



Frequentieanalyse schuifstanden Driel

Datum	9 februari 2024
Versie	1.1
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door Rijkswaterstaat Oost Nederland
Auteur D.R. van Putten
Informatie
Telefoon +31615539660
Mobiel
E-mail daniel.van.putten@rws.nl

Datum 9 februari 2024
Versie 1.1
Status Definitief

Versiebeheer

0.9	10-09-2023	Eerste versie in RWS huisstijl
1.0	24-11-2023	Tekstuele correcties + aanvulling bijlage 'hydraulische parameters Driel'
1.1	09-02-2024	Enkele tekstuele correcties

Inhoud

Dit rapport beschrijft hoe vaak de vizierschuiven en de cilinderschuif bij stuw Driel op een bepaalde schuifstand staan en welke stroomsnelheid hiermee gepaard gaat.

Achtergrond van deze vraag is de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH). De KZH is als strategie benoemd voor de zoetwatervoorziening vanuit het hoofdwatersysteem en opgenomen in het Deltaprogramma. De strategie KZH draait om een optimalisering van de huidige zoetwaterstrategie: hoe kunnen we de rivierafvoer beter benutten door inzet van zoetwaterbuffers en -zones? Het programma KZH heeft de opdracht de strategie KZH uit te werken en lerend te implementeren. Voor het Rijnstroomgebied kijkt de KZH onder andere naar flexibilisering van het stuwbeheer van Driel. In dit kader wordt nagedacht over de mogelijkheid om vaker via Driel meer afvoer richting de Neder-Rijn door te laten. Bij kleine vervallen is hiervoor de cilinderschuif niet toereikend, en zal een vizierschuif op een kier moeten worden gezet. Het is mogelijk dat dit leidt tot een toename van de visschade van het stuwcomplex. Het beoordelen van de visschade valt buiten de scope van dit rapport. Wel levert dit rapport relevante gegevens aan over hoe vaak een bepaalde schuifstand voorkomt, en de daarbij behorende afvoeren, vervallen en stroomsnelheden. De focus ligt daarbij voornamelijk op de schuifstanden van vizierschuif, omdat hier de meeste visschade kan worden verwacht.

Voor het berekenen van deze gegevens is gebruik gemaakt van:

1. Afvoercoëfficiënten stuw Driel
2. Stuwprogramma
3. Afvoerwaterstandsrelatie Lobith
4. Afvoerstatistiek Lobith

In bijlage 1 'Afleiding hydraulische parameters Driel' is voor de vizierschuif en de cilinderschuif een afvoercoëfficiënt afgeleid, door analyse van gegevens uit logboeken. Op basis van een gegeven verval en afvoer kan via de afvoercoëfficiënt een schuifstand worden bepaald.

Door deze informatie te combineren met het stuwprogramma, is per waterstand bij Lobith een schuifstand bepaald.

De waterstand bij Lobith is via de vigerende afvoerwaterstandsrelatie omgezet naar een afvoer. Vervolgens is op basis van het deltasceario 'ref 2017' bepaald hoe vaak een bepaalde afvoer bij Lobith voorkomt. Omdat de schuifstand hieraan gekoppeld is, is het resultaat een frequentieanalyse hoe vaak een bepaalde schuifstand voorkomt.

Het resultaat is daarmee een beschrijving van het basisscenario: de huidige situatie qua stuwbeheer, klimaat en bodemligging. Om het effect van de veranderend stuwbeheer door de KZH te kunnen duiden is gekeken naar trendmatige veranderingen die reeds zijn opgetreden sinds het verleden of nog gaan optreden. Terugkijkend is een analyse gedaan naar de situatie van 1985. Drijvende kracht achter de veranderingen sinds deze periode is de erosie van het zomerbed. Vooruitkijkend is klimaatverandering en de hiermee gepaard gaande afvoerverandering van groot belang. Het scenario met de grootste verandering is Stoom2050. Ook voor dit scenario is een analyse gedaan naar inzetfrequenties van de objectmiddelen en de bijbehorende stroomsnelheden.

Ten slotte is ook gekeken naar een scenario van de KZH. Hierbij is een inschatting gemaakt onder welke omstandigheden er mogelijk afgeweken gaat worden van het normale stuwprogramma. Het is een inschatting omdat de uitwerking hiervan nog wordt onderzocht en onderbouwd in het programma KZH. Er is daarbij ook ingeschat hoe vaak een dergelijke afwijking gewenst is. Daarmee is bepaald hoeveel vaker een bepaalde schuifstand voorkomt.

1 Methode

Dit hoofdstuk beschrijft de drie belangrijkste invoergegevens: afvoercoëfficiënten, stuwprogramma en afvoerstatistiek. In de vierde paragraaf wordt ingegaan op de parameters die gebruikt zijn om de stroomsnelheid te bepalen.

1.1. Afvoercoëfficiënten vizierschuif en cilinderschuif

In bijlage 1 is voor de vizierschuif en de cilinderschuif de afvoercoëfficiënt afgeleid. Hiertoe is gebruik gemaakt van de logboeken uit de periode 2005-2010.

De afvoercoëfficiënt wordt gebruikt in de formule die een relatie weergeeft tussen afvoer, verval en schuifstand:

$$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

Met:

Q = afvoer (m³/s)

μ = afvoercoëfficiënt (-)

A = doorstroomoppervlak (m²)

g = zwaartekrachtversnelling (m/s²)

Δh = verval (m)

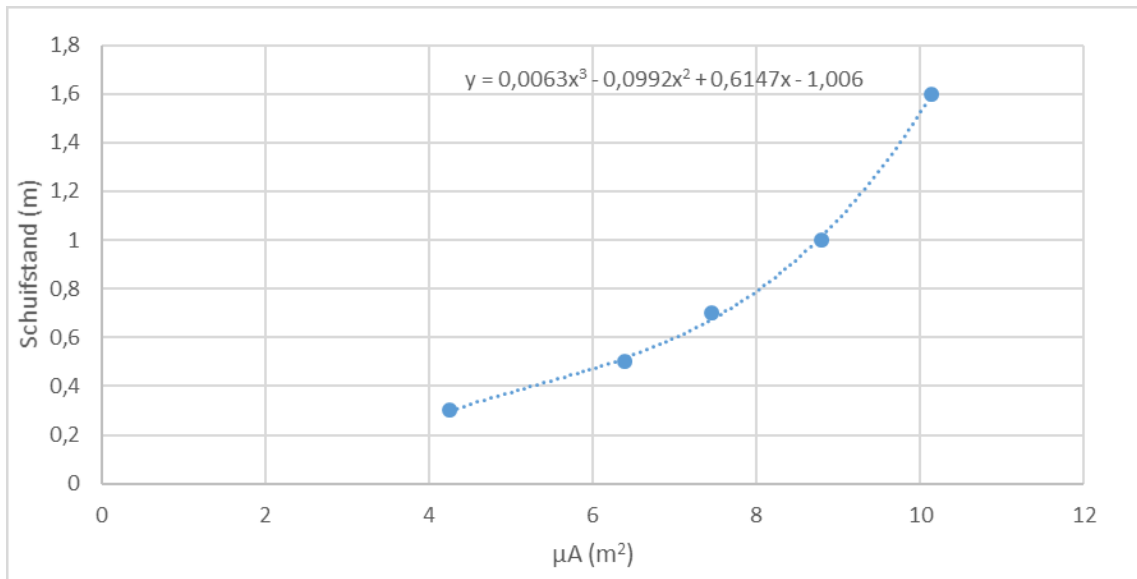
μA samen wordt ook wel het effectieve doorstroomoppervlak genoemd. Bij de afleiding in bijlage 1 is de effectieve breedte afgeleid ('μB'), welke vermenigvuldigd met de schuifstand leidt tot het effectieve doorstroomoppervlak.

Voor de vizierschuif is voor de effectieve breedte een waarde gevonden van 49,95m. Dit geldt voor een enkele vizierschuif, wanneer er 2 vizierschuiven gebruikt worden is de effectieve breedte tweemaal zo groot.

De afleiding van de afvoercoëfficiënt van de cilinderschuif bleek ingewikkeld. Voornamelijk omdat bij lagere vervallen de instroomhoogte van de cilinderbuis het instromen van water bemoeilijkt. Voorlopig zijn daarom voor 2 situaties de afvoercoëfficiënten afgeleid:

- Situatie 1 waar de schuifstand bepalend is
- Situatie 2 waar de instroomhoogte van de buis bepalend is

Voor de cilinderschuif was alleen een goede afleiding op te stellen voor situatie 1. Voor een verval van 230cm (maximaal bij Driel) is een relatie gevonden zoals weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: relatie schuifstand cilinderschuif en effectieve doorstroomoppervlak

Voor de situatie 2 waren onvoldoende metingen beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van de eenvoudige afleiding: een constante afvoercoëfficiënt van 0,85 met een doorstroomoppervlak van de waterdiepte boven de buis maal de omtrek van de buis (10,05 m).

1.2. Stuwprogramma

Met de hiervoor gevonden relaties tussen verval-debiet-schuifstand, is een schuifstand bepaald per waterstand bij Lobith. In het stuwprogramma is namelijk per waterstand Lobith een debiet bekend, en een verval te bepalen. Gecombineerd levert dit dan per waterstand Lobith een schuifstand op.

In het stuwprogramma is vastgelegd hoe stuw Driel bediend moet worden. Bij lagere afvoeren wordt er gestuurd op een minimumdebiet richting de Neder-Rijn, bij hogere afvoeren op een bepaalde waterstand bij IJsselkop. In het stuwprogramma zijn afvoeren en waterstanden per 10cm waterstand bij Lobith opgenomen. Uit het stuwprogramma zijn de volgende gegevens in deze studie gebruikt:

- De waterstand bij Lobith
- De afvoer naar de Neder-Rijn
- De waterstand bij Driel Boven

Om een verval te bepalen is aanvullend nog een waterstand bij Driel Beneden nodig. Deze is aangevuld op basis van de betrekkinglijnen 2018.

Daarnaast bleek het nodig het stuwprogramma uit te breiden bij extreem lage waterstanden. Het stuwprogramma loopt namelijk tot Lobith NAP +6,7m, terwijl dit zowel in 2018 als in 2022 is onderschreden. Er zijn daarbij een aantal keuzes gemaakt hoe het stuwprogramma hier weer te geven. Er is gekozen voor een minimum-afvoer van 15m³/s door te laten, aangezien dat ongeveer nodig is om aan de watervraag van het stuwpand Amerongen te voldoen. Qua waterstanden is ervoor gekozen om stuw Driel te openen wanneer Driel Boven gelijk is aan Driel Beneden. Dit is in de praktijk ook zo uitgevoerd in 2018. Overigens is in 2022 dit niet gedaan, waardoor het stuwpand Amerongen sterk wegzakte. Die situatie werd als onwenselijk beschouwd, en daarom is in deze studie uitgegaan van het openen van stuw Driel in deze situatie. In de praktijk wordt al iets eerder begonnen met het openen van Driel, namelijk op het moment dat het verval onder de 20cm zakt. Dit detail is niet opgenomen in onderstaande tabellen en analyse vanwege de eenvoud van de analyse en de verwachte beperkte impact op de resultaten.

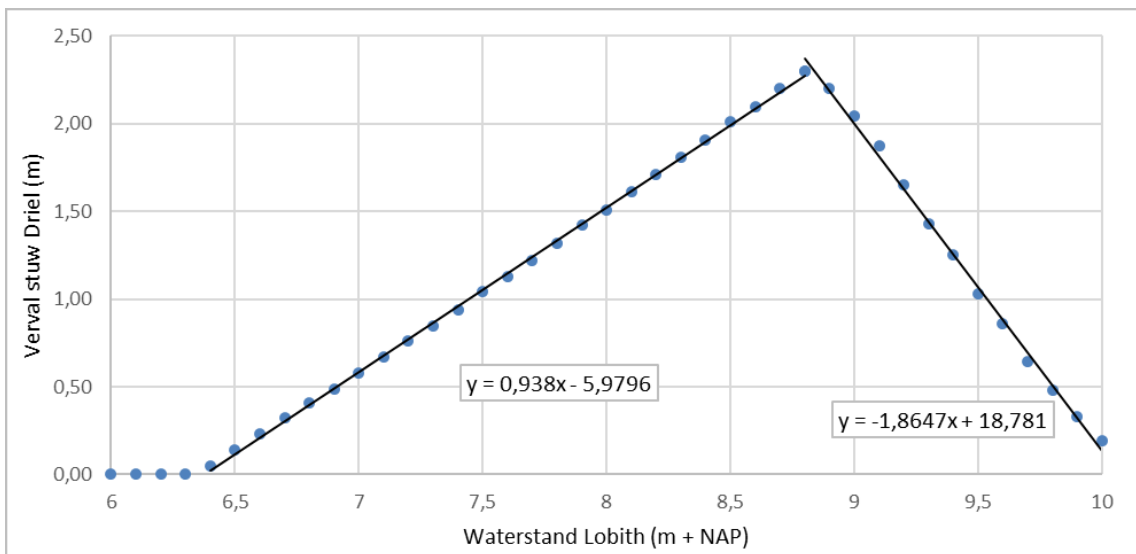
Met deze informatie is dus per waterstand Lobith een debiet en een verval bekend, zie tabel 1.

Tabel 1: Uitgebreid stuwprogramma inclusief verval

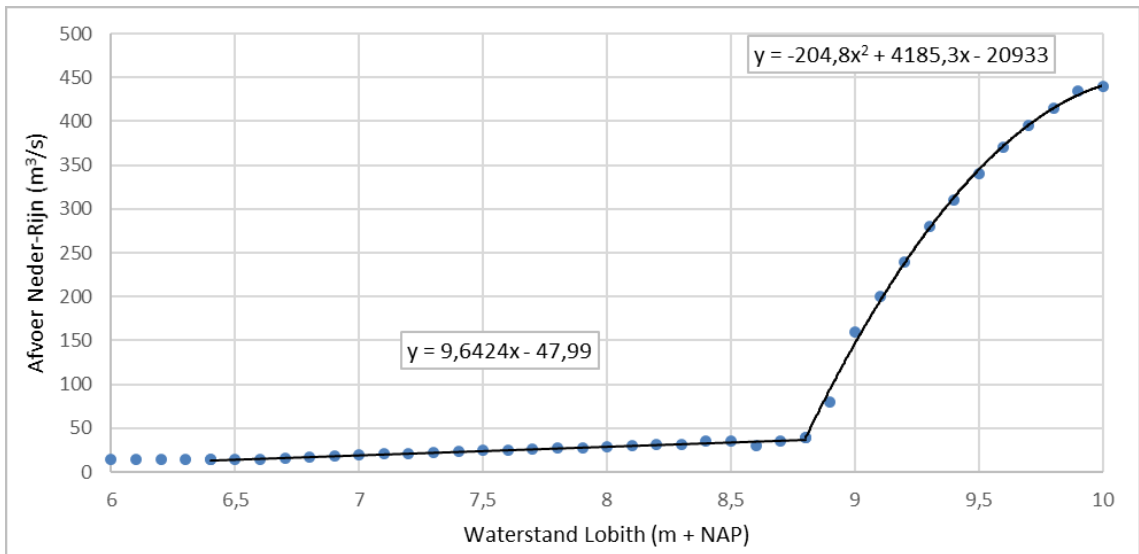
Waterstand Lobith (m + NAP)	Waterstand Driel Boven (m + NAP)	Debiet Neder-Rijn (m ³ /s)	Waterstand Driel Beneden (m + NAP)	Verval (m)
10	7,5	440	7,31	0,19
9,9	7,55	435	7,22	0,33
9,8	7,6	415	7,12	0,48
9,7	7,65	395	7,01	0,64
9,6	7,75	370	6,89	0,86
9,5	7,8	340	6,77	1,03
9,4	7,9	310	6,65	1,25
9,3	7,95	280	6,52	1,43
9,2	8,05	240	6,40	1,65
9,1	8,15	200	6,28	1,87
9	8,2	160	6,16	2,04
8,9	8,25	80	6,05	2,20
8,8	8,3	40	6	2,30
8,7	8,2	35	6	2,20
8,6	8,1	30	6	2,10
8,5	8,01	35	6	2,01

8,4	7,91	35	6	1,91
8,3	7,81	32	6	1,81
8,2	7,71	31	6	1,71
8,1	7,61	30	6	1,61
8	7,51	29	6	1,51
7,9	7,42	28	6	1,42
7,8	7,32	27	6	1,32
7,7	7,22	26	6	1,22
7,6	7,13	25	6	1,13
7,5	7,04	24	6	1,04
7,4	6,94	23	6	0,94
7,3	6,85	22	6	0,85
7,2	6,76	21	6	0,76
7,1	6,67	20	6	0,67
7	6,58	19	6	0,58
6,9	6,49	18	6	0,49
6,8	6,41	17	6	0,41
6,7	6,32	16	6	0,32
6,6	6,23	15	6	0,23
6,5	6,14	15	6	0,14
6,4	6,05	15	6	0,05
6,3	5,96	15	5,96	0,00
6,2	5,87	15	5,87	0,00
6,1	5,78	15	5,78	0,00
6	5,69	15	5,69	0,00

Voor meer detail zijn de waardes geïnterpoleerd naar waardes per cm Lobith, hiervoor zijn formules afgeleid conform figuur 2 en figuur 3.

