

VERKENNING VERGROTE AANVOER WATER VIA BETUWEPAND ONDER DROGE OMSTANDIGHEDEN

26 APRIL 2017

Contactpersonen

ARJAN TUIJNDER MSC PHD
Specialist coastal & river systems

M +31 6 15864580
E arjan.tuijnder@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

HENRY TUIN MSC
Ontwerper waterbouwkundige
kunstwerken

E henry.tuin@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Nederland

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doelen en scope	6
1.3	Aanpak en leeswijzer	7
2	SYSTEEM BESCHRIJVING	8
2.1	Hydraulisch	8
2.2	Scenario's	10
3	STROMINGSMODEL	11
3.1	Aanpassingen	11
3.2	Kalibratie	11
3.3	Resultaten	15
3.3.1	Afvoeren	15
3.3.2	Waterstanden	16
3.3.3	Stroomsnelheden	17
3.4	Afvoermodel Bernhardsluizen & Marijkesluizen	19
3.4.1	Bepaling afvoercoëfficiënt	19
3.4.2	Maatgevende waterstanden Bernhardsluizen & Marijkesluizen	22
4	KNELPUNTANALYSE	24
4.1	Waal	24
4.1.1	Gevolgen afvoerverdeling Splitsingspunten	24
4.1.2	Verandering vaardiepte Waal	24
4.1.3	Conclusies	27
4.2	Vaarweg Betuwepand	27
4.2.1	Oeverbescherming Betuwepand	27
4.2.2	Stromingsbelasting	28
4.2.3	Aflaaddiepte beperking	29
4.2.4	Effecten lage waterstanden op belasting door scheepvaart	29
4.2.5	Samenvatting Toetsing Vaarweg Betuwepand	32
4.3	Stuwpannd Hagestein	32

4.3.1	Dwarsstroming	32
4.3.2	Verandering vaardiepte	33
4.4	Prins Bernhardsluizen	35
4.4.1	Algemene beschrijving object	35
4.4.2	Stroombelasting	36
4.4.3	Effecten stroombelasting door scheepvaart	38
4.4.4	Effecten op nautiek	41
4.4.5	Samenvatting Toetsing Prins Bernhardsluizen	46
4.5	Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij	47
4.5.1	Algemene beschrijving object	47
4.5.2	Effecten stroombelastingen door debiet	47
4.5.3	Effecten stroombelastingen door scheepvaart	49
4.5.4	Effecten op nautiek	50
4.5.5	Samenvatting Toetsing van Marijkesluizen & Kering Ravenswaaij	50
4.6	Potentieel voor sediment transport	50
4.7	Knelpunten waterinname	56
5	SAMENVATTING VAN CONSLUSIES	58
5.1	Sediment transport en instabiliteit bodem	58
5.1.1	Geen knelpunt	58
5.1.2	Beperkt risico op knelpunt	58
5.1.3	Groot risico op knelpunt	58
5.1.4	Beheersmaatregelen	58
5.2	Gevolgen voor Scheepvaart	59
5.2.1	Geen knelpunt	59
5.2.2	Klein risico op knelpunt	59
5.2.3	Groot risico op knelpunt	59
5.2.4	Beheersmaatregelen	60
5.3	Onderschrijding drempel waterinlaatpunten	60
5.3.1	Geen knelpunt	60
5.3.2	Klein risico op knelpunt	60
5.3.3	Groot risico op knelpunt	60
5.3.4	Beheersmaatregelen	61
5.4	Overige onderwerpen	61
5.4.1	Geen knelpunt	61
5.4.2	Klein risico op knelpunt	61
5.4.3	Groot risico op knelpunt	61
5.4.4	Beheersmaatregelen	61

REFERENTIES	62
BIJLAGE 1A GRAFIEKEN KALIBRATIE	63
BIJLAGE 1B VALIDATIE GEBRUIKTE RANDVOORWAARDE KALIBRATIE	66
BIJLAGE 2	69
BIJLAGE 3 BEREKENING SCHEEPSGEÏNDUCEERDE BELASTINGEN	71
BIJLAGE 4 HYDRAULSICHE ANALYSE VAN AFVOEREN DOOR DE SLUISCOMPLEXEN	72

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Als gevolg van klimaatverandering en ingrepen in het watersysteem kunnen perioden met droogte vaker en langer voorkomen. Dit heeft consequenties voor de regio West Nederland, want deze regio krijgt hierdoor vaker en langduriger met verzilting van westelijk gelegen inlaatpunten te maken.

Verskillende ingrepen in het watersysteem zorgen voor een toename van de externe verzilting.

- Het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) heeft te maken met toenemende kans op verzilting t.h.v. Weesp als gevolg van ontwikkelingen zoals de aanleg van de nieuwe Zeesluis, het weghalen van het sluseiland en de drempel van de oude sluis Zeeburg. De doorspoelbehoefte kan hierdoor toenemen.
- De Nieuwe Waterweg zal worden verdiept waardoor de zouttong verder oostwaarts trekt. Om in de toekomst verzilting van de Lek te voorkomen is mogelijk extra aanvoer via Hagestein noodzakelijk.

Deze toename van de externe verzilting doet de zoetwatervraag toenemen. Om aan de watervraag te voldoen heeft de zoetwaterregio West-Nederland ingezet op wateraanvoer via alternatieve, stroomopwaarts gelegen robuuste inlaatpunten aan de Lek en vanuit het Noordpand van het ARK (KWA+). Het ARK zal daarom vaker en meer water via deze route leveren aan de regio West Nederland.

Er zijn kortom verschillende ontwikkelingen gaande waarbij duidelijk is dat het benodigd debiet via het Betuwepand van het ARK en de Lek (pand Amerongen-Hagestein) toe zal nemen. In de komende jaren zal duidelijker worden welke hoeveelheden precies benodigd zijn en zal de discussie zich richten op toekenning van hoeveelheden onder verschillende omstandigheden aan verschillende gebruiksfuncties.

Dit project moet duidelijk maken welke grenzen er zijn ten aanzien van de grootte van de door te voeren debieten op het Betuwepand ARK.

Het resultaat van het hier beschreven project is een bouwsteen om Slim Watermanagement in de praktijk te uit te voeren. In de 1^e fase van Slim Watermanagement voor de Nederrijn/Lek (SWM NRL) zijn operationele stuuropaties verkend die onder (extreme) laagwatercondities met de bestaande stuwcomplexen in de Nederrijn en Lek te realiseren zijn. Deze systeemanalyse sluit hierbij aan: om in bijzondere situaties zoals droogte met de beschikbare sturingsmiddelen om te gaan, is het van belang de grenzen van het systeem te kennen. In fase 2 is het van belang om af te stemmen met SWM NRL, aangezien deze 2^e fase gericht is op de belangenafweging die met deze operationele stuuropaties samenhangt.

1.2 Doelen en scope

Dit project moet duidelijk maken welke grenzen er zijn ten aanzien van de grootte van de door te voeren debieten op het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze grenzen kunnen door verschillende aspecten worden bepaald, in deze studie worden de gevolgen voor de volgende aspecten beschouwd:

- Scheepvaart
- Afvoerdeling
- Oeverbescherming
- Gevolgen voor de bodem
- Onderschrijden drempelwaarden voor zoetwaterinlaatpunten

Betreffende deze aspecten wordt een risico-inventarisatie gemaakt. Deze risico-inventarisatie heeft een verkennend karakter; er wordt gebruik gemaakt van een eenvoudige modelering en van een orde-grootte inschattingen. Door het gekozen beperkte detailniveau kan worden vastgesteld waar en onder welke omstandigheden; een grote kans op een knelpunt bestaat, juist geen of een geringe kans op een knelpunt bestaat. Wanneer een knelpunt is vastgesteld en er wordt gekozen om het scenario dat leidt tot het knelpunt uit te voeren, dan is het nodig om het knelpunt met geavanceerdere methoden nader te beschouwen. Een concreet voorbeeld hiervan: het toegepaste 1D stromingsmodel geeft geen dwarsstroming bij sluizen. Wanneer wordt vastgesteld dat er een groot risico bestaat op een te hoge dwarsstroming is het aan te bevelen dit nader te onderzoeken met een 2D of 3D stromingsmodelering en met een scheepvaartsimulatie.

De analyse van de knelpunten beperkt zich tot het Amsterdam-Rijnkanaal met de sluizencomplexen Prins Bernard en Prinses Marijke, en de Waal voor zo ver het de verandering van de waterdiepte en de

afvoerverdeling betreft. De stuwen op de Nederrijn en Lek, en de Prinses Irenesluizen vallen buiten de scope van de studie.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Het watersysteem rond het Betuwepand wordt gemodelleerd met een 1D SOBEK 3 model, het Rijntakkenmodel versie j16_5 is opgezet door Deltares. Het model is in eerste instantie opgezet voor waterverdelingsvraagstukken onder normale tot hoge afvoeren. Dit model is gecontroleerd en verbeterd en vervolgens op beperkte schaal gekalibreerd voor lage afvoeren. De nadruk in de kalibratie ligt op de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop en de waterstand op de Waal bij Tiel. Waterstanden elders in het systeem, bijvoorbeeld op de IJssel, zijn niet volledig gekalibreerd. Het aanpassen en kalibreren van het model wordt beschreven in hoofdstuk 3.1 en 3.2.

Het model wordt gebruikt om over een range aan condities te bepalen wat de effecten zijn. De scenario's bestaan uit combinaties van drie lage tot extreem lage afvoeren op de Bovenrijn en vier verschillende onttrekkingen bij Hagestein naar de Lek en de Prinses Irenesluizen naar het Noordpand van het ARK. De scenario's worden beschreven in hoofdstuk 2.2. Het SOBEK-model is gedraaid met alle scenario's als input. Het algemene beeld uit de resultaten wordt in hoofdstuk 3.3 gepresenteerd en dit wordt verder verfijnt met analytische modellen. In hoofdstuk 3.4 worden de waterstanden langs het Betuwepand gecorrigeerd met een analytisch model voor stroming door de sluiscomplexen.

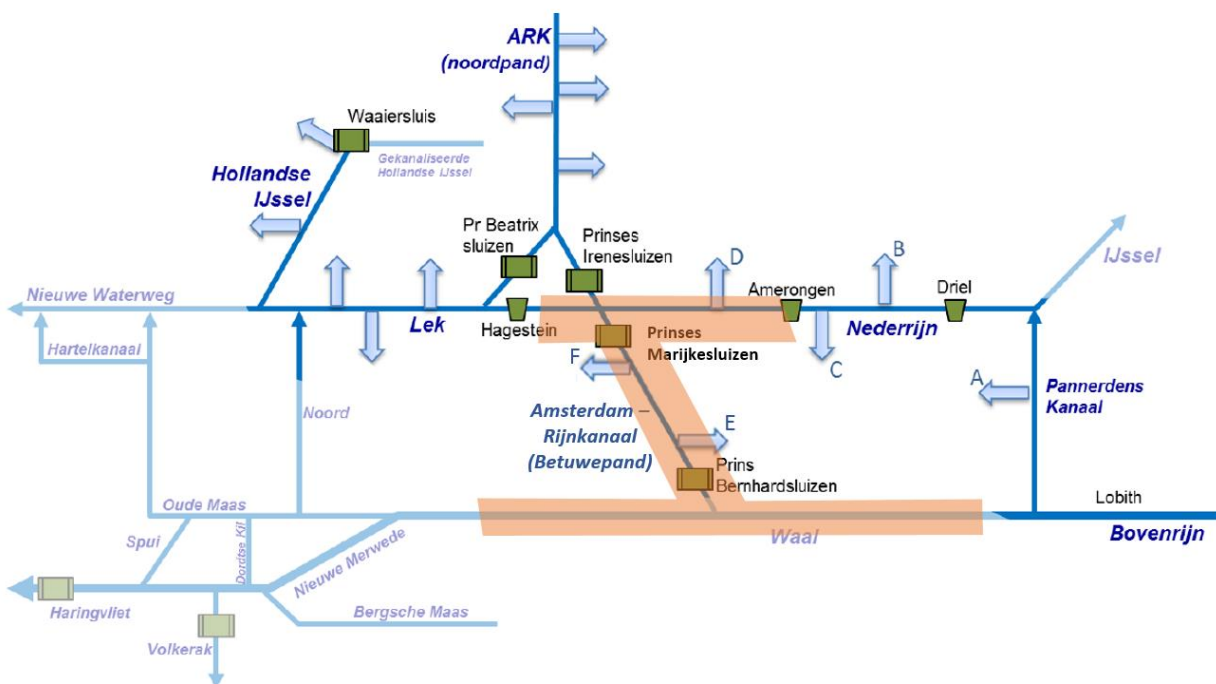
In hoofdstuk 4 wordt de knelpuntenanalyse gepresenteerd en worden de belangrijke systeemelementen stuk voor stuk langsgelopen: de Waal, het kanaal, het stuwpand Hagestein, de Prins Bernardsluizen en de Marijkesluizen. Per element worden de knelpunten geïdentificeerd. Hierbij wordt gekeken wat de gevolgen zijn van lage waterstanden en/of hoge stroomsnelheden op de waterstaatswerken zelf, op het gebruik ervan door scheepvaart en voor waterinname.

In hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van de knelpunten en de functies of aspecten waar geen knelpunten te verwachten zijn.

2 SYSTEEM BESCHRIJVING

2.1 Hydraulisch

Het Betuwepand vormt een verbinding tussen de Waal en de Nederrijn/Lek, de twee grootste takken in het rijntakken systeem (zie Figuur 1). De afvoerdeling op de IJsselkop en in mindere mate de Pannerdense Kop kan tot op zekere hoogte worden geregeld met stuw Driel. Bij lage afvoeren is deze stuw gesloten, waardoor de afvoer van het Pannerdens Kanaal (PK) voornamelijk richting de IJssel gestuurd wordt. Door het terugstuweffect wordt hierdoor ook de afvoer van de Waal iets vergroot. De waterstanden op de Nederrijn en Lek worden verder op peil gehouden door de stuwen bij Amerongen en Hagestein. Volgens het stuwprogramma zou 25 – 30 m³/s bij Driel moeten worden doorgelaten naar de Nederrijn. Wanneer het verval over deze stuw echter te klein wordt, wanneer de afvoer bij Lobith minder is dan ca. 1200 m³/s, lukt het niet meer dit debiet door te laten en kan er nog 20 – 25 m³/s worden doorgelaten [ref 3]. Stuw Hagestein handhaaft zo lang mogelijk een peil van NAP+3,0 m. Onder normale en laagwater omstandigheden is er een open verbinding tussen pand Hagestein en het Betuwepand. Het normale kanaalpeil van het Betuwepand is dan ook NAP +3,0 m. Het kanaalpeil kan naar boven afwijken tijdens perioden van relatief hoge afvoer, maar bij waterstanden hoger dan NAP +5,55 m zal kering Ravenswaaij sluiten. In deze studie worden laagwater omstandigheden beschouwd en is de kering Ravenswaaij altijd geopend.



Figuur 1 Schematische weergave van het projectgebied (binnen rode gebied), inclusief kunstwerken en onttrekkingen. (achtergrond uit: Waterverdelings- en verziltingsvraagstukken in het hoofdwatersysteem in West- en Midden-Nederland, Hydrologic, 2013). De letters bij de onttrekkingen verwijzen naar Tabel 1.

Onder normale omstandigheden staat het water in de Waal ter hoogte van Tiel hoger dan het kanaalpeil van het ARK. Schepen worden dus in de Bernardsluizen geschut om het hoogteverschil te overbruggen. De Bernardsluizen worden echter geopend wanneer de waterstand op de Waal beneden de NAP +3,0 m zakt. Dit gebeurt als er een afvoer van ca 1200 m³/s bij Lobith is (Waterstandsduurlijnen 2012, RWS). In Figuur 2 wordt de duur getoond dat een waterstand bij Tiel wordt onderschreden; het peil van NAP +3,0 m wordt gemiddeld 42 dagen per jaar niet overschreden.

De relevante onttrekkingen uit het Betuwepand en de Nederrijn/Lek onder droge omstandigheden zijn vastgesteld in samenspraak met de begeleidingsgroep. De onttrekkingen zijn aan de conservatieve kant gekozen, de drempelwaarden zijn deels afkomstig uit Hydrologic (2013) [ref 9], deels uit 'Factsheets uitwisselingspunten 2015-05-31' [ref 10] en deels uit Wittenveen en Bos (2015) [ref 11]. De drempelwaarden worden in het hydraulische model niet gebruikt maar worden in hoofdstuk 4.7 gebruikt om vast te stellen onder welke scenario's er knelpunten ontstaan met betrekking tot waterinname.

2.2 Scenario's

De scenario's bestaan uit een combinatie van een bovenstroomse afvoer bij Lobith en een afvoer over het Betuwepand. Bij Lobith zijn 600, 800 en 1000 m³/s opgelegd, deze worden aangegeven met Q600, Q800 en Q1000. Over het Betuwepand worden 4 afvoeren opgelegd: 25, 50, 75 en 100 m³/s, deze worden aangegeven met O25 – O100, de 'O' staat voor onttrekking. Om het effect van het verhogen van het debiet over het Betuwepand te bestuderen moeten ook referentiesommen worden gedaan zonder de verhoging. Een interne afvoerverdeling die leidt tot deze afvoeren wordt getoond in Tabel 2. Deze verdeling van de debieten over de verschillende kunstwerken is niet nauwkeurig vastgesteld. Doel van het onderzoek is om vast te stellen met welke beperkingen rekening gehouden moet worden als de aanvoer vanuit de Waal richting de Lek vergroot wordt. De onderste regel uit tabel 2 is bepalende voor deze analyse: dit is het debiet dat door de Bernardsluizen stroomt.

Aangenomen is dat bij Amerongen altijd 20 m³/s afvoer beschikbaar is. Bij de Prinses Irenesluizen neemt het debiet toe, dit deel kan worden gebruikt in de Kleinschalige Wateraanvoer (KWA), en om verzilting door de vergrote Zeesluis IJmuiden tegen te gaan. Een ander deel van het verhoogde debiet wordt bij Hagestein onttrokken, dit deel gaat o.a. verzilting in het Rijnmondgebied tegen. De Linge en Kromme Rijn onttrekken altijd hetzelfde debiet.

De 12 scenario bestaan dus uit een combinatie van afvoer en onttrekking. Q1000 - O25 is het minst zware scenario voor het systeem. Q600 - O100 is het zwaarste scenario.

Scenario's	Ref 0	O25	O50	O75	O100
Stuw Amerongen	+20	+20	+20	+20	+20
Irenesluizen	-5	-30	-41	-52	-63
Stuw Hagestein	0	0	-14	-28	-42
Innamepunt Linge	-5	-5	-5	-5	-5
Innamepunt Kromme Rijn	-10	-10	-10	-10	-10
Totaal Bernardsluizen	0	-25	-50	-75	-100

Tabel 2 verdeling van de afvoeren over de verschillende stuwen en innamepunten voor de scenario's.

3 STROMINGSMODEL

Het Rijntakkenmodel versie j16_5 is qua schematisatie aangepast aan het prototype en daarna gekalibreerd. Onderstaand worden in Figuur 3 de 'Branches' en 'Nodes', de takken en knooppunten van het model weergegeven. De aanpassingen en kalibratie van het model zijn onderstaand beschreven. Voor een uitgebreidere model beschrijving verwijzen we naar de rapportage bij de oplevering van het model [ref 7].



Figuur 3 Uitsnede uit stromingsmodel SOBEK 3 Rijntakken

3.1 Aanpassingen

Het van H.A. van Beuningengemaal was in het model gesitueerd langs de Nederrijn, in werkelijkheid bevindt deze zich op het kruispunt van de Linge en het Betuwepand. Dit object is verwijderd omdat zich op het kruispunt twee andere objecten bevonden, namelijk 'ARK-vanLinge' en 'ARK-naarLinge'. Deze laatste is gebruikt om de onttrekking van het ARK naar de Linge (5 m³/s zie Tabel 1) te realiseren.

Verder hadden de kunstwerken op het ARK afwijkende afmetingen qua breedte en drempel hoogte. Deze zijn aangepast volgens de onderstaande tabel (Tabel 3). De afvoercoëfficiënten van de sluiscomplexen waren niet gekalibreerd, alle waarden stonden op 1. Dit is gehandhaafd in de gebruikte schematisatie; hier is achteraf een correctie voor doorgevoerd (zie hoofdstuk 3.4). In de toegepaste correctie wordt rekening gehouden met de configuratie van de verschillende doorstroomde secties voor het bepalen van de afvoercoëfficiënt.

	Breedte oud (m)	Drempel oud (m)	Breedte nieuw (m)	Drempel (m t.o.v. NAP)
Keersluis Ravenswaay (onderdeel Marijkesluizen)			80	-2,35
Schutsluizen Marijkesluizen			2 x 18	Vloer -2,35 Drempel - 1.70
Marijke sluisen totaal	30	-2	80 + 2 x 18 = 116	-2,35
Bernhardsluizen	30	-2	18 + 24 = 42	-2,35 (vloer)

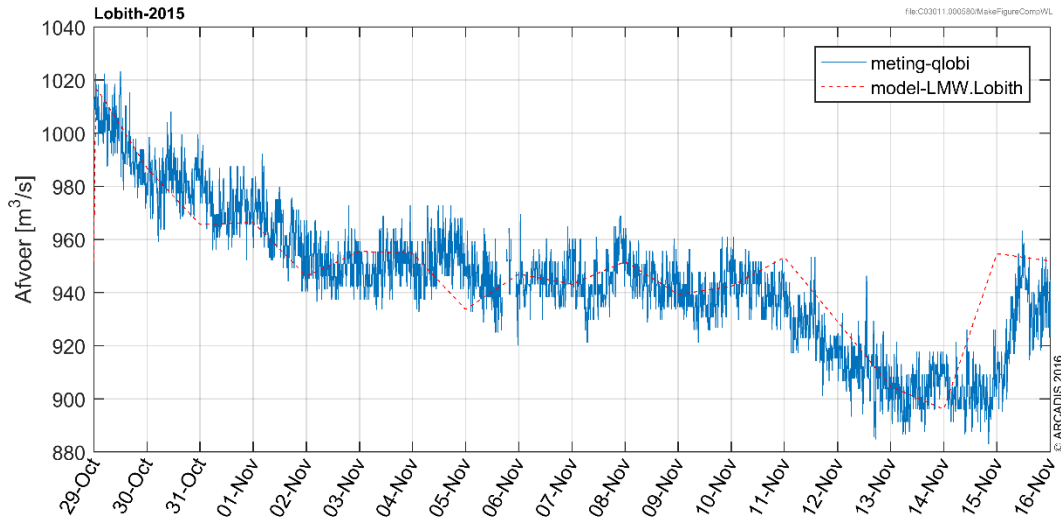
Tabel 3 veranderingen aan kunstwerken in SOBEK schematisatie

3.2 Kalibratie

Het aangeleverde SOBEK Rijntakken model is op ruwheid gekalibreerd op afvoeren van 16.000, 11.800, 4.450 en 2.700 m³/s. Het model wordt toegepast voor afvoeren van 1000 m³/s en lager. Daarom is het model gecontroleerd door een vergelijking met de waterstanden en de afvoeren die tussen 29 oktober en 16 november 2015 gemeten zijn langs de rijntakken te maken. Met de op 2.700 m³/s gekalibreerde ruwheid zijn de waterstanden wat aan de hoge kant op diverse plekken in het model. Het model is daarom in stappen

gekalibreerd om bruikbaar te zijn onder lagere afvoeren. Hierbij is gebruik gemaakt van de boven genoemde tijdserie. De afvoer die is opgelegd als bovenstroomse randvoorwaarde voor het model wordt getoond in Figuur 4.

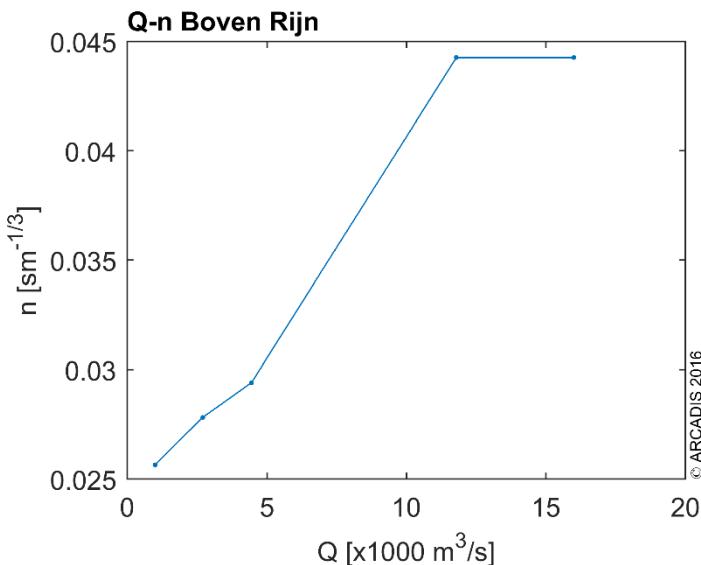
De stappen die zijn doorlopen om het model te kalibreren zijn onderstaand beschreven:



Figuur 4 Opgelegde tijdserie afvoer Lobith voor kalibratie model

Stap 1: Ruwheid Boven Rijn (BR), Pannerdens Kanaal (PK) en Waal geëxtrapoleerd naar lagere waarde

Op de Rijntakken neemt de ruwheid over het algemeen toe met een toenemende afvoer. Om toch te rekenen met een lage afvoer is als eerste stap de ruwheid verlaagt langs de Rijntakken. Figuur 5 toont de door Deltares bepaalde relatie tussen de ruwheid (Manning's n [$s/m^{1/3}$]) en de afvoer. Een nieuw kalibratiepunt is toegevoegd die hoort bij een afvoer van $1000\text{ m}^3/s$ bij Lobith. De ruwheid was een extrapolatie van de laagste door Deltares gekalibreerde waarden. In Figuur 5 is dit dus te zien als het punt bij $1000\text{ m}^3/s$. Deze geëxtrapoleerde punten zijn in de vervolgstappen van de kalibratie overschreven.



Figuur 5 Manning's n waarde als functie van de afvoer bij Lobith voor de Boven Rijn.

