,306	249: 0,364 209: 0,378 107: 0,463 55: 0,464
Brug	-	249: 0,430 209: 0,536 107: 0,788 55: 1,145	249: 0,683 209: 0,842 107: 1,225 55: 1,740

Uit de stroomsnelheden die bereikt worden die zijn af te lezen uit tabel 6, blijkt dat de eis vanuit de KRW niet behaald wordt. De gewenste stroomsnelheid van 3 dm/s wordt in geen enkel alternatief behaald bij de afvoeren uit tabel 5. Voor de dwarsstroming die zal ontstaan op de hoofdgeul van de IJssel wordt aangenomen dat de stroomsnelheid in het Zwarte Schaar gelijk is aan de dwarsstroming op de IJssel. Bij bijna alle alternatieven is het debiet dat richting het Zwarte Schaar zal stromen kleiner dan 50 m³/s. Alleen bij het alternatief van de brug zal bij een debiet hoger dan ≈650 m³/s door de hoofdgeul een debiet groter dan 50 m³/s richting het Zwarte Schaar stromen. Dit betekent dus dat bij een debiet groter dan 50 m³/s de dwarsstroming niet groter mag zijn dan 0,15 m/s. Bij het alternatief van de brug zal deze stroomsnelheid echter wel worden overschreden. Bij de andere varianten wordt de stroomsnelheid van 0,3 m/s nooit overschreden.

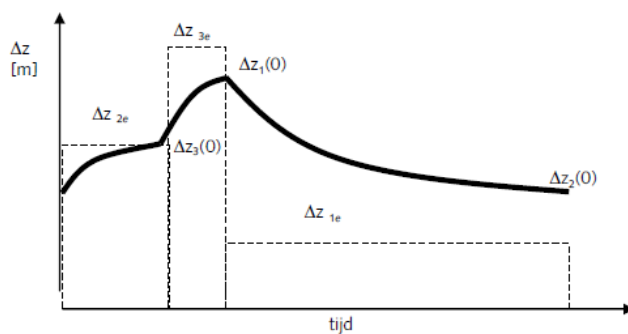
3.4 DEELVRAAG 2-1) WAT ZIJN DE EFFECTEN VAN SEDIMENTATIE EN EROSIE IN DE IJSSEL?

Om de effecten van sedimentatie en erosie in de hoofdgeul van de IJssel te onderzoeken hebben er gesprekken plaats gevonden met Andries Paarlberg (adviseur rivieren en rivierbeheer bij HKV Lijn in Water en Rijkswaterstaat), Susanne Quartel (senior adviseur rivierkunde bij Rijkswaterstaat) en Daniel van Putten (rivierkundig specialist bij Rijkswaterstaat). Vanuit Rijkswaterstaat is er een methode om een inschatting te geven van de erosie en sedimentatie die gaat plaatsvinden bij een ingreep (Sieben, 2011). Aan de hand van deze methode kan er een relaxatiemodel worden opgesteld waaruit de morfologische effecten bepaald kunnen worden. Dit zijn de minimale, maximale en de jaargemiddelde waarde voor de bodemverandering. Zoals in het theoretisch kader te lezen valt in §2.3 wordt er sedimentatie verwacht in de hoofdgeul van de IJssel nabij het punt van de splitsing. Bij de samenvoeging waar de nevengeul weer in de hoofdgeul stroomt wordt erosie verwacht. Doordat de rivierafvoer over het gehele jaar varieert zijn ook de aanzanding en erosie variabel. Er zijn twee specifieke karakteristieken die van toepassing zijn op de bodemverandering:

- De bodemverandering is variabel per seizoen: maximaal aan het einde van het hoogwaterseizoen en minimaal aan het einde van het laagwaterseizoen.
- Het effect is maximaal aan de bovenrand van de ingreep.

Met de methode van Rijkswaterstaat om het relaxatiemodel op te stellen kunnen de effecten op de bovenrand van de ingreep bepaald worden waar de effecten maximaal zijn. Deze uitkomsten worden dan ook gebruikt om de effecten te beoordelen. In bijlage D wordt de methode uitgelegd en toegepast. De resultaten worden beschreven met de volgende variabelen:

- $Z_1(0)$ = maximale waarde bodemverandering [m] aan het einde van het hoogwaterseizoen
- $Z_2(0)$ = minimale waarde bodemverandering [m] aan het einde van het laagwaterseizoen
- $Z_3(0)$ = tussenwaarde bodemverandering [m] aan het einde van de overgang van laag- naar hoogwater
- Z_m = jaargemiddelde waarde bodemverandering [m]



FIGUUR 11 SCHEMATISATIE BODEMVERANDERING

In figuur 11 is een schematisatie van een bodemveranderingsproces te zien. Hierin is Δz_{2e} de tussenperiode en is de $\Delta z_3(0)$ de maximale bodemverandering aan het einde van deze tussenperiode. Hierna volgt het hoogwaterseizoen met tijdsduur Δz_{3e} en aan het einde de maximale bodemverandering $\Delta z_1(0)$. En tot slot is er het laagwaterseizoen met tijdsduur Δz_{1e} en met de minimale bodemverandering aan het einde weergegeven als $\Delta z_2(0)$. Deze karakteristieke bodemveranderingen zijn weergegeven in tabel 7 voor de verschillende varianten. In deze tabel staat

ook de jaargemiddelde waarde. Deze waarde is de lijn die door de grafiek in figuur 11 wordt getrokken zodat de oppervlakte aan de boven- en benedenkant aan elkaar gelijk is.

TABEL 7 SEDIMENTATIE PER ALTERNATIEF BIJ SPLITSING

Alternatief	Variant	Z ₁ (0) [m]	Z ₂ (0) [m]	Z ₃ (0) [m]	Z _m [m]
Overlaat	1 meter breed	0,129	0,009	0,083	0,060
	2 meter breed	0,271	0,018	0,165	0,120
	3 meter breed	0,405	0,027	0,247	0,180
Klepstuw/duiker	1% onttrekking	0,087	0,006	0,070	0,041
	2% onttrekking	0,173	0,012	0,140	0,082
	3% onttrekking	0,260	0,018	0,210	0,122
	1% bij laag 2% bij normaal 3% bij hoog	0,257	0,017	0,140	0,119
Brug	-	0,721	0,409	0,539	0,676

Per variant is er in tabel 7 te zien wat de effecten van aanzanding zijn bij het punt van splitsing. Wat opvalt is dat als er meer water wordt onttrokken naar het Zwarte Schaar er ook meer aanzanding zal plaatsvinden. Als dit gecontroleerd wordt met de theorie van Sieben (2011) dan blijkt dit ook te kloppen.

3.5 DEELVRAAG 2-2) WAT ZIJN DE EFFECTEN VAN SEDIMENTATIE EN EROSIE IN HET ZWARTE SCHAAR?

Ook voor deze deelvraag hebben gesprekken plaatsgevonden met Andries Paarlberg, Susanne Quartel en Daniel van Putten zoals bij deelvraag 2-1. Wat vaak blijkt bij een aantakking van een nevengeul is dat er vrijwel geen sedimentatie en erosie optreedt in de nevengeul zelf. Door de beperkte stroomsnelheden die er ontstaan zal er maar zeer beperkt erosie en sedimentatie plaatsvinden. Als er wordt gekeken naar de bestaande nevengeulen die zijn aangelegd zijn er wel enkele aspecten die opvallen. Bij Gameren is één geul gesedimenteerd door hoogwater. Wat ook opvalt is dat bij Gameren en bij de Bakenhof erosie heeft plaatsgevonden achter de instroomopening (Schoor et al. 2011). Dit zijn effecten die in het Zwarte Schaar ook verwacht kunnen worden maar deze zullen echter wel beperkt blijven doordat het Zwarte Schaar vrij groot is qua omvang.

Vanuit de projectgroep ontstond ook de wens om de effecten van afkalven te onderzoeken. Dit is een proces waarbij de oevers geleidelijk inzakken en land verloren gaat. Dit is vaak het geval wanneer er golfslag ontstaat (De Vree, g.j.) Dit effect van afkalven is doorgesproken samen met Andries Paarlberg en het blijkt dat in verschillende nevengeulen het effect van afkalven wel degelijk voorkomt. Neem dit samen met het feit dat het Zwarte Schaar ook veel gebruikt word voor recreatievaart dat veel golfslag kan veroorzaken, dan kan het effect van afkalven wel degelijk een probleem gaan vormen.

3.6 DEELVRAAG 2-3) WAT ZIJN EVENTUELE MAATREGELEN TEGEN SEDIMENTATIE EN EROSIE?

Doordat ingrepen in de rivier niet alleen positieve effecten met zich meebrengen dient er gekeken te worden naar eventuele maatregelen tegen de negatieve effecten. Om de negatieve effecten tegen te gaan en een ingreep doorgang te laten vinden wordt er vaak gezocht naar compenserende of mitigerende maatregelen.

Vaak worden sedimentregulerende, debietcontrole en dwarsprofiel aanpassing maatregelen toegepast om sedimentatie tegen te gaan. Uit deelvraag 2-1 en 2-2 is gebleken dat er vooral naar maatregelen gekeken moet worden om de sedimentatie in de hoofdgeul tegen te gaan aangezien de effecten van sedimentatie in het Zwarte Schaar minimaal zijn. Om sedimentatie in de hoofdgeul tegen te gaan zijn dwarsprofielregulerende maatregelen de meest logische oplossing. De meest voor de hand liggende maatregel is het verlengen van de kribben. Hierdoor wordt het dwarsprofiel van de geul verkleind waardoor de stroomsnelheid toeneemt en dus ook de sedimenttransportcapaciteit. Hierdoor zal de aanzanding gaan eroderen. Wat echter wel belangrijk is om rekening mee te houden is dat het zand dat erodeert zich elders weer gaat plaatsen (Klop, 2009).

3.7 HOOFDVRAAG 2) WAT ZIJN DE EFFECTEN VAN SEDIMENTATIE EN EROSIE?

Uit deelvragen 2-1 t/m 2-3 is er al veel informatie beschikbaar om deze hoofdvraag te beantwoorden. Voor deze hoofdvraag zal het beoordelingskader vanuit Rijkswaterstaat ook weer in beeld komen wat ook het geval was bij hoofdvraag 1. Het beoordelingskader beschrijft verschillende criteria die getoetst worden als het gaat over hoogwaterveiligheid, sedimentatie en erosie (Rijkswaterstaat, 2017):

- Geen vermindering vaargeulafmetingen bij lage tot gemiddelde rivierafvoeren conform OLR.
- Geen waterstandverhoging op de as van de rivier bij een Boven-Rijn afvoer van 16.000 m³/s.
- Geen ongewenste afname van de waterdiepte t.g.v. de onttrekking van water uit het zomerbed bij lage en mediane Boven-Rijn afvoeren.

Voor de minimale vaargeulafmetingen bij Doesburg gelden de volgende waarden:

- Vaarwegbreedte = 50 m
- Minimale waterdiepte conform OLR = 250 cm

OLR is de overeengekomen lage rivierstand (Roosjen et al. 2013). Dit is een referentievlak dat gebruikt wordt om de dieptes voor de scheepvaart te controleren. De OLR is vastgesteld op een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith. Als er wordt gekeken naar de verschillende alternatieven hebben deze allemaal een drempel behalve de brug. De alternatieven met een drempel stromen pas mee bij een afvoer bij Lobith van 1312 m³/s. Voor het alternatief van de brug is het dus van belang om te gaan kijken naar de waterdiepte bij de OLR afvoer. Deze bedraagt 3,87 m (Rijkswaterstaat, 2016) op de as van de rivier. Dit zal dus geen problemen geven voor de scheepvaart.

Om te kijken naar de andere twee punten van het beoordelingskader wordt de waterstand bepaald bij de verschillende alternatieven bij lage en mediane Boven-Rijn afvoeren. De waterstandverhoging bij 16.000 m³/s is lastig om te toetsen aangezien hier geen waarden voan bekend zijn. Dit leidt tot tabel 8.