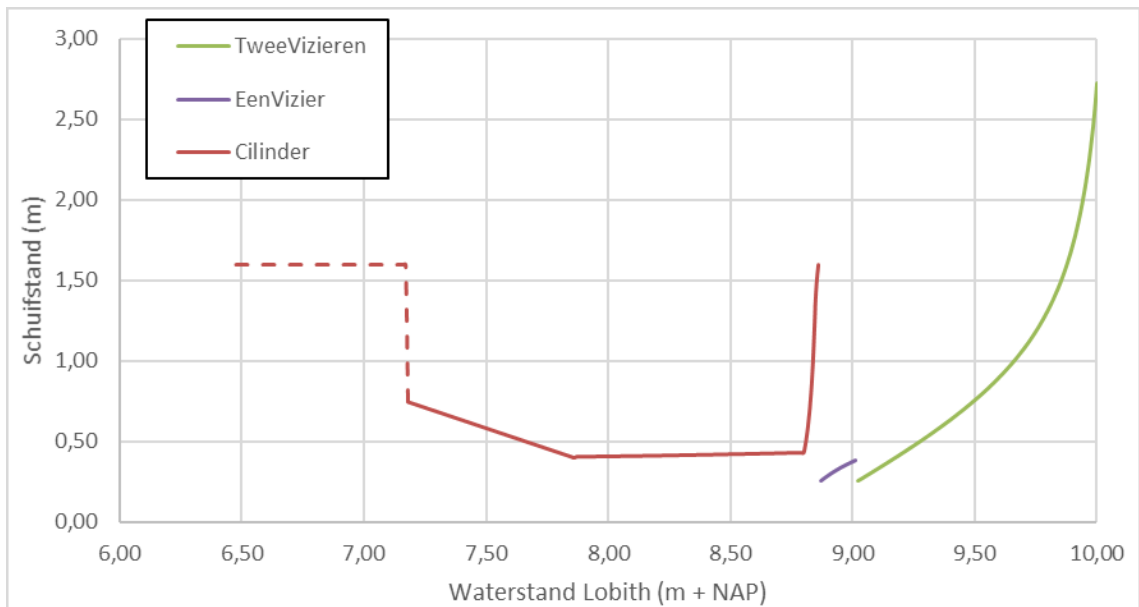


Figuur 2: relatie waterstand Lobith - verval inclusief formules. Snijpunt ligt bij NAP + 8,83 m. Bij waterstanden < NAP +6,4 m is het verval 0.



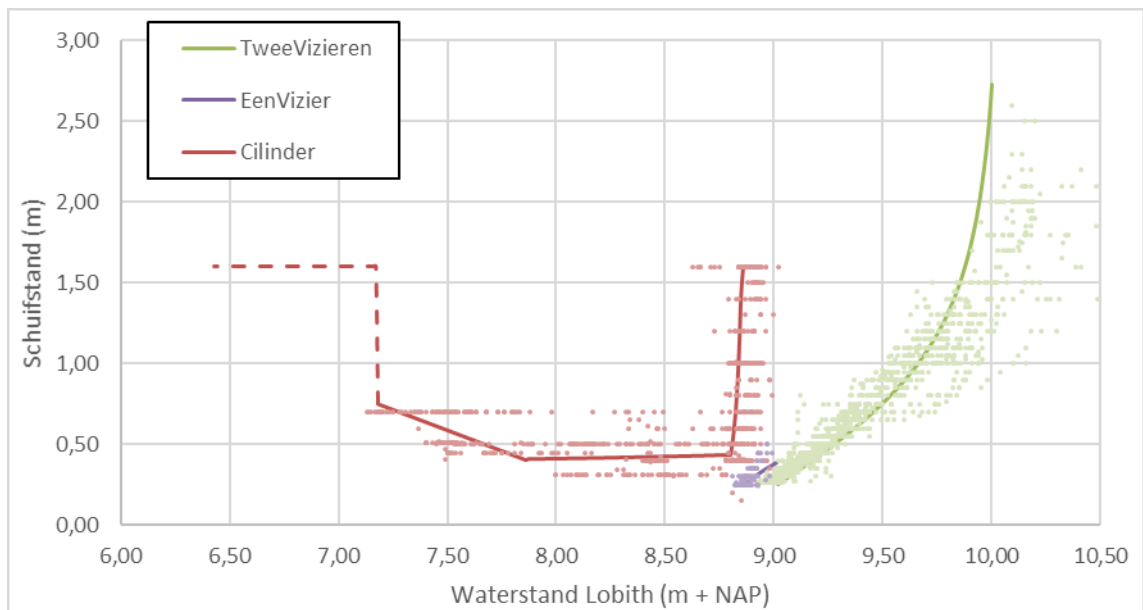
Figuur 3: relatie waterstand Lobith - afvoer Neder-Rijn inclusief formules. Snijpunt ligt bij NAP + 8,8 m. Bij waterstanden < NAP +6,4 m is de afvoer 15m³/s.

Op deze wijze zijn per cm Lobith debiet en verval bekend, en dit is omgezet naar schuifstanden met de eerder gevonden relaties op basis van de logboeken, zie figuur 4.



Figuur 4: Relatie schuifstand Driel bij een waterstand Lobith

Ter verificatie is deze figuur naast de logboeken (2005-2010) gelegd. Dit levert figuur 5 op.



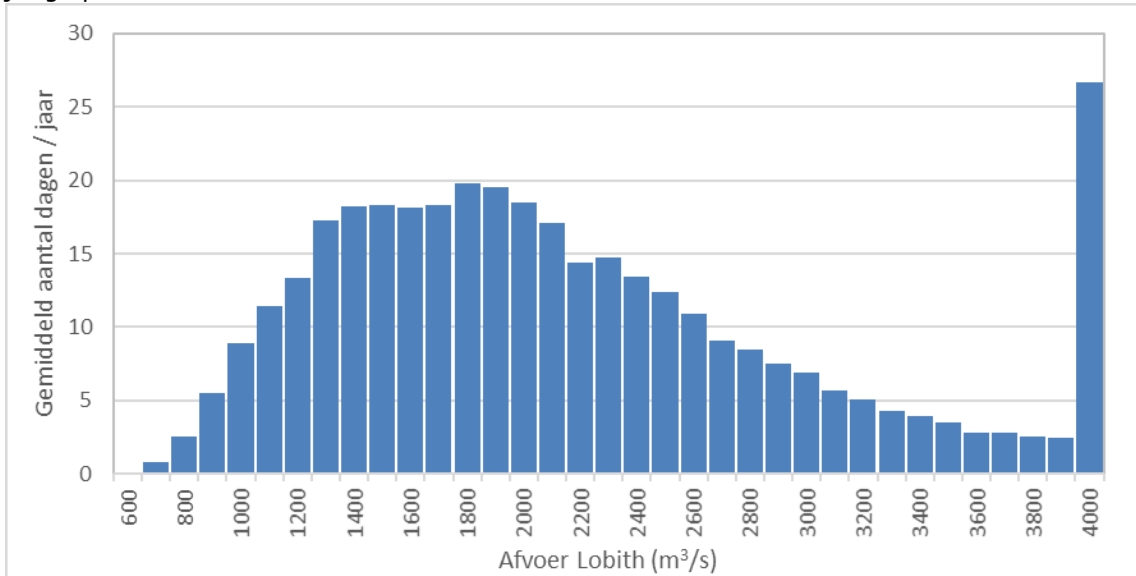
Figuur 5: Schuifstanden Driel bij een waterstand Lobith, logboek waarnemingen (punt) en theoretische afleiding (lijn)

Deze figuur laat zien dat de theoretische afleiding in het algemeen goed aansluit bij de praktijk, zoals beschikbaar in de logboeken. Opvallend is dat bij de hogere schuifstanden (twee vizierschuiven) er waarnemingen aanwezig zijn bij waterstanden hoger dan Lobith NAP +10 m. Dit heeft te maken met het precieze moment van opengaan. Dit wordt in de praktijk altijd overdag uitgevoerd in verband met de plotse waterstandseffecten. Hier kunnen gebruikers, zoals woonboten en scheepvaart, last van hebben. En daar wil men hen niet in het donker mee confronteren. Dit valt binnen de operationele vrijheid van de bediening. Het betekent dat in de praktijk men vaak iets later opent, waardoor het (bij stijgende afvoeren) bij een iets hogere waterstand Lobith plaatsvond. In het lage bereik zijn geen waarnemingen beschikbaar uit de periode 2005-2010. Blijkbaar zijn er in deze periode geen extreme laagwaters geweest.

1.3. Afvoerstatistiek Lobith

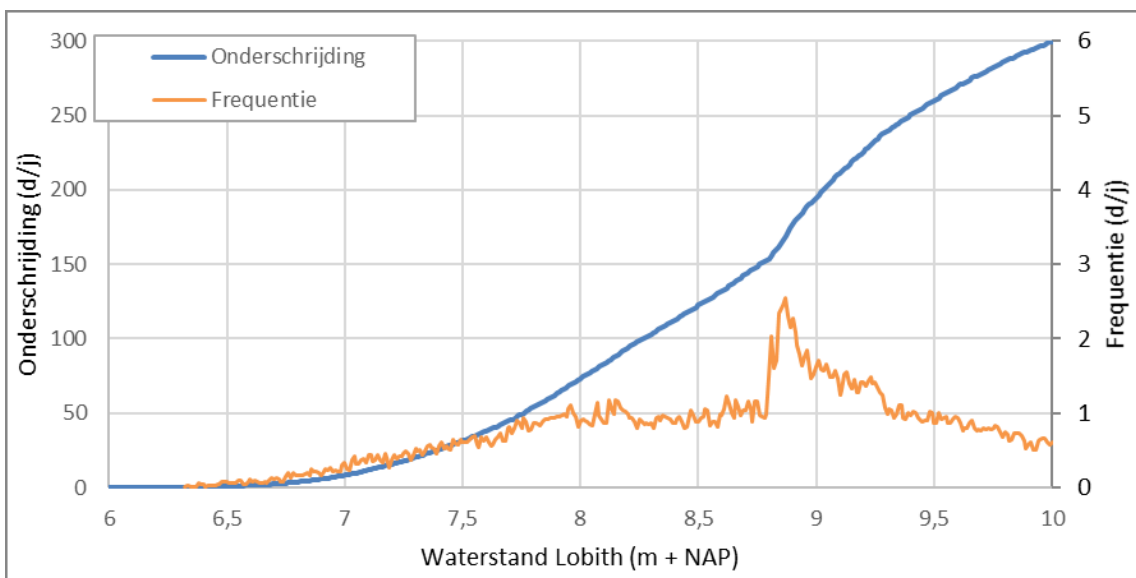
Om te bepalen hoe vaak een bepaalde schuifstand (gemiddeld) optreedt, is de afvoerstatistiek bij Lobith gekoppeld aan de hiervoor gevonden relatie tussen waterstand Lobith en schuifstand bij Driel.

Voor de afvoerstatistiek is gebruik gemaakt van het Deltascenario 'ref2017', zie figuur 6. Een scenario bevat zijn dagwaardes van de afvoer bij Lobith voor een 100-jarige periode.



Figuur 6: Afvoerstatistiek bij Lobith obv Deltascenario ref2017

Met behulp van de afvoer-waterstandsrelatie bij Lobith is de afvoerreeks omgezet naar een waterstandsreeks, zie figuur 7. Dit is nodig omdat het stuwprogramma en de daarbij gevonden schuifstanden zijn gebaseerd op waterstanden Lobith. Er is gebruik gemaakt van de stationaire afvoerwaterstandsrelatie inclusief stuwwerking en bodemtrendcorrectie tot 1-1-2023.



Figuur 7: frequentie en onderschrijding van waterstanden bij Lobith

Opvallend is dat de waterstanden rond NAP + 8,8 m relatief vaak voorkomen. Deze waterstanden zijn rond de mediane afvoer bij Lobith, dus het is niet geheel onverwacht. Toch valt het hier veel meer op dan bij de frequentie van Lobith afvoeren, waar deze uitschieter niet voorkomt. De oorzaak hiervan is dat in dit bereik stuw Driel de waterstand bij IJsselkop constant houdt, en dit effect deels ook doorwerkt tot bij Lobith. In dit bereik zorgt een afvoertoename bij Lobith dus tot een beperkte waterstandstoename bij Lobith, waardoor deze waterstanden relatief vaker voorkomen.

De laatste stap voor het bepalen van de frequentie van schuifstanden is het combineren van de frequentie van waterstanden bij Lobith met de relatie tussen waterstanden Lobith en de schuifstanden. De resultaten hiervan zijn voor verschillende scenario's in volgende hoofdstuk opgenomen.

1.4. Stroomsnelheden

Ten behoeve van de impact op vissterfte zijn ook de stroomsnelheden bij het stuwcomplex bepaald. Er is steeds gebruik gemaakt van de formule:

$$v = Q/A \quad (2)$$

Met:

v = stroomsnelheid (m/s)

Q = debiet (m³/s)

A = doorstroomoppervlak (m²)

Dit is gedaan voor vier locaties:

1. Onder de cilinderschuif
2. Bij de instroom van buis van de cilinderschuif
3. Bij de uitstroom van de cilinderschuif
4. Onder de vizierschuif

Ad 1)

De buis van de cilinderschuif heeft bij de instroom een diameter van 3,2m. Zolang de cilinderschuif in het water hangt (en dus stuwt), is het minimale doorstroomoppervlak gelijk aan de omtrek buis (10,05m) maal de schuifstand.

Ad 2)

Wanneer de waterstand aan de bovenstroomse zijde lager is dan cilinderschuif, is de instroomhoogte van de buis bepalend voor het maximaal door te laten debiet. Dit treedt op bij extreem laagwater. In dat geval is het minimale doorstroomoppervlak gelijk aan de omtrek van de buis (10,05m) maal waterhoogte boven instroomhoogte.

Ad 3)

De uitstroom bestaat uit 2 rechthoekige profielen van in totaal 16m².

Ad 4)

Voor de vizierschuif was het minder eenvoudig om een doorstroomoppervlak te bepalen. De vizierschuif is immers een halfronde boog, met een diameter van 55m. De ophangpunten bevinden zich echter in de constructie, waarbij de doorstroombreedte van de constructie 48m bedraagt. Bovendien kantelt de boog bij het opengaan, waardoor de hoogte niet uniform over de breedte beschikbaar is, en de effectieve lengte van de boog waar water onderdoor kan stromen afneemt bij het openen van de vizierschuif. Rekening houdend met deze factoren is voor diverse schuifstanden een doorstroomoppervlak bepaald. Daaruit is gebleken dat de verhouding schuifstand – doorstroomoppervlak constant is: proefondervindelijk is vastgesteld dat het doorstroomoppervlak verkregen kan worden door de schuifstand te vermenigvuldigen met 48m.