Na de 1^e stap bleek de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop niet in overeenkomst met de gemeten afvoerverdeling, want het PK trok te weinig water. Met de ruwheid op het PK bleek dit moeilijk te kalibreren, maar door de ruwheid op de IJssel te verlagen verminderd de waterstand op het PK en trekt deze meer water. Daarom is in stap 2 en 3 de ruwheid in twee stappen verlaagd.

Stap 2: Ruwheid IJssel gladder $n = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$

Stap 3: Ruwheid IJssel gladder $n = 0,026 \text{ sm}^{-1/3}$

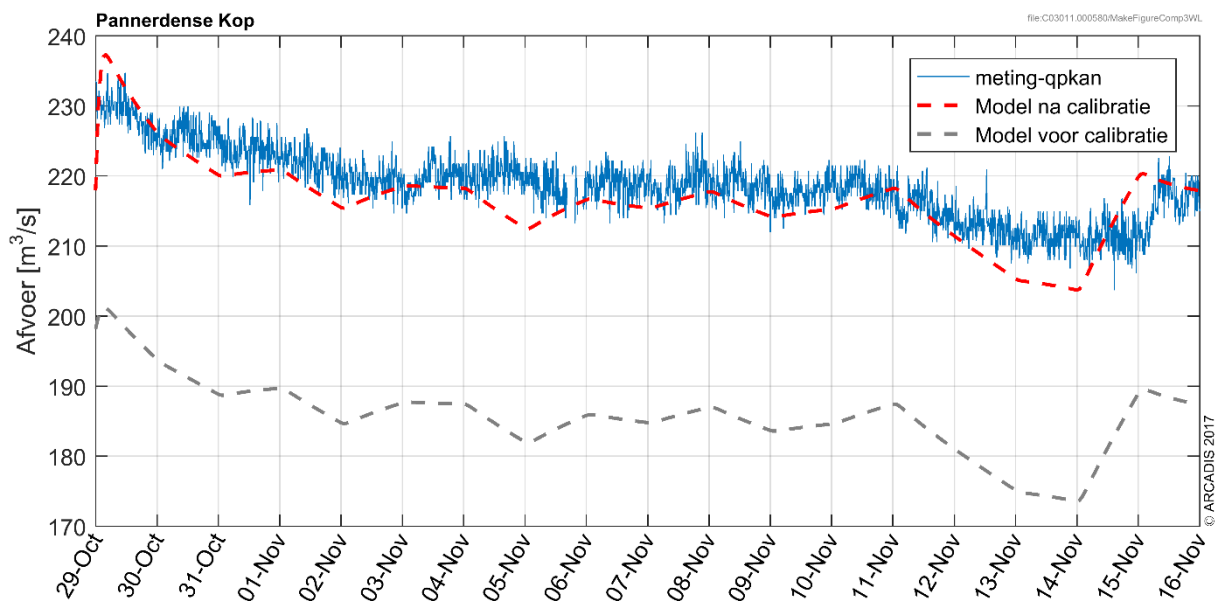
In stap 4 t/m 6 is de waterstand op de Waal in het algemeen gekalibreerd en later ook voor de waterstand bij Tiel in het bijzonder. De waterstand op de Waal bij Tiel is bepalend voor de waterstand in het Betuwepand wanneer de Bernhardsluizen geopend zijn. Daarom is aan dit punt extra aandacht besteed.

Stap 4: Ruwheid Waal $n = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$

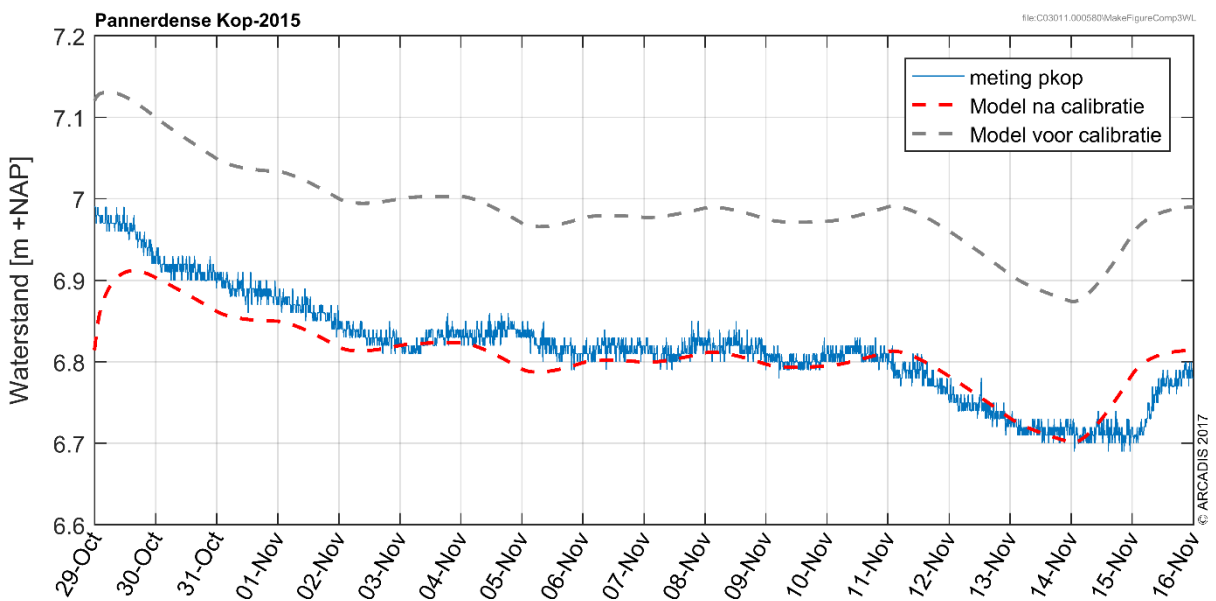
Stap 5: Waal na Ark $n = 0,032 \text{ sm}^{-1/3}$

Stap 6: Waal 3 $n = 0,028 \text{ sm}^{-1/3}$

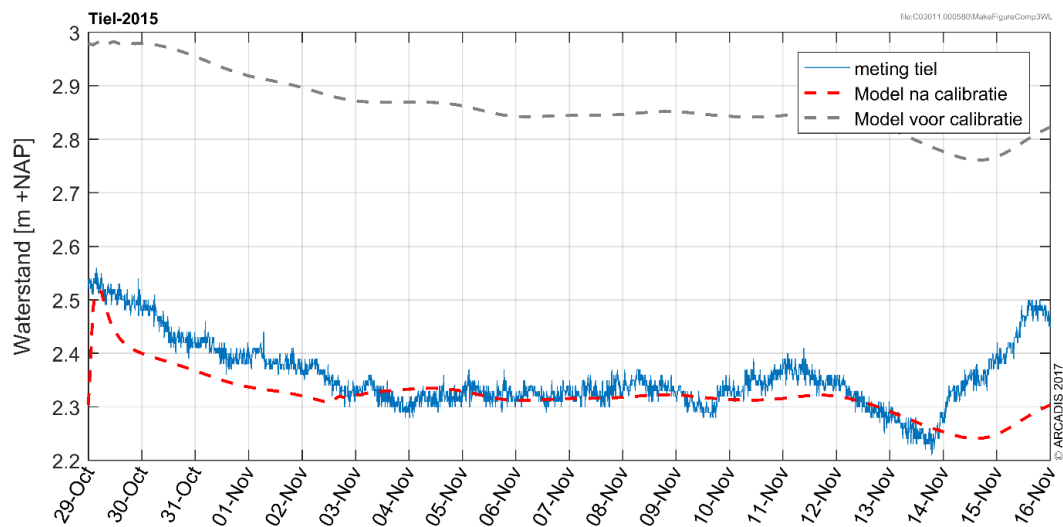
Figuur 6 toont de afvoer en Figuur 7 toont de waterstand op het PK voor en na de kalibratie. De afvoer op het PK is gemiddeld nog ongeveer $5 \text{ m}^3/\text{s}$ te laag en $5 \text{ m}^3/\text{s}$ te veel op de Waal.



Figuur 6 Afvoer bij Pannerdense Kop na kalibratie



Figuur 7 Waterstanden bij Pannerdense Kop na kalibratie



Figuur 8 Waterstanden bij Tiel na kalibratie model

	Q 2700 / Voor	Q 1000 / Na	Opm
Bovenrijn	0,027	0,0257	
Pannerdens Kanaal	0,030	0,0250	
Betuwepand	0,030	0,030	Onveranderd
IJssel	0,029 - 0,043	0,0260	
Waal tot ARK			
Waal 1	0,022	0,030	
Waal 2	0,032	0,030	
Waal 3	0,030	0,028	
Waal na ARK			
Waal 4	0,039 - 0,046	0,032	
Waal 5	0,028 - 0,046	0,032	
Waal 6	0,029	0,032	
Nederrijn	0,029 - 0,033	0,029 - 0,033	Onveranderd
Lek	0,026-0,033	0,026 - 0,033	Onveranderd

Tabel 4 Ruwheden (Manning's n [$sm^{-1/3}$]) voor en na kalibratie.

Conclusie kalibratie

Met de ruwheidskalibratie is een redelijk goede afvoerverdeling op de Pannerdense kop verkregen; ten opzichte van de meting is de afvoer ongeveer $5 \text{ m}^3/\text{s}$ te laag. Dit is een afwijking van minder dan 1% ten opzichte van de afvoer van de Rijn. De waterstand bij Tiel klopt redelijk; over de periode waar de afvoer constant is, wordt de waterstand minder dan 5 cm te hoog voorspeld.

Afwijking bij niet stationaire stroming

De waterstand volgt veranderingen in de afvoer te langzaam. Dit wordt veroorzaakt door de storage die op lage niveaus in het model aanwezig is, deze storage is afkomstig uit bijvoorbeeld zandwinplassen in het winterbed. Echter, deze storage is onder laagwater omstandigheden niet relevant in het stromingsmodel. In het model wordt de storage gevuld of geleegd bij afvoerveranderingen waardoor de waterstand in het model achterloopt op de meting.

Deze afwijkingen treden alleen op onder niet-stationaire omstandigheden. Alle scenario's in deze studie worden als stationaire afvoer beschouwd waardoor het niet nodig is het model op dit punt aan te passen.

3.3 Resultaten

3.3.1 Afvoeren

De onderstaande tabellen (Tabel 5 tot Tabel 7) tonen de debietverdeling over de Rijntakken. Als één getal wordt weergegeven, is dit het gemiddelde debiet van de tak; door laterale onttrekkingen neemt deze in stroomafwaartse richting af. Bij andere takken wordt het begin en het eind debiet weergegeven.

Q600	025	050	075	0100
Bovenrijn	600	600	600	600
Pannerdens Kanaal begin	143	143	143	143
Pannerdens Kanaal eind	138	138	138	138
IJssel begin	112	112	112	112
Nederrijn begin	26	26	26	26
Nederrijn eind	10	10	10	10
Lek	0	14	27	41
Waal tot ARK	457	457	457	457
Waal na ARK	433	408	383	358
Betuwepand	22	47	72	97

Tabel 5 afvoerverdeling over de Rijntakken in m³/s voor 600 m³/s bij Lobith

Q800	025	050	075	0100
Bovenrijn	800	800	800	800
Pannerdens Kanaal	190	190	190	190
Pannerdens Kanaal	185	185	185	185
IJssel begin	159	159	159	159
Nederrijn begin	26	26	26	26
Nederrijn eind	10	10	10	10
Lek	0	14	27	41
Waal tot ARK	610	610	610	610
Waal na ARK	586	561	536	511
Betuwepand	22	47	72	97

Tabel 6 afvoerverdeling over de Rijntakken in m³/s voor 800 m³/s bij Lobith

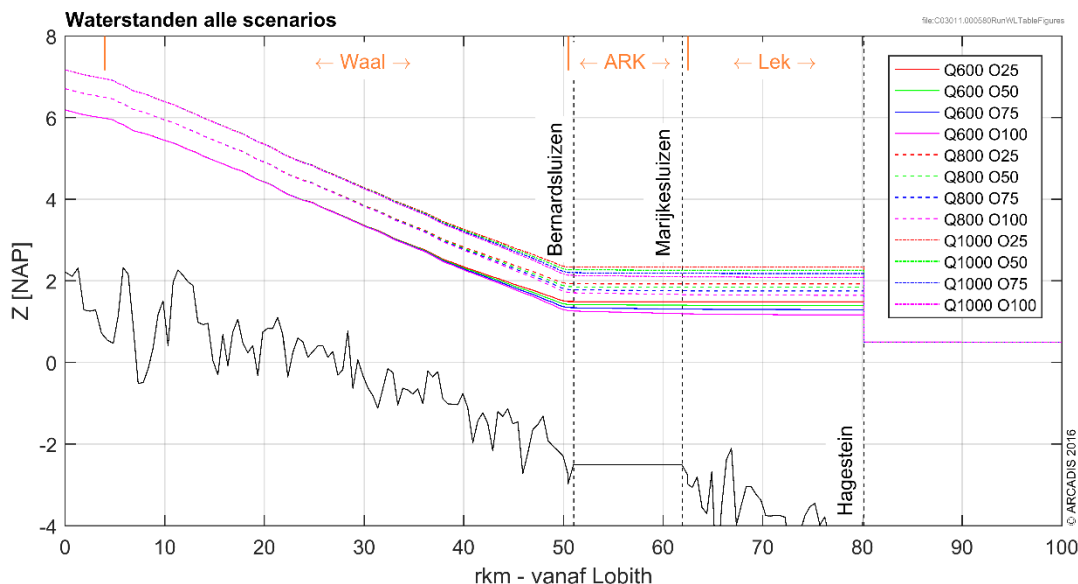
Q1000	025	050	075	0100
Bovenrijn	1000	1000	1000	1000
Pannerdens Kanaal	238	238	238	237
Pannerdens Kanaal	233	233	233	232
IJssel begin	207	207	207	206
Nederrijn begin	26	26	26	26
Nederrijn eind	10	10	10	9
Lek	0	14	27	41
Waal tot ARK	762	762	762	763
Waal na ARK	739	714	689	664
Betuwepand	22	47	72	97

Tabel 7 afvoerverdeling over de Rijntakken in m³/s voor 1000 m³/s bij Lobith

3.3.2 Waterstanden

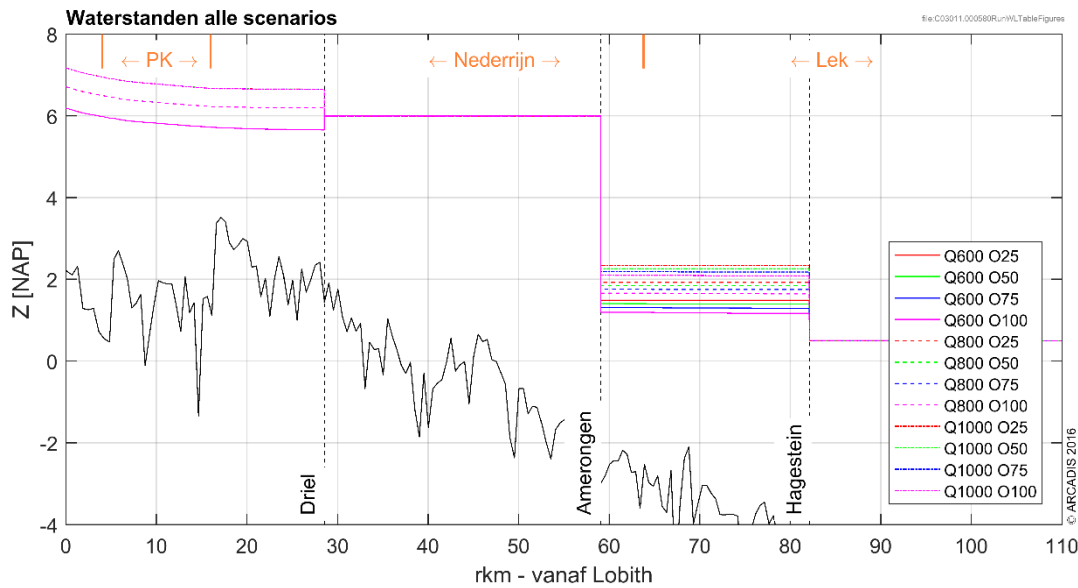
De waterstanden voor alle scenario's zijn weer gegeven in twee profielen door de Rijntakken. Figuur 9 toont de waterstanden langs de Bovenrijn, de Waal tot de splitsing naar het ARK, het ARK tot de kruising met de Lek en tenslotte de Lek. Figuur 10 toont de waterstanden langs de Bovenrijn, het Pannerdens Kanaal, de Nederrijn en tenslotte de Lek. Wanneer de rivierkilometers van de takken zouden worden gebruikt, ontstaat er een verspringende x-as die onlogisch lijkt. Daarom is er gekozen voor een x-as die langs de gekozen route de afstand tot Lobith geeft. Waar mogelijk is langs individuele takken wel met de RWS rivierkilometers gewerkt.

Figuur 9 toont duidelijk een vrij afstromend deel met een verhang van ca. 1 m per 10 km tot de splitsing naar het ARK. Op het ARK en de Lek zijn vrij geringe verhangen aanwezig, deze worden bepaald door het onttrokken debiet. Op de Waal zijn 3 groepen lijnen zichtbaar die richting de splitsing divergeren. Bovenstrooms wordt de waterstand bepaald door het bovenstroomse debiet, richting het ARK wordt de waterspiegel omlaag getrokken door de onttrekking over het Betuwepand. Het bovenstroomse debiet veroorzaakt grotere verschillen in de waterstanden dan de onttrekkingen. In hoofdstuk 3.4 worden de waterstanden langs het Betuwepand nauwkeuriger vastgesteld.



Figuur 9 Waterstanden tracé Waal – AKR Betuwepand – Lek

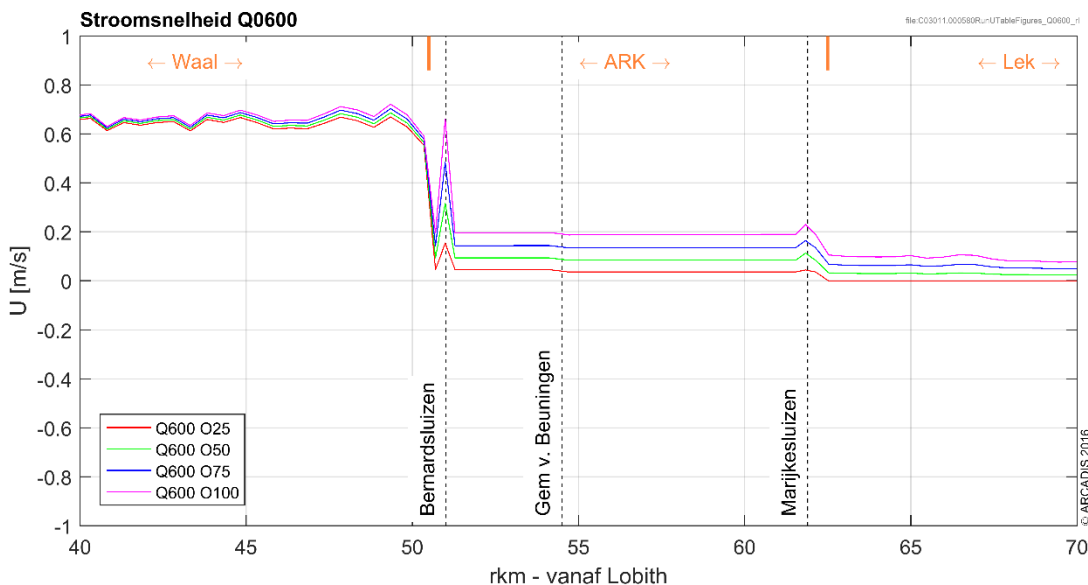
Figuur 10 toont het gestuwde karakter van de Nederrijn en Lek. Op het Pannerdens Kanaal bestaan verschillen in waterstand door de verschillen in de afvoer bij Lobith. Er is aangenomen dat het stuwpand Driel – Amerongen altijd 20 m³/s doorlaat, dit is in het model gerealiseerd met een pomp. Hierdoor behaalt het stuwpand Amerongen te allen tijde zijn stuwpeil, ook wanneer de waterstand boven stuw Driel lager uitvalt. Dit levert een niet realistische waterstand in dit stuwpand op. Voor deze analyse is dit niet relevant; de enige eis aan stuw Amerongen is dat deze 20 m³/s doorlaat. Deze keuze is gemaakt om de scenario's vergelijkbaar te houden. Op het stuwpand Hagestein is variatie in de waterstanden zichtbaar die ontstaat door de onttrekking via het Betuwepand.



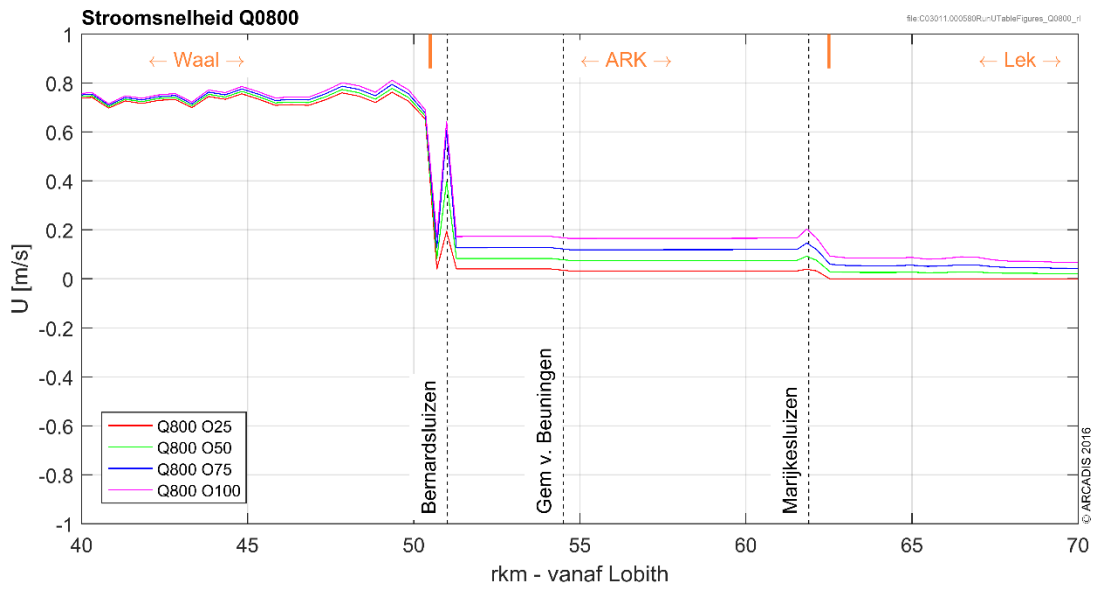
Figuur 10 Waterstanden tracé PK – Nederrijn – Lek

3.3.3 Stroomsnelheden

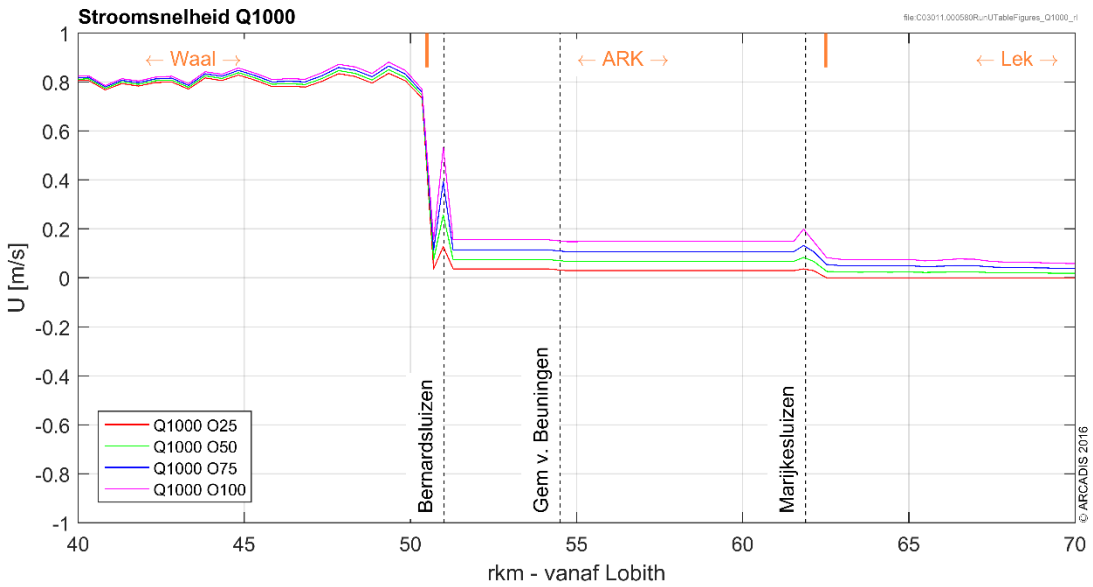
In onderstaande figuren (Figuur 11 tot Figuur 13) wordt de stroomsnelheid getoond voor de scenario's. Op de Waal is de stroomsnelheid ca. 0,6 – 0,9 m/s. Op het Betuwepand zijn de stroomsnelheden veel geringer, maximaal ca. 0,2 m/s. Behalve bij de Bernard- en Marijkesluizen, waar de stroomsnelheid door de vernauwing lokaal toeneemt. Bij de Bernardsluizen worden snelheden tot ca. 0,6 m/s bereikt en bij de Marijkesluizen is het doorstroomoppervlak veel groter, waardoor de snelheid in veel mindere mate toeneemt.



Figuur 11 Stroomsnelheden langs Waal, ARK en Lek voor de scenario's met een afvoer van 600 m³/s.



Figuur 12 Stroomsnelheden langs Waal, ARK en Lek voor de scenario's met een afvoer van 800 m³/s.



Figuur 13 Stroomsnelheden langs Waal, ARK en Lek voor de scenario's met een afvoer van 1000 m³/s.

3.4 Afvoermodel Bernhardsluizen & Marijkesluizen

De afvoer, de waterstanden en de stroomsnelheden die zijn berekend met het stromingsmodel (die zijn beschreven in de voorgaande paragrafen), zijn toepasbaar voor de reguliere rivier- en kanaalprofielen. De waterstanden en afvoeren bij de sluisen zijn niet voldoende gedetailleerd gemodelleerd in het SOBEK-model. Om in deze verkennende analyse voldoende gedetailleerdere uitspraken te doen van de afvoeren ter hoogte van de sluisen, is een analytisch model opgesteld waarin de afvoer en de stroomsnelheid per kolk berekend is. Het resultaat van deze analyse is een profielgemiddelde stroomsnelheid berekening voor de debieten en waterstanden uit paragraaf 3.3 voor elke doorstroomopening.