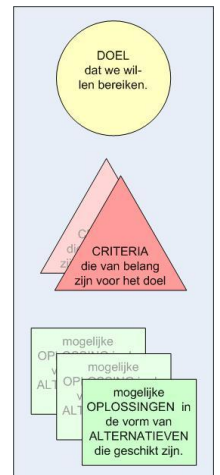
TABEL 8 UITKOMSTEN BEREKENINGEN WATERDIEPTE VERLAGING

Alternatief	Variant	Waterdiepteverandering per minimaal aantal dagen per jaar dat deze behaald wordt in mm
Overlaat	1 meter breed	249: -0,78 209: -0,97 107: -1,45 55: -2,23
	2 meter breed	249: -1,55 209: -1,93 107: -2,89 55: -4,95
	3 meter breed	249: -2,32 209: -2,88 107: -4,31 55: -7,65
Klepstuw/duiker	1% onttrekking	249: -1,99 209: -2,04 107: -2,29 55: -2,43
	2% onttrekking	249: -3,96 209: -4,56 107: -4,59 55: -4,84
	3% onttrekking	249: -5,91 209: -6,81 107: -7,11 55: -7,23
	1% bij laag 2% bij normaal 3% bij hoog	249: -3,96 209: -4,56 107: -4,59 55: -4,84
Brug	-	249: -8,50 209: -8,71 107: -12,59 55: -18,16

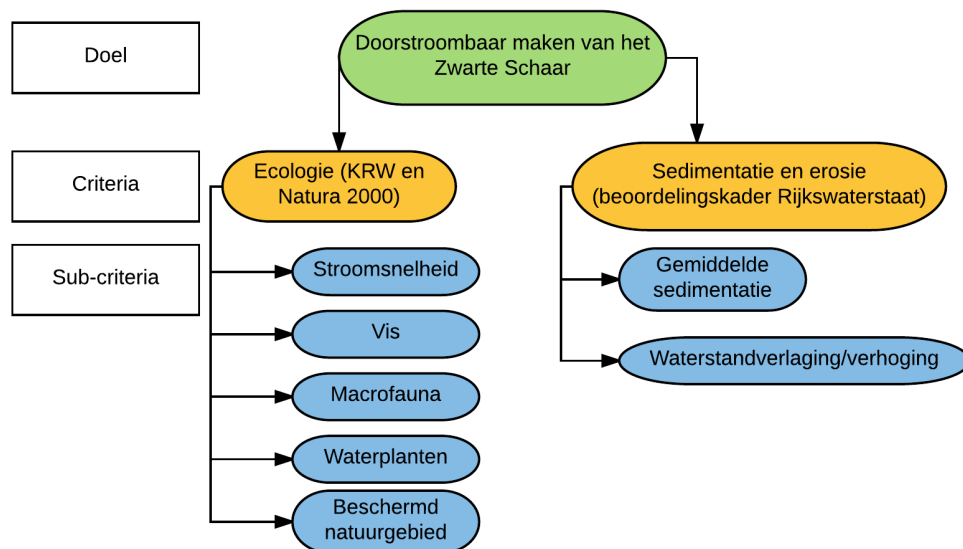
Uit tabel 8 kan de conclusie getrokken worden dat ieder alternatief voor een waterdiepteverlaging zal zorgen. Het is hier van belang om te beseffen dat het hier gaat om de waterdiepte- en niet de waterstandverlaging. In tabel 8 is de sedimentatie niet meegenomen. Het gaat hierbij dus om de waterdiepteverlaging door een onttrekking van debiet richting het Zwarte Schaar. Dit zijn echter wel ongewenste getallen in tabel 8 aangezien de ideale situatie zal zijn dat er geen waterdiepteverlaging is. Zoals al eerder vermeld is het lastig te zeggen wat de effecten zijn bij een afvoer van 16.000 m³/s. Als er wordt gekeken naar de sedimentatie dan wordt er vaak minimaal 10cm sedimentatie verwacht aan het einde van een hoogwaterseizoen. Echter zorgt het meestromen van het Zwarte Schaar wel voor een betere verdeling van de afvoerpiek. Tevens stromen de uiterwaarden ook over en dit is niet meegenomen in het gebruikte model. Het is dus lastig te zeggen of er een waterstandverhoging zal plaatsvinden.

3.8 DEELVRAAG 3-1) OP WELKE CRITERIA KUNNEN DE ALTERNATIEVEN BEOORDEELD WORDEN?

Om uiteindelijk tot een voorkeursalternatief te komen zullen er verschillende criteria gekozen moeten worden waar de alternatieven op beoordeeld moeten worden. De methode die hiervoor gebruikt zal worden is de AHP (analytisch hiërarchisch proces) (Filatova, 2015). Deze methode wordt gebruikt om de criteria om de verschillende alternatieven te beoordelen vast te stellen. Hierna worden de criteria van een waarde voorzien om zo het beste alternatief te kiezen. Een AHP bestaat uit drie kernbegrippen: doel, criteria en de alternatieven zoals geschematiseerd is in figuur 12. Het doel van de alternatieven is het doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar. De criteria die hierbij centraal staan zijn de richtlijnen die volgen uit de KRW en de effecten van de maatregel. De effecten waar de meeste aandacht naar uit is gegaan zijn sedimentatie en erosie. De richtlijnen uit het beoordelingskader zijn gebruikt om deze te toetsen. Deze kunnen weer in sub-criteria worden onderverdeeld en dit leidt tot de schematisatie in figuur 13.



FIGUUR 12
HOOFDSTRUCTUUR
AHP (TEN HAGEN,
2013)



FIGUUR 13 AHP BOOM

3.9 DEELVRAAG 3-2) HOE WORDEN DE ALTERNATIEVEN BEOORDEELD OP DE CRITERIA?

De twee hoofdcriteria over de ecologie en de sedimentatie en erosie moeten gewogen worden tegenover elkaar. In eerste instantie wordt er aan gedacht dat het doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar voortvloeit uit de KRW. Hierdoor ontstaat het idee dat de KRW het zwaarst mee zou moeten wegen in de beslissing. Dit is het geval, maar er moet echter ook naar de belangen van scheepvaart op de IJssel gekeken worden als er naar de verschillende belanghebbenden wordt gekeken. Deze belangen tellen zwaar mee aangezien sedimentatie in de hoofdgeul negatief is voor de scheepvaart en dit kan extra kosten met zich mee brengen voor baggeren. Hierdoor is er voor gekozen om de KRW een weging van 0,6 te geven en sedimentatie en erosie een weging van 0,4.

De sub-criteria die kwantitatief beschreven zijn beoordeeld met een relatieve schaling tussen 0 en 1. De minst gunstige uitkomst van een alternatief krijgt de waarde 0 en de meest gunstige waarde krijgt de waarde 1. Door hier een lineaire lijn door heen te trekken kunnen de criteria gescoord worden per alternatief. Dit is gedaan in bijlage E. Dit heeft voor de scores gezorgd zoals weergegeven in tabel 9.

TABEL 9 KWANTITATIEVE SCORING ALTERNATIEVEN

Alternatief	Variant	Score Stroomsnelheid	Score waterstandverlaging	Score sedimentatie
Overlaat	1 meter breed	0,00	1,00	0,97
	2 meter breed	0,14	0,86	0,88
	3 meter breed	0,27	0,72	0,78
Klepstuw/ duiker	1% onttrekking	0,07	0,92	1,00
	2% onttrekking	0,28	0,70	0,94
	3% onttrekking	0,49	0,49	0,87
	1% bij laag 2% bij normaal 3% bij hoog	0,28	0,70	0,88
Brug	-	1,00	0,00	0,00

Voor de kwalitatief beschreven sub-criteria wordt het iets lastiger om hier een waarde aan te geven en daarom moeten deze goed beschreven worden om deze goed te kunnen beoordelen. De kwalitatief beschreven sub-criteria die geschaald moeten worden zijn vis, waterplanten, macrofauna en de Natura 2000. Dit is gedaan in tabel 11. De manier van beoordeling staat geschematiseerd in tabel 10.

TABEL 10 MANIER VAN BEOORDELING KWALITATIEVE CRITERIA

Beoordeling	Score AHP	Kleur
Positief	1	
Positief/middelmatig	0,66	
Middelmatig/negatief	0,33	
Negatief	0	

TABEL 11 BEOORDELING ALTERNATIEVEN MET DE KRW

KRW \ Alternatief	Overlaat/drempelconstructie	Verstelbare stuw/klepstuw
Vis	Bij een enkele drempel is dit ongunstig voor vissen. Er is echter de mogelijkheid om een vistrap te realiseren.	Een verstelbare stuw/klepstuw is niet gunstig voor de vis. De vis kan hier niet passeren. Hier is ook de mogelijkheid voor een vistrap maar deze zal er naast gelegd moeten worden.
Macrofauna	Over het algemeen is de macrofauna van een goede kwaliteit. Er is echter geen permanente stroming.	Ook hier geldt dat over het algemeen de macrofauna van een goede kwaliteit is.
Waterplanten	Voor de waterplanten is het van belang dat het water van een goede kwaliteit is. Dit is het beste bij permanent stromend water en zal dus bij een drempelconstructie minder zijn.	Ook hier geldt dat bij permanent stromend water de waterplanten het beste tot hun recht komen. Bij een stuw is het echter vaak zo dat het water niet permanent meestroomt.
Natura 2000	Weinig tot geen effect.	Weinig tot geen effect.
KRW \ Alternatief	Brug	Duiker
Vis	Bij een brug kan de vis altijd passeren dus dit is een zeer gunstige situatie.	Als er bij een duiker een ruwe ondergrond wordt gerealiseerd kan de vis hier passeren. Dit is positief maar nog niet zo makkelijk passeerbaar als een brug.
Macrofauna	Het water zal andere stroomsnelheden hebben dan de hoofdgeul en ook permanent meestromen. Dit betekent dus ook een positief effect op de macrofauna.	Behoorlijk positief voor de macrofauna. Doordat er een vrijwel permanente/constante stroming is zal de reofiele macrofauna in dit gebied gestimuleerd worden.
Waterplanten	Doordat het Zwarte Schaar permanent zal meestromen heeft dit een positief effect op de waterplanten.	Ook hier geldt dat een vrijwel permanente stroming een positief effect heeft op de waterplanten.
Natura 2000	Weinig tot geen effect.	Weinig tot geen effect.

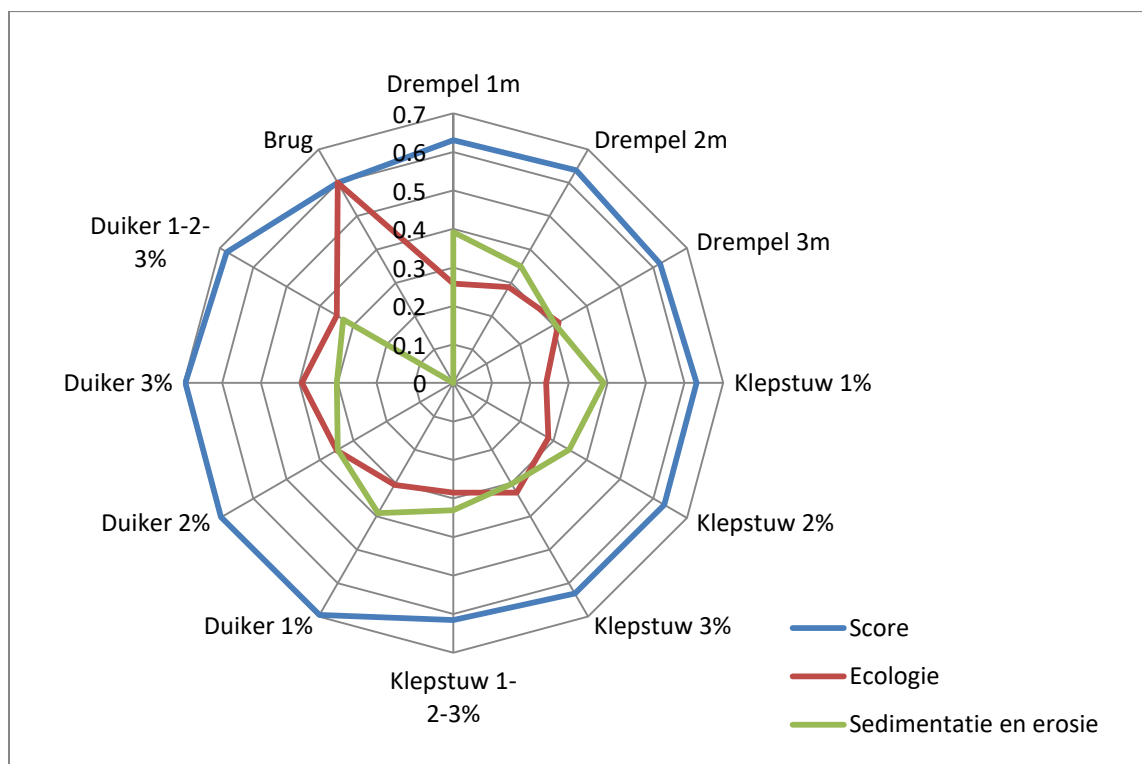
3.10 HOOFDVRAAG 3) WAT IS HET BESTE ALTERNATIEF UIT HOOFDVRAAG 1?

Om tot een uiteindelijk voorkeursalternatief te komen moeten de sub-criteria ook een gewicht krijgen ten opzichte van elkaar. Aangezien de stroomsnelheid als een vuistregel wordt gehanteerd in de KRW zal deze iets zwaarder meetellen dan de rest. De stroomsnelheid krijgt een gewicht van 0,35 en de overige sub-criteria van de KRW een gewicht van 0,1625. Bij de sedimentatie en erosie zullen de gewichten niet gelijk verdeeld worden aangezien de effecten van sedimentatie vaak een groter belang hebben. Hierdoor krijgt sedimentatie een weging van 0,7 en waterstandverlaging van 0,3. Door alle wegingen en scores met elkaar te vermenigvuldigen wordt tabel 12 verkregen.

TABEL 12 SCORE BEPALING ALTERNATIEVEN

Criteria →	Ecologie (gewicht 0.6)					Sedimentatie en erosie (gewicht 0.4)		Score
Alternatief ↓	Stroomsnelheid	Vis	Macrofauna	Waterplanten	Natura 2000	Sedimentatie	Waterstandverlaging	
Drempel 1m	0.00	0.33	0.66	0.66	1.00	0.97	1.00	0.63
Drempel 2m	0.14	0.33	0.66	0.66	1.00	0.88	0.86	0.64
Drempel 3m	0.27	0.33	0.66	0.66	1.00	0.78	0.72	0.62
Klepstuw 1%	0.07	0.00	0.66	0.66	1.00	1.00	0.92	0.63
Klepstuw 2%	0.28	0.00	0.66	0.66	1.00	0.94	0.70	0.63
Klepstuw 3%	0.49	0.00	0.66	0.66	1.00	0.87	0.49	0.63
Klepstuw 1-2-3%	0.28	0.00	0.66	0.66	1.00	0.88	0.70	0.62
Duiker 1%	0.07	0.66	0.66	0.66	1.00	1.00	0.92	0.70
Duiker 2%	0.28	0.66	0.66	0.66	1.00	0.94	0.70	0.70
Duiker 3%	0.49	0.66	0.66	0.66	1.00	0.87	0.49	0.70
Duiker 1-2-3%	0.28	0.66	0.66	0.66	1.00	0.88	0.70	0.68
Brug	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.6
Gewicht →	0.35	0.1625	0.1625	0.1625	0.1625	0.7	0.3	

Vanuit tabel 12 kan er een radar grafiek gemaakt worden om het visueel overzichtelijk te maken hoe de alternatieven scoren. Hierin worden de KRW en de sedimentatie en erosie ook apart weergegeven. Dit is te zien in figuur 14.