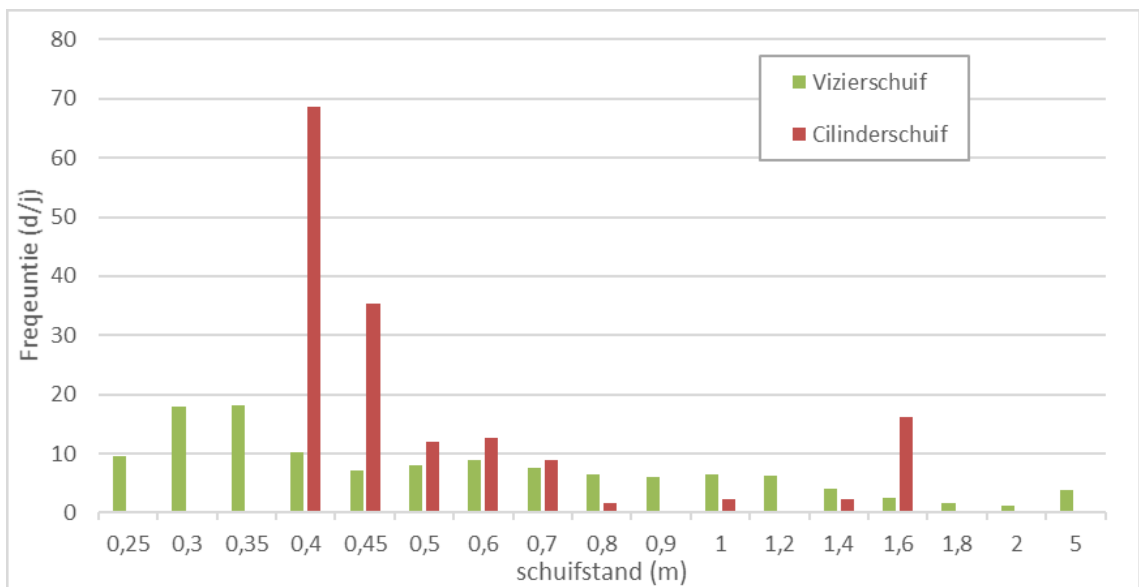
2 Resultaten

2.1. Huidige situatie

Bij de huidige situatie is gebruik gemaakt van:

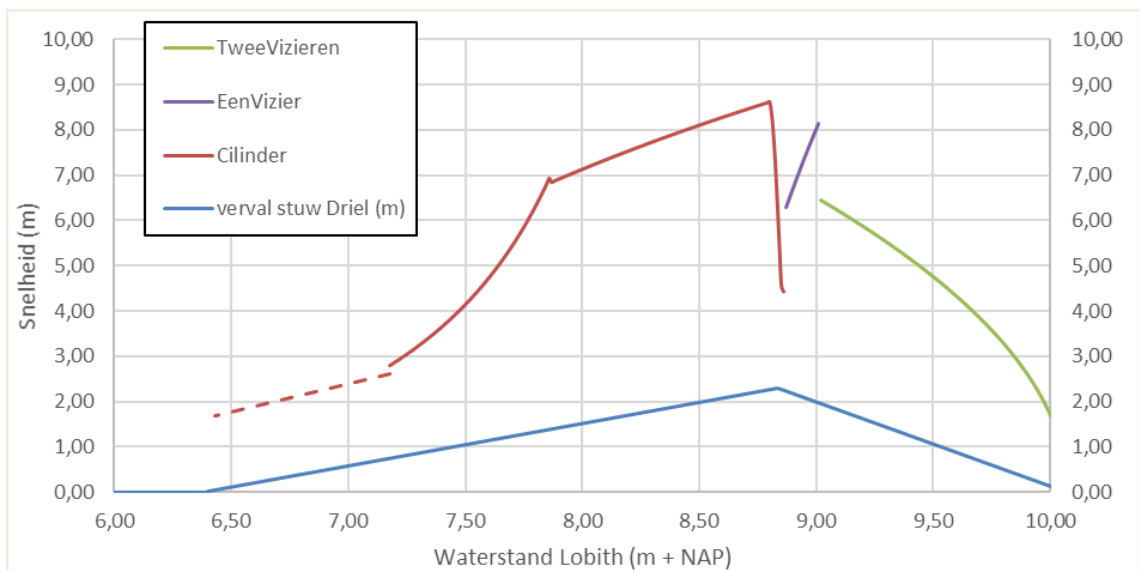
- Klimaatreeks ref 2017
- Afvoerwaterstandsrelatie 2023
- Stuwprogramma 2016

Dit leidt tot een frequentie van schuifstanden zoals weergegeven in figuur 8.

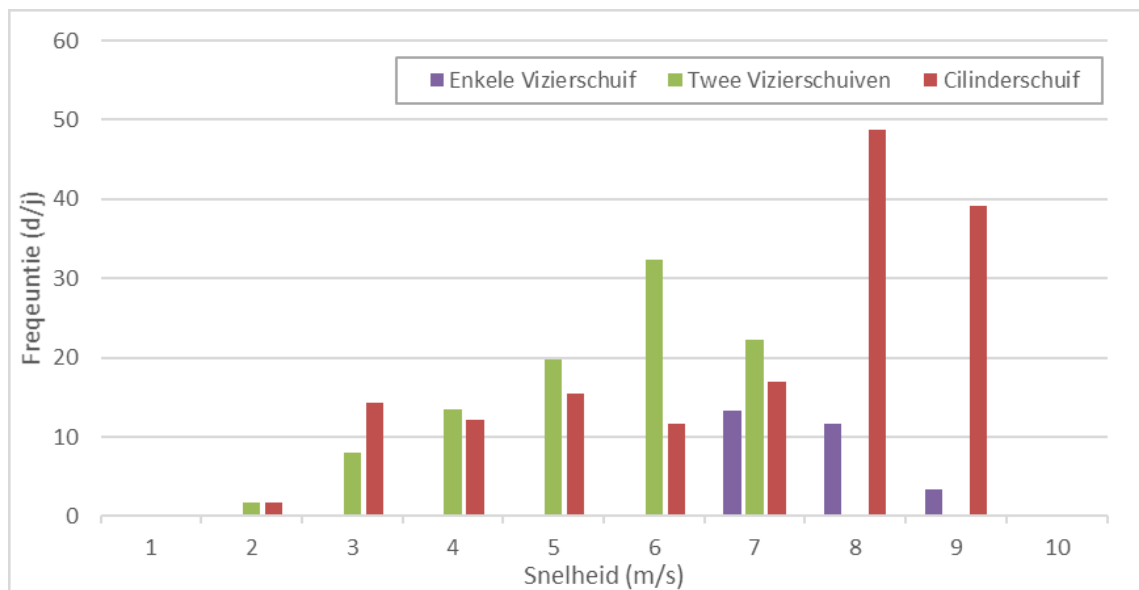


Figuur 8: frequentie schuifstanden huidige situatie

Bijbehorende stroomsnelheden zijn weergegeven per waterstand Lobith in figuur 9, en de frequentie in figuur 10.



Figuur 9: Stroomsnelheid per stuwonderdeel bij een gegeven waterstand Lobith. In blauw het verval over stuw Driel, geplot op de secundaire as.



Figuur 10: frequentie stroomsnelheden huidige situatie

2.2. Scenario bodem 1985

Dit scenario geeft inzicht in de ontwikkelingen in de laatste 40 jaar, waarbij het zomerbed van met name de Waal sterk is geërodeerd. Dit heeft 2 consequenties die bij Driel invloed hebben:

1. Dalende waterstanden
2. Verschuivende afvoerverdeling

Ad 1) door de bodemerosie dalen de waterstanden. En aangezien bij Driel gestuurd wordt op waterstanden (relatie Lobith – IJsselkop) heeft dit impact op het stuw. Aangezien er bij vrijwel gelijke waterstanden wordt gestuurd, treden dezelfde waterstanden tegenwoordig op bij hogere afvoeren.

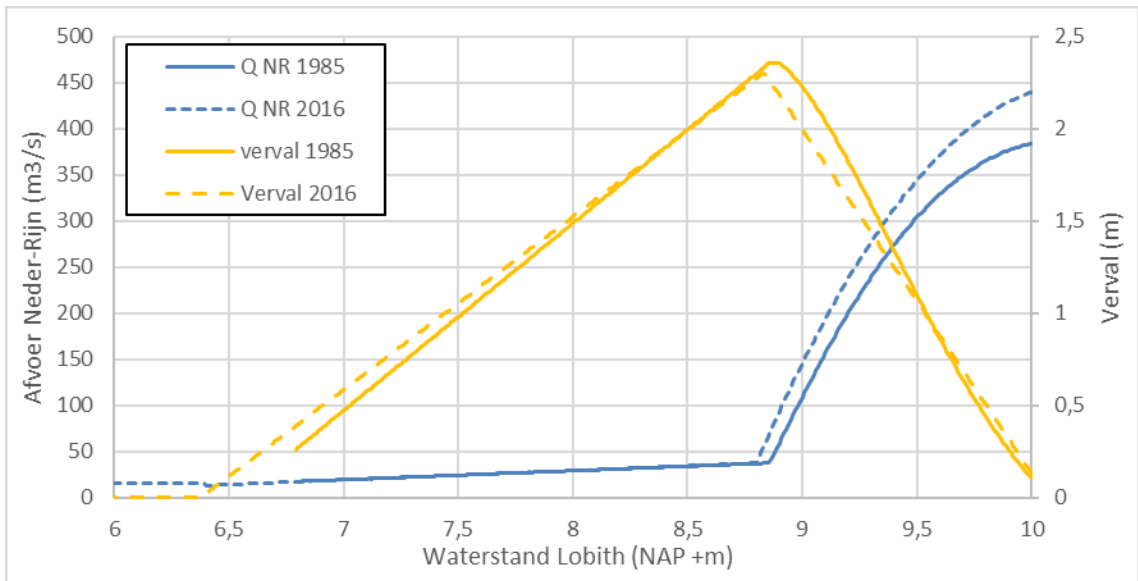
Ad 2) de bodemerosie verloopt niet evenredig over de takken. Hierdoor is er een trend dat de Waal steeds een beetje meer water ontvangt, wat ten koste gaat van de IJssel. Omdat er op een waterstand IJsselkop wordt gestuurd, is er een steeds hogere Lobith-afvoer nodig om hetzelfde IJssel-debiet (en IJsselkop waterstand) te realiseren.

Er is gebruik gemaakt van:

- Klimaatreeks ref 2017
- Stuwprogramma 1985

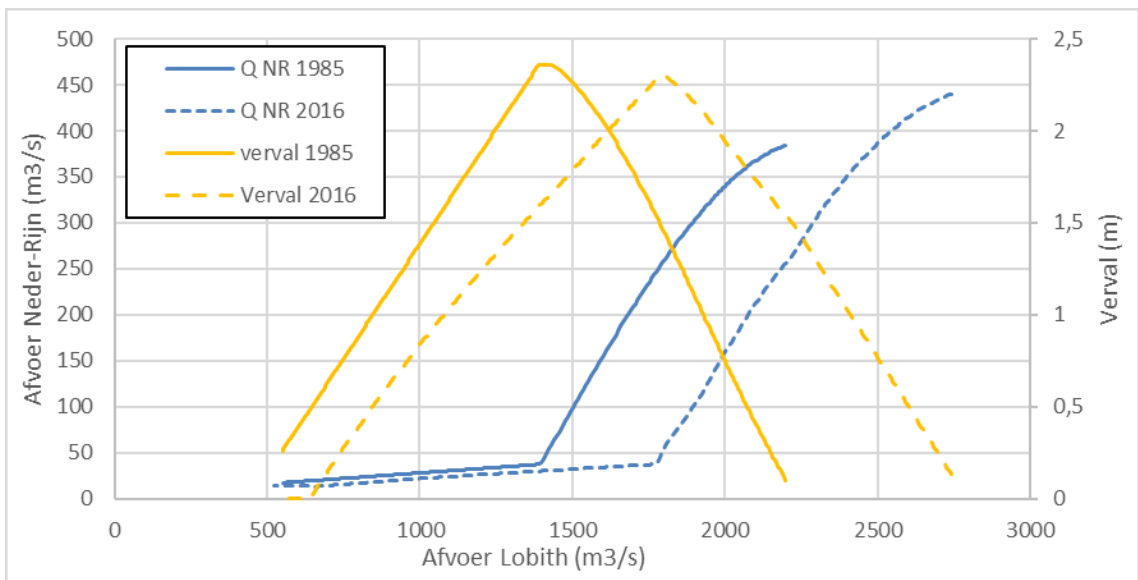
Dit scenario geeft inzicht in de trendmatige verandering van de inzet van stuwmiddelen en de consequenties op stroomsnelheden van de afgelopen 40 jaar. Tegelijkertijd geeft het resultaat ook enig inzicht in toekomstige ontwikkelingen. Het programma IRM werkt aan oplossing voor knelpunten in het rivierengebied. De veranderde afvoerverdeling als gevolg van bodemerosie is hier één van. Voor IRM zijn nog twee bodemscenario's in beeld: het handhaven van de huidige situatie of het terugbrengen van de afvoerverdeling van 1985, onder andere door aanpassingen in de rivierbodem.

In het stuwprogramma 1985 zijn grafieken opgenomen met de beoogde afvoeren en waterstanden bij een bepaalde Lobith-afvoer. Er is daarom geen afvoer-waterstandsrelatie nodig om de schuifstanden aan de afvoerstatistiek te koppelen. Het verval en de afvoer richting de Neder-Rijn afgeleid uit het stuwprogramma zijn weergegeven in figuur 11.



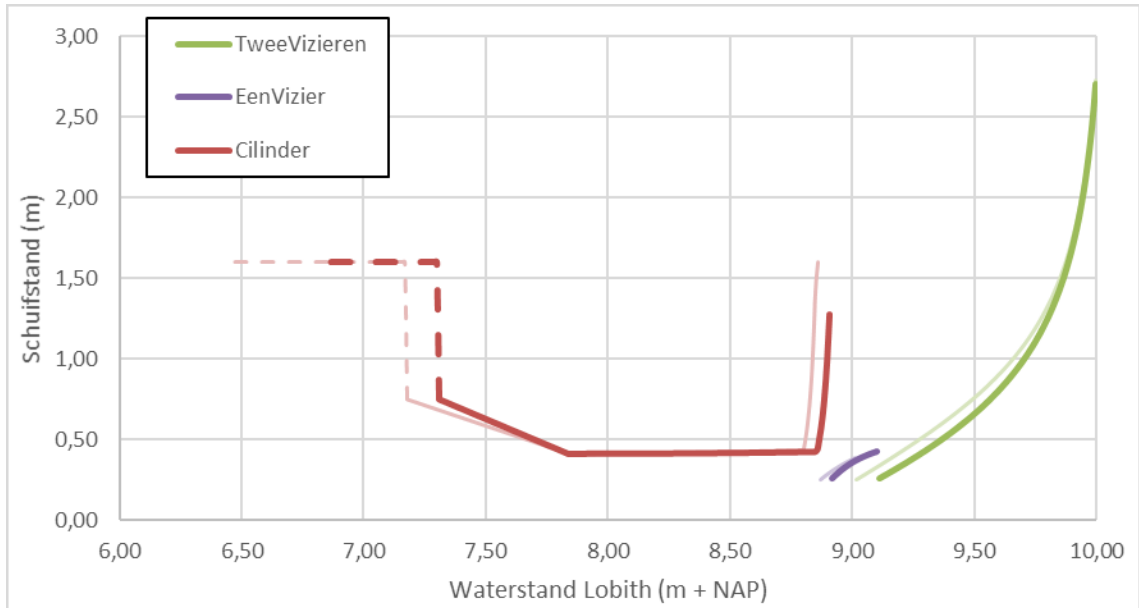
Figuur 11: Verval en afvoer NR cf stuwprogramma 1985 en 2016 bij een gegeven waterstand Lobith

Uit deze figuur blijkt dat het verval en de afvoer naar de Neder-Rijn nauwelijks zijn gewijzigd ten opzichte van de waterstand Lobith. Wanneer dezelfde data wordt uitgezet tegen de afvoer bij Lobith zijn er wel grote verschillen te zien, figuur 12. Dit is het effect van bodemerrosie.