Het debiet door het Betuwepand stroomt in door de Bernhardsluizen en stroomt uit door de Marijkesluizen & Kering Ravenswaaij. Bij instroom kan het debiet zich verdelen over:

- De Westkolk
- De Oostkolk
- De spuirollen
 - 2 van de 3 spuirollen zijn afgesloten of onbruikbaar. De verwachte capaciteit van het laatste spuirool zal laag zijn ten opzichte van de capaciteit van de kolken.
 - Het debiet en de stroming door het spuirool wordt verwaarloosd binnen deze studie.

Bij uitstroom kan het debiet zich verdelen over:

- Kering Ravenswaaij
- De Westkolk
- De Oostkolk.

De verdeling over de openingen volgt uit de mate van weerstand van elke opening. De weerstand wordt bepaald door een combinatie van het doorstroom oppervlak, de wand ruwheid en de vorm ruwheid (locaties waar stromingsloslating optreedt). Het grootste debiet zal door de opening met de minste weerstand stromen.

3.4.1 Bepaling afvoercoëfficiënt

Het debiet per doorstroomopening is berekend conform de theorie beschreven in *Toegepaste Vloeistofmechanica [ref 1]* en *Vloeistofmechanica [ref 2]*. Voor elke doorstroomopening is een afvoercoëfficiënt afgeleid, waardoor het debiet per doorstroomopening bepaald is. De afvoercoëfficiënten zijn bepaald op basis van het instroomverlies, het uitstroomverlies en het verlies door wrijving. De verliescoëfficiënten (ξ) zijn omgerekend naar een afvoercoëfficiënten op basis van de onderstaande formule.

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_{instroom} + \xi_{wrijving} + \xi_{uitstroom}}}$$

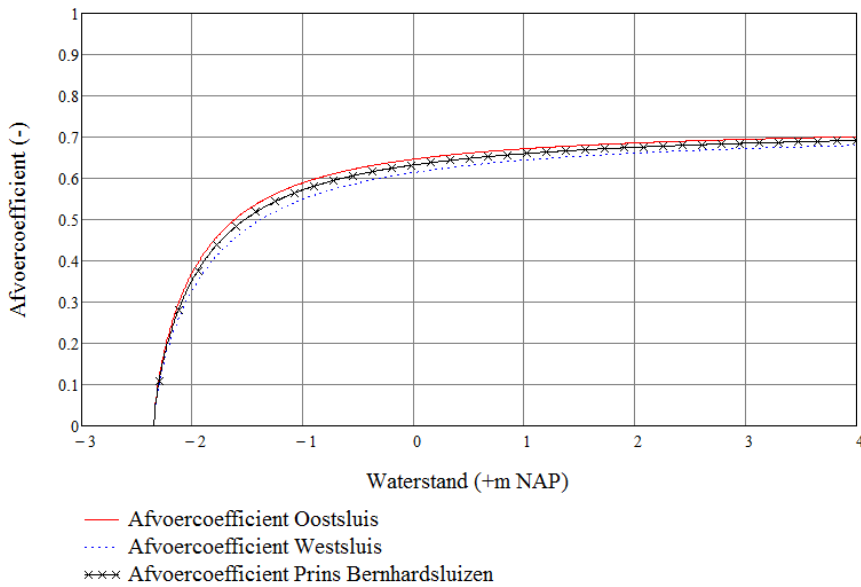
Om de gemodelleerde debieten (25 m³/s, 50 m³/s, 75 m³/s en 100 m³/s) door de doorstroomopeningen van de sluiscomplexen te laten stromen is een verval nodig. Het benodigde verval voor de complexen is berekend op basis van de totale afvoer capaciteit en de beschikbare doorstroomopeningen. Zie hiervoor de onderstaande impliciete formule voor de Prins Bernhardsluizen. Door de gemodelleerde debieten gelijk te stellen aan Q_{totaal} kan het benodigde verval over de complexen bepaald worden.

$$Q_{totaal}(\Delta h, h_{ARK}) = Q_{oostelijke\ kolk}(\Delta h, h_{ARK}) + Q_{westelijke\ kolk}(\Delta h, h_{ARK})$$

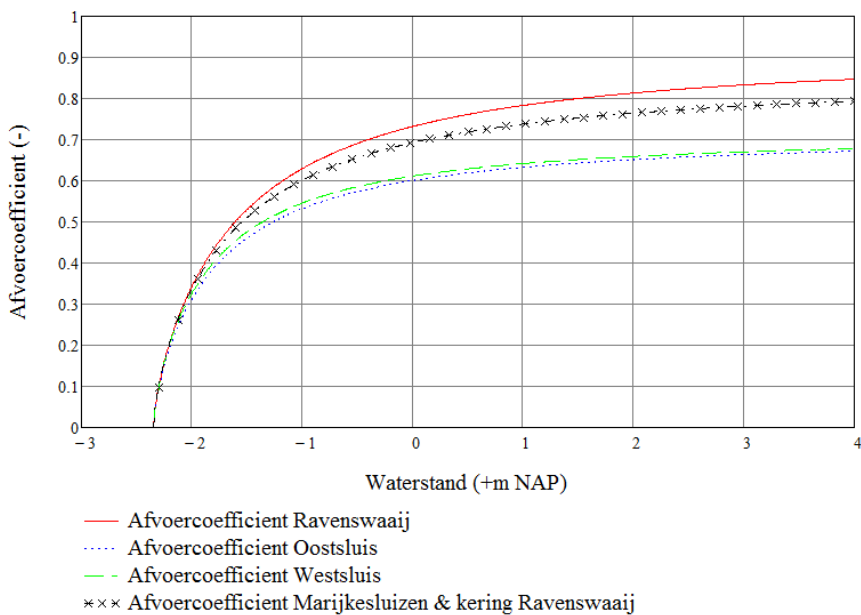
Met het bepaalde verval kan vervolgens de afvoercoëfficiënt van het totale complex berekend worden. De afvoercoëfficiënt voor de Prins Bernhardsluizen wordt bepaald met behulp van onderstaande formule.

$$\mu_{totaal} = \frac{Q_{totaal}(\Delta h, h_{ARK})}{(A_{oostsluis} + A_{westsluis}) * \sqrt{2 * g * \Delta h}}$$

In deze formule is Q het debiet, μ de afvoercoëfficiënt, A het doorstroomoppervlak, g de zwaartekracht versnelling en h de diepte. De afvoercoëfficiënten voor de Prins Bernhardsluizen en de Prinses Marijkesluizen zijn gegeven in Figuur 14 en Figuur 15. De gekleurde lijnen geven de afvoercoëfficiënten per doorstroomopening weer en de zwarte lijn met kruisjes geeft de afvoercoëfficiënten voor het totale complex weer.



Figuur 14 Afvoercoëfficiënten Prins Bernhardsluizen als functie van de waterstand boven de sluisen.

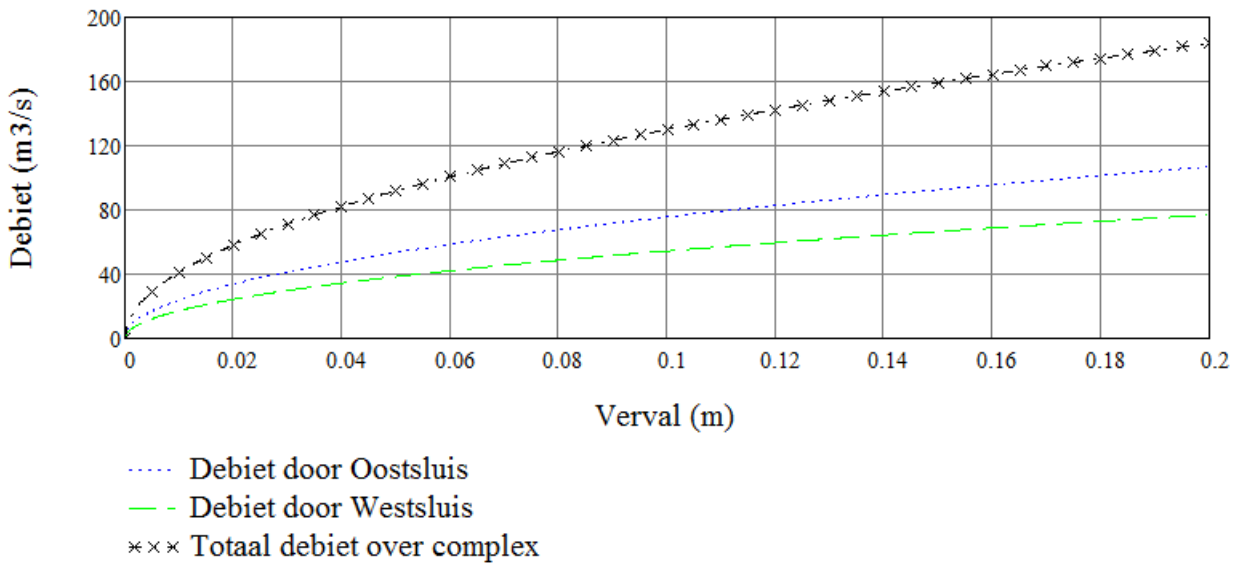


Figuur 15 Afvoercoëfficiënten Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij als functie van de waterstand boven de sluisen en kering.

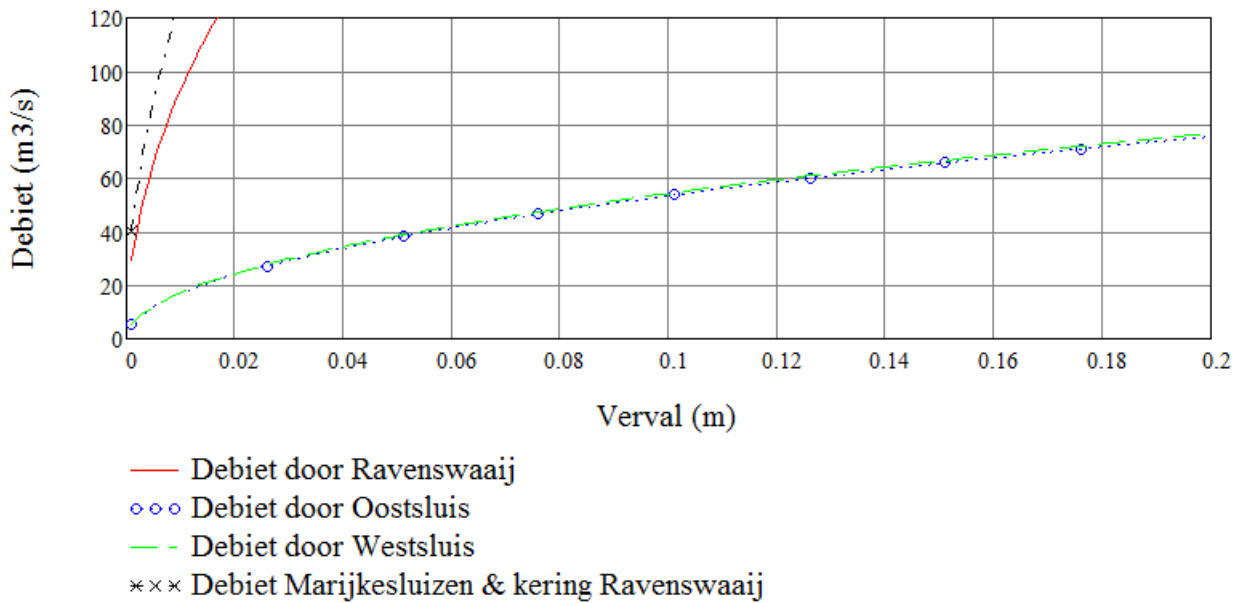
Het verval is voor elke opening gelijk. M.b.v. onderstaande formule kan het debiet per opening berekend worden voor een gegeven verval en waterstand.

$$Q = \mu * A_{opening} * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

De debieten door de complexen zijn gegeven in Figuur 16 en Figuur 17. In deze figuren is te zien dat voor een maximaal debiet van 100 m³/s zoals toegepast in het SOBEK-model een klein verval benodigd is. Op basis van de verdeling van de debieten over de doorstroomopeningen wordt voor elk gemodelleerd scenario in de stroomsnelheid per doorstroomopening bepaald.



Figuur 16 Vervallen en debieten door Prins Bernhardsluizen

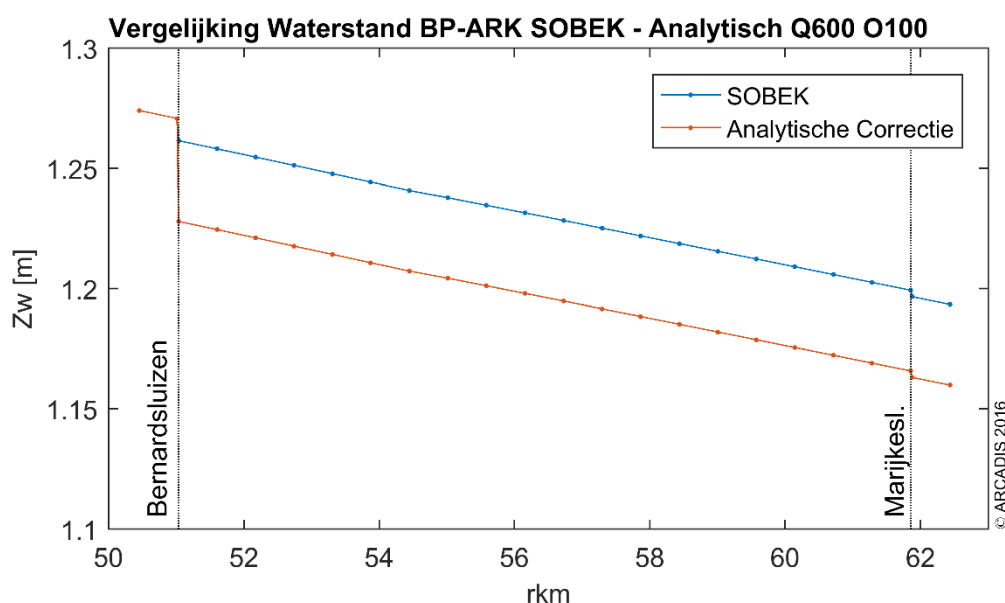


Figuur 17 Vervallen en debieten door Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij

3.4.2 Maatgevende waterstanden Bernhardsluizen & Marijkesluizen

Het met SOBEK berekende verval over de kunstwerken is kleiner dan het analytisch berekende verval omdat geen afvoercoëfficiënten in rekening zijn gebracht in het Rijntakkenmodel. Omdat het SOBEK-model hier niet mee in overeenstemming is gebracht, moeten deze verschillen bij de interpretatie van de uitkomsten in rekening worden gebracht. De onderstaande tabellen (Tabel 8 tot Tabel 10) tonen de waterstanden op belangrijke locaties langs het Betuwepand en het verval over de kunstwerken. De waterstanden uit SOBEK worden hierbij gecorrigeerd voor het nauwkeurigere analytische verval over de kunstwerken.

Figuur 18 illustreert de verschillen tussen de analytische en met SOBEK berekende waterstanden langs het Betuwepand. De waterstand aan de bovenstroomse kant van het model, de Waal bij Tiel, verandert niet, omdat de afvoerverdeling niet verandert met de hier doorgevoerde correcties. Vooral de correctie van verhang over de Bernhardsluizen zorgt ervoor dat de waterstand benedenstrooms lager wordt. Deze verlaging werkt door over het hele stuwpand Hagestein.



Figuur 18 Illustratie verschil SOBEK en analytische oplossing voor het worst-case scenario.

Scenario Q600	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Prins Bernard Sluizen				
Waterstand PB Boven (m NAP)	1,495	1,422	1,348	1,274
Verval PB SOBEK (m)	0,001	0,003	0,007	0,013
Verval PB Analytisch (m)	0,002	0,010	0,024	0,046
Waterstand PB Beneden (m NAP)	1,493	1,412	1,324	1,228
Min diepte kolk PB (m)	3,84	3,76	3,67	3,57
Prinses Marijke Sluizen				
Waterstand PM Boven (m NAP)	1,491	1,400	1,292	1,166
Verval PM SOBEK (m)	0,0001	0,0005	0,0014	0,0027
Verval PM Analytisch (m)	0,0002	0,0011	0,0026	0,0051
Waterstand PM Beneden (m NAP)	1,490	1,399	1,290	1,160
Min diepte - beneden Marijke (m)	3,84	3,75	3,64	3,51

Tabel 8 Resultaten Scenario Q600

Scenario Q800	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Prins Bernard Sluizen				
Waterstand PB Boven (m NAP)	1,931	1,862	1,762	1,721
Verval PB SOBEK (m)	0,001	0,005	0,011	0,011
Verval PB Analytisch (m)	0,002	0,008	0,020	0,037
Waterstand PB Beneden (m NAP)	1,929	1,854	1,742	1,685
Min diepte kolk PB (m)	4,28	4,20	4,12	4,03
Prinses Marijke Sluizen				
Waterstand PM Boven (m NAP)	1,927	1,845	1,751	1,643
Verval PM SOBEK (m)	0,0001	0,0004	0,0011	0,0021
Verval PM Analytisch (m)	0,0002	0,0008	0,0021	0,0040
Waterstand PM Beneden (m NAP)	1,927	1,844	1,749	1,639
Min diepte - beneden Marijke (m)	4,28	4,19	4,10	3,99

Tabel 9 Resultaten Scenario Q800

Scenario Q1000	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Prins Bernard Sluizen				
Waterstand PB Boven (m NAP)	2,337	2,272	2,207	2,14
Verval PB SOBEK (m)	0,0004	0,002	0,004	0,008
Verval PB Analytisch (m)	0,0014	0,007	0,016	0,030
Waterstand PB Beneden (m NAP)	2,335	2,265	2,191	2,11
Min diepte kolk PB (m)	4,69	4,62	4,54	4,46
Prinses Marijke Sluizen				
Waterstand PM Boven (m NAP)	2,334	2,259	2,176	2,081
Verval PM SOBEK (m)	0,0001	0,0003	0,0009	0,0016
Verval PM Analytisch (m)	0,0001	0,0007	0,0017	0,0032
Waterstand PM Beneden (m NAP)	2,334	2,259	2,174	2,078
Min diepte - beneden Marijke (m)	4,68	4,61	4,52	4,43

Tabel 10 Resultaten Scenario Q1000

4 KNELPUNTANALYSE

4.1 Waal

4.1.1 Gevolgen afvoerverdeling Splitsingspunten

De vraag of de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop significant verandert door de extra onttrekking bij Tiel via het ARK kan worden beantwoord door middel van een vergelijking van de model resultaten bij verschillende afvoeren. Tabel 11 toont een overzicht van de waterstanden en afvoeren bij de Pannerdense Kop. De afvoeren zijn de afvoeren richting het Pannerdens Kanaal ende waterstanden zijn die aan de Waalkant van de splitsing. Te zien is dat de afvoer pas op de 2^e decimaal varieert. Deze getallen achter de komma zijn gezien de onzekerheden in het model niet significant, maar laten wel zien dat het effect van de onttrekking bij het ARK ter hoogte van de splitsing PK geen invloed meer heeft.

Geconcludeerd kan worden dat de toename van de onttrekking dus vrijwel geheel ten koste gaat van het debiet richting de Waal benedenstrooms van Tiel; het debiet richting het PK is vrijwel constant.

Afvoer PK (m ³ /s)	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Scenario Q600	143,17	143,15	143,13	143,11
Scenario Q800	190,02	189,97	189,93	189,90
Scenario Q1000	237,67	237,59	237,52	237,45

Tabel 11 Samenvatting waterstanden en afvoeren bij de Pannerdense Kop

4.1.2 Verandering vaardiepte Waal

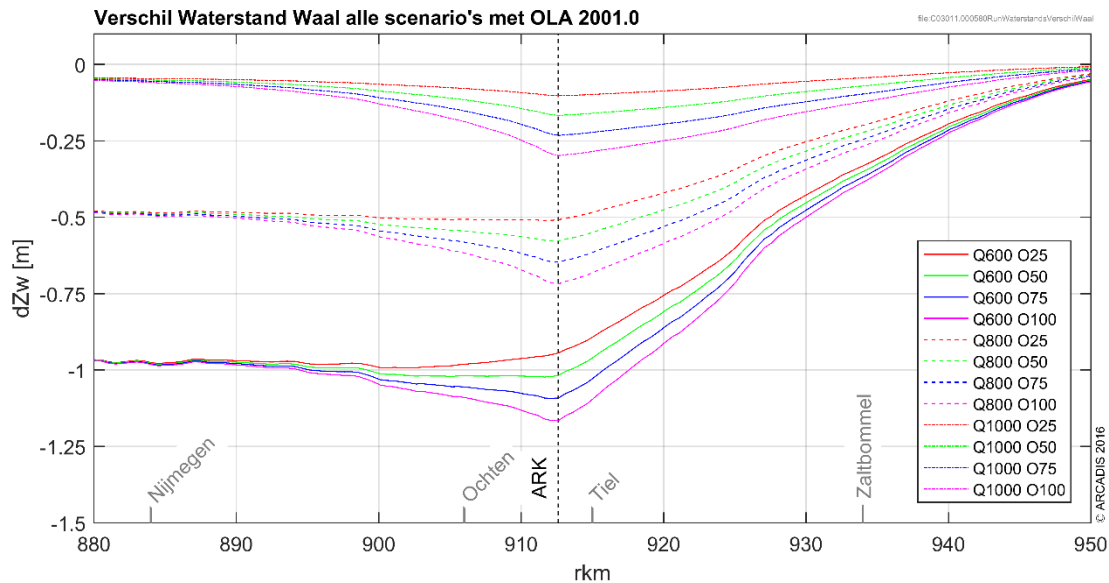
De diepte die is uitgerekend in het model is niet direct toepasbaar in het kader van een bevaarbaarheidsstudie. Dit wordt expliciet door Deltares vermeld in de modelhandleiding [ref 20]. De bodem is geschematiseerd tot een representatieve bodem voor de berekening van de afvoer, maar bevat geen definitie van een vaargeul. De over de hele dwarsdoorsnede gemiddelde diepte die wordt bepaald met het model valt in principe te laag uit.

Om toch iets te kunnen zeggen over de gemiddelde diepte in de vaargeul is aangenomen dat de vaargeul bij overeengekomen lage afvoer (OLA) wordt onderhouden op een diepte van 2,8 m. Dit werk wordt in het kader van een prestatiecontract uitgevoerd door firma Van den Herik Sliedrecht (opdrachtnemer) en firma De Jong en Zoon te Beesd (baggeraar in onderaanneming). De vaargeuldiepte van 2,8 m bij OLA is een internationale afspraak gemaakt in het kader van de CCR, de Centrale Commissie voor de Rijnvaart. Hier is uitgegaan van een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith als OLA (OLA 2001.0) [ref 4].

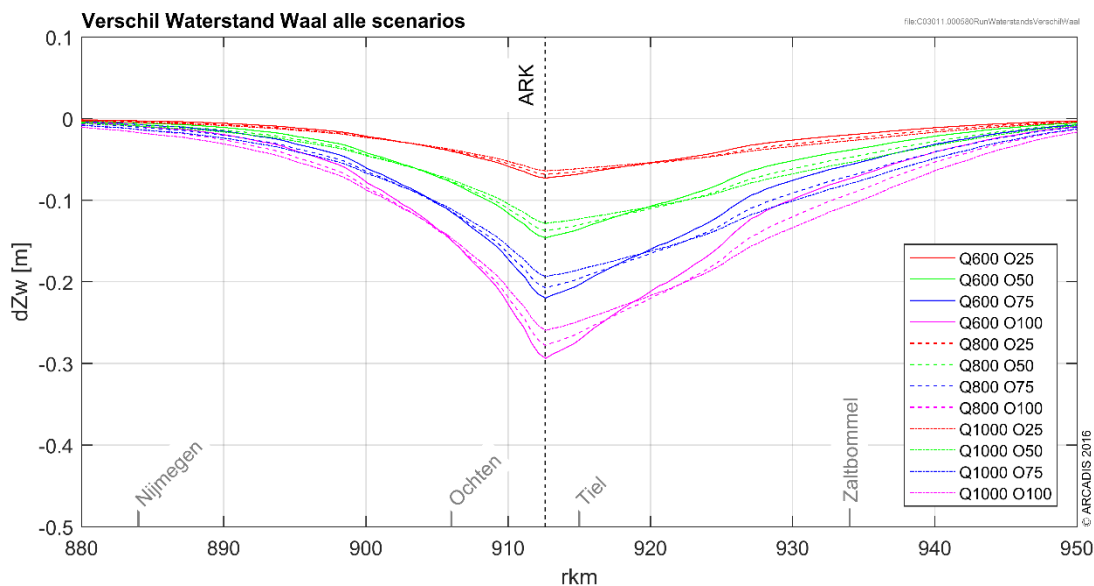
Figuur 19 toont het verschil in waterstand (dZw) tussen de som met een afvoer van 1020 m³/s zonder extra onttrekkingen (Ref 0 in Tabel 2) en de scenario's. Gegeven de gemiddelde stromingsweerstand van de Waal bij lage afvoeren zorgt elke 10 m³/s afname van het debiet voor een waterstandsdaling van ongeveer 2,5 cm. De scenario's met 1000 m³/s hebben daarom een evenwichtsdiepte die ongeveer 5 cm kleiner is dan bij OLA (1020 m³/s). Dit is te zien aan de linker kant van Figuur 19 waar de lijnen met verschillende afvoeren convergeren. Bij 800 m³/s is het verschil bijna -0,5 m en bij 600 m³/s is het verschil bijna -1 m. Aan de benedenstroomse kant van het systeem bepaalt de zeewaterstand de randvoorwaarde. Deze is voor alle scenario's gelijk. Daarom convergeren alle oplossingen aan de benedenstroomse kant; benedenstrooms van Gorinchem (rkm 955) worden de verschillen erg klein.