FIGUUR 14 RADAR GRAFIEK SCORE ALTERNATIEVEN

Zoals te zien is in figuur 14 krijgen de varianten van de duikers de hoogste score. De duiker met een onttrekking van 2% heeft de hoogste score maar dit scheelt maar weinig met de andere varianten van de duikers (3e getal achter de komma geeft de doorslag).

Aangezien de gewichten zijn gekozen naar eigen mening en niet met heel veel expertise van buitenaf is overlegd, is het belangrijk om een gevoeligheidsanalyse te doen. Deze gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd door de gewichten van ecologie en sedimentatie en erosie beide een keer maal 1,5 te doen. Dit zorgt voor de gewichten in tabel 13.

TABEL 13 GEWICHTEN GEVOELIGHEIDSANALYSE

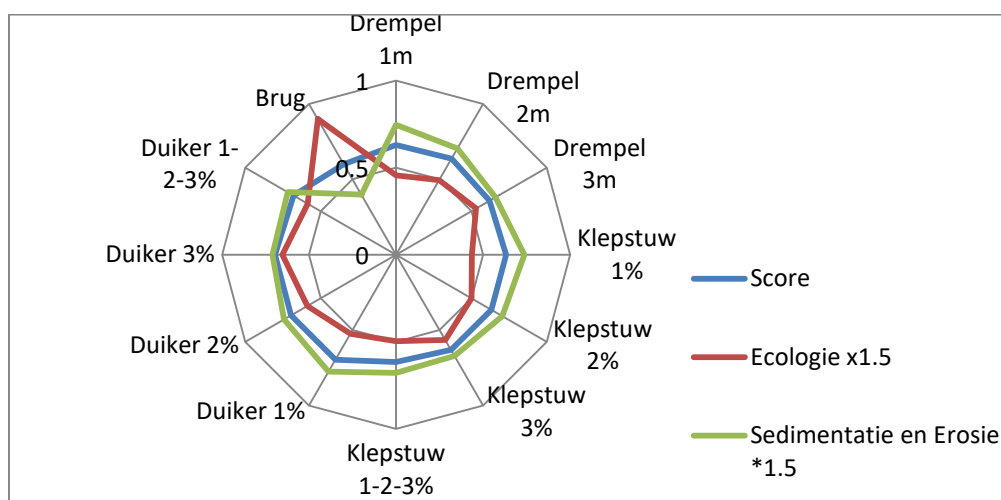
Situatie \ Gewicht	Ecologie	Sedimentatie en erosie
Normaal	0,6	0,4
Ecologie x1.5	0,9	0,1
Sedimentatie en erosie x1.5	0,4	0,6

Door de gewichten uit tabel 13 toe te passen op de varianten worden de scores bepaald die staan in tabel 14.

TABEL 14 UITKOMSTEN GEVOELIGHEIDSANALYSE

Alternatief \ Gewicht	Normaal	Ecologie x1.5	Sedimentatie en erosie x1.5
Drempel 1m	0.63	0.46	0.75
Drempel 2m	0.64	0.50	0.71
Drempel 3m	0.62	0.53	0.66
Klepstuw 1%	0.63	0.44	0.74
Klepstuw 2%	0.63	0.50	0.70
Klepstuw 3%	0.63	0.57	0.67
Klepstuw 1-2-3%	0.62	0.50	0.68
Duiker 1%	0.70	0.53	0.78
Duiker 2%	0.70	0.59	0.74
Duiker 3%	0.70	0.65	0.71
Duiker 1-2-3%	0.68	0.59	0.72
Brug	0.60	0.90	0.40

Door de gegevens uit tabel 14 te plotten in een radar grafiek wordt figuur 15 verkregen.



FIGUUR 15 RADAR GRAFIEK GEVOELIGHEIDSANALYSE

Als er wordt gekeken naar de gevoeligheidsanalyse dan valt op dat bij een vermenigvuldiging van 1,5 van de ecologie de brug als grote favoriet eruit komt. Dit is ook te verwachten aangezien de brug een groot positief effect heeft op de ecologie wat al eerder is gebleken in tabel 11. Als er wordt gekeken naar de duikers dan is te zien dat deze nog steeds één van de hoogste scores hebben na de brug. Bij een vermenigvuldiging van 1,5 van het gewicht van de sedimentatie en erosie valt het op dat de varianten met de minste onttrekking de hoogste score krijgen. Dit is te verklaren doordat in deze varianten het minste sedimentatie optreedt. Wat echter wel een aandachtspunt is, is dat nu ook de drempel en klepstuw hoge scores krijgen. Dit is dus wel iets om rekening mee te houden.

VOORKEURSALETERNATIEF

De duiker met een onttrekking van 2% heeft de hoogste score gekregen in het AHP proces. Het is nu van belang om dit alternatief verder uit te werken en te gaan kijken wat voor soort duikers er nodig zijn. Het gaat hierbij om het soort, het aantal, de grootte en de hoogtes van de duikers waar ze geplaatst worden.

Om er voor te zorgen dat de duiker een gunstige situatie creëert voor de vis wordt er gekozen voor een rechthoekige vorm voor de duiker. Een rechthoekige duiker zorgt er namelijk voor dat de stroomsnelheden lager zijn dan bij bijvoorbeeld een ronde of ovale duiker. Ook is het van belang dat de duiker wordt voorzien van ruwheid op de bodem zodat de stroomsnelheid nog verder zal afnemen.

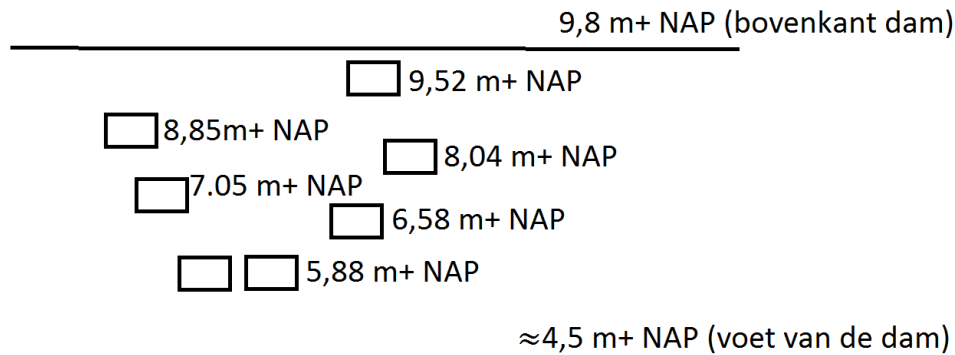
Om het aantal duikers te bepalen die nodig zijn moet eerst de oppervlakte van een enkele duiker worden vastgesteld. Hiervoor wordt gekeken naar de nevengeulen die al bestaan. Om de hele tijd zo dicht mogelijk bij de gewenste onttrekking van 2% te komen wordt er gekozen voor een wat kleinere oppervlakte van 2,5 m². Hierdoor kunnen er meerdere duikers geplaatst worden zodat het debiet dat onttrokken wordt steeds dicht bij de 2% kan zitten.

Nu dit bekend is wordt het totale oppervlakte dat nodig is bepaald. Deze berekeningen zijn te vinden in bijlage F. Nu de oppervlakte bekend is kan het aantal duikers bepaald worden en bij welke hoogte deze geplaatst moeten worden. Dit staat weergegeven in tabel 15.

TABEL 15 BESCHRIJVING VOORKEURSALETERNATIEF

Afvoer Lobith [m3/s]	Waterstand km-raai 903 m+ NAP	Gemiddelde onderschreiding in dagen per jaar	Aantal duikers
1411	5.88	79.5	2
1981	6.58	187.5	3
2602	7.05	274.16	4
3423	8.04	323.69	5
4357	8.85	345.41	6
5384	9.52	356.22	7
8162	10.35	-	8
10425	10.83	-	9

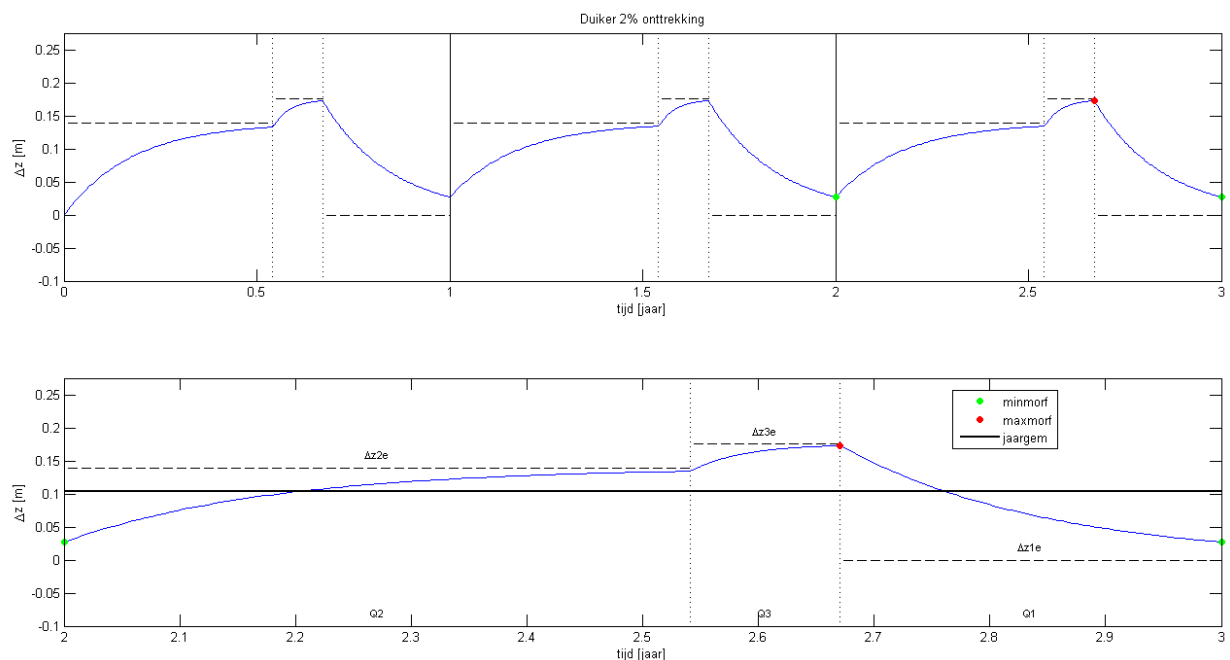
De waardes uit tabel 15 zijn als een schematisatie ingetekend in de dam in figuur 16.



FIGUUR 16 SCHEMATISATIE DAM MET DUIKERS

Uit figuur 16 blijkt dat de laatste twee duikers niet mogelijk zijn om te plaatsen aangezien de bovenkant van de dam lager ligt. Dit zorgt er dus voor dat de dam geen 9 duikers maar 7 duikers zal bevatten die te zien zijn in figuur 16.

Om de effecten van sedimentatie in de hoofdgeul te visualiseren is het Matlab script van Paarlberg (2017) gebruikt. Hierin kan de sedimentatie bepaald worden over een aantal jaren en is er ook een duidelijk evenwicht te zien. Voor het voorkeursalternatief is er een visualisatie gemaakt voor de eerste 3 jaar. Deze visualisatie is te zien in figuur 17.



FIGUUR 17 SEDIMENTATIE IN DE HOOFDGEUL OVER EEN PERIODE VAN 3 JAAR

In de 2 grafieken in figuur 17 is de bodemverandering gedurende een periode van 3 jaar gesimuleerd. We zien dat er al vrij snel te zien is dat er een evenwicht ontstaat doordat het 2e jaar al op de zelfde hoogte begint als het 3e. In het 3e jaar is ook aangegeven waar de minimale bodemhoogte verandering plaatsvindt met een groen bolletje en de maximale met een rood bolletje. Dit zijn de waarden $Z_2(0)$ en $Z_1(0)$ uit hoofdstuk 3.4.

4. DISCUSSIE

In dit hoofdstuk wordt er met een kritische blik teruggekeken op de gebruikte methode van dit onderzoek. Er wordt gekeken naar wat er anders gedaan had kunnen worden en wat de onzekerheid en de aannames zijn van dit onderzoek.

Het eerste aandachtspunt waar naar gekeken moet worden is het gebruik van de modellen. Als eerste wordt er gekeken naar de waterstandgegevens van Rijkswaterstaat. Dit model is gemaakt met actuele waterstanden en terugkeertijden die gemeten zijn over een lange periode. Klimaatverandering kan straks een effect hebben op de waterstanden en dat is hierbij niet meegenomen. Dit is dus wel belangrijk om in een later stadium misschien wel mee te nemen.

Ook zijn er verschillende aannames gedaan met betrekking tot het profiel van de haven en het Zwarte Schaar. Deze zijn geschematiseerd met behulp van een aantal dieptemetingen vanuit een hoogtekarta van Rijkswaterstaat. Deze schematisatie van het profiel geeft een goede indicatie, maar is natuurlijk niet geheel exact. Door dit te gaan modelleren kunnen lokale stroomsnelheden ook bepaald worden. Dit kan er voor zorgen dat lokaal op ondiepe stukken de gewenste stroomsnelheid van 3 dm/s wel behaald wordt. De aanname die gemaakt is over het profiel zorgt ervoor dat er hogere snelheden berekend worden dan dat er in de werkelijkheid zullen ontstaan.