Figuur 12: Verval en afvoer NR cf stuwprogramma 1985 en 2016 bij een gegeven afvoer Lobith

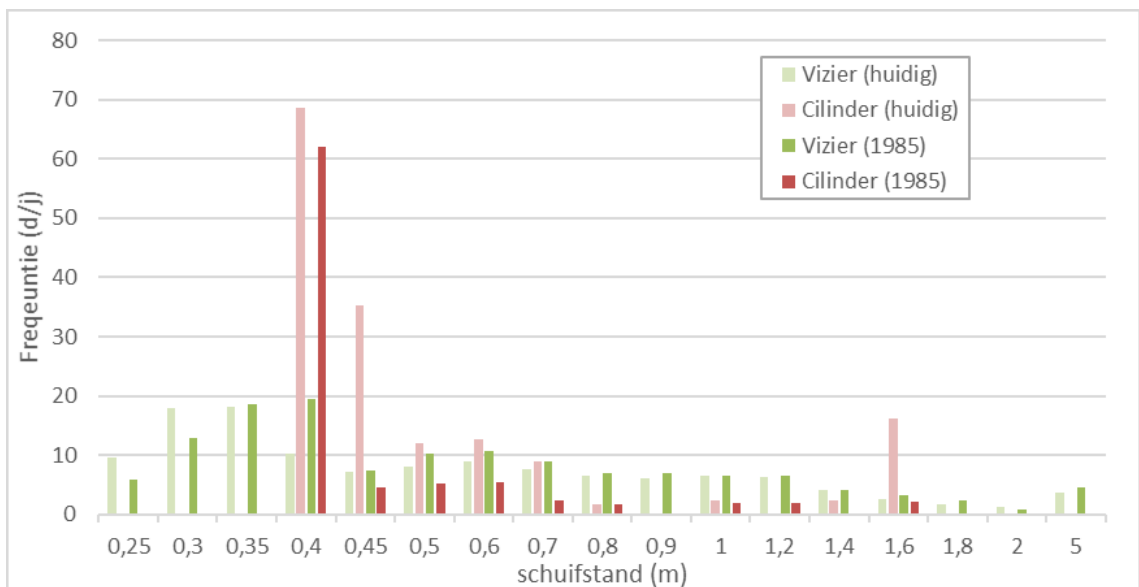
De resulterende schuifstanden per Lobith waterstand zijn weergegeven in figuur 13.



Figuur 13: Schuifstanden per waterstand Lobith voor situatie 1985 (in lichte kleuren de huidige situatie)

Op hoofdlijnen lijken de schuifstanden uit de situatie 1985 wel op de huidige situatie. De overgangen naar andere stuwmiddelen treden op bij een iets andere waterstand, maar de verschillen zijn klein. Het enige wat echt opvalt is dat in situatie 1985 extreem laagwater een veel hogere waterstand kent (NAP 6,9m) ten opzichte van de huidige situatie (NAP 6,5m). Dit is echter logisch gezien de bodemerrosie die tussen 1985 en nu is opgetreden.

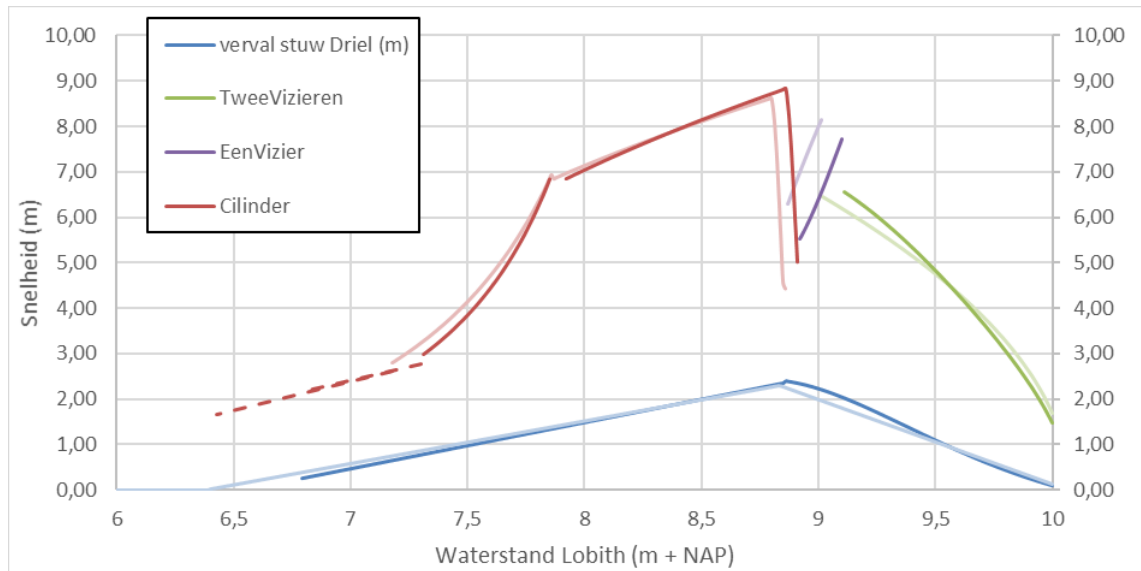
Met deze informatie is de frequentie van stuwstanden bepaald, zie figuur 14.



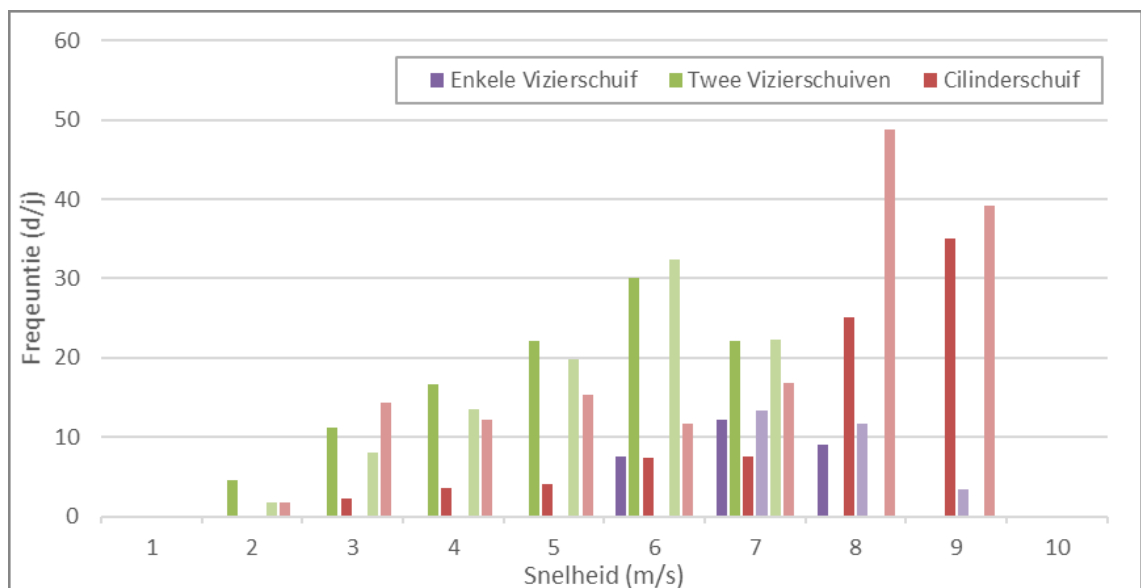
Figuur 14: frequentie schuifstanden voor situatie 1985 (in lichte kleuren de huidige situatie)

Opvallend is dat het aantal dagen dat de cilinderschuif wordt gebruikt in de huidige situatie, totaal 160 dagen, sterk is toegenomen ten opzichte van 1985, totaal 87 dagen. Het aantal dagen dat men debiet doorlaat met de vizierschuif is min of meer gelijk gebleven, totaal 130 dagen. Dit is een bekende ontwikkeling; door de bodemerrosie staat stuw Driel vaker 'dicht' en stuurt men langer op het doorlaten van 25-30 m³/s.

De bijbehorende stroomsnelheden per waterstand Lobith, en de frequentie van stroomsnelheden zijn weergegeven in figuur 15 en figuur 16.



Figuur 15: Stroomsnelheid per stuwonderdeel bij een gegeven waterstand Lobith voor de situatie 1985. In blauw het verval over stuw Driel, geplot op de secundaire as. In lichte kleuren de huidige situatie.



Figuur 16: frequentie stroomsnelheden voor situatie 1985 (in lichte kleuren de huidige situatie)

Wat betreft de stroomsnelheden blijkt uit figuur 15 dat de stroomsnelheid per waterstand Lobith sterk lijkt op de huidige situatie. Uit figuur 16 blijkt echter dat de frequenties van stroomsnelheid wel verschillen, dit komt omdat de frequentie

waarbij waterstanden Lobith voorkomen is veranderd. Gelijke waterstanden horen bij andere afvoeren (bodemerrosie) en daarmee andere frequenties. Grootste verschil is de snelheid 8m/s bij de cilinderschuif, die in 1985 ongeveer 25 dagen voorkwam en in de huidige situatie bijna 50 dagen.

2.3. Scenario klimaat stoom2050

Dit scenario geeft inzicht in de autonome ontwikkeling van klimaatverandering op het stuwproces. Er is voor gekozen om gebruik te maken van het Deltascenario 'Stoom 2050'.

Er is gebruik gemaakt van:

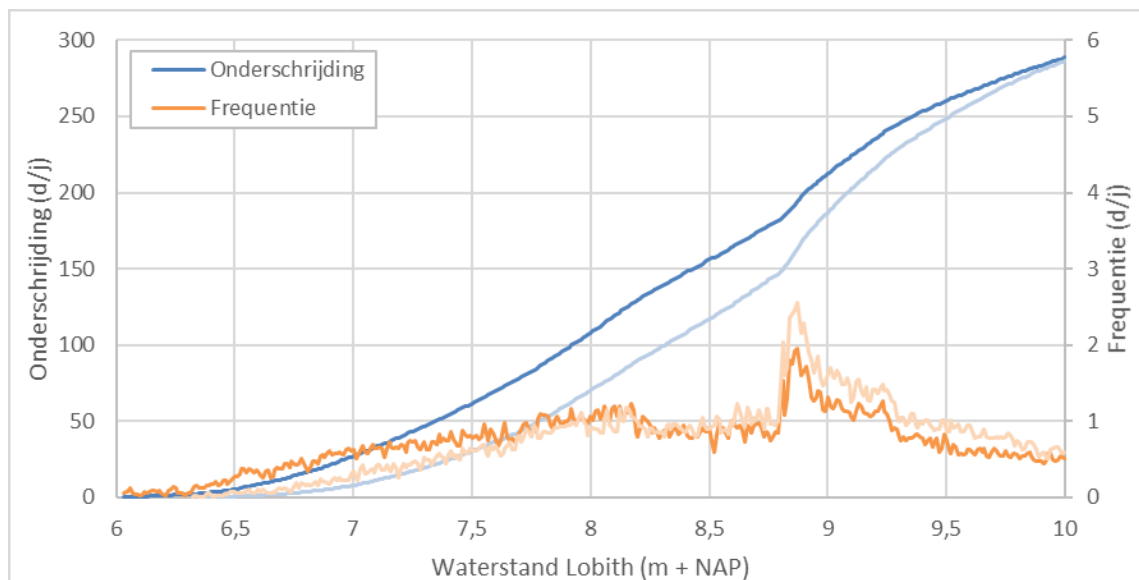
- Klimaatreeks Stoom2050
- Afvoerwaterstandsrelatie 2023
- Stuwprogramma 2016

In dit scenario is geen rekening gehouden met de doorgaande bodemerrosie. Het is de hoop en verwachting dat er in het kader van IRM een oplossing voor dit probleem wordt gevonden.

In dit scenario wijzigt alleen de frequentie van waterstanden bij Lobith.

Schuifstanden en stroomsnelheden per waterstand Lobith wijzigen niet, en zijn voor dit scenario dus identiek aan figuur 4 en figuur 9.

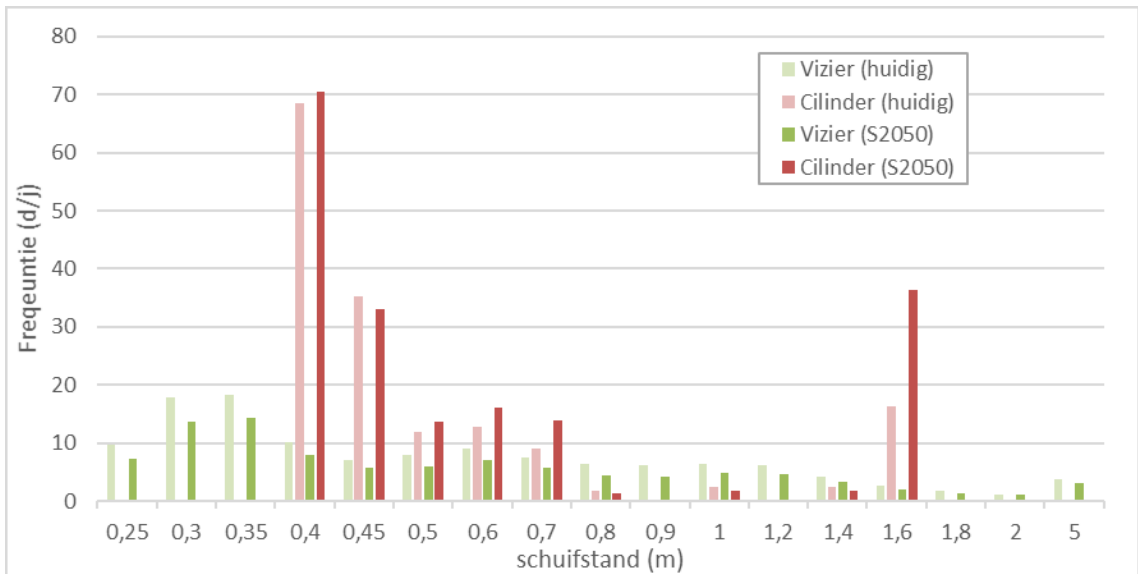
De frequentie en onderschrijding van Lobith waterstanden is weergegeven in figuur 17.



Figuur 17: frequentie en onderschrijding van waterstanden bij Lobith voor het scenario Stoom 2050, in lichte kleuren voor de huidige situatie.

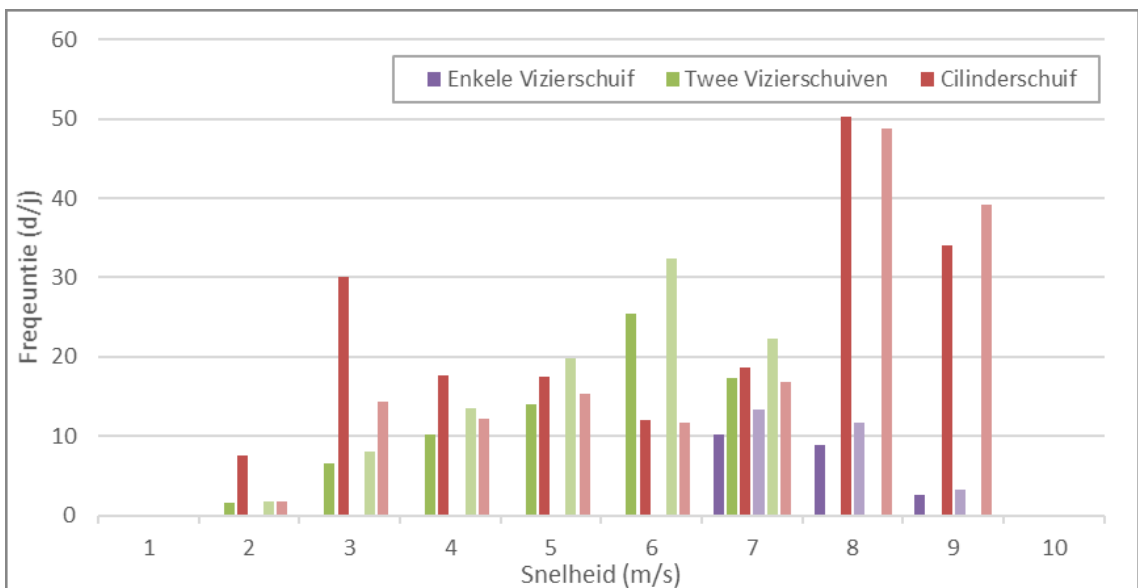
In dit figuur valt duidelijk op dat lage waterstanden in het scenario Stoom 2050 vaker voorkomen. De mediane waterstand verschuift van NAP +8,98 m in de huidige situatie naar NAP +8,80 m voor het scenario stoom 2050.