De extra onttrekkingen zorgen voor een extra lokale daling van de waterspiegel, deze is zichtbaar in Figuur 20 in de vorm van divergerende lijnen voor verschillende onttrekkingen ter hoogte van het rkm 912. In Figuur 21 is het verschil door een extra onttrekking op het ARK nog beter in beeld gebracht door elk scenario te vergelijken met een referentiesom met gelijke bovenstroomse afvoer. De Scenario's Q600 O25 - O100 zijn dus vergeleken met referentie som Q600 Ref 0 (zie ook Tabel 2) en analoog geldt dit ook voor de scenario's Q800 en Q1000. Figuur 20 laat zien dat het effect van een onttrekking bij benadering gelijk is voor verschillende bovenstroomse debieten. In meer detail laat dit figuur zien dat bij een kleine bovenstroomse afvoer de waterstandsdaling bij Tiel wat groter uitvalt, en de lengte waarover de verlaging plaatsvindt iets kleiner is. Hierdoor kruisen de lijnen. De grotere daling wordt veroorzaakt door de toename van de invloed van de bodemwrijving bij kleinere waterdieptes: er is een groter verhang nodig over het Betuwepand om de opgelegde onttrekkingen bij Hagestein en de Irenesluizen te bereiken. Hierdoor valt de diepte bij Tiel dus lager uit. De kortere lengte waarover de daling plaatsvindt heeft te maken met de aanpassingslengte van de

verhanglijnen. De aanpassingslengte is omgekeerd evenredig met de waterdiepte [ref 21] waardoor de waterdiepte bij een kleinere diepte sneller de evenwichtsdiepte benaderd dan bij een grotere diepte.

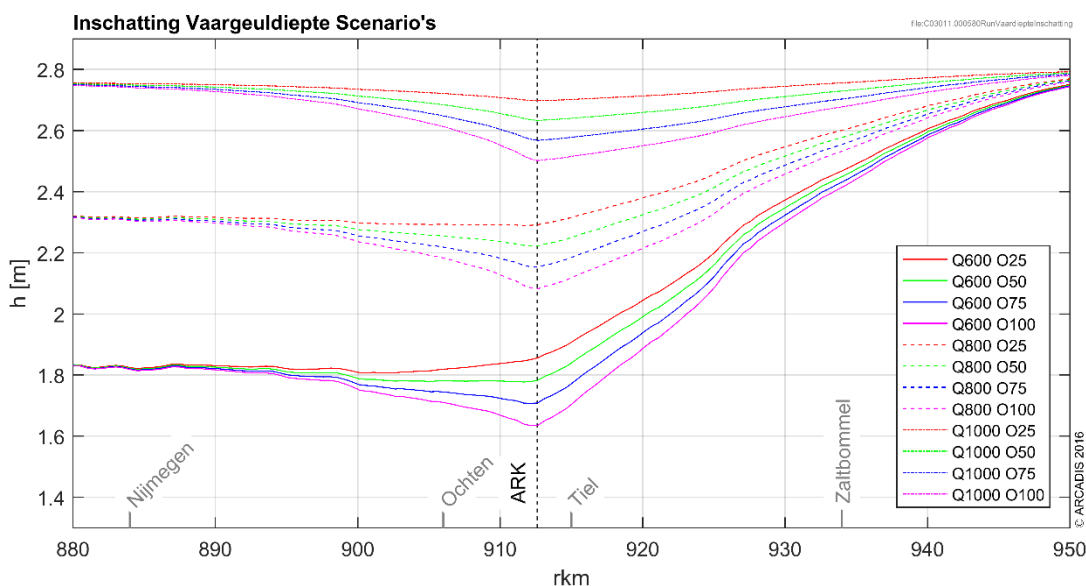


Figuur 19 het verschil tussen de waterstand in de verschillende scenario's en de waterstanden bij OLA 2001.0.



Figuur 20 het effect van de extra onttrekking op via het ARK op de waterstanden langs de Waal. De scenario's zijn hierin vergeleken met referenties met een gelijke bovenstroomse afvoer, de verschillen worden dus alleen veroorzaakt door de onttrekking op het ARK.

Door de aanname dat bij OLA de gemiddelde vaargeuldiepte 2,8 m is, kan een schatting worden gemaakt van de gemiddelde vaargeuldiepte in de verschillende scenario's. De geschatte vaargeuldiepte kan dus worden verkregen door 2,8 m op te tellen bij de y-as van Figuur 19. De geschatte vaargeuldiepte wordt getoond in Figuur 21.



Figuur 21 inschatting gemiddelde vaargeuldiepte onder aanname dat bij OLA de vaargeul op 2,8 m wordt onderhouden.

Op basis van dit figuur zou kunnen worden geconcludeerd dat de kleinste vaargeuldiepte in de meeste gevallen bestaat ter hoogte van de splitsing naar het ARK. Alleen bij scenario Q600 O25 is dit niet het geval. In dit scenario is de afvoer zo laag dat de verhanglijn naar de benedenstroomse randvoorwaarde de verhanglijn naar het ARK domineert. De beschikbare gemiddelde vaargeul diepte is bij de scenario's met 600 m³/s slechts 1,6 – 1,8 m. Bij deze diepten bestaat er een sterke aflaaddiepte beperking (zie Tabel 12). Met duwbakken kan nog aardig wat lading vervoert worden bij een diepte van 1,60 m. De grotere schepen (cat IV en Va) kunnen door lading in het voorruim nog wel wat lading meenemen, maar wel zeer beperkt. Kleinere schepen zijn ook beperkt, maar relatief minder sterk beperkt. Bij de scenario's met 800 m³/s is de maximale diepgang ca. 1,9 – 2,1 m. Bij 1000 m³/s is de maximale diepgang ca. 2,5 – 2,7 m. Dit betekent ook weer voor vrijwel alle klassen een aflaadbepaling.

Echter, de vaargeul is in de praktijk niet zo constant van diepte als hier wordt aangenomen en bevat een aantal knelpunten die in de praktijk de aflaaddiepte bepalen, de dagelijks afgegeven minst gepeilde diepte. De scheepvaart houdt veelal de deze MGD aan en laadt op die diepte af. Het MGD-punt bevindt zich, bij lage waterstanden, overwegend in het bochtige traject bij Nijmegen (Weurt). Om te beoordelen of de onttrekking via het ARK een vaardiepte beperking veroorzaakt moet dus worden gekeken of de MGD verandert. Omdat bij Nijmegen het effect van de verhanglijn van de onttrekking bij het ARK vrijwel uitgedoofd is beïnvloed de onttrekking niet in alle gevallen direct de MGD. Het is echter niet uit te sluiten dat een MGD-punt zich verplaatst richting Tiel waardoor de vaardiepte beperking toeneemt.

Schippers die varen op de route Amsterdam Rotterdam Antwerpen kunnen nu rekening houden met de kennis dat het MGD punt op het traject Millingen – Loevestein bij laagwateromstandigheden bepaald wordt bij Weurt en dieper afladen. Voor deze categorie kan de diepte al sneller beperkt worden dan op basis van de MGD zichtbaar is. Dit is voor deze schippers moeilijk dit van te voren te zien, omdat er geen aparte MGD voor het traject ARK – Loevestein wordt afgegeven.

Om de relevantie van het waterstandsverschil door onttrekking op het ARK voor de aflaaddiepte in de praktijk te bepalen, is een analyse van de vaarroutes en de daarin aanwezige drempels nodig. In deze analyse kan worden bepaald of het maatgevende knelpunt zich verplaatst richting het splitsingspunt naar het ARK of dat het punt hetzelfde blijft maar versterkt wordt door de extra onttrekking.

CEMT-klasse	breedte (m)	lengte (m)	diepgang (m)		strijkhogte (m)	laadverm. (ton)	motorverm. (kW)	boegschroef (kW)
			geladen	leeg				
I	5,05	38,5	2,5	1,2	4,25	365	175	100
II	6,6	50 - 55	2,6	1,4	5,25	535 - 615	240 - 300	130
III	8,2	67 - 85	2,7	1,5	5,35	910 - 1250	490 - 640	160 - 210
IV	9,5	80 - 105	3,0	1,6	5,55	1370 - 2040	750 - 1070	250
Va	11,4	110 - 135	3,5	1,8	6,40	2900 - 3735	1375 - 1750	435 - 705
VIa	17,0	135	4,0	2,0	8,75	6000	2400	1135

Tabel 12 Scheepskenmerken cf. Richtlijn Vaarwegen 2011, zie Bijlage 2 voor een uitbreiding met koppilverbanden.

4.1.3 Conclusies

1. Er is een duidelijke afname van de waterdiepte door een extra onttrekking op het ARK.
2. Op basis van het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de afname van de waterstand bij de splitsing Waal/ ARK, door de onttrekking, bij benadering kan worden weergegeven zoals in de volgende tabel:

Onttrekking	dZw
25 m ³ /s	-7 cm
50 m ³ /s	-14 cm
75 m ³ /s	-21 cm
100 m ³ /s	-28 cm

Dit zijn de gemiddelde maximale veranderingen van de waterstanden; de afname van de waterstand valt iets sterker uit wanneer de afvoer laag is en iets minder sterk als de afvoer hoog is.

3. De verandering van de waterstand is een worst-case scenario voor de verandering van de vaardieptebeperking. In de praktijk zal deze minder beperkt worden, omdat de bekende knelpunten buiten het gebied liggen waar de maximale waterstandsaling plaatsvindt.

4.2 Vaarweg Betuwepand

In dit hoofdstuk worden de effecten van een vergrote wateraanvoer via het Betuwepand op het kanaal buiten de kunstwerken beschouwd. Uitgegaan wordt van het normale kanaalprofiel zoals gegevens in Figuur 22 en Figuur 23.

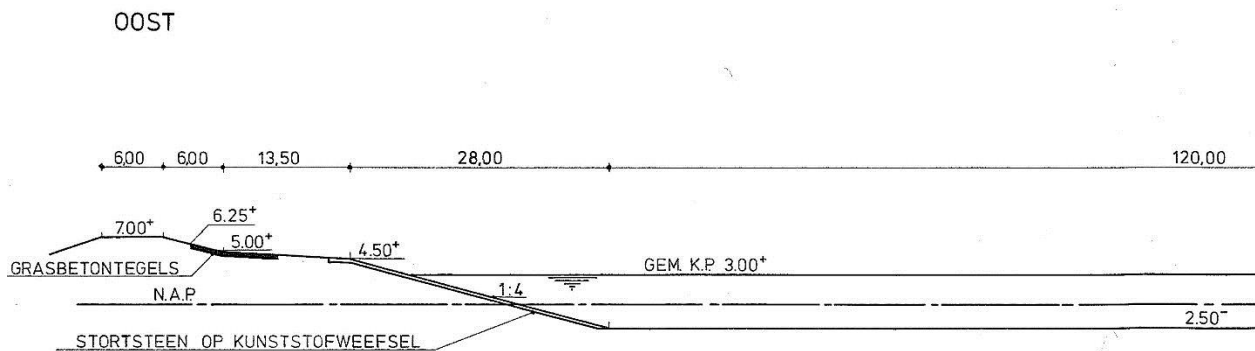
4.2.1 Oeverbescherming Betuwepand

De oeverconstructies van het Amsterdam-Rijnkanaal Betuwepand bestaan uit:

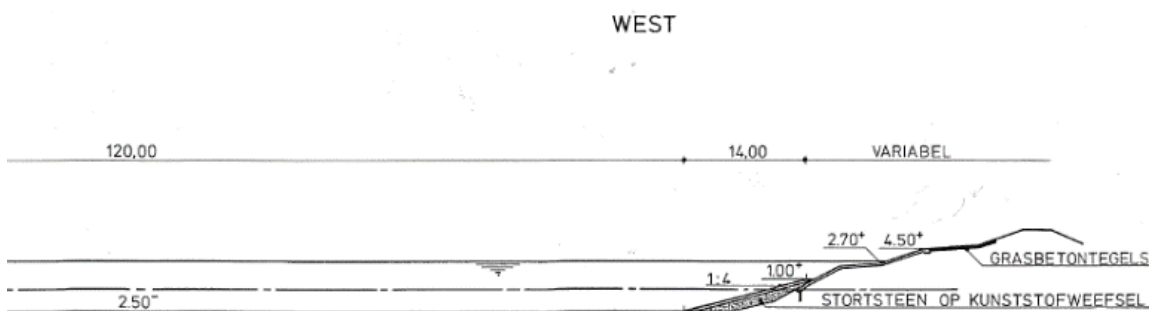
- Taluds bestort met breuksteen, zie Figuur 22 en Figuur 23.
- Verticale oevers bestaande uit o.a. damwanden.
 - Dit zijn lokale afwijkingen van het 'normale profiel' bestaande uit een talud. Denk hierbij aan kademuren, uitlaatconstructies, etc.

Een kenmerkende doorsnede van het Amsterdam-Rijnkanaal is gegeven in Figuur 22. De oeverbescherming bestaat uit een toplaag 10 – 60 kg aangebracht op een zinkstuk. De gegeven doorsnede betreft een kenmerkende dwarsdoorsnede van het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal. De specificaties van

het stortsteen is niet gegeven op tekening. Uit mailwisseling (ontvangen op 15 november 2016, verstuurd door Paul Kok) volgt dat de oever bekleed is met de standaardstorting 10 – 60 kg (zie NEN-EN 13383 Waterbouwsteen). De tekening uit Figuur 23 dateert uit 1986, het is daarom reëel dat werkzaamheden plaats hebben gevonden en de oeverbeschermingen (lokaal) gewijzigd kunnen zijn. Paul Kok (mail op 19 december 2016) geeft aan dat de bekleding momenteel in slechte staat verkeert en dat er lokaal noodreparaties zijn uitgevoerd.



Figuur 22 Doorsnede oeverbestorting Betuwepand Amsterdam-Rijnkanaal Oost (tek. 035-013.21 – Normaal Dwarsprofielen A'dam – Rijnkanaal en Lekkanaal)



Figuur 23 Doorsnede oeverbestorting Betuwepand Amsterdam-Rijnkanaal West (tek. 035-013.21 – Normaal Dwarsprofielen A'dam – Rijnkanaal en Lekkanaal)

Naast de bovenstaande 'normale' kanaalprofielen komen lokaal afwijkende oeverconstructies voor. De zijn ontworpen met een bepaalde minimum waterstand, indien deze wordt onderschreden kan mogelijk de geotechnische stabiliteit niet gewaarborgd worden. Dit zou onder andere kunnen leiden tot het afschuiven van oevers, het te ver uitbuigen van damwandconstructies etc. Naast dit technisch falen van constructies kunnen constructies functioneel falen, denk hierbij aan het niet kunnen innemen van water, het niet kunnen laden van schepen. Dit risico is niet specifiek voor de hier beschouwde vergrote aanvoer van water bij lage waterstanden, maar geldt algemeen bij deze lage waterstanden.

4.2.2 Stromingsbelasting

De stroomsnelheden in het kanaal buiten de kunstwerken zijn vrij klein, zelfs onder de scenario's met 100 m³/s afvoer. De maximum gemiddelde stroomsnelheid is ca. 0,2 m/s. Deze is lager dan de kritische stroomsnelheid van 0,3 m/s voor onbeschermd bodems (CUR 201). De met 10 – 60 kg stortsteen beschermde oevers hebben van deze stromingsbelasting niets te vrezen, maar ook waar de bescherming ontbreekt is de stroomsnelheid onvoldoende om de bodem of oevers te eroderen.

Lokale morfologische effecten worden in hoofdstuk 4.6 beschouwd.

4.2.3 Aflaaddiepte beperking

De bodem en/of drempels van het Amsterdam-Rijnkanaal liggen op NAP -2,35 m . Gegeven de minimale waterstanden per scenario zal er een waterdiepte aanwezig zijn van 3,6 – 4,7 meter zie Tabel 13.

	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Scenario Q600	3,84	3,75	3,64	3,51
Scenario Q800	4,28	4,19	4,10	3,99
Scenario Q1000	4,68	4,61	4,52	4,43

Tabel 13 Min diepte t.o.v. NAP -2,35 m

VIN [ref 5] noemt klasse V schepen als maximum toegelaten klasse voor het ARK, klasse VI schepen zijn volgens RWS [ref 6] echter ook toegelaten. Beide klassen steken maximaal ca. 4 m bij volle belading. Als wordt uitgegaan van een benodigde kielspel van 20 tot 40 cm kunnen we concluderen dat er op het Betuwepand onder scenario Q1000 bij alle onttrekkingen zonder aflaadbeperking gevaren kan worden. Voor Scenario's Q800 en Q600 geldt dat sommige schepen, afhankelijk van de onttrekking, niet met de maximale diepgang in het Betuwepand kunnen varen. De beschikbare vaarwegdiepte op de Waal is echter veel kleiner, waardoor in de praktijk daar de aflaaddiepte bepaald zal worden.

4.2.4 Effecten lage waterstanden op belasting door scheepvaart

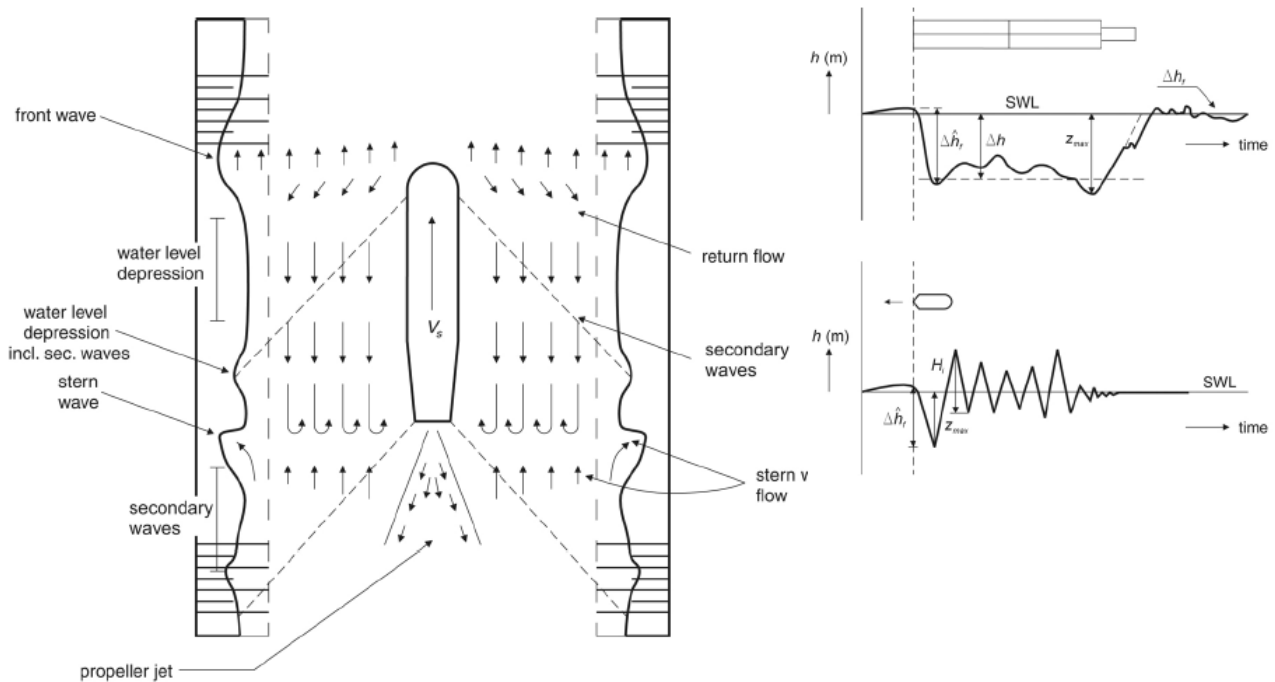
De waterstand behorende bij OLR te Tiel is NAP +2,56 m [Ref 18]. De berekende waterstanden per scenario zijn weergegeven in Tabel 8 tot Tabel 10. Te zien is dat de berekende waterstanden lager zijn dan de waterstand behorende bij de OLR. De belastingen t.g.v. scheepvaart en de geotechnische stabiliteit van oeverconstructies zullen daarom niet overeenkomen met de 'reguliere' belastingen. Op basis van Figuur 22 kan geconcludeerd worden dat de bestorting met 10 – 60 kg over de gehele hoogte van het talud loopt. Golfbelastingen op een lager niveau dan OLR zullen daarom niet leiden tot schade voor de gegeven doorsnede. Op afwijkende doorsnedes waarbij onder de golfzone een lichtere bestorting is gerealiseerd, kan mogelijk wel schade optreden.

In Tabel 14 en Tabel 15 zijn de hydraulische belastingen t.g.v. scheepvaart op het kanaalprofiel gegeven. De volgende aspecten van de hydraulische belastingen zijn bepaald:

- De maximale vaarsnelheid⁴ in het kanaal
 - De vaarsnelheid is begrensd tot de grenssnelheid. De grenssnelheid is de maximale vaarsnelheid voordat het schip gaat 'planeren' (denk hierbij aan het stuiten van een speedboot over water). De Rock Manual [ref 19] geeft aan dat de maximale efficiënte vaarsnelheid voor ongeladen schepen gelijk is aan 90 % van deze maximale snelheid en voor geladen schepen 75 %. De grenssnelheid kan bepaald worden door scheepseigenschappen het kanaal oppervlak of de diepte, onder verschillende omstandigheden zijn verschillende parameters maatgevend, in het algemeen geldt hoe krappere het profiel, hoe meer weerstand een schip ondervindt, dus hoe lager de grenssnelheid. Zie ook Bijlage 3.
- De gemiddelde retourstroom in het kanaal
 - Een varend schip in een kanaal verplaatst water. Het verplaatste water moet van voor het schip naar de achterzijde van het schip stromen. Dit wordt de retourstroom genoemd.
- De retourstroom onder het schip
 - De retourstroom onder het schip wordt als maat genomen voor de dimensionering van bodembeschermingen.
- De schroefstroom achter het schip.
 - Wanneer een schip efficiënt vaart is de schroefstroom gering ten opzichte van de vaarsnelheid. Bij een toenemende weerstand (lagere grenssnelheid) gaat de vaarsnelheid omlaag en neemt de netto schroefstroom toe. Bij lage waterstanden neemt de grenssnelheid af en grijpt deze schroefstroom beter aan op de bodem, door de geringe diepte.
- De golfbelastingen op de oevers.
 - Een varend schip genereert golfbelastingen zoals de secundaire golven en de haalgolf.

⁴ De vaarsnelheid is ten opzichte van het water, waar de stroming mee in ogenschouw wordt genomen wordt netto vaarsnelheid geschreven. De vaarsnelheid is vergelijkbaar met de 'air-speed' van een vliegtuig, de netto vaarsnelheid met de 'ground speed' van een vliegtuig.

De rekenwijze volgt uit de Rock Manual [ref 19] en Figuur 24 laat de visuele weergave van de hydraulische belasting zien in en is in onderstaand figuur weergegeven.



Figuur 24 ruimtelijk beeld van de veroorzaakte stromingen en golven. De stern wave is de haal- of hekgolf en is de maatgevende golf in deze analyse, de propeller jet is de schroefstroom.

Scenario	Percentage van Grenssnelheid	Vaarsnelheid (km/u)	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip (m/s)	Netto schroefstroom (m/s)	Secundaire golfhoogte (m)	Haalgolf (m)
Q600	75%	9,5	Geladen	0,5	0,8 tot 1,1	2,1	0,1	0,3
	90%	12,1	Ongeladen	0,7	1,1 tot 1,4	1,1	0,2	0,5
Q800	75%	10,0	Geladen	0,6	0,9 tot 1,1	1,9	0,1	0,4
	90%	13,2	Ongeladen	0,7	1,1 tot 1,4	0,5	0,2	0,5
Q1000	75%	10,4	Geladen	0,6	0,9 tot 1,2	1,7	0,1	0,4
	90%	14,1	Ongeladen	0,7	1,1 tot 1,4	0,2	0,3	0,5
OLR	75%	10,7	Geladen	0,6	0,9 tot 1,3	1,6	0,1	0,4
	90%	15,0	Ongeladen	0,7	1,1 tot 1,4	0,0	0,3	0,6

Tabel 14 Scheepsgeïnduceerde belastingen CEMT klasse VIb

Scenario	Percentage van Grenssnelheid	Vaar snelheid (km/u)	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip (m/s)	Netto schroefstroom (m/s)	Secundaire Golfhoogte (m)	Haalgolf (m)
Q600	75%	11,3	Geladen	0,4 m/s	0,6 tot 0,8	1,0	0,1	0,3
	90%	14,0	Ongeladen	0,5 m/s	0,8 tot 1,1	0,2	0,1	0,4
Q800	75%	11,9	Geladen	0,4 m/s	0,6 tot 0,8	0,8	0,1	0,3
	90%	15,2	Ongeladen	0,5 m/s	0,8 tot 1,1	0,0	0,1	0,4
Q1000	75%	12,3	Geladen	0,4 m/s	0,6 tot 0,9	0,7	0,1	0,4
	90%	16,0	Ongeladen	0,5 m/s	0,8 tot 1,1	0,0	0,1	0,5
OLR	75%	12,8	Geladen	0,4 m/s	0,7 tot 0,9	0,6	0,2	0,4
	90%	18,0	Ongeladen	0,6 m/s	0,9 tot 1,2	0,0	0,2	0,6

Tabel 15 Scheepsgeïnduceerde belastingen CEMT klasse Vb

Te zien is dat de retourstroombelasting voor de laag water scenario's in dezelfde orde grootte liggen. Dit is te verklaren door de verhouding tussen de maximale grenssnelheid en de aanwezige natte doorsnede van het kanaal. Bij een kleine natte doorsnede is de grenssnelheid lager dan bij een grote natte doorsnede. Het schip vaart minder snel, en verplaatst daardoor per tijdseenheid minder water. Echter de hoeveelheid water die verplaatst moet worden, stroomt door een kleiner oppervlak. Hierdoor wordt het positieve aspect van een lagere vaarsnelheid op de stroomsnelheid tenietgedaan door de kleinere doorstroomoppervlak. Bij hogere waterstanden, neemt het natte oppervlak toe, waardoor de grenssnelheid toeneemt. Bij een gelijkblijvende kielspeling zal de retourstroom toenemen.