Er is ook een aanname gemaakt over de breedte van de geul bij de berekeningen voor de verhanglijnen. In deze berekeningen is gesteld dat de breedte van de geul in alle gevallen 80 meter bedraagt. Dit is natuurlijk niet het geval, want als er een hoger debiet zal gaan stromen wordt de breedte van de geul ook groter. Hierin is dus ook niet meegenomen dat de uiterwaarden gaan meestromen. Deze aannames zorgen ervoor dat de waterdieptes hoger liggen dan in de werkelijkheid. Dit leidt ertoe dat de berekende afvoeren richting het Zwarte Schaar in de berekeningen hoger liggen. Voor de verhanglijnen moet er ook een stapgrootte bepaald worden voor de berekening. Die is in dit onderzoek vastgesteld op 40 m. Door deze in een vervolgonderzoek nog kleiner te maken zullen de uitkomsten nog nauwkeuriger zijn. Dit zal echter geen erg groot effect hebben aangezien 40 meter al een vrij kleine stapgrootte is.

Er zijn ook methodes beschikbaar om de effecten van sedimentatie en erosie te modelleren. In dit verslag is gebruik gemaakt van een methode van Rijkswaterstaat die gebaseerd is op vuistregels. Hierdoor kan er eigenlijk alleen maar een inschatting gemaakt worden van de effecten van sedimentatie en erosie. Op dit moment is dit nog prima aangezien het hier om het derde tranche gaat en de plannen nog in heel vroeg stadium zijn. Maar mocht het straks verder komen dan is het aan te raden dit nog door te rekenen met bijvoorbeeld SOBEK.

5. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Om verschillende alternatieven op te stellen om het Zwarte Schaar weer doorstroombaar te maken is de dam als locatie van doorbraak onderzocht. Het is de bedoeling dat bij het doorstroombaar maken van het Zwarte Schaar er een meerwaarde voor de ecologie wordt gevormd. Deze meerwaarde voor ecologie volgt uit de richtlijnen die gevormd zijn in de KRW. Zo moet er ingezet worden op drie verschillende ecologische doelen: vis, macrofauna en waterplanten. Om dit te doen zijn er enkele vuistregels opgesteld om te toetsen of er wel degelijk een meerwaarde gecreëerd wordt. Zo moet de nevengeul minimaal 300 dagen in het jaar meestromen met de hoofdgeul en zo moet er minimaal een stroomsnelheid behaald worden van 3 dm/s.

Om zo goed mogelijk aan deze eisen te voldoen zijn er verschillende alternatieven opgesteld om de dam weer doorstroombaar te maken. Binnen deze alternatieven is er nog gevarieerd met de hoeveelheid water dat wordt onttrokken uit de hoofdgeul. Dit heeft geleid tot de volgende alternatieven en varianten:

- Overlaat (1m, 2m en 3m breed)
- Klepstuw (1%, 2%, 3% en combi 1,2,3% onttrekking)
- Duiker (1%, 2%, 3% en combi 1,2,3% onttrekking)
- Brug

Deze varianten zijn vervolgens getoetst aan de eisen vanuit de KRW en de effecten van sedimentatie en erosie in de hoofdgeul en in het Zwarte Schaar. Voor deze effecten is er vanuit Rijkswaterstaat een beoordelingskader opgesteld waaraan deze getoetst kunnen worden. Het gaat hierbij om de grote van de dwarsstroming die ontstaat, de hoeveelheid sedimentatie en erosie en de waterstandverhoging/verlaging die zal ontstaan. Vervolgens moeten de alternatieven beoordeeld worden. Dit is gedaan aan de hand van de criteria en wegingsfactoren uit tabel 16.

TABEL 16 CRITERIA EN WEGING

Criteria	Weging	Criteria	Weging
Ecologie	0,6	Sedimentatie/erosie	0,4
Sub-criteria	Weging	Sub-criteria	Weging
Stroomsnelheid	0,35	Waterstandverlaging	0,3
Vis	0,1625	Hoeveelheid sedimentatie	0,7
Macrofauna	0,1625		
Waterplanten	0,1625		
Natura-2000	0,1625		

Deze criteria zijn gebruikt om een AHP op te stellen. Vanuit de AHP is de conclusie getrokken dat de variant van de duiker met een onttrekking van 2% het beste is. Deze variant is vervolgens uitgewerkt en verder gespecificeerd. Om er voor te zorgen dat er altijd bijna 2% wordt onttrokken zijn er 7 verschillende duikers nodig met een doorstroomoppervlakte van 2,5 m² per duiker. Deze duikers worden op verschillende hoogtes in de dam geplaatst zodat deze allemaal bij een andere waterhoogte zullen meestromen. Dit zorgt voor de uitkomsten in tabel 17.

TABEL 17 UITKOMSTEN VOORKEURALTERNATIEF

Aantal dagen meestromen	Stroomsnelheid Zwarte Schaar per minimaal aantal dagen per jaar dat deze behaald wordt	Gemiddelde sedimentatie	Waterstandverlaging per minimaal aantal dagen per jaar dat deze behaald wordt
302	249: 0,229 dm/s 209: 0,241 dm/s 107: 0,298 dm/s 55: 0,306 dm/s	0,082 m	249: -3,96 mm 209: -4,56 mm 107: -4,59 mm 55: -4,84 mm

Als er wordt gekeken naar de gevoeligheidsanalyse dan wordt het aanbevolen om bij een verder onderzoek de gewichten nog eens te bepalen. Uit de gevoeligheidsanalyse kwam de conclusie dat bij het kiezen van andere gewichten er meerdere voorkeurvarianten aan bod komen. Het kiezen van de gewichten kan in een toekomstig onderzoek uitgebreider gedaan worden door gesprekken met experts en belanghebbenden te voeren. Door dit te doen zal er een betrouwbaarder gewicht gekozen worden en dit zorgt ervoor dat de uitkomst een grotere betrouwbaarheid heeft.

Bij verder onderzoek is het ook aan te raden om nog meer contact met Rijkswaterstaat te leggen. Zo zijn er bijvoorbeeld al plannen vanuit Rijkswaterstaat om het Zwarte Schaar in het kader van de KRW aan te pakken. Het idee hiervan is om de geul die in de Fraterwaard ligt (figuur 1) aan te takken op de IJssel. Door dit verder te onderzoeken kan er gekeken worden naar de stroomsnelheden die in deze geul behaald zullen worden. Aangezien de stroomsnelheid van 3 dm/s niet behaald wordt in de varianten van dit onderzoek is het een idee om dit in een verder onderzoek wel mee te nemen. Dit maakt dit onderzoek niet overbodig aangezien dezelfde sedimentatie zal optreden als het debiet wordt onttrokken dat in dit onderzoek is gebruikt.

Waar ook verder onderzoek naar gedaan kan worden is de versmalling van het Zwarte Schaar. Door het plaatsen van een schanskorfconstructie kan het dwarsprofiel verkleind worden waardoor er hogere stroomsnelheden zullen ontstaan. Door dit verder te onderzoeken kan dus straks blijken dat de huidige varianten wel kunnen voldoen aan de eis voor de stroomsnelheid door een versmalling van het Zwarte Schaar.

Wat ook een punt van aandacht is zijn de effecten die onderzocht zijn in dit onderzoek. Zoals vermeld in de discussie zijn er enkele aannames gemaakt. In een vervolgonderzoek wordt aangeraden deze aannames eruit te halen en de effecten nogmaals te bepalen. Dit zorgt er voor dat de uitkomsten betrouwbaarder zijn.

De gesprekken met de experts hebben vooral plaatsgevonden bij Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat is vooral bezig met de effecten op de rivier zelf. De omringende dijken van de IJssel behoren allemaal tot het Waterschap Rijn en IJssel. De effecten die kunnen plaatsvinden op de dijkkering zijn niet onderzocht. Een daling van de waterstand kan namelijk effecten hebben op de stabiliteit van de dijk. Dit zou in een vervolgonderzoek meegenomen kunnen worden.

BIBLIOGRAFIE

- Bruyn, J. (2016). Variant cultuur [Illustratie]. Geraadpleegd van:
https://projectextern.prvgld.nl/sites/rotra_ubbink/Documenten%20project/02%20Projectmanagement/02%20Plan%20van%20aanpak/20170202%20Plan%20van%20aanpak%20Koninklijke%20Rotra%20-%20Ubbink%20planfase%2031-01-2017.pdf
- Filatova, T. (2015). *Quantitative multi-criteria analysis*. University of Twente.
- Giverbo (2014), Klepstuw [Illustratie], Geraadpleegd van: <https://www.giverbo.nl/product-sort/4233/klepstuw>
- Google Earth (2017), Luchtfoto projectgebied [Illustratie], Geraadpleegd van: <https://www.google.nl/maps/place/Doesburg/@52.0185562,6.1083591,13z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x47c799ce515148e7:0xd5276a4582c42a92!8m2!3d52.0142878!4d6.1397816>
- Klop, E. R. (2009), Morfologische ontwikkelingen in nevengeulen: ontwerpparameters & sedimentbeheersende maatregelen, Universiteit Twente.
- Koninklijke Rotra en Ubbink, (2017). *Plan van Aanpak, planfase*. Ecopark IJsselvallei Doesburg.
- Microbial Life. (2007, 10 mei). *Manning roughness coefficient*. Geraadpleegd op 12 mei, 2017, van: <http://serc.carleton.edu/details/images/9159.html>
- Ministerie van Economische Zaken. (z.j.). *Rijntakken*. Geraadpleegd op 25 april, 2017, van <https://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx?subj=n2k&groep=5&id=n2k38&topic=introductie>
- Ministerie van Economische Zaken, (2008). *glanshaver- en vossenstaarthooilanden*, Natura 2000
- Ministerie van Economische Zaken, (2008). *Vochtige alluviale bossen*, Natura 2000
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). *Stroomgebiedbeheerplan Rijn 2016-2021*. Geraadpleegd op 21 juni 2017, van: www.helpdeskwater.nl/publish/pages/.../stroomgebiedbeheerplan_rijn_2016-2021.pdf
- Paarlberg, A. (2016). *Matlab model sedimentatie* [Databestand]. Arnhem: Rijkswaterstaat
- Petts, G.E. & Amoros, C. (1996). Fluvial Hydrosystems. [Illustratie]. Geraadpleegd van: https://www.helpdeskwater.nl/publish/.../cdr070-1_wtk_nevengeulen_single_lr.pdf
- Plattelandsvereniging HEI (2015), Overlaat [Illustratie]. Geraadpleegd van: http://hvdol.nl/database/product_info.php?products_id=14047
- Pyrce, M., Ritter, E. & Roberts, C. (g.j.). *Broad-Crested and Sharp-Crested Weirs*. Geraadpleegd op 12 mei, 2017, van: http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CIVE%20401/projects%202015/Broad-%20and%20Sharp-Crested%20Weirs.pdf
- Ribberink, J.S. & Hulscher, S.J.M.H. (2012). *River dynamics, Shallow- Water Flows*. University of Twente.

- Ribberink, J. (2006), Evenwichtssituatie ter plaatse van nevengeul [Illustratie]. Geraadpleegd van:
https://blackboard.utwente.nl/bbcswebdav/pid-864487-dt-content-rid-1711012_2/courses/2015-201400144-1A/2015-201400144-1A_ImportedContent_20150818040055/Syllabus%20Stroming.pdf
- Rijksoverheid (2009). *Waterwet*. Geraadpleegd op 22 april 2017, van:
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/waterwet/>
- Rijkswaterstaat. (z.j.). Actuele waterstanden t.o.v. NAP. Geraadpleegd op 25 april, 2017, van
<https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/rwsnl/awd.php?mode=html>
- Rijkswaterstaat (2015). Natura 2000 gebied Doesburg [Illustratie]. Geraadpleegd van:
<https://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/googlemapszoek.aspx>
- Rijkswaterstaat (2016). *Baseline Arcgis model* [Databestand]. Arnhem: Rijkswaterstaat
- Rijkswaterstaat (2016). *Indicatie verhanglijnen 2016 waterstandsduurlijn rkm* [Databestand].
 Arnhem: Rijkswaterstaat
- Rijkswaterstaat (2017). *Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Verkeer en leefomgeving*
- Rijkswaterstaat, (2017). *Samen werken aan waterkwaliteit*. Geraadpleegd van:
https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Brochure%20samen%20werken%20aan%20de%20waterkwaliteit_tcm21-86228.pdf
- Roosjen, R., Mosselman, E. van der Brugge, R., Barneveld, H. & Termes, P. (2013). *Praktische voorbeelden van sedimentsturing in de IJssel, aanzet tot plotprojecten op knelpunten*. Deltares & HKV Lijn in water.
- Schoor, M.M., Greijdanus, M., Geerling, G.W., Van Kouwen, L.A.H. & Postma, R. (2011). *Een nevengeul vol leven, handreiking voor een goed ecologisch ontwerp*. Rijkswaterstaat.
- Sieben, J. (2011). *Methodiek inschatting morfologische effecten in het zomerbed door lokale rivieringrepen*. Rijkswaterstaat.
- Stimular (2015), Duiker [Illustratie], Geraadpleegd van:
http://www.stimular.nl/nieuws/lca_voor_duiker_van_bergschenhoek_ct
- Ten Hagen, R. (2013), AHP, hoofdstructuur [Illustratie]. Geraadpleegd van:
https://nl.wikipedia.org/wiki/Analytisch_hi%C3%ABrarchisch_proces#/media/File:AHP_hoofdstructuur.jpg
- van der Sanden, G. J. (2010). *Gemaal Kamperveen, functioneren in situatie met Bypass*. Tauw, Witteveen + Bos & Royal Haskoning
- Van Heuvel, I. (1723). Kaart van de Fraterwaard ten noorden van Doesburg [Illustratie].
 Geraadpleegd van: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraterwaard_1723.jpg
- Van Putten, D. (2011). *Morfologisch modelleren van nevengeulen in 2D, Afstudeerverslag over verschillen tussen 2D-, 1D- en analytische resultaten*, Universiteit Twente.