Dit betekent ook dat het aantal dagen dat via de vizierschuiven debiet wordt doorgelaten afneemt, en het aantal dagen met de cilinderschuif sterk toeneemt, zie figuur 18.



Figuur 18: frequentie schuifstanden voor situatie Stoom 2050 (in lichte kleuren de huidige situatie)

Het blijkt dat het aantal dagen dat met de vizierschuif debiet wordt doorgelaten in het scenario stoom2050 met 30 dagen afneemt tot 100 dagen per jaar. Het aantal dagen dat met de cilinderschuif wordt gestuurd neemt met 30 dagen toe tot 190 dagen per jaar. Dit laatste komt voornamelijk door het grote aantal dagen dat er extreem laagwater optreedt, en de cilinderschuif bij lage waterstanden volledig open gaat. Dit gaat van 14 dagen per jaar in de huidige situatie naar 38 dagen in het scenario stoom 2050.



Figuur 19: frequentie stroomsnelheden voor situatie Stoom 2050 (in lichte kleuren de huidige situatie)

Uit deze figuur blijkt dat de frequentie van stroomsnelheden bij bijna alle klassen licht daalt bij klimaatverandering, behalve voor de cilinderschuif bij snelheden kleiner dan 5m/s. Dit laatste hangt samen met de vaker voorkomen van extreem laagwater en het volledig open gaan de cilinderschuif.

2.4. Scenario KZH

In het kader van de KZH wordt overwogen om in sommige gevallen af te wijken van het reguliere stuwprogramma, om 'slim' water te sturen waar het op dat moment nodig is. Voor Driel betekent dit dat in sommige situaties meer water over de Neder-Rijn te sturen. Concreet zijn er 2 situaties waarin dit nodig/mogelijk is:

- Situatie A: Grote onttrekking Irenesluizen en Bernhardsluizen gesloten
- Situatie B: Grote onttrekking Irenesluizen & Hagestein, Bernharsluizen al maximaal en afvoer Lobith klein

Bijlage 2 geeft een onderbouwing voor het scenario KZH: de argumentatie voor inzet en frequentie van inzet.

Voor Driel is dit vertaald naar de volgende aanpassingen aan het stuwprogramma, zie tabel 2.

Tabel 2: Benodigd debiet bij inzet KZH

Afvoer Lobith (m ³ /s)	Debiet cf stuwprogramma (m ³ /s)	Benodigd debiet over Driel bij inzet KZH (m ³ /s)
1.800	40	
1.700	36	60
1.600	34	60
1.500	32	60
1.400	30	60
1.300	28	60
1.200	26	
1.100	24	
1.000	22	
900	20	25
800	17	25
700	15	25

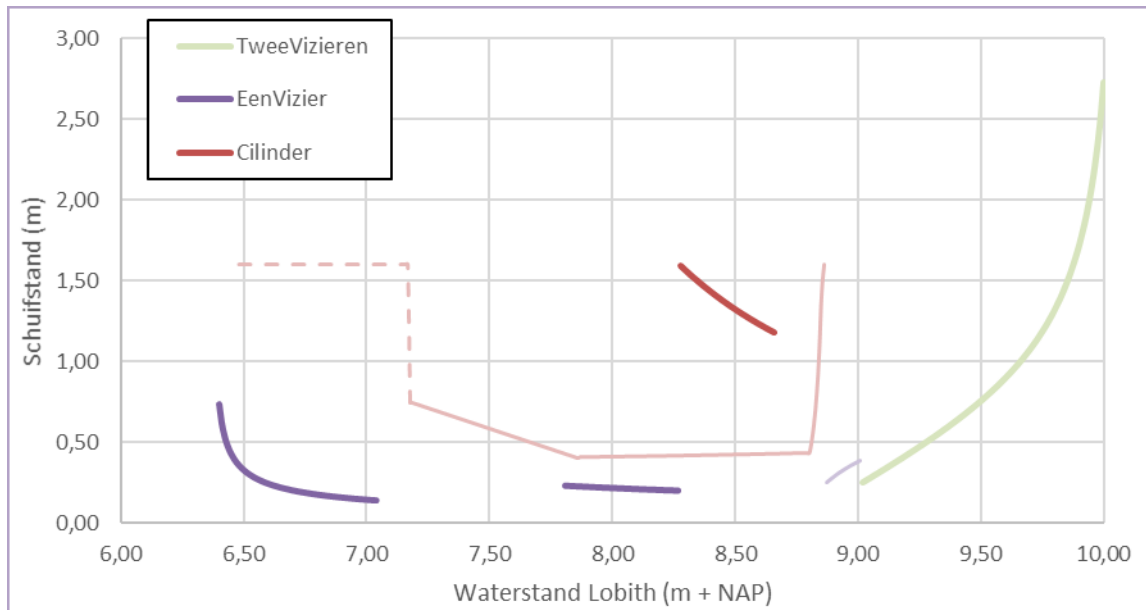
De inzet van KZH wordt alleen voorzien in de periode mei tot en met september. Buiten deze periode is de watervraag een stuk kleiner en is inzet van KZH onwaarschijnlijk. Bovendien zal niet elke keer dat een bepaalde afvoer voorkomt, de inzet van KZH nodig zijn. In deze studie is uitgegaan van het voorkomen conform tabel 3.

Tabel 3: Verwachte gemiddelde inzet van KZH

Afvoerrange	Voorkomen in mei tot sept	Verwachte kans op inzet KZH	Gemiddelde inzet KZH
650-900	2,24	50%	1,12
1300-1500	20,9	10%	2,04
1500-1700	17,7	2%	0,35

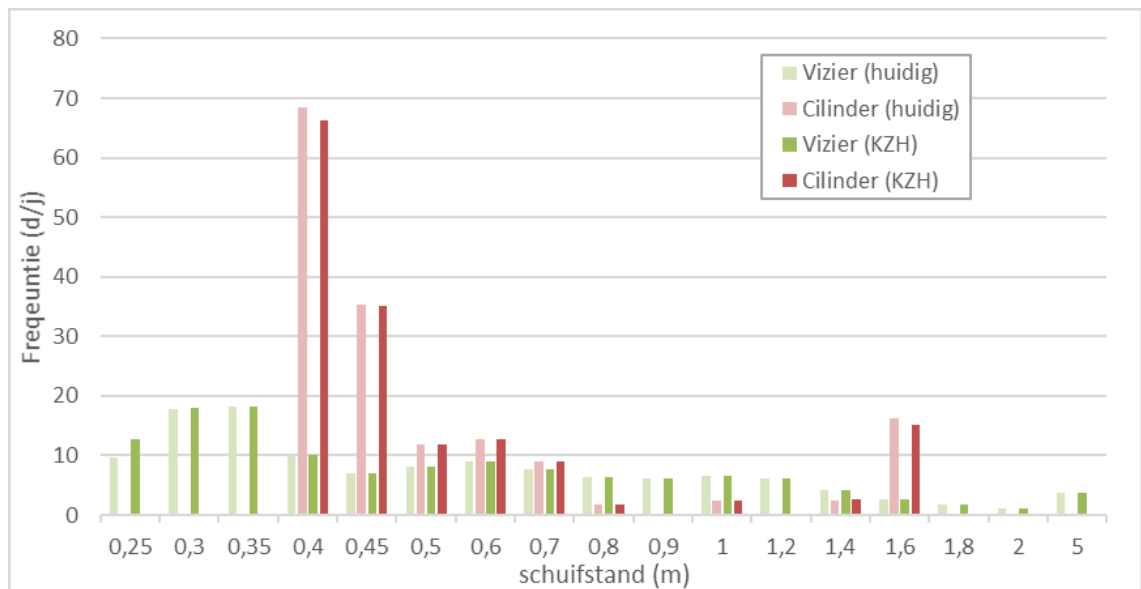
Om het benodigde debiet bij inzet van de KZH door te laten, zijn schuifstanden per waterstand Lobith berekend, zie

figuur 20.



Figuur 20: Schuifstanden per waterstand Lobith voor inzet KZH (in lichte kleuren de huidige situatie)

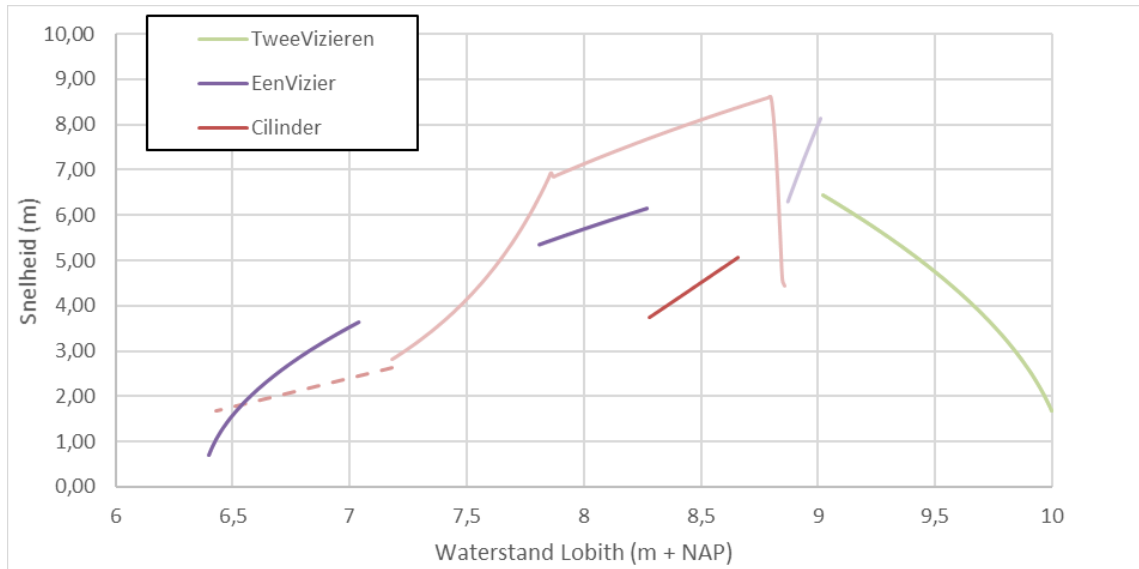
Dit levert behoorlijke gewijzigde schuifstanden op, en de inzet van de enkele vizierschuif is een stuk groter. Wel moet worden gerealiseerd dat dit bij inzet van de KZH is, terwijl dit bijvoorbeeld in situatie A slechts in 10% van de tijd, en alleen in de periode mei tot en met september, wordt voorzien. Bij de frequentie van schuifstanden, figuur 21, is hiermee rekening gehouden.



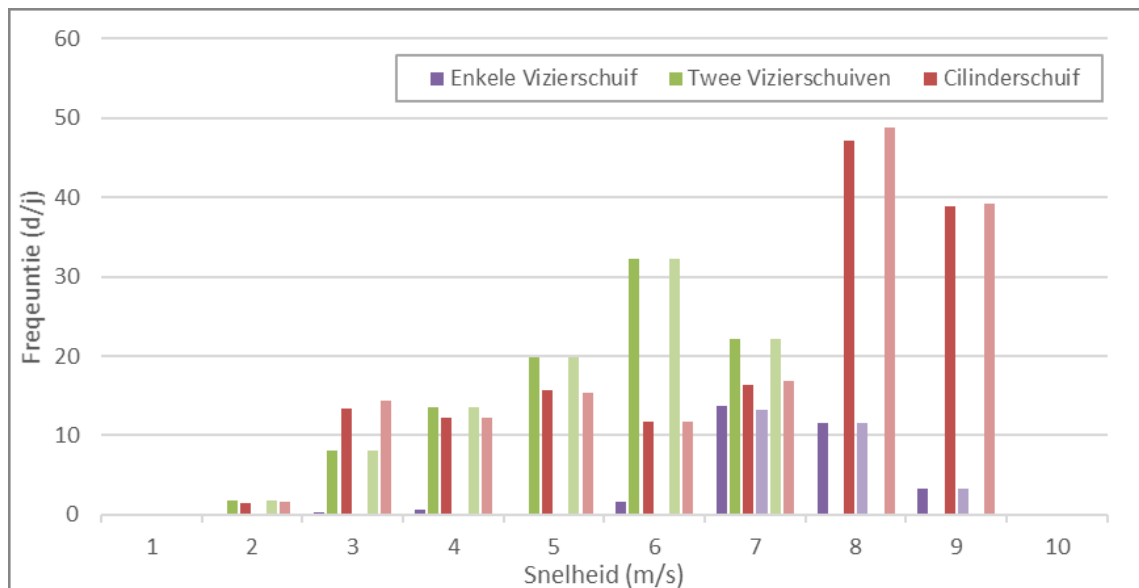
Figuur 21: frequentie schuifstanden voor situatie inzet KZH (in lichte kleuren de huidige situatie)

Zoals verwacht zijn de verschillen met de huidige situatie klein. Het enige dat opvalt is dat de kleinste opening van de vizierschuif (0,25m) 3 dagen vaker voorkomt. Uiteraard is dit direct gekoppeld met de inzet in Situatie A (2d/j) en Situatie B (1d/j). De schuifstanden zijn in situatie A ongeveer 20cm, en in situatie B 15cm-75cm.

De snelheden die optreden bij inzet van de KZH zijn weergegeven in figuur 22, bijbehorende frequenties in figuur 23. Opvallend is dat bij de inzet van de cilinderschuif de snelheid ongeveer een factor 2 daalt, terwijl het debiet door de cilinderschuif juist verdubbeld. Dit komt omdat de schuifstand fors groter moet worden om dit debiet door te laten (van ~0,4 m naar ~1,5m). De achtergrond daarvan is dat de relatie schuifstand – effectief doorstroomoppervlak niet lineair is (figuur 1). Het is daarom in eerste instantie contra intuïtief, maar wel verklaarbaar.



Figuur 22: Stroomsnelheid per stuwonderdeel bij een gegeven waterstand Lobith bij inzet van de KZH. In lichte kleuren de huidige situatie.



Figuur 23: frequentie stroomsnelheden voor scenario KZH (in lichte kleuren de huidige situatie)

Uit figuur 22 blijkt dat bij inzet van KZH fors lagere stroomsnelheden optreden in situatie A, maar in situatie B juist iets hogere stroomsnelheden. In absolute zin zijn de stroomsnelheden in situatie B al laag, en komt het weinig voor. Wel verschuift het stuwmiddel, de (enkele) vizierschuif wordt vaker ingezet in plaats van de cilinderschuif. Welke impact dit heeft op de visschade valt buiten de scope van dit rapport.

Bij het bekijken van de frequenties van stroomsnelheden uit figuur 23, valt op dat er weinig verschil is te zien. Dit is ook logisch, want hier is gecorrigeerd voor de waarschijnlijke inzet van de KZH. Dit blijkt ongeveer 3d/j te zijn, dus vandaar dat de verschillen in frequenties klein zijn.

3 Conclusies

Dit rapport beschrijft een methodiek om voor stuw Driel in verschillende scenario's frequenties te bepalen van het voorkomen van schuifstanden en bijbehorende stroomsnelheden. Het doel van de gepresenteerde gegevens in de rapport is basisinformatie leveren voor het bepalen van de mogelijke visschade door extra inzet van stuw Driel door KZH. De daadwerkelijke bepaling van visschade valt buiten de scope van dit rapport en is een ander rapport beschreven.