De haalgolf neemt bij lagere waterstanden af en is daarmee onder de beschouwde laagwater omstandigheden kleiner dan onder normale omstandigheden. Gecombineerd met de uniforme oeverbekleding (hst 4.2.1) vormt de haalgolf onder laagwater omstandigheden over het algemeen geen maatgevende belasting.

Onderstaand is een opsomming gegeven van enkele mogelijke consequenties van scheepvaart bij lage waterstanden in het Betuwepand op de bodem en oeverbescherming:

- 1) De afstand tussen de bodem en de kiel van de schepen zal kleiner zijn dan onder normale omstandigheden. Hierdoor wordt de stroomsnelheid t.g.v. de retourstroom en schroefstroom groter en kan (meer) erosie aan de bodem verwacht worden t.o.v. de huidige situatie. De retourstroom onder het schip bedraagt ongeveer 1 m/s (zie Tabel 15). De netto schroefstroom bij 100 % inzet motorvermogen bedraagt deze circa 2 m/s; deze belasting neemt af bij toenemende vaarsnelheid. Een onbeschermde bodem is niet stabiel onder deze belastingen (zie ook paragraaf 4.6). Kortstondige overbelasting zal leiden tot weinig schade. Echter wanneer de laag water situaties langer aanhouden, zal dit leiden tot een 'spoor' die de schepen in het midden van de vaargeul trekken. Een voorbeeld van dit effect is in Figuur 25 zichtbaar voor de zijtak van de Twentekanal. Achter het schip is een sedimentpluim van opgewoeld sediment zichtbaar. Dit sediment zakt en verspreidt zich over de breedte van het kanaal weer naar de bodem, waardoor netto een transport van sediment plaatsvindt van de vaargeul richting de oevers.
- 2) Door de lagere waterstanden grijpen de scheepsgeïnduceerde belastingen op een lager niveau aan. Gezien de uniforme bekleding van de oevers (zie paragraaf 4.2.1) is de sterkte voor

stroombelastingen en golfbelastingen over het gehele talud gelijk. Naar verwachting zal de belasting op de oevers bij lagere waterstanden weinig tot geen schade veroorzaken. Deze conclusie geldt niet voor afwijkende oeverconstructies.



Figuur 25 Erosie t.g.v. retourstromen en/of schroefstromen in de zijtak van de Twentekanal

De bovenstaande knelpunten worden veroorzaakt door lage waterstanden op de Waal bij Tiel waar de waterstand op het Betuwepand grotendeels wordt bepaald. In hoofdstuk 4.1.2 is beschreven dat de waterstand daar vooral wordt bepaald door de afvoer bij Lobith, dit veroorzaakt een verschil van ca. 1 m waterstand tussen een afvoer van 1000 m³/s en 600 m³/s. Het verschil in waterstand veroorzaakt door de onttrekking is ca. 7 cm per 25 m³/s, dus maximaal ca. 28 cm. De problemen met lage waterstanden in het Betuwepand worden dus grotendeels veroorzaakt door de natuurlijke waterstand bij Tiel en daarbovenop - in geringere mate - versterkt door het verder dalen van de waterstand door waterinname via het Betuwepand.

4.2.5 Samenvatting Toetsing Vaarweg Betuwepand

- De hydraulische belasting door de verhoogde stroomsnelheid is zeer gering.
- De waterdiepte op het Betuwepand is vrij groot in vergelijking met die op de Waal, hierdoor vormt het Betuwepand geen knelpunt m.b.t. de vaardiepte.
- Lage waterstanden veroorzaken afwijkende belastingen op de oeverbescherming en de bodem maar door de uniform doorgetrokken oeverbescherming leidt dit niet tot schade aan de oevers.
- Tijdens lage waterstanden zijn de retourstromen van schepen groot, deze veroorzaken een versterkt transport van het midden van het kanaal naar de zijanten, spoorvorming.
- Eventueel technisch of functioneel falen van constructies door lage waterstanden wordt slechts in beperkte mate versterkt door de wateraanvoer over het Betuwepand.

4.3 Stuwpannd Hagestein

4.3.1 Dwarsstroming

Bij de kruising van het ARK en de Lek bestaat een potentieel voor dwarsstroming. Onder normale omstandigheden stroomt de Lek en staat het water op het ARK stil. Om met dit snelheidsverschil om te gaan zijn de 'Eieren van Thijsse' ontworpen. Deze geven de schepen ruimte om te manoeuvreren en veroorzaken een neer die sedimentatie van de bekkens voorkomt.

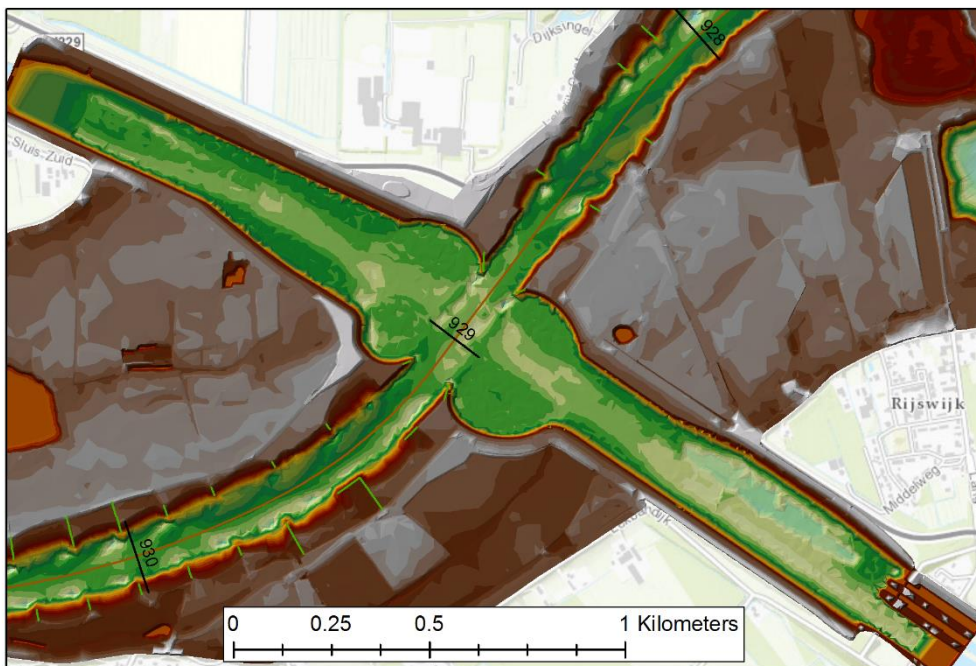
Conservatief gerekend is er minimaal een waterdiepte van gemiddeld 3 meter beschikbaar bij de kruising van het ARK en de Lek. De breedte van de Eieren van Thijsse bedraagt > 250 m. Wanneer het maximale debiet van 100 m³/s wordt gedeeld over de diepte en breedte, resulteert een gemiddelde stroomsnelheid van ca. 0,12 m/s. Doordat de stroomsnelheid niet uniform verdeeld is over de breedte en diepte, zal deze in de praktijk hoger uitvallen. Wanneer we de gemiddelde stroomsnelheid met een factor 2 verhogen hebben we een redelijke schatting van de dwarsstroming in het slechtste geval. Op deze manier schatten we een maximale dwarsstroming van ca. 0,24 m/s.

Wanneer de stuwen op de Nederrijn – Lek geheven zijn zal de dwarsstroming op dit punt een veelvoud zijn van de waarde. Echter, de Eieren van Thijsse zijn ontworpen om een zijdelingse uitwijking op te vangen bij het oversteken van de Lek onder dwarsstroming. Bij het oversteken van het ARK onder dwarsstroming is er geen sprake van een stromingsluwe verbreding. De 'eieren' zijn immers andersom ontworpen.

Richtlijn vaarwegen geeft harde criteria voor dwarsstroming wanneer deze kleiner is dan $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en de breedte voldoende klein. Omdat de breedte van de dwarsstroming groot is in vergelijking tot de scheepslengte en het debiet groter is dan $50 \text{ m}^3/\text{s}$ kunnen de gegeven criteria niet worden toegepast. In andere gevallen gelden als criteria:

- Toename padbreedte kleiner dan $\frac{1}{2} \cdot B$ (B = scheepsbreedte) boven de padbreedte, die het schip nodig heeft zonder dwarsstroom.
- Roeruitslag behoudens kortstondige uitschieters maximaal 20 graden.

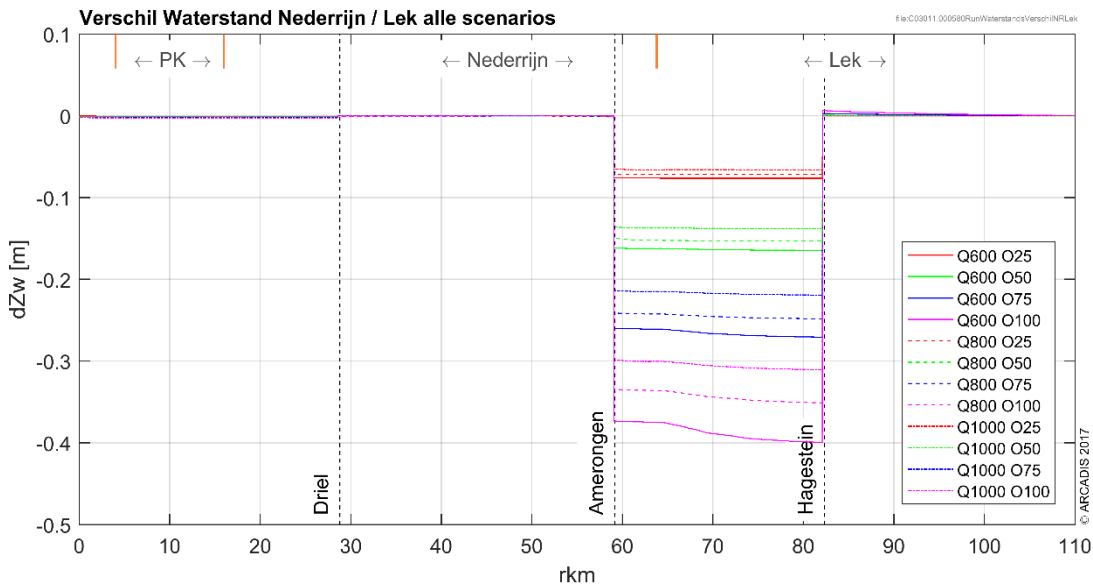
Of hieraan voldaan wordt kan worden bepaald in een scheepvaart simulator waarbij de interactie met het stromingsveld wordt gesimuleerd.



Figuur 26 Eieren van Thijsse op kruising ARK met LEK.

4.3.2 Verandering vaardiepte

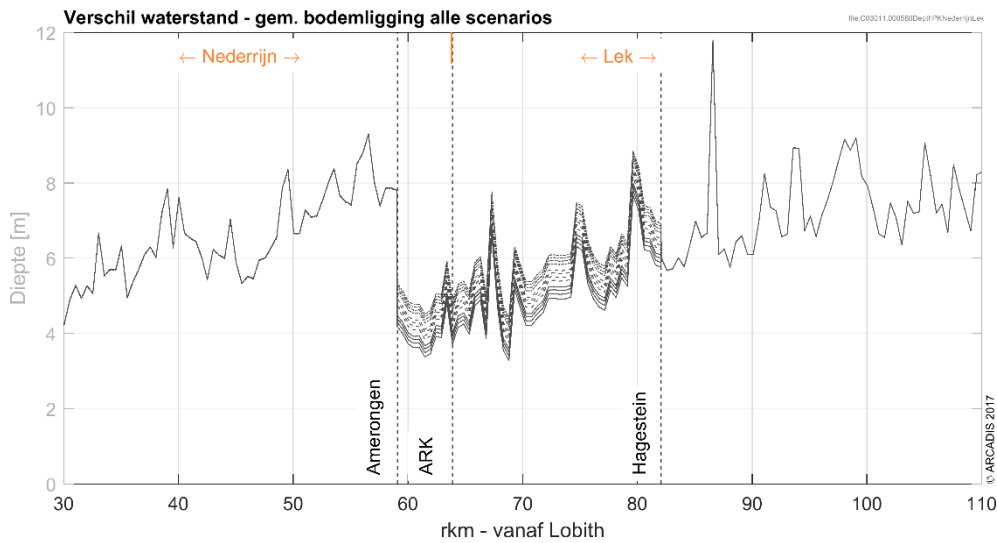
Door de open verbinding met de Waal wordt de waterstand en daarmee de beschikbare diepte op het pand Hagestein grotendeels bepaald door de waterstand bij op de Waal bij Tiel. Wanneer er geen afvoer zou zijn over het Betuwepand zou de waterstand gelijk zijn. Door de onttrekking van water bij de Irenesluizen, stuw Hagestein en overige waterinnamepunten stelt zich een verhang in. De waterstand bij de inname punten neemt af, totdat het verhang voldoende is om de onttrekking aan te vullen. Bij grote onttrekkingen neemt de waterstand daardoor verder af. Bij lage waterstanden is de invloed van de stromingsweestand met de oevers en de bodem relatief groter en moet de waterstand verder zakken om dit energieverlies te compenseren. Figuur 27 toont dit principe. In dit figuur wordt het verschil in waterstand getoond tussen de situatie zonder extra afvoer (ref 0 in Tabel 2) en de verschillende scenario's. Op deze manier wordt alleen het effect van de toename van afvoer op de waterstand in rekening gebracht.



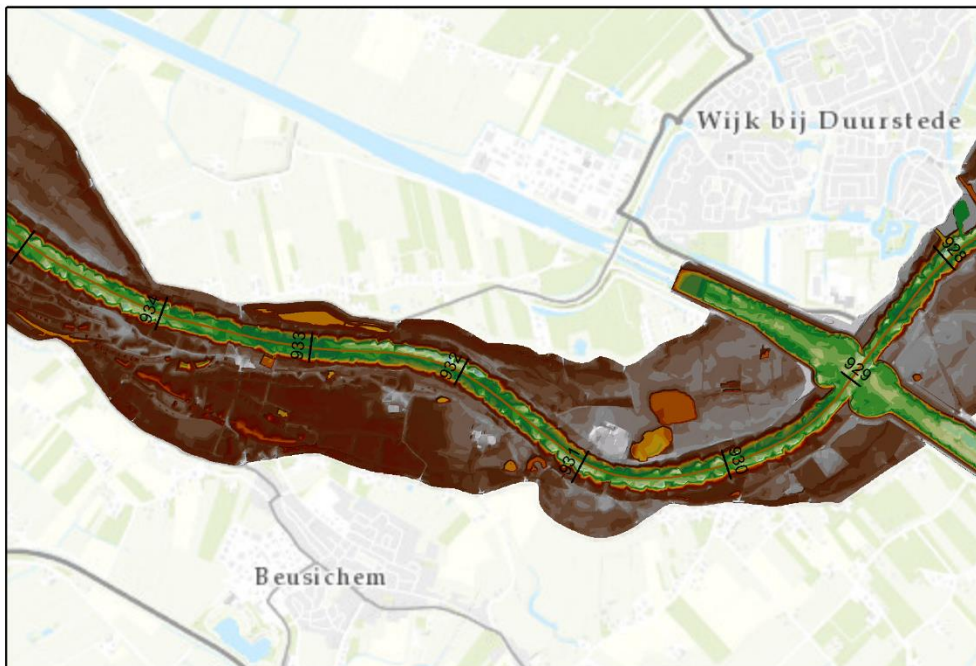
Figuur 27 Verlaging van de waterstand veroorzaakt door extra debiet over het Betuwepand. De rivierkilometers zijn gerekend vanaf Lobith.

Figuur 27 laat zien dat de waterstand maximaal 40 cm zakt bij de grootste onttrekking (100 m³/s) bij het laagste debiet bij Lobith (600 m³/s). Verder is te zien dat bij grote onttrekkingen de invloed van de bodemweerstand zwaarder meetelt: het verschil tussen de waterstanden bij verschillende afvoeren bij Lobith neemt toe.

Een betrouwbare uitspraak over de absolute vaardiepte in het stuwpand is op basis van de gegevens in het model niet mogelijk. De breedte gemiddelde bodemligging in het model zegt weinig over de beschikbare diepte in de vaargeul. Voor de Waal werd bovenstaand nog een inschatting gegeven op basis van het uitgangspunt, dat bij OLR de vaargeul 2,8 m diep moet zijn. Een dergelijke referentie mist voor het stuwpand Hagestein. Deze analyse kan wel gemaakt worden wanneer de (2D) bodemligging van de vaargeul wordt gebruikt. Over het algemeen kan worden gesteld dat de beschikbare diepte toeneemt op de lek vanaf de kruising met het ARK richting Hagestein. In Figuur 28 is ondanks de bovenstaande kanttekening het verschil tussen de waterstand en de gemiddelde bodemligging getoond. De absolute waarden moeten niet worden geïnterpreteerd. De trends van een grotere waterdiepte vanaf de kruising van de Lek met het ARK richting Hagestein en een kleinere waterdiepte van de kruising richting Amerongen zijn goed zichtbaar. Rond kilometer 69 is een knelpunt in de waterdiepte zichtbaar, deze komt overeen met rkm 933 op de Lek. Figuur 29 toont de bodemmorfologie bij rkm 933 op de Lek volgens het RWS Baseline model beno13_5-v1. Ter hoogte van rkm 933 steekt de stroomdraad over tussen twee bochten en is een ondiepte zichtbaar. Het is te verwachten dat de beschikbare waterdiepte hier geringer is dan op het Betuwepand.



Figuur 28 verschil waterstand en gemiddelde bodemligging ter indicatie van mogelijke knelpunten voor de scheepvaart



Figuur 29 Bodemtopografie op de Lek bij Wijk bij Duurstede. De diepste plekken zijn licht blauw en licht groen, de ondiepe plekken zijn donkergroen.

4.4 Prins Bernhardsluizen

4.4.1 Algemene beschrijving object

De Prins Bernhardsluizen bevinden zich aan de zuidzijde van het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze objecten verbinden het Betuwepand met de Waal. Onder normale omstandigheden zijn deze sluisen gesloten. Wanneer de waterstand op de Waal lager zakt dan het kanaal peil van het Betuwepand (ca. NAP +3 m) worden de deuren geopend en ontstaat een open verbinding bij tussen Waal en ARK. De afmetingen van de objecten zijn weergegeven in Tabel 16.



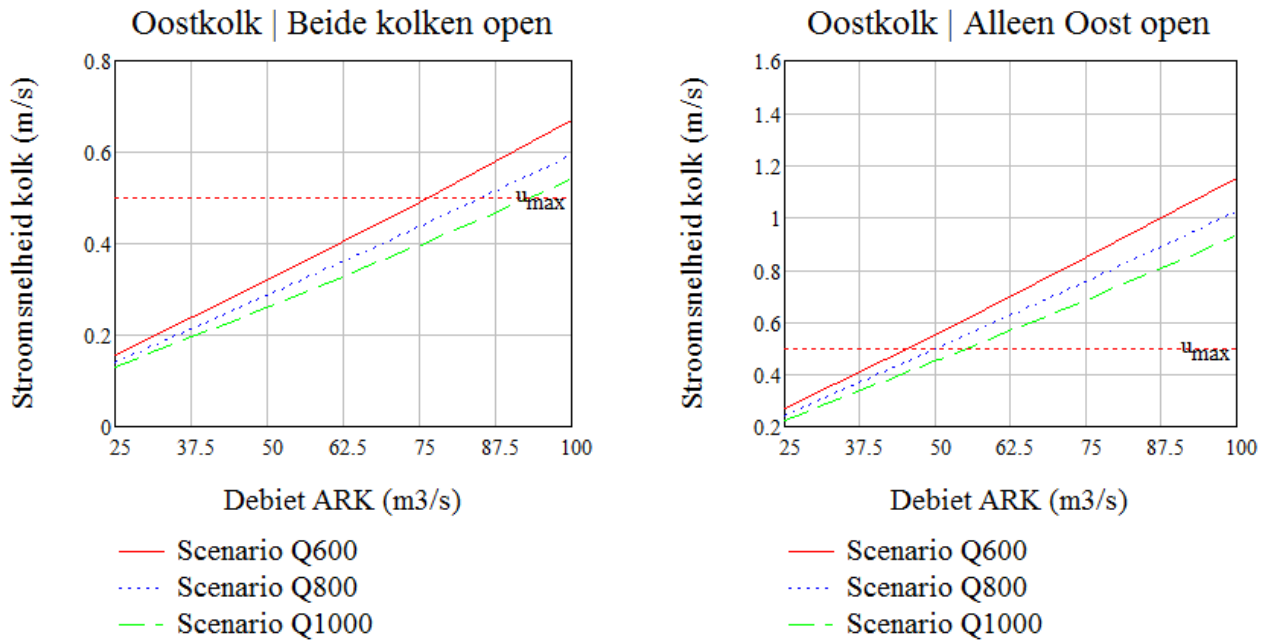
Foto 1 Luchtfoto Bernardsluizen

Object	(Doorvaart) breedte	(Drempel) hoogte	Deur	Bodembescherming	Bron
Oostsluis "Sluiskolk Duwvaartsluis Tiel"	24,0 m	NAP – 2,35m	Hefdeur	Buitenhoofd 3 meter betonblokken 50x50x20 op grindbed gevolgd door 3 meter 20/80 kg op grindbed. Totale lengte bodem- bescherming is 6 meter	Tek. 135-021.4 Tek. 137-021.4 Tek. 347-021.4 Tek. 318-021.4
				Binnenhoofd Geen bodembescherming	
Spuiriool Oostsluis	320 mm	365 mm	Onbekend	Buitenhoofd 3 meter betonblokken 50x50x20 op grindbed gevolgd door 3 meter 20/80 kg op grindbed. Totale lengte bodem- bescherming is 6 meter	Tek. 137-021.4 Tek 347-021.4
				Binnenhoofd Geen bodembescherming	
Westsluis "Sluiskolk C.A. Nabij Tiel"	18,0 m	NAP – 2,35m	Buitenhoofd: Hefdeur Binnenhoofd: Puntdeur	Onbekend	Tek. 035-021.3
2 spuriolen Westsluis	320 mm	365 mm	Onbekend	Onbekend	Tek. 035-021.3

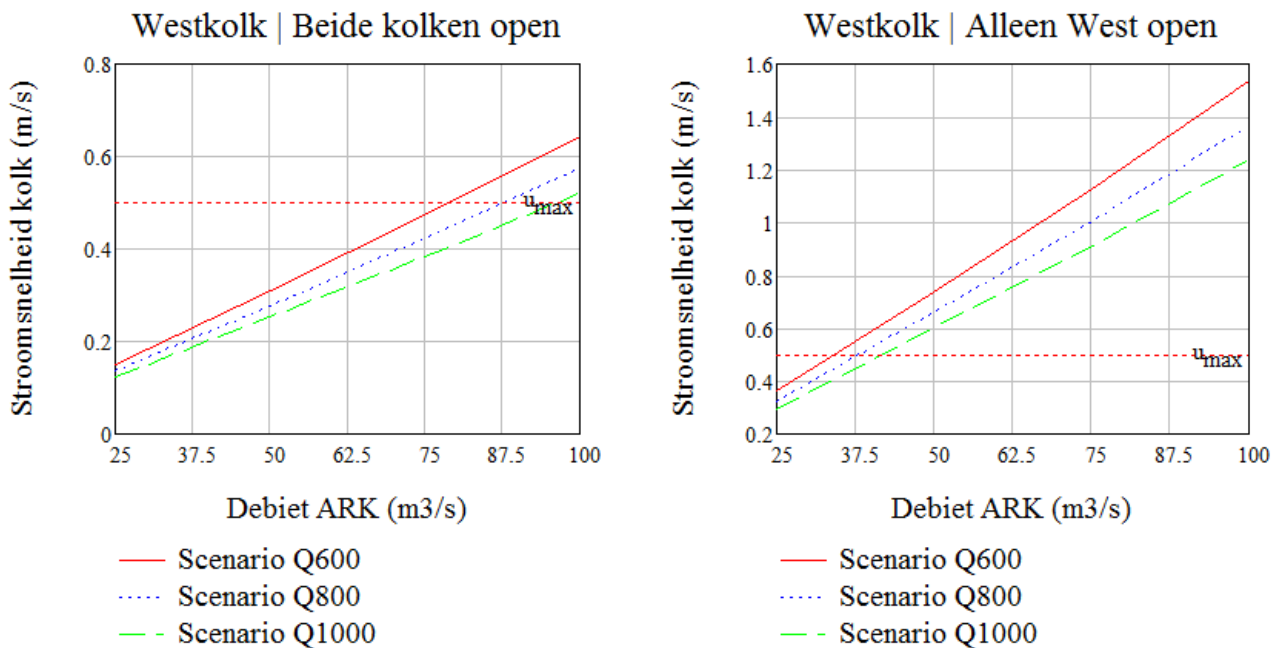
Tabel 16 Specificaties object Prins Bernhardsluizen

4.4.2 Stroombelasting

In Figuur 30 en Figuur 31 zijn de stroomsnelheden door de kolken gegeven voor de Oost- en Westkolk van de Prins Bernhardsluizen. De stroomsnelheid in één kolk (Oost of West) bedraagt minimaal 0,15 m/s en maximaal 0,7 m/s (zie Figuur 30 en Figuur 31) wanneer beide kolken geopend zijn om water in te laten. De stroomsnelheid in één kolk (Oost of West), wanneer 1 van de kolken open is, bedraagt minimaal 0,2 m/s en maximaal 1,6 m/s (zie de rechter figuren van Figuur 30 en Figuur 31).