van Rijn, C. L. (2011). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*.
Universiteit Utrecht & Deltares

VOBI Beton- en waterbouw (2013), Brug Deltares Delft [Illustratie], Geraadpleegd van:
<http://vobi.nl/projecten/list/1/bruggen/bruggen-en-viaducten/brug-deltares-delft>

Vree, J. De. (2017, 22 mei). *Afkalven*. Geraadpleegd van:
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/afkalven.shtml>

BIJLAGEN

BIJLAGE A



FIGUUR 18 FOTO VANAF DE DAM MET UIZICHT OP DE HAVEN



FIGUUR 19 FOTO VANAF DE OEVER MET UIZICHT OP HET ZWARTE SCHAAR

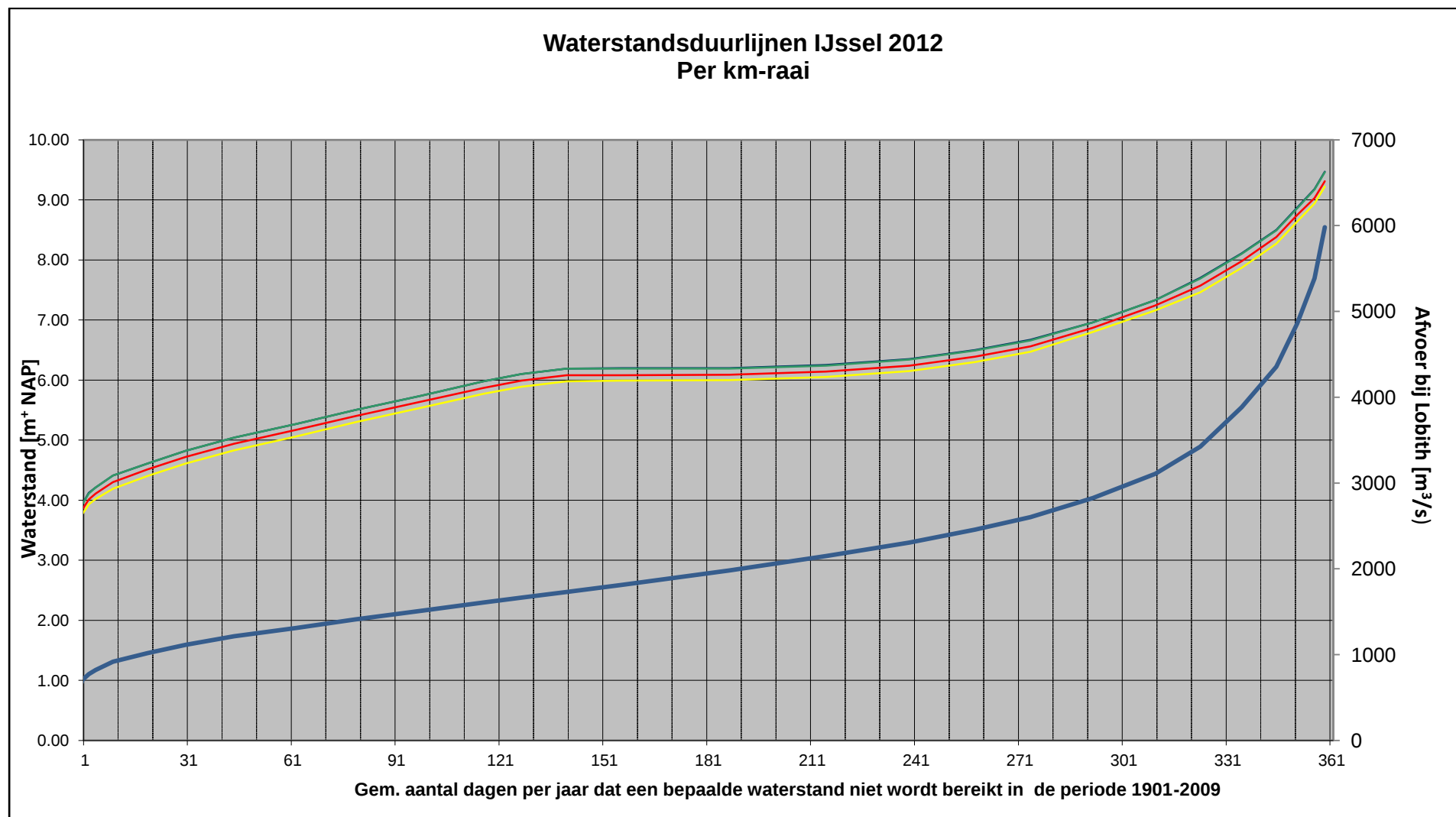


FIGUUR 20 FOTO VAN DE WEG OVER DE DAM



FIGUUR 21 FOTO VANAF DE ZIJKANT VAN DE DAM

BIJLAGE B



FIGUUR 22 WATERSTANDSLIJN IJSSEL (GROEN = DOESBURG BRUG, ROOD = 904KM, GEEL = 905KM EN BLAUW IS DE AFVOER BIJ LOBITH (RIJKSWATERSTAAT, 2016))

BIJLAGE C

Om de stroomsnelheid te bepalen in de haven en in het Zwarte Schaar moet eerst bepaald worden hoeveel debiet er richting het Zwarte Schaar stroomt. Het debiet dat richting het Zwarte Schaar zal gaan stromen kan berekend worden met de vergelijkingen van verhanglijnen. Een verhanglijn berekent de waterspiegelverloop over de lengte van de rivier. De methode die in dit verslag wordt gebruikt is de prediction-corrector methode (van Rijn, 2011). Voor die methode moeten eerst enkele variabelen bepaald worden. Dit zijn de Chézy coëfficiënt, het verhang, evenwichtsdiepte en de kritische diepte.

CHÉZY COËFFICIËNT

De formule die voor de Chézy coëfficiënt gehanteerd wordt is de volgende (Ribberink & Hulscher, 2012):

Chézy coëfficiënt: $C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}}$

Met:

C = coëfficiënt van Chézy	[m ^{1/2} /s]
n = mannings coëfficiënt	[$\frac{s}{m^{1/3}}$]
R = de hydraulische straal	[m]

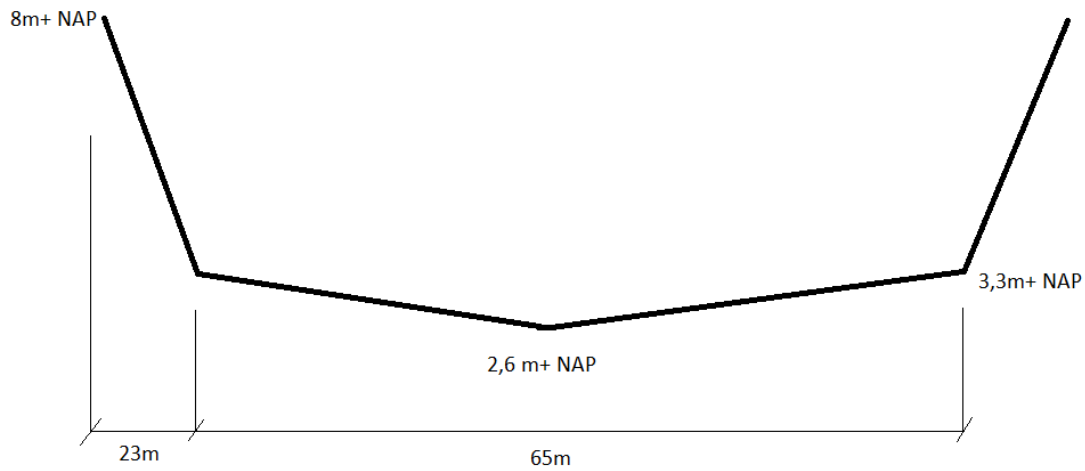
De mannings coëfficiënt moet bepaald worden voor de IJssel en voor het Zwarte Schaar. Voor de IJssel is deze bepaald op 0,025 en voor het Zwarte Schaar op 0,035 (Microbial life, 2007). De hydraulische straal kan berekend worden met de volgende formule (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$R = \frac{A}{P}$$

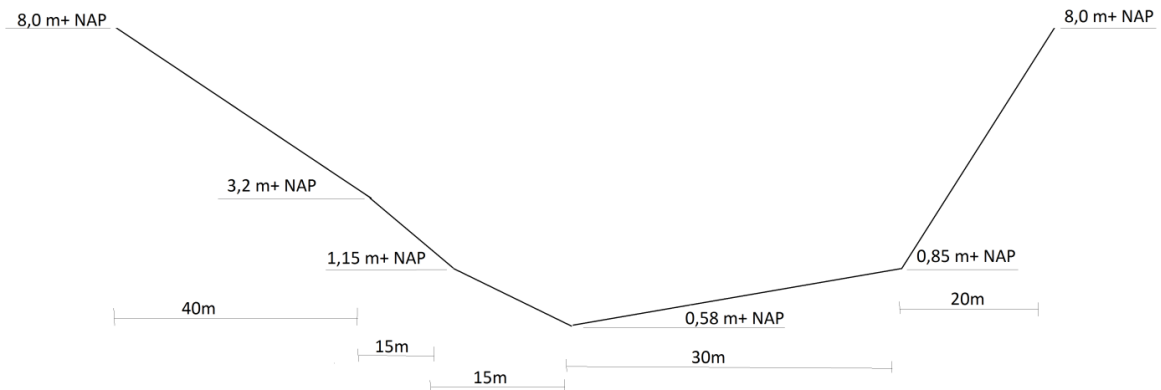
Met:

A = oppervlakte van de stroming	[m ²]
P = natte omtrek	[m]

Om de oppervlakte van de stroming en de natte omtrek te bepalen van de IJssel en het Zwarte Schaar is er een doorsnede van beide geulen nodig. Deze doorsneden kunnen bepaald worden doormiddel van het Arcgis bestand dat is aangeleverd door Rijkswaterstaat (2016). Dit Arcgis bestand bestaat uit een hoogtemodel van de omgeving van de IJssel en het Zwarte Schaar. De twee doorsneden in figuur 23 en 24 zijn gebruikt voor de berekeningen.



FIGUUR 23 DOORSNEDE HET ZWARTE SCHAAR



FIGUUR 24 DOORSNEDE IJSSEL

Wat ook een veel gebruikte methode is om de Chézy coëfficiënt uit te rekenen is e formule van Nikuradse . Deze formule ziet er als volgt uit (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$C = 18 \cdot \log \left(\frac{12R}{K_n} \right)$$

Hierin is K_n de Nikuradse equivalente korreldiameter [m]. Deze K_n moet eigenlijk zo constant mogelijk blijven bij berekeningen om de Chézy coëfficiënt te bepalen. De formule kan omgeschreven worden zodat de K_n bepaald kan worden en gekeken kan worden of deze constant blijft. De formule wordt als volgt omgeschreven:

$$\frac{C}{18} = \log \left(\frac{12R}{K_n} \right)$$

$$\frac{12R}{K_n} = 10^{\frac{C}{18}}$$

$$K_n = \frac{12R}{10^{\frac{C}{18}}}$$

Aan de hand van deze twee doorsneden en de waterstandduurlijn van Rijkswaterstaat (2016) in bijlage B kunnen de benodigde berekeningen uitgevoerd worden met Excel. Er wordt met de berekeningen geen rekening gehouden met het meestromen van de uiterwaarden. Er wordt een aanname gemaakt dat het profiel gewoon doorloopt volgens de schematisaties. De uitkomsten van de berekeningen zijn te zien in tabel 18.