De conclusie van dit rapport:

- Er is een methodiek ontwikkeld voor het bepalen van frequenties van schuifstanden en stroomsnelheden bij stuw Driel. Met deze methodiek is een eerlijke vergelijking tussen scenario's mogelijk. Hierbij is gebruik gemaakt van het stuwprogramma, afvoer-waterstandsrelatie en de afvoerstatistiek bij Lobith. Om te bepalen bij welke stuwstand hoort bij welke combinatie verval-afvoer is gebruikt gemaakt van afvoercoëfficiënten die zijn afgeleid op basis van logboeken van stuw Driel in de periode 2005-2010.
- Voor de huidige situatie is gebruik gemaakt van het stuwprogramma 2016, vigerende afvoerwaterstandsrelatie en de afvoerstatistiek Lobith op basis van het deltasceario 'ref2017'. Voor andere scenario's is één of meerdere van deze bestanden aangepast.
- In de huidige situatie wordt er 98 d/j debiet doorgelaten via twee vizierschuiven, 28 d/j met één vizierschuif en 160 d/j via de cilinderschuif. De stroomsnelheden die hierbij optreden variëren in de range van 2-9m/s. De hoogste stroomsnelheden komen voornamelijk voor bij de cilinderschuif.
- Het scenario 1985 geeft inzicht in de effecten van bodemerrosie. Opvallend is dat vroeger de cilinderschuif veel minder vaak gebruikt hoefde te worden: 87 d/j. De frequentie van het doorlaten van debiet via de vizierschuif is min of meer gelijk gebleven. De stroomsnelheden per waterstand Lobith zijn min of meer gelijk gebleven. De frequenties zijn echter wel veranderd, omdat gelijke Lobith waterstanden door de bodemerrosie bij andere afvoeren (en dus frequenties) horen. In 1985 kwamen de hoge snelheden (> 8m/s) bij de cilinderschuif veel minder vaak voor, terwijl bij de vizierschuif de lage snelheden (< 5m/s) in 1985 juist vaker voorkwamen.
- Het scenario stoom 2050 geeft inzicht in het effect van de klimaatverandering op het stuwproces. Uit de afvoerstatistiek uit het deltasceario 'stoom2050' blijkt duidelijk dat lage afvoeren vaker voorkomen. Hierdoor daalt het aantal dagen dat via de vizierschuif debiet wordt doorgelaten naar 75 d/j met twee schuiven, en 21 d/j met één schuif. Het aantal dagen dat met de cilinderschuif wordt gestuurd neemt juist toe, tot 188 d/j. In het algemeen dalen de frequenties van stroomsnelheden, behalve bij snelheden <5m/s bij de cilinderschuif; een resultante van de extra inzet doordat laagwaters vaker voorkomen.
- De inzet ten behoeve van KZH wordt alleen voorzien in twee situaties:
 - A. grote watervraag en Bernhardsluizen dicht
 - B. grote watervraag, Bernhardsluizen maximaal en afvoer Lobith klein
 De verwachte inzet van de KZH beslaat *gemiddeld* voor situatie A 2d/j en situatie B 1d/j.
 Om deze inzet te kunnen leveren, dient vaker gestuurd te worden met de vizierschuif in plaats van met de cilinderschuif. De optredende stroomsnelheden bij de vizierschuif zijn in de orde 6m/s in situatie A en 1-4m/s in situatie B.



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Bijlage 1: Afleiding hydraulische parameters stuw Driel

Voor de afleiding van de hydraulische parameters is gebruik gemaakt van de logboeken uit de jaren 2005 tot en met 2010. Deze zijn door de operators bijgehouden, met gegevens over waterstanden, afvoeren en schuifstanden. Op basis van deze logboeken is een relatie opgesteld tussen de afvoer (Neder-Rijn), het verval over het complex en de ingestelde schuifstand. Er is namelijk geen recent onderzoek bekend naar deze relatie.

Voor de cilinderschuif is wel een theoretische relatie bekend op basis van schaalproeven voor Amerongen. Voor de vizierschuiven is een dergelijk onderzoek niet beschikbaar.

Voor het afleiden van deze relatie is gebruik gemaakt van de logboeken van stuw Driel. In het verleden werden hierin veranderingen in schuifstanden bijgehouden. Een voorbeeld van hoe dit eruit ziet is te zien in figuur 24.

juli-05															
Dag	Datum	Tijd	Driel Boven	Driel Beneden	Verschil	Vzieren		Cylinder schuif	Spoel riolen	Debiet	Ijsselkop	Lobith	Afvoer		Bijzonderheden
						zuid	noord						Rijn	Ijssel	
vr	1	08:00	826	601	225	0	0	50	0	33	826	880	33	292	Zonnig zw-2
	1	13:00	833	612	221	0	0	40	4	41	834	887			
	1	16:00	828	619	209	0	0	40	4	80	832	892			
	1	19:00	826	612	214	0	0	160	4	91	833	893			
	1	23:00	826	614	212	0	25	0	4	125	832	895			
za	2	05:00	827	616	211	0	30	0	4	127	833	897			Bewolkt zw-2
	2	07:00	825	617	208	0	35	0	4	143	833	898			
	2	08:00	821	619	202	0	35	0	4	147	832	899	143	300	
	2	11:00	822	622	200	0	40	0	4	157	832	902			
	2	16:00	813	623	195	0	40	0	4	162	831	900			
zo	3	07:40	815	620	195	0	30	0	4	169	827	894			Zonnig w-1
	3	08:00	818	618	200	0	30	0	4	159	826	894	168	294	
	3	11:30	822	615	207	0	25	0	3	135	829	894			
	3	16:00	826	608	218	0	25	0	3	138	831	893			
ma	4	08:00	824	613	211	0	25	0	3	116	829	890	118	297	Zonnig zo-2

Figuur 24: voorbeeld van logboek van stuw Driel

Voor de jaren 2005 t/m 2012 zijn deze logboeken digitaal beschikbaar (in Excel). Vanaf augustus 2010 is slechts 1 registratie per dag (8:00) bewaard. Er is voor gekozen om alleen data mee te nemen van vóór augustus 2010, omdat deze periode beter geregistreerd lijkt.

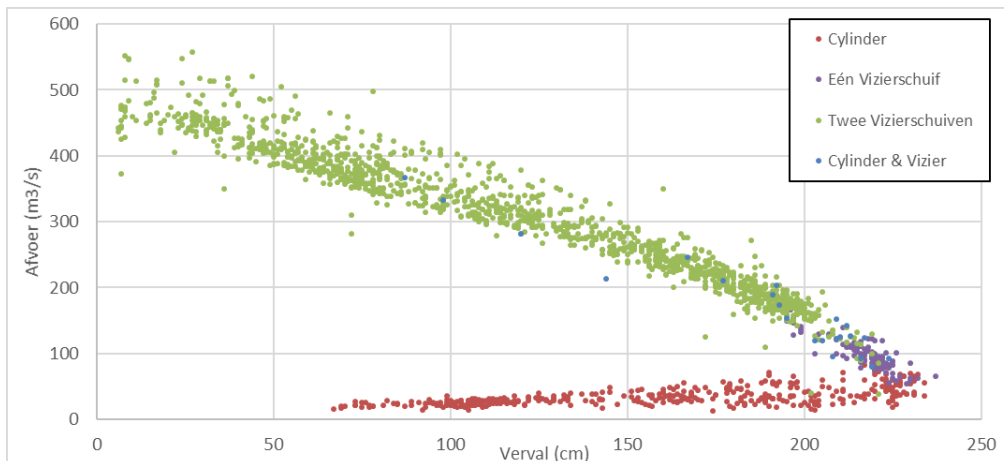
Deze registraties zijn opgeschoond, door het verwijderen van:

- Registraties met missende data (debiet, waterstand Driel Boven/Beneden, schuifstanden)
- Registraties met onrealistische waardes
- Registraties waar spoelriool is ingezet

Van deze resulterende set registraties is onderscheid gemaakt in welk onderdeel van de stuw is gebruikt:

- Twee vizierschuiven
- Eén vizierschuif
- De cilinderschuif
- Een combinatie van cilinder en vizierschuif

In figuur 25 is weergegeven wanneer er gebruik gemaakt is van welk stuwonderdeel.



Figuur 25: relatie verval en afvoer, bij een gegeven stuwonderdeel obv logboeken

Uit dit figuur blijkt dat bij hogere Neder-Rijn afvoeren er gestuurd wordt met beide vizierschuiven. Hierbij geldt dat bij oplopende NR-afvoeren het verval afneemt: dit komt door de inzet van de vizierschuiven. Doordat deze steeds verder open gaan, neemt de afvoer toe en het verval af.

Wanneer de afvoer geknepen dient te worden tot onder een niveau van 170 m³/s wordt er overgestapt op een enkele vizierschuif. In de situatie dat er met beide vizierschuiven 170 m³/s doorgelaten dient te worden, blijkt uit de registratie dat beide schuiven een opening hebben van 25cm. Ten tijde van de registraties was dit de minimale schuifopening in verband met trillingen; er was dus een technische oorzaak dat er geen kleinere opening kon worden gerealiseerd. Na de renovatie in 2020 is ook een kleine schuifstand technisch mogelijk.

Bij afvoeren kleiner dan 70 m³/s wordt gebruik gemaakt van de cilinderschuif. Uit de registraties blijkt dat rond dit afvoerniveau de enkele vizierschuif op een opening van 25cm staat, en dus niet verder geknepen kan worden met de onderdeel van de stuw.

Het maximale verval bij stuw Driel is 230 cm. Bij hogere afvoercondities gaat stuw Driel (beperkt / volledig) open, hierdoor neemt de benedenstroomse waterstand toe (er komt verhang op pand Amerongen – Driel). Ook neemt de bovenstroomse waterstand af, omdat er minder gestuurd wordt. Bij lagere afvoercondities dan bij een verval van 230 cm, staat stuw Driel 'dicht' en zakt de bovenstroomse waterstand mee met IJsselkop. Benedenstrooms is de waterstand dan constant op stuwpeil Amerongen. Een groter verval dan 230 cm komt daarom niet voor.

Er is een beperkt aantal registraties waarbij zowel de vizierschuiven alsook de cilinderschuif is gebruikt, terwijl op basis van mondelinge communicatie dit veel vaker lijkt te gebeuren. Hierbij is aangegeven dat de vizierschuif voor de 'groeve' regeling is, en de cilinderschuif de fijnregeling verzorgt. Voor dit onderzoek zijn de registraties van de gecombineerde inzet buiten beschouwing gelaten vanwege het gebrek aan data en dat dit het complex maakt om een relatie af te leiden.

In navolgende subparagrafen is per gebruikt onderdeel van het stuwcomplex een relatie opgesteld tussen afvoer, verval en schuifstand. Hierbij wordt steeds gebruik gemaakt van de formule:

$$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

Met:

Q = afvoer (m³/s)

μ = afvoercoëfficiënt (-)

A = doorstroomoppervlak (m²)

g = zwaartekrachtversnelling (m/s²)

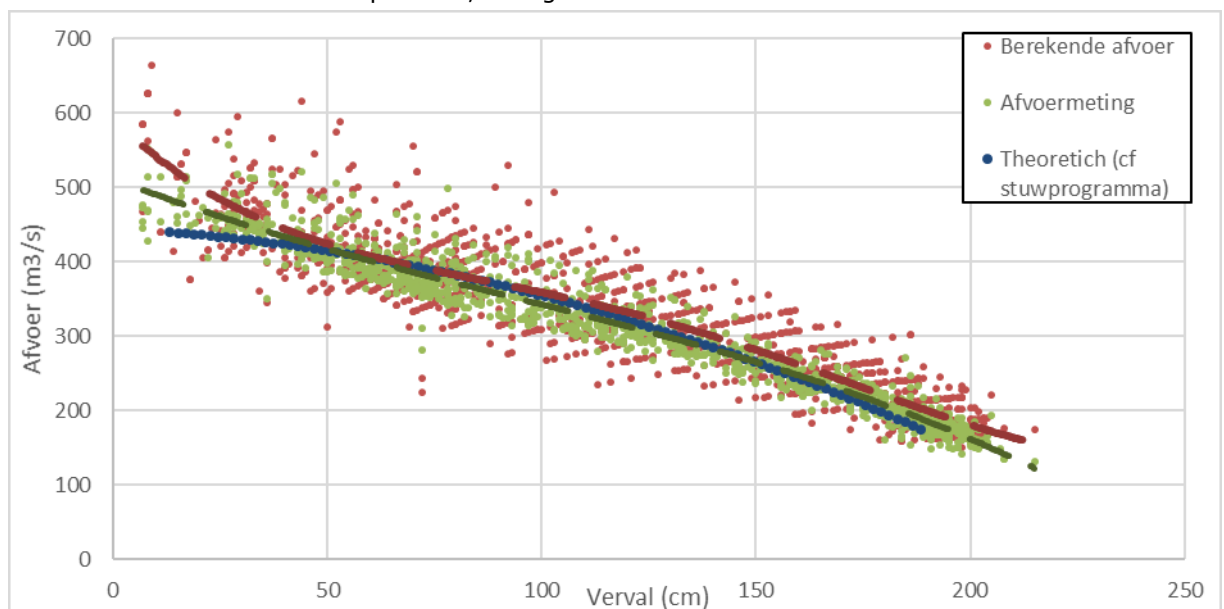
Δh = verval (m)

De afvoer zoals geregistreerd in het logboek is gemeten door de ADM bij Driel. In deze afvoermeting is niet de afvoer door de schutsluis inbegrepen, aangezien de afvoer via de schutsluis al bovenstrooms van het meetkruis wordt onttrokken. Verder is in de ADM-meting wél het debiet van de vistrap inbegrepen. Bij het afleiden van de relaties is hiervoor niet gecorrigeerd, omdat het om kleine debieten gaat (1-5 m³/s), en de impact klein is, zeker in het bereik waarin met de vizierschuif wordt gestuwd. Het verdient aanbeveling in de toekomst dit wel een keer zuiver af te leiden, met name voor kleine debieten en inzet van de cilinderschuif. De afvoercoëfficiënt is niet altijd een constante, maar kan ook afhankelijk zijn van het doorstroomoppervlak en het verval. μA samen wordt ook wel het effectieve doorstroomoppervlak genoemd. In sommige gevallen kan μA worden bepaald als μB * schuifstand. μB is dan de effectieve breedte.

Twee Vizierschuiven

Uit de registraties blijkt dat bij Neder-Rijn afvoeren groter dan 170m³/s beide vizierschuiven worden ingezet. Bij afvoeren rond 450-500 m³/s worden de vizierschuiven getrokken.

Voor de situatie met twee vizierschuiven is bepaald dat een μB van 99,9 m tot een zeer acceptabel resultaat lijkt. Bij dit effectieve doorstroombreedte is er geen bias tussen de afvoermetingen en de berekende afvoeren. Bovendien lijken de relaties tussen verval – afvoer sterk op elkaar, zie figuur 26.



Figuur 26: afvoermetingen en afvoerberekeningen inclusief trendlijnen en theoretisch cf stuwprogramma bij een gegeven verval in de situatie dat twee vizierschuiven worden ingezet.

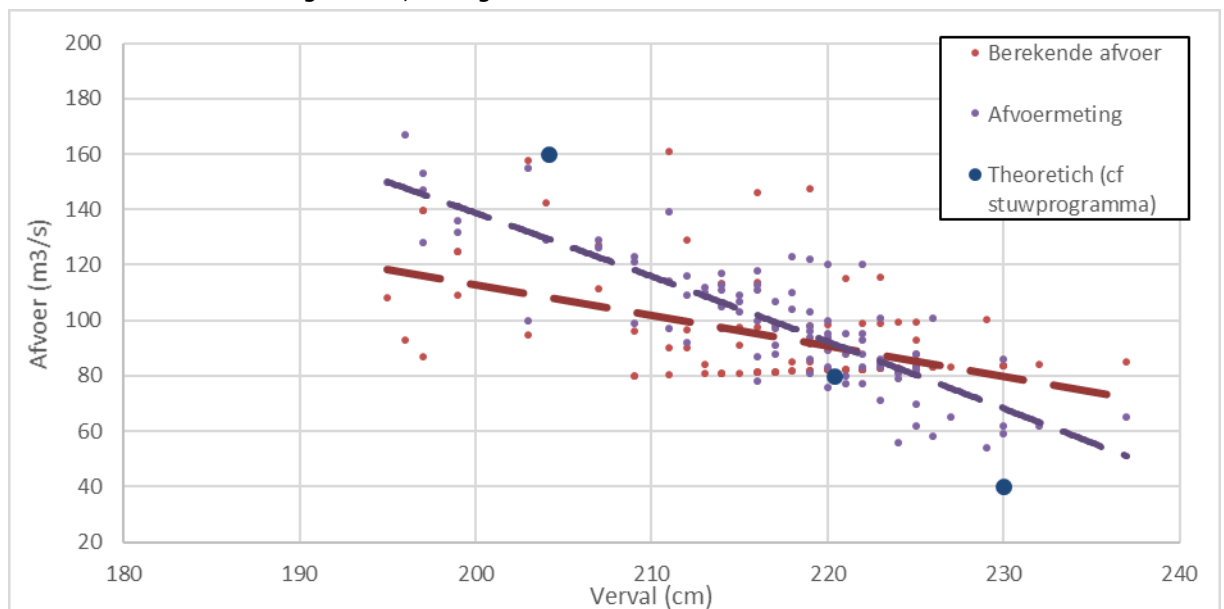
In dit figuur staan in groen de logboekregistraties van afvoer – verval. In rood zijn de afvoeren berekend op basis van het verval uit het logboek en vergelijking (1) bij een effectief doorstroombreedte van 99,9 m. Deze waarde is in een aantal iteraties gevonden, en hierbij is er geen bias tussen de afvoermetingen en afvoerberekeningen. De theoretische data ligt in 'schuine lijnen'; elke 'lijn' staat voor een bepaalde schuifstand. De punten op zo'n schuine lijn geven de resultaten weer voor de verschillende opgetreden verval en het daarbij berekende debiet. De effectieve breedte is steeds constant gehouden.