Figuur 30 Stroomsnelheden door Oostkolk (links; stroomsnelheid in de Oostkolk voor beide kolken open. Rechts; stroomsnelheid door alleen een open Oostkolk)



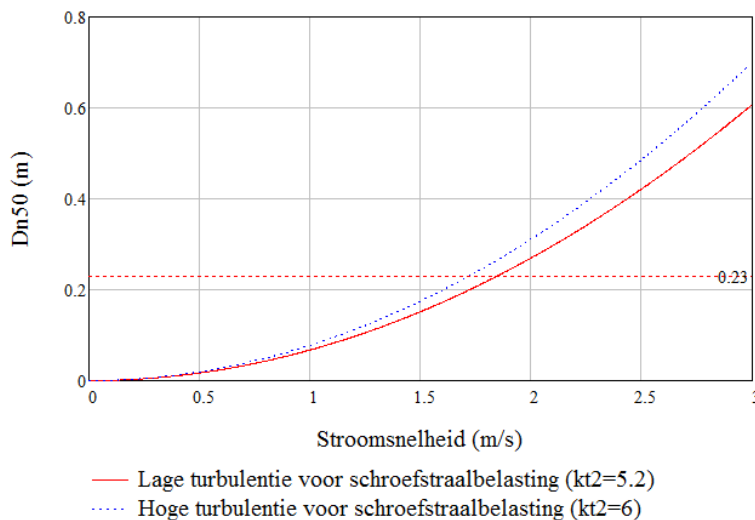
Figuur 31 Stroomsnelheden door Westkolk (links; stroomsnelheid in de Oostkolk voor beide kolken open. Rechts; stroomsnelheid door alleen een open Oostkolk)

De berekende stroomsnelheden zijn niet dermate groot dat deze problematisch zullen zijn voor de vaste constructie. De constructie is berekend op hydraulische belastingen door scheepschroeven (zie volgende sectie) die groter zijn dan de stromingsbelasting tijdens het inlaten van water.

Het binnenhoofd van de westsluis van de Prins Bernhardsluizen is uitgevoerd met puntdeuren. Bij een stroming van de Waal naar het Betuwepand zal de stroming een kracht uitoefenen op de deuren. Het water zal parallel langs de deur stromen, waarbij de punt van de puntdeur tegen de stroming in gericht staat. Getoetst dient te worden of de deur in de open positie gehouden kan worden bij een langsstroom. De weerstand van de deur tegen sluiten volgt o.a. uit de remkracht en houdkracht van de bewegingswerken. Een resultaat kan zijn dat de deur wel onder het inlaatdebiet open gehouden kan worden, maar dat scheepvaart niet langs kan varen.

De kritische stroomsnelheid voor onbeschermde bodems van 0,3 m/s (CUR 201) wordt overgeschreden voor alle scenario's bij het gebruik van 1 kolk. Voor water inlaten met 2 kolken voldoet het scenario bij 25 m³/s wel en bij de overige scenario's niet. Dit betekent dat vlak buiten de kolken erosie verwacht kan worden. In hoofdstuk 4.6 worden de effecten van de overschrijding van de kritische snelheid in meer detail beschouwd.

Aan de Waalzijde van de Bernardsluizen is de bodem voorzien van 3 meter betonblokken 50x50x20 cm op grindbed gevolgd door 3 meter 20 – 80 kg op grindbed. De sortering 20 – 80 kg is een 'oude' sortering en de maat voor de sterkte van de sortering (de mediane diameter D_{n50}) is niet bekend. Onderstaand is voor een variabele stroomsnelheid de benodigde D_{n50} berekend. De horizontale lijn bij $D_{n50} = 0,23$ m geeft de stabiliteit van 10 – 60 kg (huidige vergelijkbare sortering) weer. De kritische stroomsnelheid is ca. 1,8 m/s. De stroomsnelheden in de beschouwde scenario's overschrijden deze niet.



Figuur 32 Relatie stroomsnelheid door schroefstroom en benodigde mediane nominale steendiameter (D_{n50}) conform Izbash (Rock Manual) De mediane grootte van 0,23 m is karakteristiek voor het mengsel 10 – 60 kg.

4.4.3 Effecten stroombelasting door scheepvaart

Onder normale omstandigheden zullen de sluisen gesloten zijn en zal een schip met lage snelheid de sluis in of uit varen of staan de sluisen open zonder sterke stroming. Indien water ingelaten wordt door de sluisen, zullen de sluisen open staan. In de huidige situatie worden de sluisen opengezet bij een waterstand in de Waal kleiner dan NAP +3,0 m. Schepen zullen zonder stil te gaan liggen de sluisen passeren. De hydraulische belastingen t.g.v. passerende schepen wordt berekend cf. de Rock Manual hoofdstuk 4 voor CEMT-klasse VIb. Indien de diepte niet toereikend is voor de diepgang voor geladen schepen cf. RVW 2011, wordt een diepgang ingeschat o.b.v. RVW 2011 paragraaf 3.5.1. De retourstroom en schroefstroombelasting is berekend voor de scenario's Q600, Q800, Q1000 en OLR voor CEMT-klasse VIb en Vb. De Resultaten zijn gegeven in Tabel 17, Tabel 18 en Tabel 19.

Ook hier is, net als bij de belasting op het kanaalprofiel (paragraaf 4.2.4), te zien is dat de retourstroombelasting voor de laag water scenario's in dezelfde orde grootte liggen voor de geladen en ongeladen situatie (75% vs 90% grenssnelheid). Voor de netto schroefstroom wordt de grootste belasting verkregen voor lage grenssnelheden. Lage grenssnelheden worden gehaald bij kleine profielen. Te zien is dat voor beladen schepen (75% grenssnelheid) de vaarsnelheid lager is waardoor de retourstroom afneemt, maar de netto schroefstroom neemt juist toe. Deze wordt dan maatgevend. Voor onbeladen schepen is dit andersom doordat deze minder weerstand ondervinden varen ze sneller, waardoor de netto schroefstroom afneemt, maar de retourstroom juist toeneemt. De retourstroom wordt dan maatgevend. De maatgevende belasting blijkt in alle gevallen 3 m/s of meer. Dit is een hoge belasting waarbij de scheepvaart de bodem losmaakt en zo 'sporen trekt'. De grootste belasting wordt verkregen voor een klasse VIb met zeer lage waterstanden. De grenssnelheid is zeer laag, waardoor de netto schroefstroom zeer hoog is. De netto schroefstroom is conservatief berekend, uitgegaan is van een 100 % inzet van het motorvermogen bij varen. Bij een schip varende met een constante snelheid is dit een overschatting. Het resultaat dient als effecteninnschatting en niet als ontwerpparameter.

Scenario	Grenssnelheid	Vaarsnelheid	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip	Netto schroefstroom
Q600	75%	1,7 km/uur	Geladen	1,1 m/s	1,7 m/s tot 2,3 m/s	3,4 m/s
	90%	3,5 km/uur	Ongeladen	1,6 m/s	2,3 m/s tot 3,1 m/s	2,5 m/s
Q800	75%	1,7 km/uur	Geladen	1,2 m/s	1,8 m/s tot 2,4 m/s	3,2 m/s
	90%	4,6 km/uur	Ongeladen	1,6 m/s	2,4 m/s tot 3,3 m/s	1,8 m/s
Q1000	75%	1,8 km/uur	Geladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,5 m/s	3,1 m/s
	90%	5,5 km/uur	Ongeladen	1,7 m/s	2,5 m/s tot 3,3, m/s	1,4 m/s
OLR	75%	1,7 km/uur	Geladen	1,3 m/s	2,0 m/s tot 2,6 m/s	3,0 m/s
	90%	6,5 km/uur	Ongeladen	1,7 m/s	2,6 m/s tot 3,4 m/s	1,1 m/s

Tabel 17 Scheepsgeïnduceerde hydraulische belastingen Westsluis CEMT VIb, snelheden zijn t.o.v. het water

Scenario	Grenssnelheid	Vaar snelheid	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip	Netto schroefstroom
Q600	75%	5,3 km/uur	Geladen	1,0 m/s	1,5 m/s tot 2,0 m/s	2,0 m/s
	90%	7,6 km/uur	Ongeladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,5 m/s	1,2 m/s
Q800	75%	5,6 km/uur	Geladen	1,1 m/s	1,6 m/s tot 2,1 m/s	1,9 m/s
	90%	8,9 km/uur	Ongeladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,5 m/s	0,7 m/s
Q1000	75%	5,8 km/uur	Geladen	1,1 m/s	1,7 m/s tot 2,2 m/s	1,7 m/s
	90%	9,8 km/uur	Ongeladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,6 m/s	0,3 m/s
OLR	75%	6,0 km/uur	Geladen	1,2 m/s	1,8 m/s tot 2,3 m/s	1,7 m/s
	90%	10,9 km/uur	Ongeladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,6 m/s	0,0 m/s

Tabel 18 Scheepsgeïnduceerde hydraulische belastingen Westsluis CEMT Vb, snelheden zijn t.o.v. het water

Scenario	Grenssnelheid	Vaar snelheid	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip	Netto schroefstroom
Q600	75%	3,9 km/uur	Geladen	1,1 m/s	1,6 m/s tot 2,2 m/s	2,2 m/s
	90%	6,0 km/uur	Ongeladen	1,4 m/s	2,1 m/s tot 2,8 m/s	1,4 m/s
Q800	75%	4,0 km/uur	Geladen	1,2 m/s	1,8 m/s tot 2,3 m/s	2,1 m/s
	90%	7,2 km/uur	Ongeladen	1,4 m/s	2,2 m/s tot 2,9 m/s	0,9 m/s
Q1000	75%	4,2 km/uur	Geladen	1,2 m/s	1,8 m/s tot 2,5 m/s	2,0 m/s
	90%	8,2 km/uur	Ongeladen	1,5 m/s	2,2 m/s tot 2,9 m/s	0,6 m/s
OLR	75%	4,3 km/uur	Geladen	1,3 m/s	1,9 m/s tot 2,6 m/s	1,9 m/s
	90%	9,2 km/uur	Ongeladen	1,5 m/s	2,2 m/s tot 2,9 m/s	0,2 m/s

Tabel 19 Scheepsgeïnduceerde hydraulische belastingen Oostsluis CEMT Vb, snelheden zijn t.o.v. het water

De bovenstaande tabellen laten zien dat de stromingsbelasting door scheepvaart in veel gevallen oploopt tot 2 a 3 m/s. Dit zijn snelheden ten opzichte van het water, ten opzichte van de bodem loopt de belasting dus nog verder op indien met tegenstroming gevaren wordt.

Deze belasting is voor de betonnen kolkvloer geen probleem, maar aan de randen van de kolkvloer kunnen erosiekuilen ontstaan. Aan de Waalzijde van de Duwvaarkolk (Oostelijke kolk) is direct na de drempel van de sluis is een bodembescherming voorzien met stortsteen 20 - 80 kg.

Hoewel de toegepast bestorting (20 – 80 kg) iets zwaarder is dan die in Figuur 32 kunnen we toch concluderen dat deze niet voor alle situaties stabiel zal zijn bij het passeren van schepen. Tijdens laag water wordt daarom geadviseerd om regelmatig te peilen en indien nodig scheepvaart te stremmen of de schade te herstellen.

4.4.4 Effecten op nautiek

Onder normale omstandigheden zullen de sluisen gesloten zijn en zal een schip met lage snelheid de sluis in of uit varen of staan de sluisen open zonder sterke stroming. Indien water ingelaten wordt door de sluisen, zullen de sluisen open staan en is er sprake van een tegen of meestroming. Schepen zullen zonder stil te gaan liggen de sluisen passeren. Gezien de geringe manoeuvreerruimte in de kolken kan zowel een tegen al een meestroming problematisch zijn. Bij een te sterke tegenstroming kan de stromingsweerstand voor een te kleine vaarsnelheid zorgen. Bij een meestroming moet rekening gehouden worden met het feit dat het schip een snelheid moet hebben ten opzichte van het water om effectief met het roer te kunnen sturen. Wanneer er een meestroming bestaat van 1 m/s verhoogt deze dus de snelheid van het schip met 3,6 km/u. Een schipper moet dus met een vrij hoge snelheid door een relatief nauwe kolk varen. Bij hoge stroomsnelheden zal de snelheid t.o.v. de kolkwanden hoog zijn, waardoor de kans op schade aan het schip groot zal zijn.

We hebben geen criterium gevonden dat zegt met welke stroomsnelheid een schip veilig een sluis kan passeren. De richtlijn vaarwegen noemt een waarde van 0,5 m/s als veilige waarde voor langsstroming op vaarwegen, maar het is niet zeker dat deze voldoet voor het passeren van nauwe kunstwerken. We hanteren deze stroomsnelheid binnen deze studie als indicatieve grens om af te schatten onder welke omstandigheden door de sluisen gevaren kan worden. Een maximale waarde o.b.v. de veiligheidsbeleving van schippers is niet bekend en dient in een separate studie bepaald te worden. Naast de langssnelheid baseren we ons oordeel over de passeerbaarheid van de sluisen op de netto vaarsnelheid door de sluisen.

Richtlijn Vaarwegen par. 3.3.4 Langsstroming

De richtlijnen zijn bedoeld voor vaarwegen zonder stroom of met lage langsstroomsnelheden. In het algemeen is op de vaarweg geen grotere langsstroming dan 0,5 m/s gemiddeld over het dwarsprofiel toelaatbaar. Deze waarde is afgestemd op de situatie bij bruggen, scherpe bochten, manoeuvreer plaatsen, splitsingspunten en dergelijke. Afvarende schepen hebben in bochten bij langsstroming meer breedte nodig, opvarende schepen weer minder. Bij een langsstroming van meer dan 0,5 m/s bij beroepsvaart is het nodig nader onderzoek uit te voeren. Deze aanbeveling geldt zowel voor bochten als voor rechtstanden, kanalen en rivieren.

Ook bij bruggen en keersluizen mag de langsstroomsnelheid, gemiddeld over het natte dwarsprofiel, niet meer bedragen dan 0,5 m/s. Als de snelheid hoger is, dan moet het dwarsprofiel worden verwijd of moet een andere oplossing worden gezocht om zeker te stellen dat het maatgevende schip tegenstrooms voldoende vermogen heeft om de lokale stroom snelheden te overwinnen en voorstrooms voldoende manoeuvreerbaar te zijn.

Voor de recreatievaart zijn ter plaatse van vernauwingen stroomsnelheden tot 0,8 m/s aanvaardbaar, mits boven- en benedenstrooms van de vernauwing tenminste 50 m rechte vaarweg aanwezig is. Bij schutsluisen kan het uit waterhuishoudkundig oogpunt nodig zijn om regelmatig of incidenteel water te spuien. De omloopriolen moeten zodanig ontworpen zijn, dat het schutbedrijf tijdens het spuien zonder grote bezwaren door kan gaan.

Overschrijding langssnelheid

Figuur 30 en Figuur 31 laten zien dat de stroomsnelheden de 0,5 m/s bij veel scenario's overschrijden. Wanneer beide kolken open staan voldoen de scenario's met 25 en 50 m³/s wateraanvoer wel, bij 75 m³/s zit de stroomsnelheid op de grens en bij 100 m³/s wordt de grens overschreden. Ondanks dat het onduidelijk is bij welke langsstroming nog veilig gepasseerd kan worden, verwachten we wel dat de grens ergens in het onderzochte bereik ligt. Daarom wordt een alternatief beschouwd waarin 1 kolk gebruikt wordt om schepen zonder stroming te laten passeren. Er is in die kolk steeds minimaal 1 deur gesloten. De andere kolk wordt gebruikt voor water inname. Deze zou eventueel door andere schepen gebruikt kunnen worden echter, is de stroomsnelheid door de open kolk veel hoger. Bij het gebruik van 1 kolk blijven alleen de scenario's met 25 m³/s aanvoer beneden de langssnelheid van 0,5 m/s.

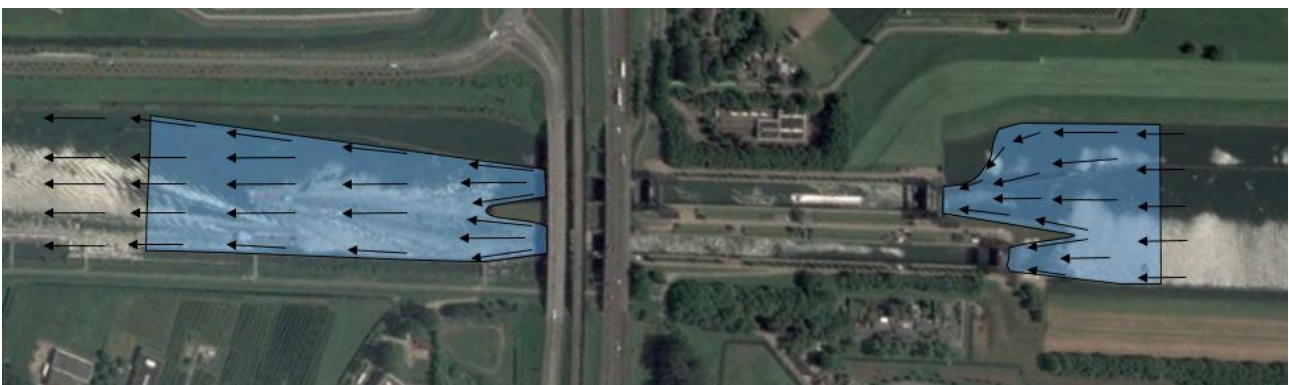
Dwarsstroming bij inlaten van water door 1 sluiskolk

In Figuur 33 is de oostelijke sluis water aan het inlaten, en is de westelijke sluis beschikbaar voor scheepvaart. Er is een schets gegeven van het stroombeeld dat zich kan ontwikkelen. Het blauwe vlak aan de rechterzijde van de sluis geeft het gebied aan waar water de sluis in stroomt. Het blauwe vlak aan de linkerzijde van de sluis geeft het gebied aan waar water de sluis uit stroomt. Bij de westelijke sluis zal het water niet mee stromen. Hierdoor zal een neer ontstaan wat zal leiden tot dwarsstromen. Dwarsstromen zijn zeer hinderlijk voor scheepvaart. Om te kwantificeren of de dwarsstromen dermate hoog zullen worden dat de nautische veiligheid niet gegarandeerd is, dient een aanvullende analyse uitgevoerd te worden. Vanuit eerdere studies (Zeesluis Farmsum) is bekend dat het spuien in door één kolk kan leiden tot dermate grote dwarsstromen dat de scheepvaart in de naastgelegen kolk gestremd moet worden.



Figuur 33 Stroming door Prins Bernhardsluizen, spuien door Oostelijke kolk

In Figuur 34 zijn de stroomlijnen geschetst voor de situatie wanneer beide sluiskolken aan het inlaten zijn. Te zien is dat de stroming zich gelijkmatiger verdeeld t.o.v. Figuur 33. Scheepvaart zal naar verwachting geen hinder ondervinden van dwarsstromen.



Figuur 34 Stroming door Prins Bernhardsluizen, spuien door beide kolken

Passeerbaarheid van de sluisen o.b.v. de netto vaarsnelheid

De grenssnelheden geven aan wat de maximale vaarsnelheid is van een schip in een vaarweg. Het is fysisch niet mogelijk om sneller te varen dan 100 % van de grenssnelheid. Voor geladen schepen wordt een

maximum aangehouden van 75 % en voor ongeladen schepen een maximum van 90 %. Indien de grenssnelheid zeer laag is, is de te overwinnen hydraulische weerstand erg groot. Deze weerstand bestaat uit het weg duwen van het water voor het schip. Het weggeduwde water zal langs het schip naar achteren stromen. De grenssnelheid van geladen klasse Vlb schip in de sluis is slechts 1,7 km/uur. Deze grenssnelheid is dermate laag, dat het onwaarschijnlijk is dat deze schepen voldoende snel de sluis kunnen passeren. Bij een lage vaarsnelheid zal immers de druk op het roer klein zijn, waardoor de schipper het schip lastig op koers kan houden. Gezien de kleine breedte van de sluis, is de kans groot dat het schip in aanvaring zal komen met de zijkanalen van de sluis.

Wanneer een schip van het Betuwepand naar de Waal vaart, zal het schip tegen de stroom in moeten varen. Wanneer de vaarsnelheid lager is dan de tegenstroom, zal het schip niet de sluis kunnen passeren. In onderstaande tabellen zijn de vaarsnelheden en de tegenstroom weergegeven per scenario. Bij netto vaarsnelheden lager dan 1 km/uur wordt het onwaarschijnlijk geacht dat schepen de kolk kunnen passeren. Deze cellen zijn in de onderstaande tabellen (Tabel 21 tot Tabel 24) rood gearceerd. Snelheden tussen 1 en 2 km/u zijn oranje gearceerd. Er kan niet met zekerheid gesteld worden of schepen de Prins Bernhardsluizen kunnen passeren voor hogere netto vaarsnelheden. Aanvullend onderzoek dient uitgevoerd te worden om deze effecten te kwantificeren.

Scenario	Kolk	Open kolken	Stroomsnelheid (km/uur)				Vaarsnelheid			
			Debiet 25m3/s	Debiet 50m3/s	Debiet 75m3/s	Debiet 100m3/s	Vlb geladen	Vlb ongeladen	Vb geladen	Vb ongeladen
Q600	West	Een	1.3	2.7	4.1	5.5	n.v.t.	n.v.t.	3.9	6
	West	Beide	0.5	1.2	1.7	2.3	n.v.t.	n.v.t.	3.9	6
	Oost	Een	0.9	2.0	3.1	4.1	1.7	3.5	5.3	7.6
	Oost	Beide	0.6	1.2	1.8	2.4	1.7	3.5	5.3	7.6
Q800	West	Een	1.4	2.4	3.6	4.9	n.v.t.	n.v.t.	4	7.2
	West	Beide	0.5	1.0	1.7	2.3	n.v.t.	n.v.t.	4	7.2
	Oost	Een	0.9	1.8	2.7	3.7	1.7	4.6	5.3	7.6
	Oost	Beide	0.5	1.0	1.6	2.2	1.7	4.6	5.3	7.6
Q1000	West	Een	1.1	2.2	3.3	4.4	n.v.t.	n.v.t.	4.2	8.2
	West	Beide	0.5	0.9	1.4	1.9	n.v.t.	n.v.t.	4.2	8.2
	Oost	Een	0.8	1.6	2.5	3.3	1.8	5.5	5.8	9.8
	Oost	Beide	0.5	1.0	1.4	1.9	1.8	5.5	5.8	9.8

Tabel 20 Overzicht van de gegevens die zijn gebruikt om de netto vaarsnelheden te bepalen. De stroomsnelheden volgen uit de resultaten van sectie 3.4, de vaarsnelheden zijn een samenvatting van de gegevens uit tabellen 17 – 19.

Resultaten bij 25m3/s in Betuwepand						
Scenario	Kolk	Aantal kolken	Netto vaarsnelheid (km/uur)			
			Vlb geladen	Vlb ongeladen	Vb geladen	Vb ongeladen
Q600	West	Een	n.v.t.	n.v.t.	2.6	4.7
	West	Beide	n.v.t.	n.v.t.	3.4	5.5
	Oost	Een	0.8	2.6	4.4	6.7
	Oost	Beide	1.1	2.9	4.7	7.0
Q800	West	Een	n.v.t.	n.v.t.	2.7	5.9
	West	Beide	n.v.t.	n.v.t.	3.5	6.7
	Oost	Een	0.8	3.7	4.4	6.7
	Oost	Beide	1.2	4.1	4.8	7.1
Q1000	West	Een	n.v.t.	n.v.t.	3.1	7.1
	West	Beide	n.v.t.	n.v.t.	3.7	7.7
	Oost	Een	1.0	4.7	5.0	9.0
	Oost	Beide	1.3	5.0	5.3	9.3

Tabel 21

Resultaten bij 50m ³ /s in Betuwepand						
Scenario	Kolk	Aantal kolken	Netto vaarsnelheid (km/uur)			
			Vlb geladen	Vlb ongeladen	Vb geladen	Vb ongeladen
Q600	West	Een	n.v.t	n.v.t	1.2	3.3
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	2.7	4.8
	Oost	Een	-0.3	1.5	3.3	5.6
	Oost	Beide	0.5	2.3	4.1	6.4
Q800	West	Een	n.v.t	n.v.t	1.6	4.8
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	3.0	6.2
	Oost	Een	-0.1	2.8	3.5	5.8
	Oost	Beide	0.7	3.6	4.3	6.6
Q1000	West	Een	n.v.t	n.v.t	2.0	6.0
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	3.3	7.3
	Oost	Een	0.2	3.9	4.2	8.2
	Oost	Beide	0.8	4.5	4.8	8.8

Tabel 22

Resultaten bij 75m ³ /s in Betuwepand						
Scenario	Kolk	Aantal kolken	Netto vaarsnelheid (km/uur)			
			Vlb geladen	Vlb ongeladen	Vb geladen	Vb ongeladen
Q600	West	Een	n.v.t	n.v.t	-0.2	0.5
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	2.2	3.7
	Oost	Een	-1.4	0.4	2.2	3.5
	Oost	Beide	-0.1	1.7	3.5	5.2
Q800	West	Een	n.v.t	n.v.t	0.4	2.3
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	2.3	4.9
	Oost	Een	-1.0	1.9	2.6	3.9
	Oost	Beide	0.1	3.0	3.7	5.4
Q1000	West	Een	n.v.t	n.v.t	0.9	3.8
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	2.9	6.3
	Oost	Een	-0.7	3.0	3.3	6.5
	Oost	Beide	0.4	4.1	4.4	7.9

Tabel 23

Resultaten bij 100m ³ /s in Betuwepand						
Scenario	Kolk	Aantal kolken	Netto vaarsnelheid (km/uur)			
			Vib geladen	Vib ongeladen	Vb geladen	Vb ongeladen
Q600	West	Een	n.v.t	n.v.t	-1.6	0.5
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	1.6	3.7
	Oost	Een	-2.4	-0.6	1.2	3.5
	Oost	Beide	-0.7	1.1	2.9	5.2
Q800	West	Een	n.v.t	n.v.t	-0.9	2.3
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	1.7	4.9
	Oost	Een	-2.0	0.9	1.6	3.9
	Oost	Beide	-0.5	2.4	3.1	5.4
Q1000	West	Een	n.v.t	n.v.t	-0.2	3.8
	West	Beide	n.v.t	n.v.t	2.3	6.3
	Oost	Een	-1.5	2.2	2.5	6.5
	Oost	Beide	-0.1	3.6	3.9	7.9

Tabel 24

De bovenstaande tabellen laten zien dat bij 25 m³/s waterinname eerste de geladen cat. Vib schepen niet meer kunnen passeren; bij 50 en 75 m³/s komen ook de ongeladen cat. Vib schepen voor een probleem te staan. Bij 100 m³/s kunnen zelfs de kleinere geladen cat Vb. schepen niet meer passeren. Het gehanteerde criterium van een netto vaarsnelheid van 1 km/u zou bij nadere beschouwing in werkelijkheid weleens hoger kunnen liggen. We hebben niet het idee dat we hier onnodig conservatief rekenen. Als een kritische grens van 2 km/u nodig zou blijken neemt de passeerbaarheid snel af.