TABEL 18 BEPALING CHÉZY COËFFICIËNT VAN DE IJSSEL EN HET ZWARTE SCHAAR

Afvoer Lobith	Gem. onderschr. 1901-2009	Afvoer IJssel	Waterstand KM-raai 905	Waterdiepte [m]		Het Zwarte Schaar N = 0.035 $\frac{s}{m^{1/3}}$					De IJssel N = 0.025 $\frac{s}{m^{1/3}}$				
[m3/s]	in dagen per jaar	[m3/s]	M+ NAP	Splitsing	Zwarte Schaar	A [m ²]	P [m]	R [m]	C [m1/2/s]	K _N [m]	A [m ²]	P [m]	R [m]	C [m1/2/s]	K _N [m]
679	0.49	105.245	3.71	3.13	1.11	74.16	68.37	1.08	28.96	0.32	124.23	66.84	1.86	44.35	0.077
698	0.78	108.19	3.76	3.18	1.16	77.65	68.78	1.13	29.16	0.33	127.53	66.99	1.90	44.53	0.077
735	1.49	113.925	3.84	3.26	1.24	83.24	69.43	1.20	29.45	0.33	132.87	67.28	1.97	44.80	0.077
773	2.28	119.815	3.93	3.35	1.33	89.53	70.17	1.28	29.76	0.34	138.96	67.64	2.05	45.10	0.077
821	4.07	127.255	4.02	3.44	1.42	95.82	70.90	1.35	30.04	0.35	145.14	67.99	2.13	45.39	0.077
918	9.94	142.29	4.19	3.61	1.59	107.71	72.29	1.49	30.53	0.36	157.05	68.66	2.29	45.91	0.077
1016	19.24	157.48	4.40	3.82	1.8	122.38	74.01	1.65	31.07	0.37	172.21	69.49	2.48	46.53	0.077
1114	30.69	172.67	4.61	4.03	2.01	137.06	75.73	1.81	31.54	0.38	187.86	70.32	2.67	47.12	0.077
1213	44.58	188.015	4.83	4.25	2.23	152.44	77.53	1.97	31.98	0.39	204.78	71.18	2.88	47.70	0.077
1312	62.07	203.36	5.06	4.48	2.46	168.51	79.41	2.12	32.39	0.40	223.05	72.09	3.09	48.29	0.077
1411	79.5	218.705	5.30	4.72	2.7	185.29	81.37	2.28	32.77	0.41	242.73	73.04	3.32	48.86	0.077
1510	98.49	234.05	5.54	4.96	2.94	202.06	83.34	2.42	33.12	0.42	263.05	73.98	3.56	49.42	0.077
1608	116.34	249.24	5.77	5.19	3.17	218.14	85.22	2.56	33.42	0.43	283.13	74.89	3.78	49.93	0.076
1665	127.54	258.075	5.89	5.31	3.29	226.52	86.20	2.63	33.56	0.43	293.83	75.36	3.90	50.18	0.076
1730	140.2	268.15	5.98	5.4	3.38	232.81	86.94	2.68	33.67	0.43	301.97	75.72	3.99	50.37	0.076
1813	156.17	281.015	5.99	5.41	3.39	233.51	87.02	2.68	33.68	0.43	302.88	75.76	4.00	50.39	0.076
1981	187.5	307.055	6.00	5.42	3.4	234.21	87.10	2.69	33.69	0.43	303.79	75.80	4.01	50.41	0.076
2148	215.01	332.94	6.05	5.47	3.45	237.71	87.51	2.72	33.75	0.43	308.36	75.99	4.06	50.52	0.076
2307	239	357.585	6.15	5.57	3.55	244.70	88.33	2.77	33.86	0.44	317.58	76.39	4.16	50.72	0.076
2457	258.23	380.835	6.30	5.72	3.7	255.18	89.55	2.85	34.02	0.44	331.62	76.98	4.31	51.02	0.076
2602	274.16	403.31	6.47	5.89	3.87	267.06	90.94	2.94	34.19	0.44	347.83	77.65	4.48	51.36	0.075
2824	292.87	437.72	6.80	6.22	4.2	290.13	93.64	3.10	34.50	0.45	380.22	78.95	4.82	51.98	0.075
3108	310.16	481.74	7.16	6.58	4.56	315.29	96.59	3.26	34.80	0.46	416.93	80.37	5.19	52.63	0.074
3423	323.69	530.565	7.46	6.88	4.86	336.26	99.04	3.40	35.03	0.46	448.62	81.55	5.50	53.15	0.074
3882	335.98	601.71	7.87	7.29	5.27	364.91	102.39	3.56	35.31	0.47	493.55	83.17	5.93	53.82	0.073

4357	345.41	675.335	8.27		7.69	5.67		392.87	105.67	3.72	35.56	0.47		539.18	84.74	6.36	54.45	0.072
4859	351.71	753.145	8.64		8.06	6.04		418.73	108.69	3.85	35.77	0.48		582.96	86.20	6.76	55.01	0.071
5384	356.22	834.52	8.94		8.36	6.34		439.70	111.15	3.96	35.93	0.48		619.58	87.38	7.09	55.44	0.071
5982	359.7	927.21	9.22		8.64	6.62		459.27	113.44	4.05	36.07	0.48		654.65	88.49	7.40	55.84	0.070
6577		1019.435	9.45		8.87	6.85		475.35	115.32	4.12	36.18	0.48		684.12	89.39	7.65	56.15	0.070
7263		1125.765	9.58		9	6.98		484.43	116.38	4.16	36.24	0.48		701.03	89.91	7.80	56.33	0.069
8162		1265.11	9.77		9.19	7.17		497.71	117.94	4.22	36.32	0.49		726.08	90.65	8.01	56.58	0.069
9215		1428.325	10.10		9.52	7.5		520.78	120.63	4.32	36.46	0.49		770.55	91.96	8.38	57.01	0.068
10425		1480.83333	10.25		9.67	7.65		531.26	121.86	4.36	36.52	0.49		791.17	92.55	8.55	57.20	0.068
11796		1709.33333	10.50		9.92	7.9		548.73	123.91	4.43	36.61	0.49		826.07	93.53	8.83	57.51	0.068
13327		1964.5	10.69		10.11	8.09		562.01	125.46	4.48	36.68	0.49		853.07	94.28	9.05	57.74	0.067

BODEMVERHANG

Naast de Chézy coëfficiënt moet ook het verhang van beide geulen bekend zijn. Het Zwarte Schaar heeft een verval van 12 cm over 5,4 km, dit komt neer op een bodemverhang van $2,22 \cdot 10^{-5}$. De IJssel heeft een verval van 12cm over 1,6 km, dit komt neer op een bodemverhang van $7,5 \cdot 10^{-5}$ (Rijkswaterstaat [databestand], 2016).

EVENWICHTSDIEPTE

De evenwichtsdiepte kan bepaald worden aan de hand van de volgende formule (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$h_e = \left(\frac{Q}{B \cdot C \cdot \sqrt{i}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Met:	h_e = evenwichtsdiepte	[m]
	Q = afvoer	[m ³ /s]
	B = breedte geul	[m]
	C = coëfficiënt van Chézy	[m ^{1/2} /s]
	i = bodemverhang	[-]

KRITISCHE WATERDIEPTE

De kritische waterdiepte is de waterdiepte is gelijk aan de waterdiepte aan het einde van het kanaal. Op dit punt geldt dus dat $h_0 = h_c$. Dit is alleen het geval als het gaat over een milde helling. Er is sprake van een milde helling als het kritische bodemverhang groter is dan het werkelijke verhang. Dit ziet er als volgt uit (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$\text{Milde helling als } i_b < i_c$$

$$i_b = \text{werkelijk bodemverhang}$$

$$i_c = \text{kritisch bodemverhang}$$

De formule voor het kritisch bodemverhang ziet er als volgt uit (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$i_c = \frac{g}{C^2}$$

De hoogste Chézy coëfficiënt die bepaald is in tabel 18 is gelijk aan 57. Invullen in de formule geeft:

$$i_c = \frac{9,81}{57^2} \approx 0,003$$

Deze waarde is hoger dan het bepaalde bodemverhang hiervoor. Hierdoor wordt er dus geconcludeerd dat het hier om een milde helling gaat.

De kritische waterdiepte kan berekend worden aan de hand van de volgende formule (Ribberink & Hulscher, 2012):

$$h_c = \left(\frac{q_w^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Met: h_c = kritische waterdiepte [m]

q_w = afvoer door geul per eenheid van breedte (specifieke afvoer) [m²/s]

g = zwaartekracht [m/s²]

De specifieke afvoer q_w kan eenvoudig berekend worden door het debiet wat door de geul gaat te delen door de breedte van de geul. Voor de breedte van de geul wordt voor de IJssel en voor het Zwarte Schaar 80 meter gehanteerd.

PREDICTION-CORRECTOR METHODE

De prediction-correcter methode is een numerieke benadering om de waterdiepte te bepalen. Voor een breed kanaal kan de verhanglijn worden opgesteld aan de hand van de volgende formule (van Rijn, 2011):

$$\frac{dh}{dx} = \left[\frac{h^3 - h_c^3}{h^3 - h_c^3} \right] i_b$$

Voor een kanaal met een willekeurige breedte (deze moet echter wel als een constante genomen worden) kan de verhanglijn bepaald worden met de volgende formule (van Rijn, 2011):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_b - \tau_b / (\rho g R)}{1 - (ab_s Q^2) / (g A^3)}$$

De schuifspanning op de bodem is gelijk aan (van Rijn, 2011):

$$\tau_b = \rho g u_*^2 / C^2 = \rho g Q^2 / C^2 A^2$$

Door deze formule van de schuifspanning in te vullen in de formule wordt de volgende formule verkregen (van Rijn, 2011):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_b - Q^2 / (C^2 A^2 R)}{1 - (ab_s Q^2) / (g A^3)}$$

De waterdiepte kan nu berekend worden aan de hand van de prediction-corrector methode. De Chézy coëfficiënt moet als een constante gezien worden. Het is de bedoeling dat de waterdiepte h_k op het punt x_k bekend is. Als dit het geval is dan kan de waterdiepte h'_{k+1} op punt x_{k+1} berekend worden met de volgende formule (van Rijn, 2011):

$$h'_{k+1} = h_k + (x_{k+1} - x_k) \left(\frac{dh}{dx} \right)_k$$

Vervolgens kan de corrector methode gebruikt worden om een betere inschatting te maken:

$$h_{k+1} = h_k + (x_{k+1} - x_k) \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{dh}{dx} \right)_k + \left(\frac{dh}{dx} \right)_{k'+1} \right\}$$

Aan de hand van deze twee formules van de prediction en de corrector kan de verhanglijn bepaald worden van zowel de IJssel als het Zwarte Schaar.

BEREKENINGEN

Alle varianten worden opgelost met dezelfde methode. Om te onderzoeken wat de effecten zijn, moeten de verhanglijnen tegen de stroomrichting in opgelost worden. In figuur 25 staan twee locaties aangegeven, km-raai 903 aan de bovenstroomse kant van de haven en km-raai 905 aan de bendenstroomse kant bij het punt van samenvoeging. Het startpunt van de verhanglijn is punt 2 en beide verhanglijnen worden opgelost tot aan punt 1. Dit betekent dus dat de verhanglijn door het Zwarte Schaar niet tot aan de dam wordt opgelost maar tot aan de IJssel. Dit is een versimpeling omdat er anders met drie verhanglijnen gerekend moet worden. Het is de bedoeling dat beide verhanglijnen dezelfde waterdiepte hebben bij punt 1, als dit het geval is dan betekent dit dat de goede oplossing is gevonden voor de afvoerverdeling tussen de IJssel en het Zwarte Schaar. Dit kan gedaan worden in Excel door gebruik te maken van de "goal-seeking methode". Als "goal" wordt er gesteld dat het waterdiepteverschil op punt 1 gelijk is aan 0 en dat dit gedaan moet worden door de afvoerverdeling steeds te veranderen. Op deze manier kan Excel dus het juiste antwoord vinden.



**FIGUUR 25 OPLOSSEN VERHANGLIJNEN
BEGIN EN EINDPUNT (GOOGLE EARTH, 2017)**

Als voorbeeld wordt de eerste stap van de berekening met de brug handmatig berekend voor de IJssel. Als aanname bij de berekening wordt aangenomen dat de breedte van zowel het Zwarte Schaar als de IJssel 80 m is.

Afvoer door de IJssel = $437 \text{ m}^3/\text{s}$

$q_w = 5,4525 \text{ m}^2/\text{s}$

$i = 0,000075$

Chézy = 51

$h_e = 6,212\text{m}$

$h_c = 1,584\text{m}$

$h_0 = 6,20\text{m}$

Stapgrootte = -40m

(deze afvoer is later nog nodig voor de berekening voor de sedimentatie van de variant brug)

Prediction 1:
$$h'_{x=40} = h_{x=0} + (-\Delta x) \left(\frac{dh}{dx} \right)_{x=0}$$

$$= 6,20 - (40) \left(\frac{6,20^3 - 6,212^3}{6,20^3 - 1,584^3} \right) 0,000075$$

$$= 6,20 + 1,77 \cdot 10^{-5} = 6.20002m$$

Corrector 1:
$$h_{x=40} = h_{x=0} + (-\Delta x) \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{dh}{dx} \right)_{x=0} + \left(\frac{dh}{dx} \right)'_{x=40} \right\}$$

$$= 6,20 - (40) \frac{1}{2} \left\{ \frac{6,20^3 - 6,212^3}{6,20^3 - 1,584^3} + \frac{6,20002^3 - 6,212^3}{6,20002^3 - 1,584^3} \right\} 0,000075$$

$$= 6,20 - (40) \frac{1}{2} \{-0,0059 - 0,0059\} 0,000075$$

$$= 6,20 + 1,77 \cdot 10^{-5} = 6.20002m$$

Deze stap wordt herhaald totdat de correcter methode punt 1 heeft bereikt en daar de waterdiepte bekend is. De verhanglijnen zijn opgelost voor de afvoeren die te vinden zijn in tabel 5 van hoofdstuk 3.3.

OVERLAAT

De drempel van de overlaat is gesteld op 5.27 m+ NAP, dit betekent dat deze minimaal 303 dagen per jaar meestroomt. Om het debiet te bepalen dat over de overlaat heen zal stromen is de volgende formule nodig (Pyrce et al., g.j.):

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_D \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = \text{Afvoer} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$C_D = \text{Afvoer coëfficiënt} \quad [-]$$

$$H = \text{Waterhoogte boven de drempel} \quad [\text{m}]$$

$$L = \text{Breedte van de drempel} \quad [\text{m}]$$

Wat er gebeurt is dat als er water onttrokken wordt uit de hoofdgeul de waterstand hier ook zal dalen. Dit betekent dus dat de berekende afvoer over de drempel eigenlijk niet klopt doordat de waterhoogte boven de drempel gezakt is. Daarom wordt de formule als volgt omgeschreven:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_D \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

$$H^{\frac{3}{2}} = \frac{Q}{\frac{2}{3} C_D \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g}}$$

$$H = \left(\frac{Q}{\frac{2}{3} C_D \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Door deze formule in het Excel script te zetten kan er weer gebruik gemaakt worden van de "goal-seeking methode". Er is namelijk een berekende waterhoogte over de drempel en er is een berekende waterhoogte over de drempel door de omschreven formule hierboven. Als goal wordt dan gezet dat het verschil tussen deze twee waterhoogtes gelijk is aan nul door de afvoerverdeling steeds te veranderen.

KLEPSTUW/DUIKER

Voor de klepstuw en de duiker zijn vaste onttrekkingen gekozen van 1%, 2%, 3% en een variant met 1% bij lage afvoer, 2% bij normale afvoer en 3% bij hoge afvoer ten opzichte van de IJsselaafvoer. Voor deze onttrekkingen kan de verhanglijn opgesteld worden door de afvoerverdeling tussen de IJssel en het Zwarte Schaar zo te kiezen dat deze overeenkomen met de gewenste percentages.