Ook de trendlijnen door de data punten van zowel de metingen als berekeningen liggen vrij dicht op elkaar. Alleen aan de randen van het bereik van verval (zeer klein en zeer groot) lopen de verschillen iets op. Datzelfde geldt voor de relatie verval-afvoer zoals opgeschreven in het stuwprogramma. Voor het detailniveau van deze studie is op deze wijze een voldoende accurate relatie afgeleid.

De breedte tussen de middenpijler en het landhoofd bedraagt 48 m. Dat betekent dat de doorstroombreedte bij 2 vizierschuiven 96 m bedraagt. Als je dit toepast op effectieve breedte, betekent dit dat μ gelijk is aan 1,04.

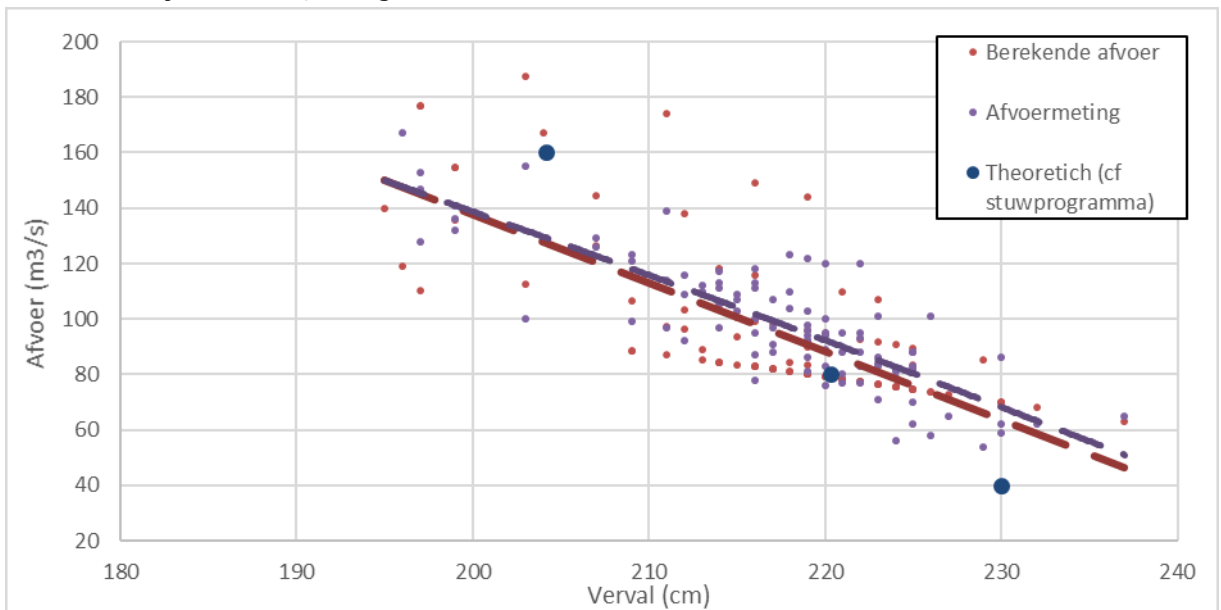
3.1.1. Eén Vizierschuif

Uit de registraties blijkt dat één vizierschuif wordt ingezet bij afvoeren in de het bereik 70 – 170 m³/s. Hierbij treden schuifstanden op van 25cm tot 50cm. Voor de bepaling van de afvoercoëfficiënt is in eerste instantie de helft van constante μ_B aangehouden als voor twee vizierschuiven, omdat nu slechts één van de twee schuiven wordt gebruikt, zie figuur 27.



Figuur 27: afvoermetingen en afvoerberekeningen (bij constante afvoercoëfficiënt) inclusief trendlijnen en theoretisch cf stuwprogramma bij een gegeven verval in de situatie dat één vizierschuif worden ingezet.

Uit deze figuur blijkt dat een constante afvoercoëfficiënt niet tot een goed resultaat leidt. Bij hogere vervallen wordt het debiet overschat, en bij lagere vervallen onderschat. Er is daarom een tweede figuur afgeleid, waarbij de afvoercoëfficiënt afhankelijk is gemaakt van het verval. Hierbij leidt een lineair verband hiertussen tot een redelijk resultaat, zie figuur 28.



Figuur 28: afvoermetingen en afvoerberekeningen (bij lineaire afvoercoëfficiënt obv verval) inclusief trendlijnen en theoretisch cf stuwprogramma bij een gegeven verval in de situatie dat één vizierschuif worden ingezet.

Hierbij is het effectieve doorstroombreedte bepaald als:

$$\mu_b = 192,2 - 65,43 * \Delta h$$

Uit de figuur blijkt dat de trendlijnen nu redelijk op elkaar liggen. Toch lijkt bij hogere vervallen de metingen nog wat lager te liggen dan de berekeningen. Dit zou mogelijk verbeterd kunnen worden door de afvoercoëfficiënt ook afhankelijk te maken van de schuifstand. Voor het detailniveau van deze studie voert het echter te ver dit nader uit te werken.

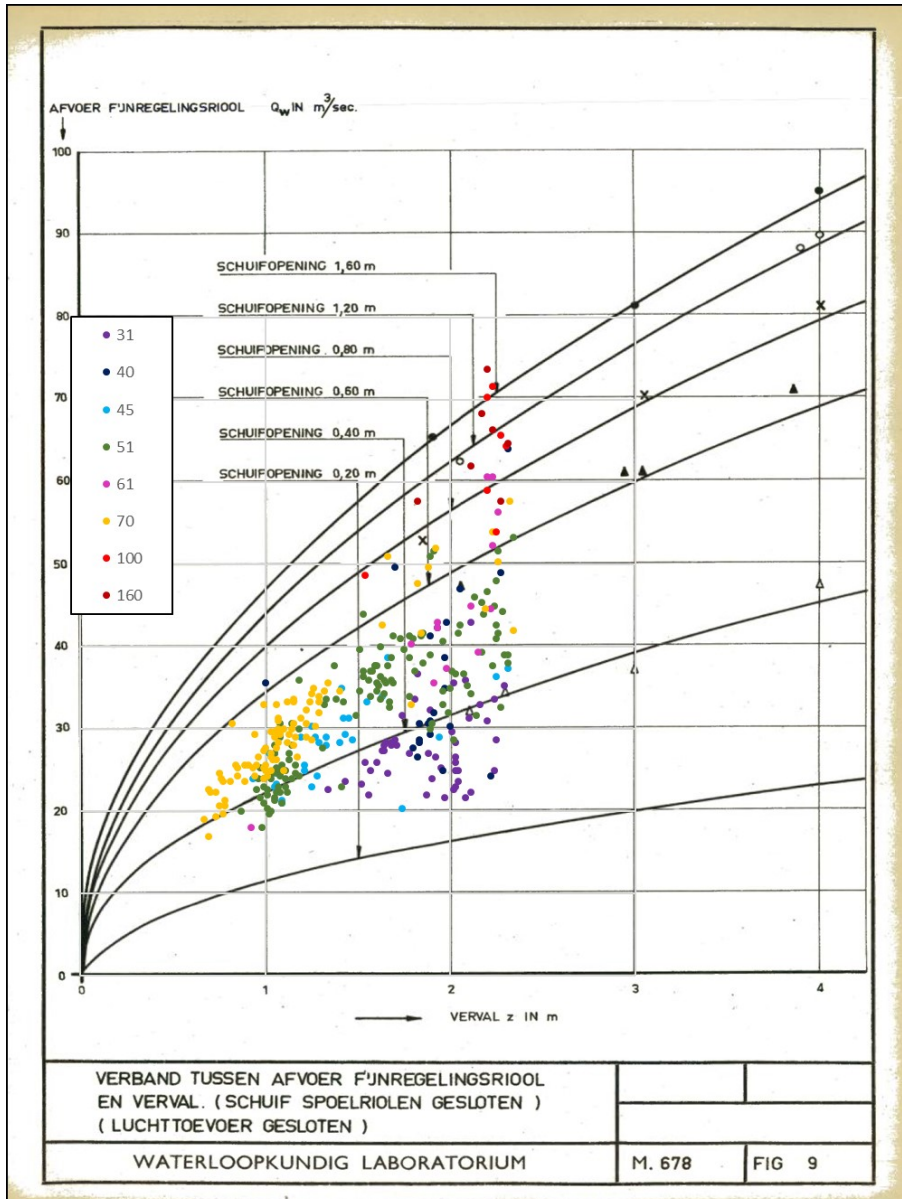
Bij het toepassen van deze formule bij kleine vervallen (zoals bij inzet KZH) blijkt deze formule onrealistische (grote) afvoeren te geven. Dit geeft aan dat voor kleine vervallen deze formule buiten het toepassingsbereik ligt. Daarom is voor kleine vervallen een constante μ_B aangenomen van 49,95 m (de helft van de μ_B van 2 vizierschuiven. De levert logische resultaten op.

Cilinderschuif

Bij afvoeren kleiner dan 70m³/s wordt gebruik gemaakt van de cilinderschuif. De cilinderschuif staat maximaal open bij een stand van 160cm, en de kleinste stand die gebruikt wordt is 30cm (of volledig gesloten).

De afleiding van een afvoercoëfficiënt bleek vrij ingewikkeld te zijn. De voornaamste reden is dat bij verschillende omstandigheden op verschillende locaties een 'kleinste doorstroomprofiel' is. Bij grotere vervallen en kleine schuifstanden wordt het kleinste doorstroomprofiel bepaald door de stand van de cilinderschuif. Bij grotere schuifstanden wordt het kleinste doorstroomprofiel voornamelijk bepaald door de diameter van de buis (3,20m). Bij kleinere vervallen is de instroomhoogte van de buis een beperkende factor. En deze verschillende omstandigheden gaan vloeiend in elkaar over, waardoor soms meerdere doorstroomprofielen tegelijk beperkend zijn.

Een beeld van de registraties voor de cilinderschuif is weergegeven in figuur 29 , waar op de achtergrond de theoretische afleiding van stuw Amerongen op basis van schaalproeven is weergegeven.



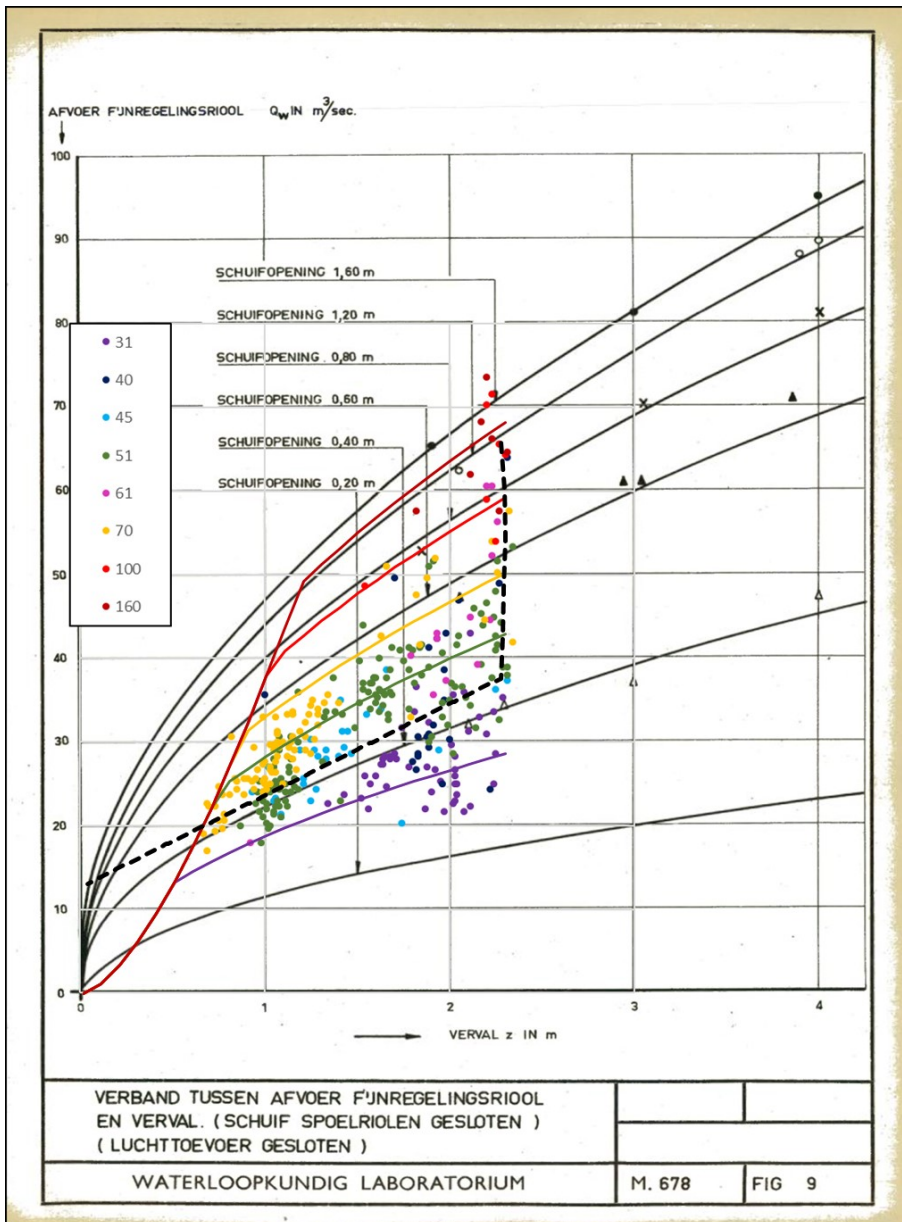
Figuur 29: registraties verval-afvoer bij een gegeven schuifstand (in cm), geplot op de afleiding van een schaalproef bij Amerongen.

Uit dit figuur blijkt dat bij vervallen ~2m de registraties vrij goed aansluiten bij de afleiding van het Waterloopkundig Laboratorium. De waardes van de veel voorkomende schuifstanden 31cm (paars) en 51cm (groen) liggen precies tussen de lijnen respectievelijk 20-40cm en 40-60cm. En de hoogste afvoer, bij een maximaal verval van 2,3m en een schuifstand van 160cm, ligt rond de 65-70m³/s, gelijk aan de afleiding in schaalproeven.

Bij de kleinere vervallen neemt de afvoer echter sneller af en moet de schuifstand toenemen om de beoogde afvoer of stuwprogramma door te laten. Het sterke vermoeden is dat dit komt door de instroomhoogte van de cilinderbuis bij Driel,

deze ligt op NAP +5,95 terwijl de benedenstroomse waterstand op NAP +6,0 m – NAP +6,1 m wordt gehouden. Kleine vervallen betekenen dus ook een kleine waterstand boven de instroomhoogte van de buis. Dit treedt alleen op bij Driel, bij de andere stuwcomplexen is de instroomhoogte relatief lager aangelegd en dus niet het beperkend element in het doorstroomprofiel.