Wanneer een schip stroomafwaarts vaart moet een schip een snelheid hebben ten opzichte van het water om het roer te kunnen gebruiken. Als er geen stroming is langs het roer functioneert het roer niet. De netto vaarsnelheid bij het passeren van de sluisen is nu dus de som van de snelheid t.o.v. het water en de stroomsnelheid. Tabel 20 toont de stroomsnelheden door de kolken, deze variëren van een halve km/u tot meer dan 5 km/u. Zowel voor de maximale veilige snelheid om een nauwe passage zoals de kolken te passeren, als voor de hoeveel stroomsnelheid die nodig is voor voldoende roerdruk is geen vaststaand criterium op basis waarvan hier gezegd kan worden in welke scenario's veilig stroomafwaarts gevaren kan worden. We kunnen constateren dat bij de lagere debieten er slechts een kleine snelheidstoename plaatsvindt wat slechts tot een gering achteruitgang van de veiligheid leidt. Bij een debiet van 75 m³/s over beide kolken is de snelheidstoename nog beperkt tot 1,4 – 1,8 km/u, wat ten opzichte van de ordegrrootte van een voldoende vaarsnelheid van ca. 10 km/u nog beperkt is. Bij grote debieten, of gebruik van één kolk signaleren we dat de tegengestelde eisen aan de stroomsnelheid: langzaam om veilige de nauwe passage te passeren, maar met voldoende snelheid om genoeg roerdruk te hebben, een negatieve impact hebben op de veiligheid.

Op basis van bovenstaande analyse kan worden gesteld dat er zeker sprake zal zijn van een knelpunt met betrekking tot het passeren van de Bernardsluizen bij een combinatie van een lage waterstand met een verhoogde stroomsnelheid door waterinname. De precieze omvang van het probleem laat zich in deze studie nog niet vaststellen.

Om te bepalen of de nautische veiligheid voldoet dient aanvullend onderzoek uitgevoerd te worden. Hierbij moet gedacht worden aan gesprekken met ervaren binnenvaartschippers en/of aanvullend hydraulische modelonderzoek in combinatie met toepassing van een scheepssimulator. Gesprekken met binnenvaartschippers zijn van belang om te verkennen of schippers door de sluis heen durven varen met de berekende stroomsnelheden. Het risico bestaat dat het schip 'meegesleurd' wordt door de stroming en geen tot weinig controle hebben op het schip. De sluisen zijn niet voorzien van wrijving- en/of geleidingconstructies waardoor schepen mogelijk beschadigd kunnen raken. Scheepsimulatoren kunnen een aanvullend inzicht geven in de veiligheid van de manoeuvres.

4.4.5 Samenvatting Toetsing Prins Bernhardsluizen

Onderstaand is een opsomming gegeven van enkele mogelijke consequenties van een verhoogd debiet tijdens laag water door de Prins Bernhardsluizen:

- 1) De bodembescherming aan de Waalzijde voldoet niet onder alle omstandigheden, de verhoogde schroefstraalbelasting van passerende schepen maakt de bodembescherming instabiel. Bij het beschouwen van de stabiliteit van de bodembescherming dient een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd te worden m.b.t. het in te zetten vermogen. Een inzet van 100 % van het schroefvermogen is nu als uitgangspunt gekozen.
- 2) Aan de ARK-zijde van de Bernardsluizen ontbreekt een bodembescherming. Hier erodeert de bodem door zowel de stroming veroorzaakt door de afvoer als door de retourstroom en schroefstraal van passerende schepen. Dit punt wordt in hoofdstuk 4.6 verder uitgediept.
- 3) Harde criteria voor veilige passage door schepen ontbreken. Wel is duidelijk dat passage van de Bernardsluizen onder een aanzienlijk deel van de scenario's een knelpunt opleveren.
 - a. Conclusies voor beide kolken open:
 - i. Bij 25 m³/s aanvoer is er voor het grootste deel van het verkeer geen sprake van een knelpunt. Mogelijk dat de grootste beladen schepen niet meer stroomopwaarts kunnen passeren.
 - ii. Bij 50 m³/s aanvoer is er voor een deel van het verkeer sprake van een knelpunt. De grootste beladen schepen kunnen niet meer stroomopwaarts passeren.
 - iii. Bij 75 m³/s kunnen de grootste schepen alleen leeg passeren, ook voor de grootste lege schepen wordt passeren moeilijk bij lage afvoer bij Lobith (800 of 600 m³/s). Wellicht kunnen ook bij het stroomafwaarts passeren knelpunten ontstaan doordat de netto vaarsnelheid hoog wordt.
 - iv. Bij 100 m³/s kunnen ook cat. Vb schepen alleen nog gebruik maken van de grotere oostelijke sluis bij lage afvoer bij Lobith (600 – 800 m³/s). Ook bij het stroomafwaarts passeren kunnen knelpunten ontstaan doordat de netto vaarsnelheid hoog wordt.
 - b. Conclusies voor scenario 1 kolk open, 1 kolk doorvaart zonder stroming:
 - i. Er bestaat een groot risico op een grote dwarsstroming bij het in en uitvaren van de kolk door de hoge stroomsnelheden in de naastgelegen kolk. Deze dwarsstroming moet verder worden onderzocht indien deze optie wordt overwogen; op basis hiervan moeten maatregelen om de dwarsstroming te verminderen worden overwogen.
 - ii. De langssnelheden lopen snel op wanneer door één kolk water wordt ingelaten. Bij stroomafwaarts varen moet erg snel gevaren worden om voldoende roerdruk te houden. Bij stroomopwaarts varen wordt de te overwinnen combinatie van weerstand en tegenstroming al snel te veel. Varen door de kolk die open staat is voor veel schepen niet haalbaar of veilig.
 - c. Bij bovenstaande conclusies moet worden bedacht dat bij 600 en 800 m³/s de scheepvaart op de rijntakken voor aanzienlijke knelpunten komt te staan. Het is de vraag in hoeverre een knelpunt bij de Bernardsluizen dan nog maatgevend is.

4.5 Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij

4.5.1 Algemene beschrijving object

De Prinses Marijkesluizen en kering Ravenswaaij bevinden zich aan de noordzijde van het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze objecten verbinden het Betuwepand met de Nederrijn/lek. Onder normale omstandigheden staan de kering en de sluisen open. Bij waterstanden hoger dan NAP +5,55 m op de Nederrijn/Lek worden de sluisen in gebruik genomen en sluit de kering. Deze omstandigheden doen zich bij laagwater - waar deze studie zich op richt - nooit voor. De afmetingen van de objecten zijn weergegeven in Tabel 25.

Object	Doorvaartbreedte	Drempelhoogte	Deur	Bron
Kering Ravenswaaij	80 m	NAP -2,35m	Hefdeur	Tek. 456-021.3
Westelijke sluis	18,02 m	Onbekend, voor afvoer berekening is NAP - 2,35m aangenomen	Puntdeur	Tek. 035-021.3
Oostelijke sluis	18,02 m	Onbekend, voor afvoer berekening is NAP - 2,35m aangenomen	Puntdeur	Tek. 035-021.3

Tabel 25 Specificaties objecten Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij

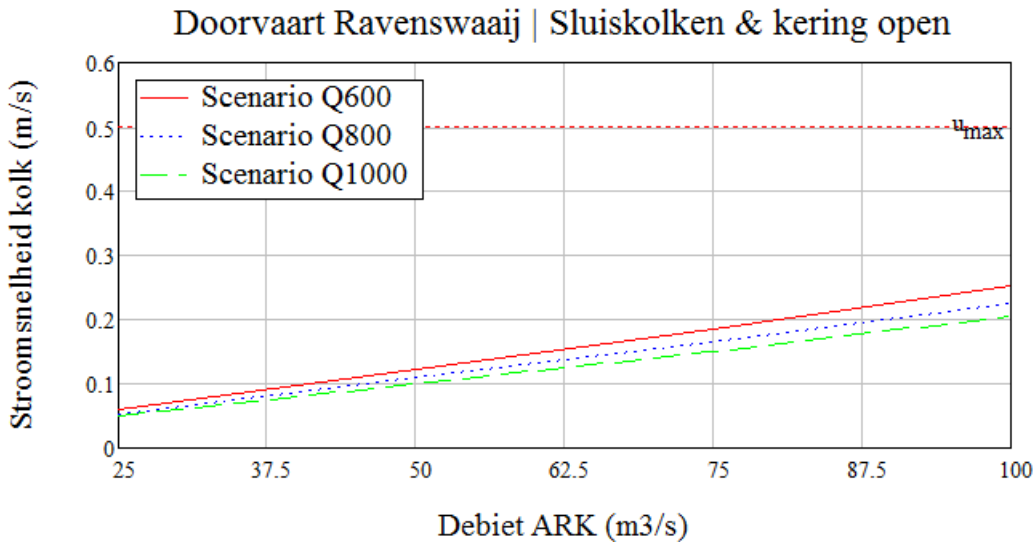
In paragraaf 4.5.2 en 4.5.3 zijn de stroombelastingen door debiet en door de schepen separaat berekend. Een algemene uitspraak over de impact van beide belastingsgevallen samen is gegeven in paragraaf 4.5.5.



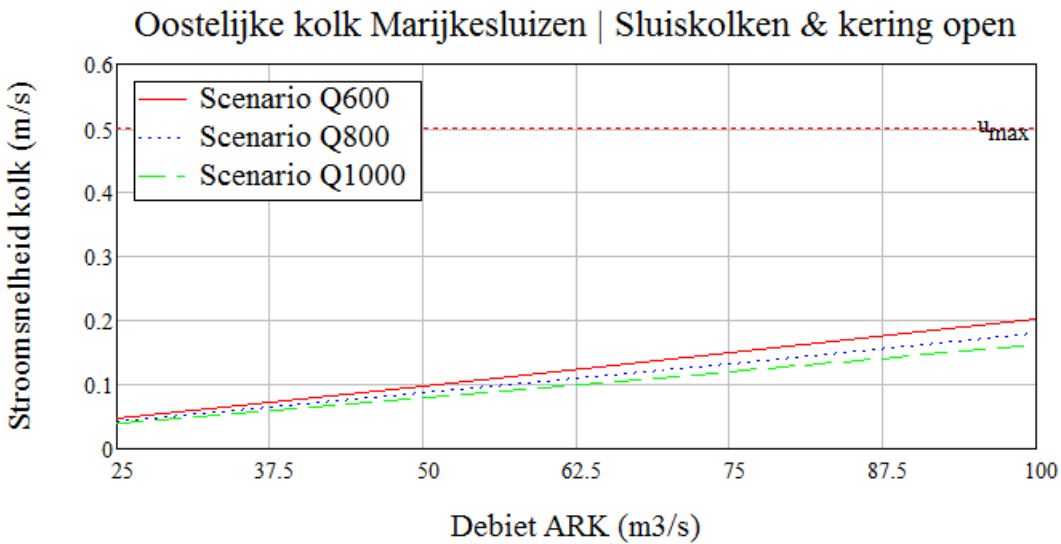
Foto 2 Luchtfoto Marijkesluizen en kering Ravenswaaij

4.5.2 Effecten stroombelastingen door debiet

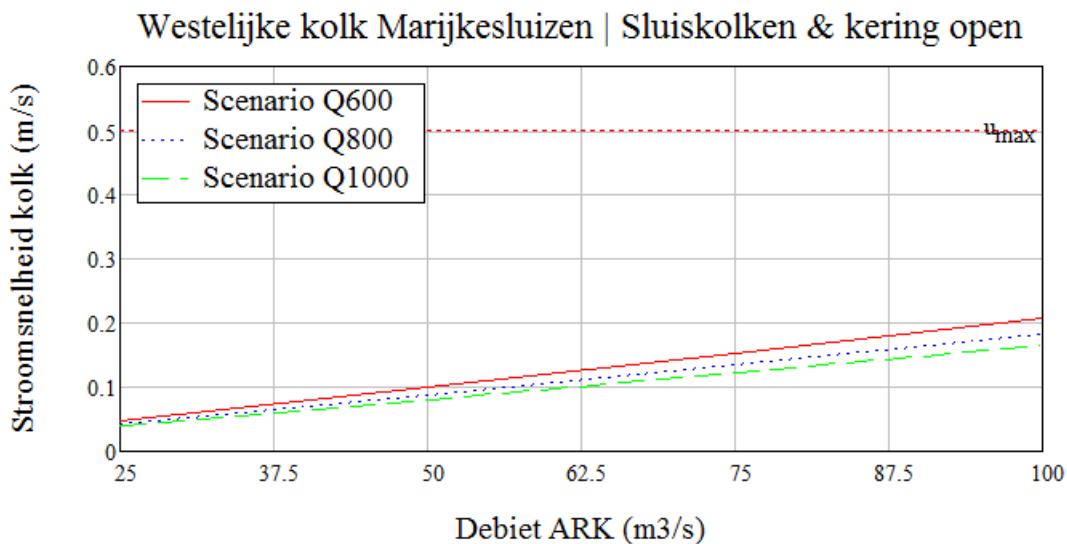
De stroomsnelheid is berekend voor de eerdergenoemde scenario's. De resultaten zijn in Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37 weergegeven. Te zien is dat de maximale stroomsnelheid onder de kritieke stroomsnelheid voor stabiliteit van een onbeschermd bodem van zand (0,3 m/s [Ref. 19]) blijft voor alle scenario's. Het is onbekend wat voor bodembescherming is aangebracht rond de kering en sluisen. De verwachting is dat de bodembescherming rond kering Ravenswaaij is ontworpen voor scheepvaartbelasting, waardoor de effecten van de stroming op de bodembescherming rond de objecten gering zullen zijn.



Figuur 35 Stroomsnelheid door doorvaartopening Ravenswaaij



Figuur 36 Stroomsnelheid door Oostelijke kolk Marijkesluizen



Figuur 37 Stroomsnelheid door Westelijke kolk Marijkesluizen

4.5.3 Effecten stroombelastingen door scheepvaart

De stroombelasting door de scheepvaart is berekend analoog aan de methode toegepast op de Bernardsluizen (zie hst. 4.4.3). Er wordt vanuit gegaan dat scheepvaart door een open kering Ravenswaaij zal varen en niet door de sluizen. Een open kering is immers een beter bevaarbare verbinding dan een open sluis. De Resultaten zijn gegeven in Tabel 26. Te zien is dat de retourstroombelasting voor de scenario's in dezelfde orde grootte liggen. Dit is te verklaren door de verhouding tussen de maximale grenssnelheid en de aanwezige natte doorsnede van het kanaal. Bij een kleine natte doorsnede is de grenssnelheid lager dan bij een grote natte doorsnede. Het schip vaart minder snel, en verplaatst daardoor per tijdseenheid minder water. Echter de hoeveelheid water die verplaatst moet worden, stroomt door een kleiner oppervlak. Hierdoor wordt het positieve aspect van een lagere vaarsnelheid tenietgedaan door de kleinere doorstroomoppervlak.

Voor de netto schroefstroom wordt de grootste belasting verkregen voor lage grenssnelheden. Lage grenssnelheden worden gehaald bij kleine kanaalprofielen. Te zien is dat voor lagere waterstanden de belasting snel toe neemt. De netto schroefstroom is conservatief berekend, uitgegaan is van een 100 % inzet van het motorvermogen bij varen. Bij een schip varende met een constante snelheid is dit een overschatting. Het resultaat dient als effecteninschatting en niet als ontwerpparameter.

Scenario	Grenssnelheid	Vaar snelheid	Geladen / ongeladen	Retourstroom gemiddeld	Retourstroom onder schip	Netto schroefstroom
Q600	75%	7,6 km/uur	Geladen	0,8 m/s	1,4 m/s tot 1,9 m/s	2,6 m/s
	90%	10,1 km/uur	Ongeladen	1,0 m/s	1,8 m/s tot 2,4 m/s	1,5 m/s
Q800	75%	8,0 km/uur	Geladen	0,8 m/s	1,5 m/s tot 2,0 m/s	2,3 m/s
	90%	11,3 km/uur	Ongeladen	1,0 m/s	1,8 m/s tot 2,4 m/s	0,9 m/s
Q1000	75%	8,4 km/uur	Geladen	0,9 m/s	1,6 m/s tot 2,1 m/s	2,2 m/s
	90%	12,3 km/uur	Ongeladen	1,0 m/s	1,8 m/s tot 2,5 m/s	0,5 m/s
OLR	75%	8,9 km/uur	Geladen	0,9 m/s	1,7 m/s tot 2,2 m/s	1,9 m/s
	90%	13,6 km/uur	Ongeladen	1,0 m/s	1,8 m/s tot 2,5 m/s	0,0 m/s

Tabel 26 Scheepsgeïnduceerde hydraulische belastingen te kering Ravenswaaij

De bovenstaande tabel laat zien dat de stromingsbelasting door scheepvaart in veel gevallen oploopt tot 2 a 2,5 m/s. Dit zijn snelheden ten opzichte van het water, ten opzichte van de bodem loopt de belasting dus nog verder op indien met tegenstroming gevaren wordt. Deze belasting is voor de betonnen vloer van de kering geen probleem, maar aan de randen van de vloer kunnen erosiekuilen ontstaan.

We hebben geen informatie over eventueel aanwezige bodembescherming. Wanneer analoog aan de Bernardsluizen een bestorting met 10 – 60 of 20 – 80 kg is aangebracht is deze onder de conservatieve uitgangspunten die hier zijn gehanteerd (100 % motorvermogen, 75 % en 90 % grenssnelheid) niet onder alle scenario's stabiel. Dit heeft echter meer te maken met het varen bij lage waterstanden dan met het aanvoeren van extra water over het Betuwepand.

4.5.4 Effecten op nautiek

De stroomsnelheden door een open kering Ravenswaaij zijn lager dan de stroomsnelheid gegeven in richtlijn vaarwegen. Hierbij wordt uitgegaan dat scheepvaart door de open kering zullen varen en niet door de open sluisen. Tevens zijn de grenssnelheden voldoende hoog. Een hoge grenssnelheid geeft aan dat de hydraulische weerstand die het schip moet overwinnen laag is. Op basis van deze twee gegevens wordt verwacht dat de effecten op de nautiek beperkt zijn.

4.5.5 Samenvatting Toetsing van Marijkesluizen & Kering Ravenswaaij

Onderstaand is een opsomming gegeven van enkele mogelijke consequenties van een verhoogd debiet tijdens laag water te Ravenswaaij & prinses Marijkesluizen:

- 1) De stroomsnelheden door de aanvoer van water over het Betuwepand zijn laag en blijven onder de kritische waarde voor begin van beweging.
- 2) Direct na de drempel van de sluis is naar alle waarschijnlijkheid een bodembescherming aanwezig. Op de geleverde tekeningen zijn deze bodembeschermingen niet gegeven. De belasting op de bodem bedraagt ca. 2 tot 2,6 m/s. De eventueel aanwezige bodembescherming en/of de onbeschermd bodem is mogelijk niet stabiel voor deze belastingen. Geadviseerd wordt om:
 - a. Tijdens laag water regelmatig te peilen en indien nodig scheepvaart te stremmen of de schade te herstellen.
 - b. Te onderzoeken wat voor bodembescherming is aangebracht bij de drempel van de Prinses Marijkesluis en kering Ravenswaaij.
- 3) Uit deze verkenning volgt dat de effecten op de nautiek beperkt zijn voor kering Ravenswaaij en de Prinses Marijkesluizen. Hierbij wordt uitgegaan dat schepen door de doorstroomopening van kering Ravenswaaij zullen varen.

4.6 Potentieel voor sediment transport

De bepaling van het potentieel voor sediment transport wordt in drie delen uitgevoerd. Eerst wordt er gekeken naar het potentieel voor transport langs het uniforme kanaalprofiel. Hieruit blijkt dat de stroomsnelheden zelfs in het zwaarste scenario nog ruim onder de kritieke grens blijven. Vervolgens wordt er gekeken naar het transport bij de Bernardsluizen waar de stroomsnelheden het hoogst zijn. Ook hier is het potentieel voor sediment transport zeer gering. Tot slot wordt er gekeken naar de gevolgen voor het sedimenttransport op de Waal.

Uit de milieutechnische keuringen [ref 12 - 15] die gedaan zijn in het kader van het baggeren van het Betuwepand kan een beeld worden verkregen van de samenstelling van de bodem. Onder de sliblaag die werd weggebaggerd bestond de ondergrond van het Betuwepand uit afwisselend zand en klei. Waar zand werd aangetroffen bestond dit meestal overwegend uit de fractie 125 – 250 micrometer. Dit is fijn zand dat in principe makkelijk transporteert. We nemen aan dat deze fractie maatgevend is voor het transport van bodemmateriaal. De klei is door cohesie over het algemeen moeilijker te eroderen. De kritieke schuifspanning voor deze fractie, bepaald met Brownlie 1981 [ref. 16], is $0,4 \text{ N/m}^2$.

Gegeven het kanaalprofiel is de maximale gemiddelde stroomsnelheid is ca. 0,2 m/s bij de laagste waterstand en een aanvoer van $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Met de White-Colebrook en Chézy vergelijkingen kan worden bepaald dat de bodemschuifspanning in dit geval ca. $0,1 \text{ N/m}^2$ is. Hierbij is uitgegaan van een ruwheidshoogte van 1 cm. Omdat er normaal weinig stroming staat op het ARK nemen we aan dat de bodem vrij glad is en gebruiken een ruwheidshoogte van $8 \times D_{\text{zand}}$, de diameter van de belangrijkste zandfractie. De bodemschuifspanning is dus lager dan de kritische waarde ($0,1 < 0,4 \text{ N/m}^2$). Het CUR geeft een indicatieve snelheid van 0,3 m/s voor de stabiliteit van zand (Figuur 38).

Grondsoort	u_{toel} (m/s)
Zand	0,30
Veen	0,50
Zandige klei	0,40
Slappe klei	0,60
Redelijk vaste klei	0,80 (1,0 bij kortdurende belastingen)
Vaste klei	1,20 (1,5 bij kortdurende belastingen)

Figuur 38 Indicatieve toelaatbare stroomsnelheden o.b.v. CUR 201 [ref. 19].

Knelpunten bij kunstwerken – Prins Bernardsluizen - beide kolken open

Het algemene beeld op het kanaal, zoals bovenstaand beschreven, is dat de stroomsnelheid te laag is om bodemtransport te genereren. Bij de kunstwerken vindt echter een versnelling van de stroming plaats waardoor daar mogelijk wel transport plaatsvindt.

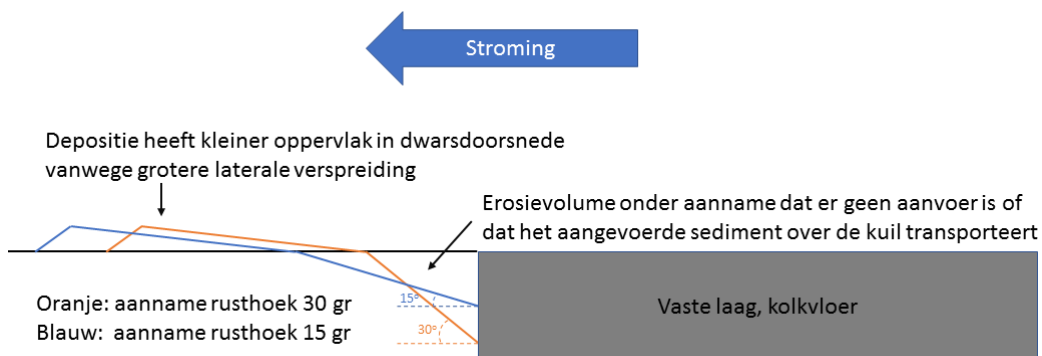
In hoofdstuk 0 is de stroming door de kolken bepaald. De snelheden en waterstanden zijn in Tabel 27 weergegeven vormen en vormen de input voor een berekening van het sediment transport. Aangenomen is dat door beide kolken gespuid wordt. Op basis van de stroomsnelheid en de diepte zijn volgens de bovenstaand beschreven methode de Chézy-waarde (C) en de bodemschuifspanning bepaald. Op basis van de bodemschuifspanning is met de transport formule van Engelund en Hansen (1967) [ref 17] het volume sediment bepaald dat in twee weken zou eroderen achter de Prins Bernardsluizen. Dit volume zou vlak achter de kolken eroderen en direct weer worden afgezet over een lengte van ca. 100 – 300 m. Deze lengte is een schatting, en is gerelateerd aan de lengte waarover de stroming afremt, maar geeft aan dat het om een lokale erosie en sedimentatie gaat. Het transport model van Engelund en Hansen bevat geen waarde voor een kritische schuifspanning, vandaar dat ook voor de situaties waar de bodemschuifspanning (T_b) onder de kritieke waarde blijft ($0,4 \text{ N/m}^2$) een volume wordt uitgerekend. Deze getallen zijn grijs weergegeven.

De volumes laten zien dat in de meeste scenario's weinig transport plaatsvindt. De berekende volumes worden geërodeerd vlak voor en achter de kolken. In vergelijking met het baggeronderhoud op de Waal zijn dit kleine volumes. De capaciteit van een kleine sleepopperzuiger als bijvoorbeeld de Wilma is maximaal ca. 500 m^3 per uur. Wat dat betreft vormen deze volumes dus geen groot knelpunt.

Het volume wordt opgenomen over de breedte van $24 + 18 = 42 \text{ m}$. De diepte van de erosiekuil is op een eenvoudige manier geschat. Er is aangenomen dat aan de benedenstroomse rand een driehoekig gat ontstaat met de diepste zijde direct tegen de vaste rand en een schuine zijde met de rusthoek van verzadigd zand van 30 graden (zie Figuur 39). De resultaten van deze schatting staan vermeld in Tabel 27. Bij de interpretatie van de getallen moet rekening worden gehouden met het feit dat de methode wellicht te conservatief is. De erosie wordt hier lineair geëxtrapoleerd. Naarmate de kuil zich vormt wordt de schuifspanning in de kuil in werkelijkheid lager omdat de stroming er overheen schiet. Er ontstaat dan wel een turbulentie effect achter de harde rand van de overgang van verhard naar los sediment, deze turbulentie zal de kuil langer maken. Netto is de inschatting dat de kuil dus minder diep wordt maar langer. Daarom is een tweede minder conservatie inschatting toegevoegd met een rusthoek van 15 graden. Op basis van deze uitkomsten beoordelen we verder of hier sprake kan zijn van een knelpunt.