UITEINDELIJKE RESULTATEN

De uiteindelijke resultaten zijn weergegeven in tabel 6 in hoofdstuk 3.3.

BIJLAGE D

Er is een stappenplan opgesteld vanuit Rijkswaterstaat om de sedimentatie en erosie te bepalen aan de hand van vuistregels (Sieben, 2011). Dit stappenplan is opgebouwd met behulp van een computerprogramma dat veel gebruikt wordt binnen Rijkswaterstaat genaamd WAQUA. De eerste stap die beschreven wordt is de karakterisering van de maatregel. Twee afvoeren spelen hierbij een belangrijke rol:

- De drempelafvoer Q_{dr} (bij Lobith), dit is de afvoer waar de maatregel effectief invloed uitoefent op de hydraulica in het zomerbed.
- De afvoer Q_{bv} , dit is de afvoer waarbij de maatregel tot aan de rand stroomvoerend (bankvullend) is.

De volgende stap die voltooid moet worden is het bepalen van de drie verschillende afvoerblokken. Deze afvoerblokken bestaan uit een 'laagwater', 'hoogwater' en 'overgang tussen laag- en hoogwater' blok. Deze blokken kunnen bepaald worden aan de hand van figuur 26.

Van al deze blokken is de σ_i en de Δz_{ie} bekend na het volgen van figuur 26. σ_i zegt iets over de voortplantingsnelheid van de morfologische verandering en Δz_{ie} zegt iets over de grootte van het morfologisch effect. Met deze gegevens kan het morfologisch effect aan de bovenrand van de ingreep bepaald worden met behulp van de volgende formule:

$$z_i = z_i(0) + (z_{ie} - z_i(0))(1 - e^{-T/T_{mi}})$$

Met: z_i = Het morfologisch effect van ingrepen gedurende periode i [m]

$z_i(0)$ = Het morfologisch effect van ingrepen bij aanvang van periode i [m]

z_{ie} = De evenwichtswaarde van het morfologisch effect in periode i [m]

T_{mi} = De morfologische tijdschaal gedurende periode i [dagen]

De morfologische tijdschaal beschrijft de reactietijd van de bodemligging. Deze morfologische tijdschaal wordt vaak beschreven als $T=L/w$. Hierin is w de voortplantingssnelheid van de bodemveranderingen en hierin is L de lengte waarover deze bodemverandering van toepassing is. Deze wordt vaak als 2 keer de breedte van de hoofdgeul gezien.

Aan de hand van deze formule kan aan het eind van ieder afvoerblok het morfologisch effect bepaald worden.

$$z_{i+1}(0) = z_i(0)\sigma_i + z_{ie}(1 - \sigma_i) \quad \text{met} \quad \sigma_i = e^{-T/T_{mi}}$$

Als het jaarlijkse verloop (ook te zien in figuur 11) wordt weergegeven met behulp van de drie eerder bepaalde periode dan geldt het volgende:

$$z_2(0) = z_1(0)\sigma_1 + z_{1e}(1 - \sigma_1)$$

$$z_3(0) = z_2(0)\sigma_2 + z_{2e}(1 - \sigma_2)$$

$$z_1(0) = z_3(0)\sigma_3 + z_{3e}(1 - \sigma_3)$$

Hiermee kunnen de volgende karakteristieke bodemveranderingen gevonden worden:

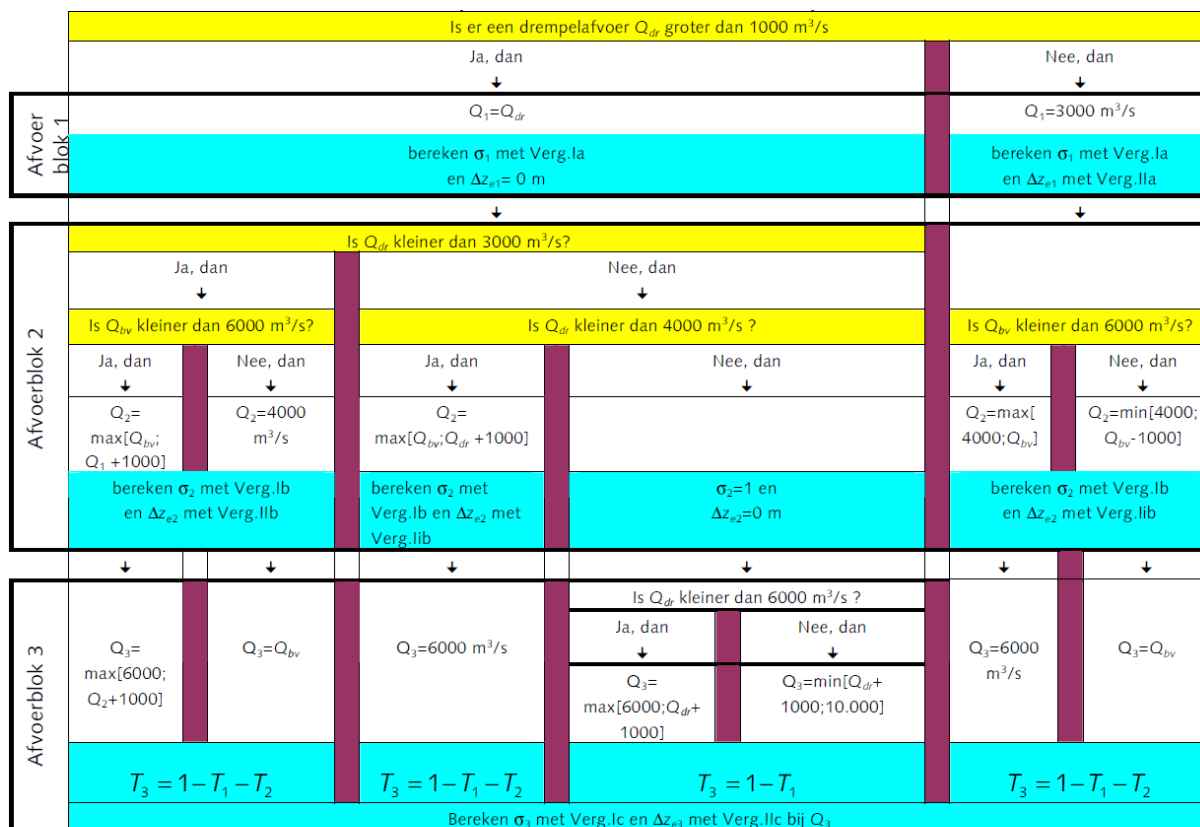
$$z_1(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1)\sigma_2\sigma_3 + z_{2e}(1 - \sigma_2)\sigma_3 + z_{3e}(1 - \sigma_3)}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

$$z_2(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1) + z_{2e}(1 - \sigma_2)\sigma_3\sigma_1 + z_{3e}(1 - \sigma_3)\sigma_1}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

$$z_3(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1)\sigma_2 + z_{2e}(1 - \sigma_2) + z_{3e}(1 - \sigma_3)\sigma_1\sigma_2}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

Jaargemiddelde waarde [m]

$$z_m = T_1 \cdot z_1(0) + T_2 \cdot z_2(0) + T_3 \cdot z_3(0)$$



$$\sigma_1 = e^{-\frac{w_l}{2B_n} T_1} \quad \text{met } T_1 = e^{\left(\frac{800 - Q_{stuw}}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800 - Q_1}{1280}\right)} \quad \text{en } w_l \text{ uit Tabel 4} \quad \text{Ia}$$

(met $Q_{stuw} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ in Nederrijn en Lek en $Q_{stuw} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de andere Rijntakken)

$$\sigma_2 = e^{-\frac{w_h}{2B_n} T_2} \quad \text{met } T_2 = e^{\left(\frac{800 - Q_1}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800 - Q_2}{1280}\right)} \quad \text{en } w_h \text{ uit Tabel 4} \quad \text{Ib}$$

$$\sigma_3 = e^{-\frac{w_h}{2B_n} T_3} \quad \text{met } w_h \text{ uit Tabel 4} \quad \text{Ic}$$

$$\Delta z_{1e} = -a_o \frac{q_n - q_o}{q_o} \quad \text{bij } Q_1 \text{ met WAQUA} \quad \text{IIa}$$

$$\Delta z_{2e} = -a_o \frac{q_n - q_o}{q_o} \quad \text{bij } Q_2 \text{ met WAQUA} \quad \text{IIb}$$

$$\Delta z_{3e} = -a_o \frac{q_n - q_o}{q_o} \quad \text{bij } Q_3 \text{ met WAQUA} \quad \text{IIc}$$

FIGUUR 26 AFVOERBLOKKEN BEPALEN

VOORBEELD BEREKENING HANDMATIG:

Vanuit de KRW wordt de eis gesteld dat de nevengeul minimaal 300 dagen mee stroomt met de hoofdgeul. Als er wordt gekeken naar de afvoeren en het gemiddelde aantal dagen in het jaar dat deze worden onderschreden wordt de afvoer van 1312 m³/s bij Lobith gehanteerd. Vanaf deze afvoer zal de nevengeul altijd meestromen. Er worden berekeningen gemaakt voor een afvoer onttrekking van 1%, 2% en 3%.

Stappenplan:

1. Karakterisering maatregel

$$Q_{dr} = 1312 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{bv} = 3423 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Afvoerblokken definiëren met figuur 26.

Blok 1

$$Q_1 = 1312 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\sigma_1 = e^{-\frac{W_L T_1}{2B_n}} \quad \text{Met } B_n = 80 \text{ m en } T_1 = e^{\left(\frac{800-Q_{stuw}}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800-Q_1}{1280}\right)} \quad \text{En } W_L = 1,31 \text{ (Sieben, 2011)}$$

$$Q_{stuw} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_1 = e^{\left(\frac{800-800}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800-1312}{1280}\right)} \approx 0,330$$

$$\sigma_1 = e^{-\frac{1310}{2 \cdot 80} 0,330} \approx 0,067$$

$$\Delta z_{1e} = 0 \text{ m}$$

Blok 2

$$Q_2 = 3423 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\sigma_2 = e^{-\frac{W_h T_2}{2B_n}} \quad \text{Met } T_2 = e^{\left(\frac{800-Q_1}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800-Q_2}{1280}\right)} \quad \text{En } W_h = 3,65 \text{ (Sieben, 2011)}$$

$$T_2 = e^{\left(\frac{800-1312}{1280}\right)} - e^{\left(\frac{800-3423}{1280}\right)} \approx 0,541$$

$$\sigma_2 = e^{-\frac{3650}{2 \cdot 80} 0,541} \approx 4,366 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta z_{2e} = -a_0 \frac{q_n - q_0}{q_0} \quad \text{Bij } Q_2$$

$$q_0 = 524 \text{ m}^3/\text{s}, q_n = 0,97 \cdot 524 = 508 \text{ m}^3/\text{s} \text{ en } a_0 = 7,12 \text{ m}$$

$$\Delta z_{2e} = -7,12 \cdot \frac{508-524}{524} \approx 0,217 \text{ m}$$

Blok 3

$$Q_3 = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\sigma_3 = e^{-\frac{W_h T_2}{2B_n}} \quad \text{Met } T_3 = 1 - T_1 - T_2$$

$$T_3 = 1 - 0,330 - 0,541 \approx 0,129$$

$$\sigma_3 = e^{-\frac{3650}{2 \cdot 80} 0,129} \approx 0,053$$

$$\Delta z_{3e} = -a_0 \frac{q_n - q_0}{q_0} \quad \text{Bij } Q_3$$

$$q_0 = 910 \text{ m}^3/\text{s}, q_n = 0,97 \cdot 910 = 883 \text{ m}^3/\text{s} \text{ en } a_0 = 8,89 \text{ m}$$

$$\Delta z_{3e} = -8,89 \cdot \frac{883 - 910}{910} \approx 0,264 \text{ m}$$

3. Berekening karakteristieke bodemverandering

Maximale waarde [m] aan het einde van het hoogwaterseizoen

$$z_1(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1)\sigma_2\sigma_3 + z_{2e}(1 - \sigma_2)\sigma_3 + z_{3e}(1 - \sigma_3)}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

$$= \frac{0 \cdot (1 - 0,067) \cdot 4,366 \cdot 10^{-6} \cdot 0,053 + 0,217 \cdot (1 - 4,366 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,053 + 0,264 \cdot (1 - 0,053)}{1 - 0,067 \cdot 4,366 \cdot 10^{-6} \cdot 0,053}$$

$$\approx 0,262 \text{ m}$$

Maximale waarde [m] aan het einde van het laagwaterseizoen

$$z_2(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1) + z_{2e}(1 - \sigma_2)\sigma_3\sigma_1 + z_{3e}(1 - \sigma_3)\sigma_1}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

$$z_2(0) = \frac{0 \cdot (1 - 0,067) + 0,217 \cdot (1 - 4,366 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,053 \cdot 0,067 + 0,264 \cdot (1 - 0,053) \cdot 0,067}{1 - 0,067 \cdot 4,366 \cdot 10^{-6} \cdot 0,053}$$

$$= 0,018 \text{ m}$$

Tussenwaarde [m] aan het einde van de overgang van laag- naar hoogwater

$$z_3(0) = \frac{z_{1e}(1 - \sigma_1)\sigma_2 + z_{2e}(1 - \sigma_2) + z_{3e}(1 - \sigma_3)\sigma_1\sigma_2}{1 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3}$$

$$z_3(0) = \frac{0 \cdot (1 - 0,067) \cdot 4,366 \cdot 10^{-6} + 0,217 \cdot (1 - 4,366 \cdot 10^{-6}) + 0,264 \cdot (1 - 0,053) \cdot 0,067 \cdot 4,366 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,067 \cdot 4,366 \cdot 10^{-6} \cdot 0,053}$$

$$= 0,217 \text{ m}$$

Jaargemiddelde waarde [m]

$$z_m = T_1 \cdot z_1(0) + T_2 \cdot z_2(0) + T_3 \cdot z_3(0)$$

$$z_m = 0,330 \cdot 0,262 + 0,541 \cdot 0,018 + 0,129 \cdot 0,217 = 0,124 \text{ m}$$