Er is een poging gedaan naar de afleiding van een afvoercoëfficiënt. Hierbij is onderscheid gemaakt in het bereik waarbij de schuifstand bepalend is en het bereik waar de waterstand boven de buis bepalend is. Dit leidt tot figuur 30.



Figuur 30: afleiding van relatie verval-afvoer bij een gegeven schuifstand. De zwarte stippellijn geeft verval-afvoer uit het stuwprogramma weer.

Dit figuur laat zien dat voor grotere vervallen de afleiding er redelijk goed uit ziet. De gevonden (gekleurde) lijnen vallen logisch binnen de afleiding vanuit de schaalproeven. Bij de kleinere vervallen (<1m) is geen data beschikbaar, en is de afleiding puur theoretisch. In de overgang van deze bereiken, met vervallen tussen

1 – 1,5m, is duidelijk dat de registraties een lagere afvoer laten zien dan de afleiding. Dit voornamelijk te zien in de schuifstanden 70 cm (geel) en 50cm (groen), waar de datapunten 5-10m³/s lager liggen dan de afleiding. Het vermoeden is dat in dit bereik ook het doorstroomoppervlak van de buis beperkend is en weerstand opleveren, terwijl dit niet in de afleiding is verwerkt.

Er is voor gekozen om de gekleurde lijnen verder te gebruiken in dit rapport. Deze voldoen bij hogere vervallen, en sluiten hier aan op de afleiding uit de schaalmodellen. Er is te weinig data om een goede afleiding te maken in het overgangsbereik naar de lage vervallen. Hiervoor zijn te weinig verschillende schuifstanden aanwezig om de afleiding verval-afhankelijk te maken. Voor het lage bereik is gekozen voor een theoretische afleiding, omdat er geen data beschikbaar is.

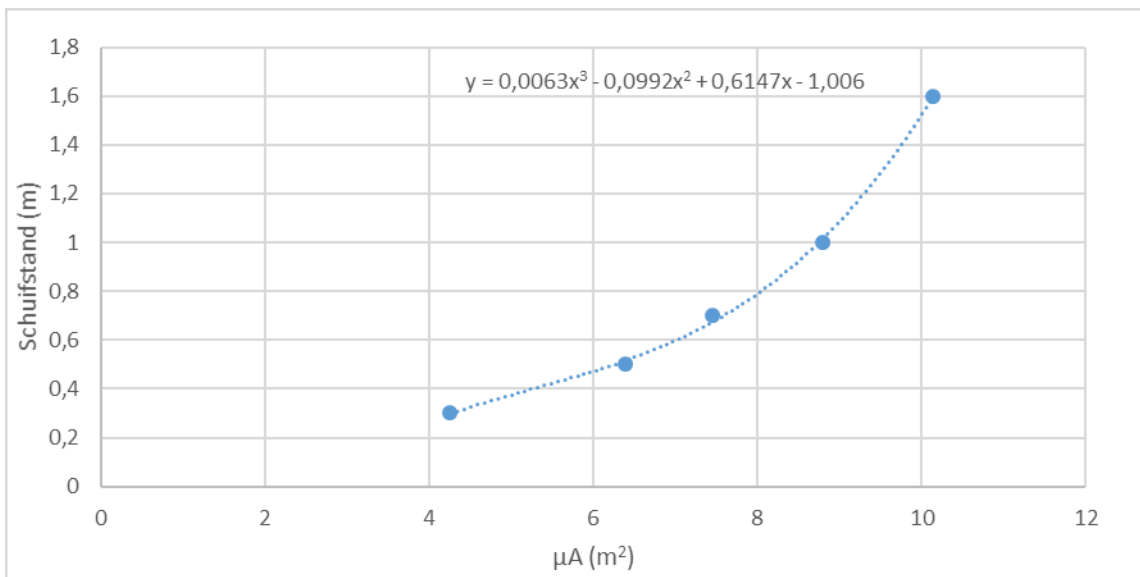
In de praktijk van het stuwprogramma, is gedurende een groot deel van de tijd een stand van ~40cm nodig. Alleen bij een verval van 2,3m komen grotere schuifstanden voor, om meer afvoer door te laten. En bij vervallen kleiner dan 1,5m komen grotere schuifstanden voor. Bij vervallen kleiner dan ~0,8m kan de beoogde afvoer uit het stuwprogramma niet meer worden gerealiseerd.

Op basis van het gemiddelde gemeten debiet bij een verval van 230cm is voor een aantal schuifstanden een afvoercoëfficiënt bepaald, zie tabel 4. Hierbij is het doorstroomoppervlak bepaald als de schuifstand vermenigvuldigd met de omtrek van de cilinderbuis.

Tabel 4: afgeleide afvoercoëfficiënt bij verschillende schuifstanden, gegeven een verval van 230cm

Schuifstand (cm)	Afvoer (m ³ /s)	Afvoercoëfficiënt (-)
30	28,5	1,41
50	43,5	1,27
70	50	1,06
100	59	0,875
160	68	0,63

Op basis van deze gegevens kan een relatie worden gelegd tussen het effectieve doorstroomoppervlak en de schuifstand, zie figuur 31. Aangenomen is dat deze



afvoercoëfficiënten geldig is bij normale vervallen (1,2 m – 2,3 m) wanneer alleen de schuifstand bepalend is en niet de instroomhoogte.

Figuur 31: relatie tussen effectieve doorstroomoppervlak en schuifstand.

Er is voor gekozen deze relatie ook te gebruiken in het 'overgangsregime' waarin zowel schuifstand als instroomhoogte bepalend zijn. Dit regime begint bij een verval van 1,2m, en afhankelijk van de schuifstand loopt deze tot een verval 0,9m (schuifstand 70cm) en 0,5m (schuifstand 30cm). In figuur 30 is te zien dat in dit overgangsregime de relatie maar matig presteert. Op dit moment is er echter geen beter alternatief beschikbaar, wel wordt aanbevolen hier een betere relatie voor te laten afleiden.

Voor het bereik met lage vervallen (afhankelijk van de schuifstand: < 0,5 – 1,2 m) waar de waterstand boven de instroomhoogte van de buis beperkend is, zijn geen datapunten beschikbaar. Er is daarom gekozen voor een eenvoudige afleiding: een constante afvoercoëfficiënt van 0,85 met een doorstroomoppervlak van de waterdiepte boven de buis maal de omtrek van de buis (10,05 m).

Bijlage 2: Afleiding KZH scenario's

In het kader van de KZH wordt overwogen om in sommige gevallen af te wijken van het reguliere stuwprogramma, om 'slim' water te sturen waar het op dat moment nodig is. In de huidige fase van KZH is deze optimale sturing nog niet bekend. Op basis van reeds bekende kansen en beperkingen worden hier de aannames beschreven ten aanzien van een mogelijke inzet van de KZH. Hierbij is gebruik gemaakt van de rapportage over de redeneerlijnen van Slim Watermanagement Nederrijn Lek (Hydrologic, 2021).

De basis van de KZH scenario's zijn kwantitatief beschreven in onderstaande tabellen. In tabel 5 is de inschatting van de watervraag opgenomen, in tabel 6 staan de aanvoermogelijkheden beschreven. Na de tabellen staat uitleg over de gemaakte keuzes.

Tabel 5: Inschatting watervraag/onttrekkingen per afvoer Lobith

Afvoer Lobith (m ³ /s)	Amerongen (m ³ /s)	Hagestein (m ³ /s)	Irene (m ³ /s)	Lek (m ³ /s)	Totaal (m ³ /s)
700	10	15	60	20	105
800	10	15	60	20	105
900	10	15	60	20	105
1.000	10	15	60	0	85
1.100	10	15	60	0	85
1.200	10	15	45	0	70
1.300	10	15	45	0	70
1.400	10	15	45	0	70
1.500	10	15	45	0	70
1.600	10	15	45	0	70
1.700	10	15	45	0	70

Onttrekking Amerongen: inschatting onttrekkingen uit stuwpannd Amerongen (zonder schutverlies en vistrap)

Onttrekking Hagestein: inschatting onttrekkingen uit stuwpannd Hagestein

Onttrekking Irenesluizen: inschatting onttrekkingen richting Noordpannd ARK (20 m³/s gebruik, 25 m³/s doorvoer Weesp, 15 m³/s KWA bij Lobith afvoer onder 1.100 m³/s)

Onttrekking Lek: inschatting doorvoer via Hagestein: surplus + onttrekkingen Lek bij verziltingsdreiging Lek (bij afvoeren onder 900 m³/s)

Totaal: som van de vier bovenstaande onttrekkingen

Tabel 6: Capaciteit van aanvoermogelijkheden en benodigd via Driel

Afvoer Lobith (m ³ /s)	Neder-Rijn cf stuwprogramma (m ³ /s)	Capaciteit cilinderschuif (m ³ /s)	Capaciteit Bernhardsluizen (m ³ /s)	Benodigd via Driel (m ³ /s)
700	15	0	80	25
800	15	8	80	25
900	15	15	80	25
1.000	21	28	80	5
1.100	24	42	80	5
1.200	26	50	80	-10
1.300	28	55	10	60
1.400	30	58	10	60
1.500	32	60	10	60
1.600	35	62	10	60
1.700	35	63	10	60

Neder-Rijn cf stuwprogramma: afvoer via cilinder volgens (uitgebreide) stuwprogramma (2016). Bij extreem laagwater is het minimumdebiet op 15 m³/s gezet ivm het niet laten uitzakken van pand Amerongen.

Capaciteit cilinderschuif: technische mogelijkheden van de cilinderschuif bij Driel uit 'Hydraulische parameter stuw Driel'. Bij laagwater is deze minder dan het stuwprogramma, bij hoger verval is de afvoer groter dan conform stuwprogramma. Capaciteit Bernhardsluizen: bij Lobith afvoeren boven 1.300 m³/s zijn de schutsluizen in werking, en via schutverlies komt er 10 m³/s door. Bij geopende schutsluizen (Lobith afvoer < 1.300 m³/s) is de doorvoer gemaximeerd op 80 m³/s. Bij een hoger debiet wordt de stroomsnelheid in de sluis kolk belemmerend voor grotere schepen. Deze grenswaarde wordt momenteel gehanteerd in het werkprotocol, maar wordt verder onderzocht en onderbouwd.

Benodigd via Driel: Totaal onttrekkingen minus aanvoer via de Bernhardsluizen. Dit restant dient via Driel doorgevoerd te worden. De gekleurde cellen geven aan wanneer de vraag groter is dan de capaciteit bij Driel.

Er zijn voor het KZH scenario 2 situaties van belang.

Situatie A

Deze situatie kan optreden bij een afvoer bij Lobith groter is dan 1.300 m³/s. In deze situatie zijn de Bernardsluizen gesloten, en dient er ~60 m³/s via Driel te worden doorgevoerd. Dit kan deels worden opgevangen door het vergroten van de aanvoer via de cilinderschuif. Indien de Rijnaafvoer groter is dan 1.500 m³/s is het verval bij Driel voldoende om op deze manier in de waterbehoefte voorzien. Bij afvoeren tussen 1.300 en 1.500 m³/s resteert een klein tekort. Er zal dan via de vizierschuif moet worden doorgelaten. Concluderend:

- Tussen 1.300 m³/s en 1.500 m³/s is de capaciteit van de cilinderschuif minder dan het benodigde debiet, en moet de vizierschuif worden ingezet. In deze studie is ervoor gekozen alle benodigde afvoer door te laten via de vizierschuif. Het is ook mogelijk dat een deel via de cilinderschuif wordt doorgelaten, maar dat is in deze studie buiten beschouwing gelaten. Qua visshade lijkt het namelijk beter om een grotere opening te realiseren, en dan kan beter al het debiet via de vizierschuif worden doorgelaten.
- Tussen 1.500 en 1.700 m³/s is de capaciteit van de cilinderschuif toereikend en kan meer dan in het stuwprogramma is voorgeschreven worden doorgelaten.

Situatie B

Deze situatie kan optreden bij een afvoer bij Lobith kleiner dan 900 m³/s. Doordat het verval erg klein is bij Driel de capaciteit van de cilinderschuif beperkt. De waterbehoefte is echter groot. Het tekort is circa 25 m³/s. Door het instellen van de vizierschuif op een kier kan hierin voorzien worden.

Het KZH scenario bevat dus twee situaties dus waarbij de vizierschuif op een kier gezet moet worden (A en B) en 1 situatie waarbij de cilinderschuif maximaal wordt benut (Lobith afvoer tussen 1.500 m³/s en 1.700 m³/s).

De frequentie van inzet

De inzet van KZH wordt alleen voorzien in de periode mei tot en met september. Buiten deze periode is de watervraag een stuk kleiner en is inzet van KZH onwaarschijnlijk. Bovendien zal niet elke keer dat een bepaalde afvoer voorkomt, de inzet van KZH nodig zijn. Immers, niet altijd valt een lage afvoer samen met een hoge watervraag in alle gebieden. Bij lage afvoeren speelt daarbij mee dat er sprake zal zijn van een tekortsituatie en daarmee een afweging waar het water naar toe te sturen.

Het samenvallen van lage afvoer en hoge watervraag is waarschijnlijker bij zeer lage afvoeren (situatie B). In deze situatie is het vaak overal in het Rijnstroomgebied langdurig droog. Extra water sturen naar het westen zal echter afgewogen moeten worden met minder aanvoer naar het IJsselmeer en kleinere vaardiepte op IJssel en Waal. De kans op het samenvallen en daadwerkelijk inzetten van extra aanvoer via Driel is hier ingeschat op 50% van de tijd.

Voor situatie A (1.300-1.500 m³/s) zal het veel vaker voorkomen dat de waterbehoefte kleiner is. Er is echter minder sprake van een waterverdelingsvraagstuk. De kans op inzet van extra aanvoer via Driel is hier ingeschat op 10% van de dagen in de zomer met deze afvoerrange.

Bij de hogere afvoeren (1500-1700 m³/s) wordt deze redenering verder doorgetrokken. Het samenvallen met geschetste hoge watervraag wordt onwaarschijnlijk: 2% van het aantal dagen in de zomer met deze afvoerrange.

Het referentie-afvoerscenario van het Deltaprogramma is gebruikt om het gemiddeld aantal dagen in een specifieke afvoerrange in de zomermaanden (mei tm september) in beeld te brengen. De frequentie van de te hanteren inzet van het KZH scenario is samengevat in tabel 2.

Tabel 2: Verwachte gemiddelde inzet van KZH

Afvoerrange	Voorkomen in mei tot sept (d/j)	Verwachte kans op inzet KZH	Gemiddelde inzet KZH (d/j)	Aangepast beheer Driel
650-900	2,24	50%	1,12	vizierschuif of een kier
1300-1500	20,9	10%	2,04	vizierschuif of een kier, cilinderschuif dicht
1500-1700	17,7	2%	0,35	cilinderschuif verder openen

Tot slot, binnen de KZH wordt de ARK route onderzocht. Dit betreft mogelijk een gemaal tussen ARK en Markermeer om water van ARK naar Markermeer te sturen om het IJsselmeer van voldoende water te voorzien.

De extra waterbehoefte van deze route en de betekenis hiervan voor Driel is in deze onderbouwing niet meegenomen. Immers het is nog de vraag of deze infrastructurele aanpassing uitgevoerd gaat worden. Mocht de ARK route wel realiteit gaan worden dan kan de betekenis voor het flexibiliseren van Driel grofstoffelijk als volgt worden geïnterpreteerd:

- de benodigde capaciteit van het gemaal wordt voorlopig ingeschat op 40 m³/s maar een waarde tot circa 80 m³/s is niet uitgesloten.
- Inzet van de ARK route bij afvoeren > 1.300 m³/s is minder waarschijnlijk omdat tekorten op het IJsselmeer bij dit afvoerniveau onwaarschijnlijk zijn en inzet wel ten koste zou gaan van de vaardiepte op Waal en IJssel.
- Inzet van de ARK route bij afvoeren van 650 tot 900 m³/s is meer waarschijnlijk, de frequentie (hierboven ingeschat op 50%) zal niet sterk toenemen (zelfde afweging als hierboven genoemd), de mate van inzet van de vizierschuif zal wel kunnen toenemen omdat de waterbehoefte toeneemt. Bv 40 m³/s extra via Driel door het verder vergroten van de kieropening van de vizierschuif.