Voor onttrekking van 2%

$$\Delta z_{1e} = 0 \text{ m}$$

$$\Delta z_{2e} = -7,12 \cdot \frac{514-524}{524} \approx 0,148 \text{ m}$$

$$\Delta z_{3e} = -8,89 \cdot \frac{892-910}{910} \approx 0,176 \text{ m}$$

$$z_1(0) = 0,175 \text{ m}$$

$$z_2(0) = 0,012 \text{ m}$$

$$z_3(0) = 0,148 \text{ m}$$

$$z_m = 0,083 \text{ m}$$

Voor onttrekking van 1%

$$\Delta z_{1e} = 0 \text{ m}$$

$$\Delta z_{2e} = -7,12 \cdot \frac{519-524}{524} \approx 0,068 \text{ m}$$

$$\Delta z_{3e} = -8,89 \cdot \frac{901-910}{910} \approx 0,088 \text{ m}$$

$$z_1(0) = 0,087 \text{ m}$$

$$z_2(0) = 0,006 \text{ m}$$

$$z_3(0) = 0,088 \text{ m}$$

$$z_m = 0,041 \text{ m}$$

De rest van de berekeningen zijn allemaal uitgevoerd via Excel. Dit heeft de volgende antwoorden opgeleverd:

Variant dremepl 1m		
	ljsel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	6.26
blok 3	927.21	14.64
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.082650413	
z3e	0.138492268	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.135537355	
z2(0)	0.00911565	
z3(0)	0.082650096	
Zm	0.0602682	

Variant dremepl 2m		
	ljssel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	12.50
blok 3	927.21	29.24
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.164924838	
z3e	0.27655798	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.27065083	
z2(0)	0.018202791	
z3(0)	0.164924205	
Zm	0.120332778	

Variant dremepl 3m		
	ljssel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	18.72
blok 3	927.21	43.79
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.246990445	
z3e	0.414214902	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.405366098	
z2(0)	0.02726315	
z3(0)	0.246989497	
Zm	0.18022467	

Variant 1% onttrekking		
	ljsel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	5.30
blok 3	927.21	9.27
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.069925457	
z3e	0.087680137	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.086740626	
z2(0)	0.005833795	
z3(0)	0.06992518	
Zm	0.040764402	

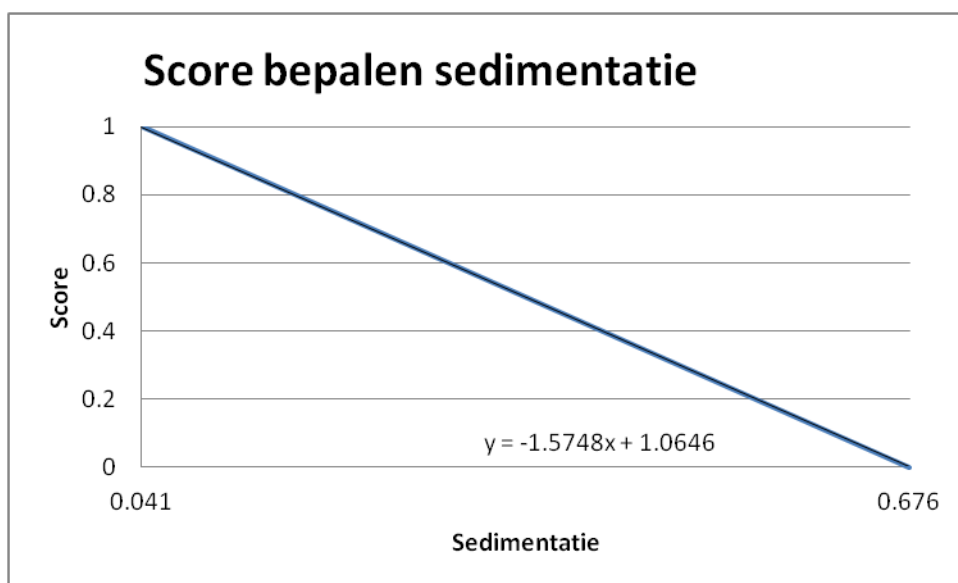
Variant 2% onttrekking		
	ljsel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	10.60
blok 3	927.21	18.54
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.139850914	
z3e	0.175360274	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.173481252	
z2(0)	0.01166759	
z3(0)	0.13985036	
Zm	0.081528804	

Variant 3% onttrekking		
	ljsel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	15.90
blok 3	927.21	27.81
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.20977637	
z3e	0.263040412	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.260221878	
z2(0)	0.017501385	
z3(0)	0.20977554	
Zm	0.122293206	

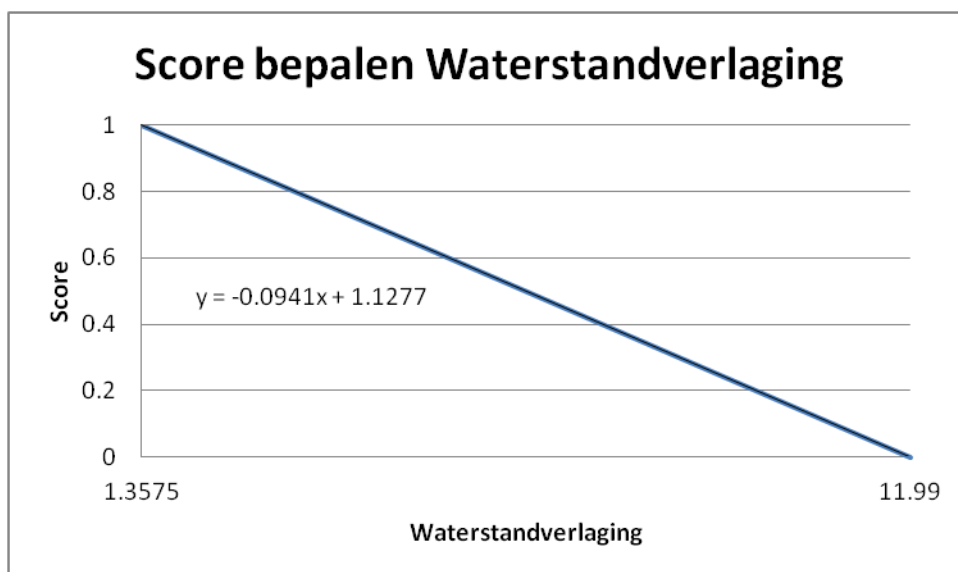
Variant 1-2-3% onttrekking		
	ljsel afvoer	Q onttrekking
blok 2	530.57	10.60
blok 3	927.21	27.81
Qdr	1312	
Qbv	3423	
Q1	1312	
Q2	3423	
Q3	6000	
z1e	0	
z2e	0.139850914	
z3e	0.263040412	
o1	0.067255625	
o2	4.31844E-06	
o3	0.052915434	
t1	0.329679954	
t2	0.541484529	
t3	0.128835517	
z1(0)	0.256521758	
z2(0)	0.017252531	
z3(0)	0.139850384	
Zm	0.111929757	

Variant Brug		
	Afvoer	Q onttrekking
blok 1	437.72	28.58448453
blok 2	601.71	45.08302365
blok 3	927.21	79.7986959
Qdr	0.00	
Qbv	3423	
Q1	3000	
Q2	4000	
Q3	6000	
z1e	0.408798	
z2e	0.555193	
z3e	0.754775	
o1	0.001207	
o2	0.108882	
o3	0.153729	
t1	0.82071	
t2	0.097205	
t3	0.082085	
z1(0)	0.721649	
z2(0)	0.409175	
z3(0)	0.539294	
Zm	0.676306	

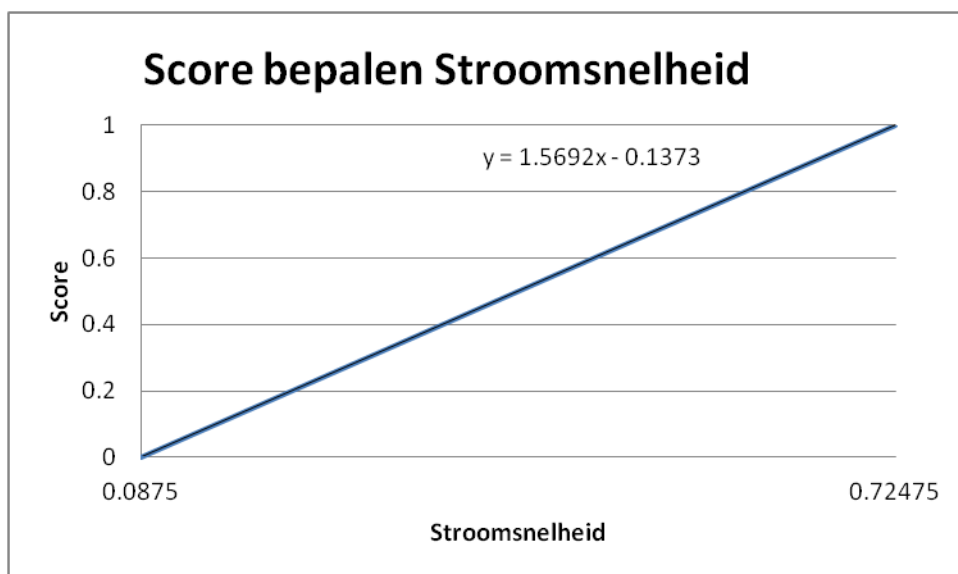
BIJLAGE E



FIGUUR 27 SCORE BEPALEN SEDIMENTATIE



FIGUUR 28 SCORE BEPALEN WATERSTANDVERLAGING



FIGUUR 29 SCORE BEPALEN STROOMSNELHEID

BIJLAGE F

Om het voorkeursalternatief verder uit te werken zijn het aantal duikers nodig en de oppervlakte hiervan. De oppervlakte van een enkele duiker is vastgesteld op 2,5 m². Om het debiet door een duiker te bepalen is de volgende formule van toepassing (van der Sanden, 2010):

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \max(0, \zeta_{intake} - \zeta_{outlet})}$$

$$Q = \text{Afvoer} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$A = \text{doorstroom oppervlakte van de duiker} \quad [\text{m}^2]$$

$$\mu = \text{Duiker verlies coëfficiënt} \quad [-]$$

$$g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\zeta_{intake, outlet} = \text{Waterhoogte inlaat en uitlaat} \quad [\text{m}]$$

Deze formule moet echter nog wel omgeschreven worden. De afvoer die door de duiker(s) heen moet is bekend. Dit is namelijk de 2% onttrekking uit de IJssel. De verlies coëfficiënt is een constante en die is vastgesteld op 0,9 (Pyrce et al., g.j.). Het verschil tussen de waterdiepte aan de kant van de inlaat en de uitlaat kan bepaald worden aan de hand van de verhanglijnen als er 2% wordt onttrokken. Hierna blijft er nog één onbekende over en dat is de oppervlakte. De formule wordt als volgt omgeschreven:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \max(0, \zeta_{intake} - \zeta_{outlet})}$$

$$\frac{Q}{A} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \max(0, \zeta_{intake} - \zeta_{outlet})}$$

$$A = \frac{Q}{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \max(0, \zeta_{intake} - \zeta_{outlet})}}$$

Aan de hand van deze omgeschreven formule kan het aantal duikers bepaald worden. De resultaten hiervan staan weergegeven in tabel 19.

TABEL 19 RESULTATEN DUIKER BEREKENING

Afvoer bij Lobith	Afvoer IJssel	Waterstand km-raai 903	Gem. onderschreiding	2% onttrekking IJssel	Oppervlakte	Oppervlakte/2.5	Aantal duikers
[m ³ /s]	[m ³ /s]	m+ NAP	in dagen per jaar	[m ³ /s]	[m ²]	[m ²]	
1411	218.705	5.88	79.50	4.3741	5.21	2.084	2
1510	234.05	6.12	98.49	4.681	5.57	2.228	2
1608	249.24	6.35	116.34	4.9848	5.93	2.372	2
1665	258.075	6.47	127.54	5.1615	6.14	2.456	2
1730	268.15	6.56	140.20	5.363	6.38	2.552	2
1813	281.015	6.57	156.17	5.6203	6.69	2.676	2
1981	307.055	6.58	187.50	6.1411	7.31	2.924	3
2148	332.94	6.63	215.01	6.6588	7.29	2.916	3
2307	357.585	6.73	239.00	7.1517	8.52	3.408	3
2457	380.835	6.88	258.23	7.6167	9.26	3.704	3
2602	403.31	7.05	274.16	8.0662	9.53	3.812	4
2824	437.72	7.38	292.87	8.7544	10.1	4.04	4
3108	481.74	7.74	310.16	9.6348	11.12	4.448	4
3423	530.565	8.04	323.69	10.6113	12.19	4.876	5
3882	601.71	8.45	335.98	12.0342	13.49	5.396	5
4357	675.335	8.85	345.41	13.5067	14.87	5.948	6
4859	753.145	9.22	351.71	15.0629	16.7	6.68	6
5384	834.52	9.52	356.22	16.6904	17.35	6.94	7
5982	927.21	9.80	359.70	18.5442	18.54	7.416	7
6577	1019.435	10.03		20.3887	19.06	7.624	7
7263	1125.765	10.16		22.5153	19.26	7.704	7
8162	1265.11	10.35		25.3022	20.39	8.156	8
9215	1428.325	10.68		28.5665	21.58	8.632	8
10425	1480.833333	10.83		29.6166667	22.09	8.836	9
11796	1709.333333	11.08		34.1866667	22.28	8.912	9