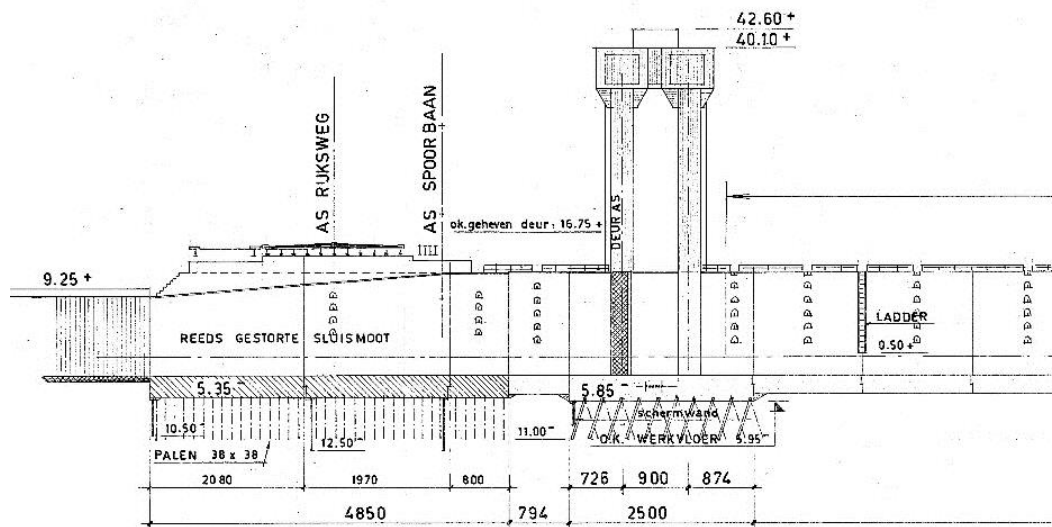
Q 1000	25 m ³ /s	50 m ³ /s	75 m ³ /s	100 m ³ /s
Stroming [m/s]	0,13	0,26	0,40	0,54
Diepte [m]	5,09	5,02	4,96	4,89
C [m ^{1/2} /s]	68	68	68	68
Tb [N/m ²]	0,04	0,15	0,34	0,62
Transport 2 weken [m ³]	0	2	13	58
Diepte erosiekuil (rusthoek 30°) [m]		0,22	0,60	1,27
Diepte erosiekuil (rusthoek 15°) [m]		0,15	0,41	0,86
Q800				
Stroming [m/s]	0,14	0,29	0,44	0,59
Diepte [m]	4,68	4,61	4,54	4,47
C [m ^{1/2} /s]	67	67	67	67
Tb [N/m ²]	0,04	0,18	0,42	0,77
Transport 2 weken [m ³]	0	3	22	98
Diepte erosiekuil (rusthoek 30°) [m]		0,27	0,77	1,64
Diepte erosiekuil (rusthoek 15°) [m]		0,18	0,53	1,12
Q600				
Stroming [m/s]	0,16	0,32	0,49	0,67
Diepte [m]	4,24	4,17	4,1	4,02
C [m ^{1/2} /s]	67	67	66	66
Tb [N/m ²]	0,06	0,23	0,54	1,0
Transport 2 weken [m ³]	0	5	39	183
Diepte erosiekuil (rusthoek 30°) [m]		0,36	1,04	2,25
Diepte erosiekuil (rusthoek 15°) [m]		0,25	0,71	1,53

Tabel 27



Figuur 39

De aanname in deze analyse is dat er aan de ARK-zijde van de Bernardsluizen geen bodembescherming aanwezig is. De ontwerptekeningen van de Duwvaartkolk (Oostelijke kolk) laten zien dat er aan de Waalzijde een korte bodembescherming van beton en een 20 – 80 kg bestorting bestaat, totaal 6 meter. Aan de ARK-zijde lijkt deze bescherming te ontbreken. Echter, de bodembemonstering in het kader van baggeronderhoud maakt vlak achter de sluizen wel melding van een steenbestorting, misschien is er toch ook aan de ARK-zijde van de Bernardsluizen een bodembescherming aangebracht. De onderzijde van de constructie ligt op NAP -5,35 m waardoor de kuil 3 meter diep zou moeten worden voordat de onderzijde van de constructie zou worden ondermijnd door de kuil (Figuur 40). Gezien de aannamen en resultaten achten we het onwaarschijnlijk dat dit niveau wordt bereikt.



LANGS DOORSNEDE A - A

Figuur 40 Detail uit tekening 135-021.4; deze tekening toont het bodemniveau van de kolk op NAP -2,35 m en de 3 meter dikke sluisvloer onder de rijksweg.

De depositie van het geërodeerde materiaal kan eventueel voor een knelpunt zorgen in de vorm van een vaardiepte beperking. De vaargeuldiepten op het Betuwepand zijn echter met 4 – 5 m royaal in vergelijking met de vaargeuldiepten op de Waal onder de beschouwde laagwater omstandigheden (zie hoofdstuk 4.1.2). In de praktijk zal dit daarom niet snel tot een knelpunt leiden. Wel moeten de afzettingen op enig moment weer worden opgeruimd, wat kosten en hinder veroorzaakt. Voorgaand is reeds opgemerkt dat de volumes in dit licht relatief gering zijn.

Knelpunten bij kunstwerken – Prins Bernardsluizen - één kolk open

Wanneer één van de kolken gesloten zou blijven voor het schutten van schepen om de sluisen te passeren zonder tegen- of meestroming zijn de stroomsnelheden in de open kolk veel groter (zie hoofdstuk 4.4.2). Alleen bij de scenario's met 25 m³/s blijven de bodemschuifspanningen rond de kritische schuifspanning. Bij de scenario's met meer wateraanvoer loopt de bodemschuifspanning snel op en is, bij afwezigheid van een bodembescherming, significante erosie te verwachten. De bovenstaande methode voldoet hier niet meer om een schatting te maken en een gedetailleerdere beschouwing op basis van een 3D stromingsmodel is aan te bevelen indien dit scenario wordt overwogen.

Knelpunten bij kunstwerken – Prinses Marijkesluizen

De stroomsnelheid is, zelfs in het meest ongunstige scenario, maximaal 0,25 m/s (zie Figuur 35 - Figuur 37). Hiermee blijft de stroomsnelheid onder de kritische waarde voor transport. Enig transport van slib is niet uit te sluiten, maar de zand en klei afzettingen die de ondergrond vormen zullen niet in transport gaan.

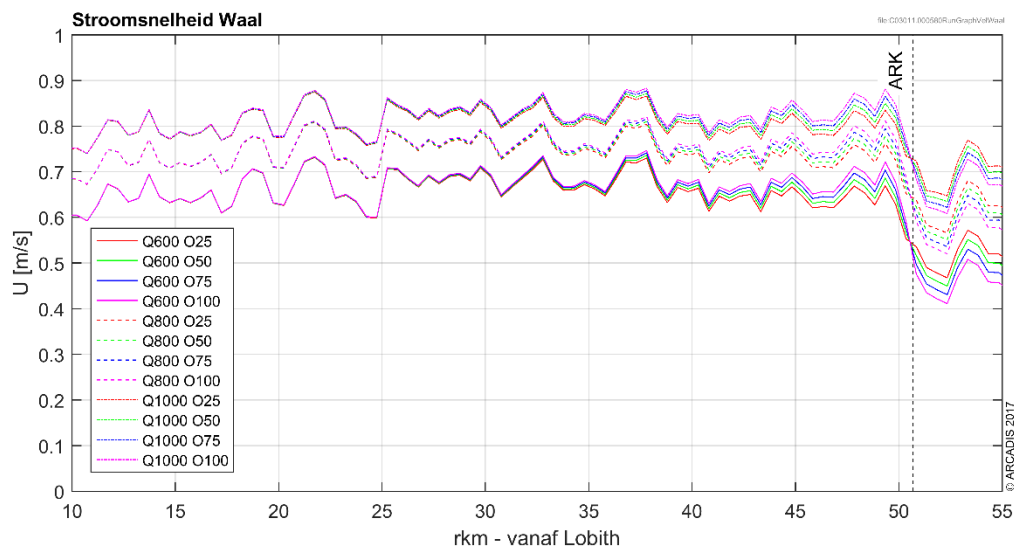
Gevolgen voor morfologie Waal

Een onttrekking van water langs een rivier met (bij benadering) evenwichtsstroming zorgt in principe voor een bovenstrooms verhanglijn die een gradueel versnellende stroming veroorzaakt (zie Figuur 20). Op het stuk bovenstrooms van de onttrekking is het debiet constant, maar de waterstand neemt af en de stroomsnelheid neemt daardoor toe. Door de versnellende stroming neemt ook het sediment transport langs de rivier toe in de richting van de onttrekking. Dat betekent dat op iedere plek steeds iets meer sediment wordt afgevoerd dan wordt aangevoerd waardoor een zeer geleidelijke erosie ontstaat. Benedenstrooms van de onttrekking is de schuifspanning kleiner waardoor het aangevoerde sediment slechts deels kan worden afgevoerd. Hierdoor ontstaat benedenstrooms van de onttrekking dus een sedimentatie gebied.

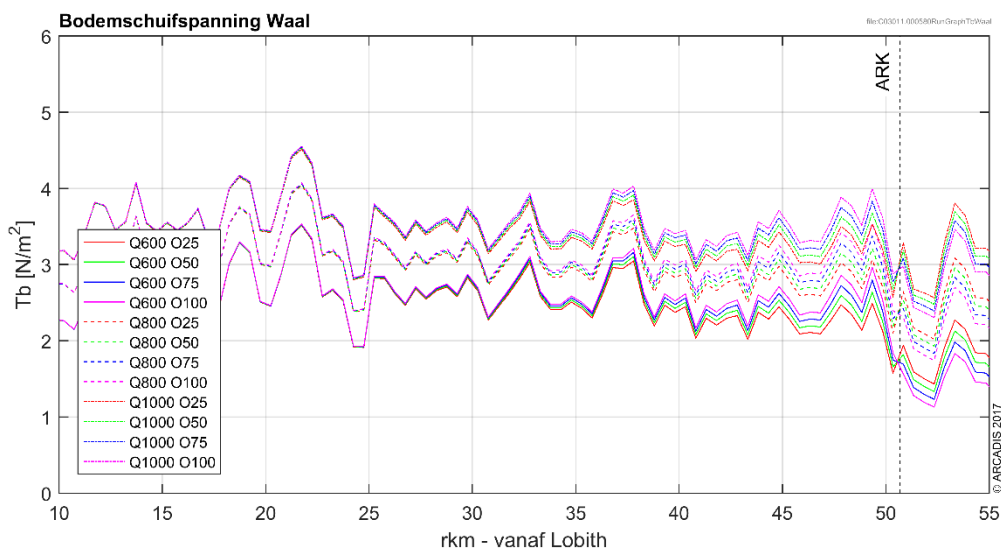
Dit is de theorie. De grafiek van de stroomsnelheid (Figuur 41) langs de Waal laat zien dat de verhanglijn niet veel effect heeft op de stroomsnelheid. Bij een grote onttrekking ligt de stroomsnelheid vlak voor de splitsing naar het ARK iets hoger dan bij een kleine onttrekking, maar het verschil is klein, enkele cm/s. Van een duidelijk oplopende stroomsnelheid is echter geen sprake. Ter hoogte van de onttrekking neemt de stroomsnelheid wel duidelijk af. Dit betekent dat hier inderdaad sedimentatie te verwachten is.

Door de lage afvoer is de bodemschuifspanning, die het sediment transport aandrijft, echter ook laag. Figuur 42 toont het verloop van de bodemschuifspanning voor alle beschouwde scenario's. Deze is berekend met de gemiddelde stroomsnelheid en bodemruwheid uit het Sobek model. Te zien is dat de bodemschuifspanning voor elk afvoerniveau (600, 800, 1000 m³/s) ongeveer constant is langs de Waal, het varieert rond ca. 2,5 N/m² bij 600 m³/s, 3,0 N/m² bij 800 m³/s en 3,5 N/m² bij 1000 m³/s. Richting het ARK divergeren de lijnen licht. Bij het ARK is de schuifspanning het grootst bij de grootste inname en het klein bij de kleinste inname. Benedenstrooms slaat dit beeld om: bij de grootste inname blijft het minste water over op de Waal waardoor de schuifspanning benedenstrooms het laagst uitpakt. Dit betekent dat het verschil in schuifspanning over de splitsing naar het ARK het grootst wordt voor de grootste onttrekking.

Op basis van het snelheids- en schuifspanningsverloop verwachten we dat er bovenstrooms van het ARK weinig tot geen erosie merkbaar zal zijn. Echter, het relatief geringe transport neemt ter hoogte van de onttrekking naar het ARK wel duidelijk af waardoor er naar verwachting een sedimentatiefront ontstaat. Door het geringe transport zal de sedimentatiesnelheid wellicht meevallen. Het valt echter op basis van de huidige resultaten niet uit te sluiten dat er een knelpunt kan ontstaan. Hoe snel het knelpunt zich kan ontwikkelen zou moeten worden vastgesteld met een model dat is gekalibreerd voor sediment transport, in plaats van waterstanden. Een alternatieve beheersmaatregel zou extra monitoring zijn. De uitvoerder van het onderhoudscontract van de Waalbodem zou bij de onttrekking naar het ARK vaker moeten meten. Dan kan tijdig worden gebaggerd bij het ontstaan van een ondiepte.



Figuur 41 Stroomsnelheden bij de verschillende scenario's.



Figuur 42 Bodemschuifspanning bij de verschillende scenario's.

Conclusies sediment transport

- Op het uniforme kanaalprofiel is geen sediment transport te verwachten door de stromingsbelasting.
- Bij de Bernardsluizen kan zich onder omstandigheden met een lage waterstand en hoge afvoer eventueel een erosiekuil vormen.
 - Bij afvoeren t/m 50 m³/s zijn er geen problemen te verwachten
 - Bij afvoeren van 75 m³/s is er bij lage waterstanden kans op beperkte erosie
 - Bij afvoeren van 100 m³/s kan niet worden uitgesloten dat er significante erosie optreed
- Het is niet waarschijnlijk dat het erosie gat snel een diepte van 3 meter bereikt en de onderkant van de sluisvloer benaderd.
- Wanneer wordt overwogen 75 m³/s of 100 m³/s aan te voeren via het ARK verdient het aanbeveling om na te gaan of de toch een bodembescherming in de vorm van een steenbestorting aanwezig is aan de ARK-zijde. Indien deze werkelijk ontbreekt verdient het aanbeveling te overwegen of het nodig is deze aan te brengen.
- Spuien via 1 kolk leidt al snel tot erosie problemen. Bodembescherming is nodig.

4.7 Knelpunten waterinname

Voor de waterinname punten aan het stuwpand Hagestein – Amerongen en aan het Betuwepand is nagegaan of de drempelwaarde voor waterinname wordt onderschreden of benaderd.

Inlaten aan stuwpand Hagestein

De Inlaat Kromme Rijn ligt aan het stuwpand Hagestein. Het drempelniveau van deze inlaat ligt op NAP +1,5m [Ref 10], echter de innamecapaciteit ligt al bij een niveau van NAP +2,7m duidelijk onder de watervraag van 10 m³/s via deze inlaat die in deze studie is gehanteerd. Bij NAP +2,7m is de capaciteit ca. 7 m³/s en bij +2,3m ca. 2 m³/s.

De waterstanden op dit stuwpand zijn bij benadering constant en worden bepaald door de waterstand benedenstrooms van de Marijkesluizen. Deze waterstanden zijn samengevat in Tabel 28. Uit een vergelijking tussen de bovengenoemde drempelwaarden en de waterstanden blijkt dat:

- Bij de scenario's met een afvoer van 600 m³/s bij alle onttrekkingen de drempelwaarde wordt onderschreden; water inname is niet mogelijk.
- Bij de scenario's met een afvoer van 800 en 1000 m³/s bij alle onttrekkingen een knelpunt ontstaat; water inname is mogelijk maar met sterk beperkte capaciteit, namelijk maximaal ca 1 – 2 m³/s .

Waterstanden stuwpand Hagestein [m +NAP]				
Scenario	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Q1000	2,33m	2,26m	2,17m	2,08m
Q800	1,93m	1,84m	1,75m	1,64m
Q600	1,49m	1,40m	1,29m	1,16m

Tabel 28 Waterstanden benedenstrooms van de Marijkesluizen, gegevens afkomstig uit de tabellen 8-10.

De inlaat Kromme Rijn is een bekend knelpunt. Waterinname naar de Kromme Rijn kan ook plaatsvinden via gemaal Caspargouw aan het Noordpand van het ARK. Dit pand heeft een peil van NAP -0,4m en heeft geen last van uitzakkende peilen. Wel moet het onttrekkingsdebiet worden aangevuld met zoet water van de Lek via de Irenesluizen om verzilting tegen te gaan. Op deze manier wordt voorkomen dat het meer verzilte water van het Noordzeekanaal landinwaarts getrokken wordt.

Inlaten aan de Waal

Inlaat Tiel (inlaat naar de stadsgrachten van Tiel) ligt aan de Waal benedenstrooms van de aftakking naar het ARK. De inlaaddrempel ligt op NAP +1.92 m. De waterstanden op de Waal zijn af te lezen in tabellen 8 t/m 10. Het niveau van de inlaaddrempel wordt bereikt bij een Rijnafvoer van circa 800 m³/s. Dit betekent dat rond dit afvoerniveau de grootte van de onttrekking richting het Betuwepand bepalend kan zijn voor de inlaatmogelijkheden.

Inlaten aan het Betuwe Pand

Aan het Betuwepand liggen de Inlaat Prins Bernardsluis, het Van Beuningengemaal en het gemaal Drielandenpunt. Deze innamepunten liggen alle tussen de Bernard- en Marijkesluizen. De Inlaat Prins Bernardsluis ligt pal achter de sluis, het Van Beuningengemaal ligt ca. 2,2 km van de Bernardsluizen, het gemaal Drielandenpunt vlak voor de Marijkesluizen. De waterstanden bij het Beuningengemaal en gemaal Drielandenpunt zijn voor alle scenario's weergegeven in Tabel 29. De waterstanden voor de inlaat Prins Bernardsluis zijn af te lezen in tabellen 8 t/m 10. Het drempelniveau van het Van Beuningengemaal ligt op NAP -0,6 m [ref 11]. Voor dit gemaal kan geconcludeerd worden dat het drempelniveau niet wordt ondergeschreden voor één van de scenario's. Voor het gemaal Drielandenpunt ligt de drempel voor inname op NAP +1,2m; uit vergelijking met de waterstanden blijkt dat hier bij het meeste extreme scenario (Q = 600 / O = 100) een knelpunt optreedt. Het drempelniveau voor de Inlaat Prins Bernardsluis is NAP +2.32m. Dit niveau wordt bereikt bij een Rijnafvoer van circa 1000 m³/s. Dit betekent dat rond dit afvoerniveau de grootte van de onttrekking richting het Betuwepand bepalend kan zijn voor de inlaatmogelijkheden. Geconcludeerd wordt dat:

- De waterstand bij het Van Beuningengemaal boven de drempelwaterstand blijft.
- De waterstand bij het Gemaal Drielandenpunt alleen bij het meest extreme scenario onder de drempelwaarde komt.

- De grootte van de onttrekking richting het Betuwepand invloed heeft op de inlaatmogelijkheden bij Inlaat Tiel bij een Rijnafvoer rond de 800 m³/s.
- De grootte van de onttrekking richting het Betuwepand invloed heeft op de inlaatmogelijkheden bij Inlaat Prins Bernardsluis bij een Rijnafvoer rond de 1000 m³/s.

Over een eventuele capaciteitsafname van de inlaten bij een lage waterstand is ons geen informatie bekend. Dit kan eventueel nog voor een knelpunt zorgen.

Waterstanden van Beuningengemaal [m +NAP]				
Scenario	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Q1000	2,33m	2,26m	2,19m	2,10m
Q800	1,93m	1,85m	1,77m	1,68m
Q600	1,49m	1,41m	1,32m	1,21m
Waterstanden gemaal Drielandenpunt [m +NAP]				
Scenario	25m ³ /s	50m ³ /s	75m ³ /s	100m ³ /s
Q1000	2,33m	2,26m	2,18m	2,08m
Q800	1,93m	1,84m	1,75m	1,64m
Q600	1,49m	1,40m	1,29m	1,17m

Tabel 29

De Pannerling

In het hydraulisch model van het rijntakken systeem zijn nog een aantal andere waterinname punten opgenomen (zie Tabel 1). Voor de Pannerling kan worden gesteld dat de extra onttrekking via het ARK de waterstand bij de Pannerling niet beïnvloed. Indien de extra aanvoer van water via het Pannerdens Kanaal zou plaatsvinden zou de waterstand hier nog iets zakken omdat bij Driel minder gestuwd zou worden. Omdat dit scenario geen onderdeel van deze studie uitmaakt kan hier kwantitatief niets over gezegd worden, maar kwalitatief kan worden geconcludeerd dat het voor de Pannerling dus (iets) gunstiger om via het Betuwepand water aan te voeren richting Hagestein en de Irensluizen.

5 SAMENVATTING VAN CONCLUSIES

In dit hoofdstuk zijn de conclusies van de voorgaand gepresenteerde toetsingen samengevat en onderverdeeld naar grootte van het risico. Niet alle details van de voorgaande hoofdstukken zijn herhaald.

5.1 Sediment transport en instabiliteit bodem

5.1.1 Geen knelpunt

1. Op het uniforme kanaalprofiel is geen sediment transport te verwachten door de stromingsbelasting.
2. Bij de Bernardsluizen kan zich onder omstandigheden met een lage waterstand en hoge afvoer eventueel een erosiekuil vormen. Bij afvoeren t/m 50 m³/s zijn er bij gebruik van 2 kolken geen problemen te verwachten.
3. De stroomsnelheid bij de Marijkesluizen is, zelfs in het meest ongunstige scenario, maximaal 0,25 m/s. Hiermee blijft de stroomsnelheid onder de kritische waarde voor transport. Enig transport van slib is niet uit te sluiten, maar de zand en klei afzettingen die de ondergrond vormen zullen niet in transport gaan.

5.1.2 Beperkt risico op knelpunt

4. Bij de Bernardsluizen kan zich onder omstandigheden met een lage waterstand en hoge afvoer eventueel een erosiekuil vormen. Bij afvoeren van 75 m³/s is er bij lage waterstanden en gebruik van 2 kolken kans op beperkte erosie.
5. Door een afname van de transport capaciteit op de Waal ter hoogte van de splitsing naar het ARK bestaat de kans op het ontstaan van sediment afzettingen die hinderlijk zijn voor de scheepvaart. Mogelijk is de snelheid waarmee deze ontstaan klein in verhouding tot de duur van een laagwater, maar dat valt met het toegepaste instrumentarium niet betrouwbaar vast te stellen.

5.1.3 Groot risico op knelpunt

6. Bij de Bernardsluizen kan zich onder omstandigheden met een lage waterstand en hoge afvoer eventueel een erosiekuil vormen. Bij afvoeren van 100 m³/s, verdeeld over 2 kolken, kan niet worden uitgesloten dat er significante erosie optreedt. Het is niet waarschijnlijk dat het erosie gat snel een diepte van 3 meter bereikt en de onderkant van de sluisvloer benaderd.
7. Spuien via 1 kolk leidt al snel tot erosie problemen. Bodembescherming is nodig.
8. De retourstroom en schroefstroom van schepen bereiken hoge snelheden, bij de hier bepaalde waarden blijven veel toegepaste soorten bodembescherming als 10 – 60 of 20 – 80 kg waterbouwsteen niet stabiel. De onbeschermd kanaalbodem in het algemeen en speciaal bij de uitvaart van de Bernardsluizen zal hier eroderen en leiden tot spoorvorming. Dit probleem wordt vooral veroorzaakt door de lage waterstand en in mindere mate verergerd door het verder zakken van de waterstanden door het aanvoeren van water over het Betuwepand.

5.1.4 Beheersmaatregelen

Bij de kleinere afvoeren is reguliere monitoring en onderhoud van de bodem voldoende. Bij scenario's waar een beperkt risico bestaat voldoet regelmatige monitoring en ingrijpen bij problemen. Wanneer wordt overwogen 75 m³/s of 100 m³/s aan te voeren via het ARK verdient het aanbeveling om na te gaan of de toch een bodembescherming in de vorm van een steenbestorting aanwezig is aan de ARK-zijde. Indien deze werkelijk ontbreekt verdient het aanbeveling te overwegen of het nodig is deze aan te brengen.

De snelheid van het ontstaan van hinderlijke sedimentatie bij het splitsingspunt van Waal en ARK moet ofwel nader worden onderzocht in een morfologisch model of de beheerder moet ten tijde van een hoge onttrekking de bodem van de Waal bij het splitsingspunt extra monitoren.

5.2 Gevolgen voor Scheepvaart

5.2.1 Geen knelpunt

1. Uit deze verkenning volgt dat de effecten op de nautiek beperkt zijn voor kering Ravenswaaij en de Prinses Marijkesluizen. Hierbij wordt uitgegaan dat schepen door de doorstroomopening van kering Ravenswaaij zullen varen.
2. De waterdiepte op het Betuwepand is vrij groot in vergelijking met die op de Waal, hierdoor vormt het Betuwepand geen knelpunt.
3. Lage waterstanden veroorzaken afwijkende belastingen op de oeverbescherming en de bodem maar door de uniform doorgetrokken oeverbescherming leidt dit niet tot schade aan de oevers. Hierbij is wel uitgegaan van een goede staat van onderhoud.

5.2.2 Klein risico op knelpunt

4. Passage van de Bernardsluizen onder tegenstrooming gaat onder een aanzienlijk deel van de scenario's een knelpunt opleveren. Bij 25 m³/s aanvoer is er voor het grootste deel van het verkeer geen sprake van een knelpunt. Mogelijk dat de grootste beladen schepen niet meer kunnen passeren.
5. Wanneer een schip stroomafwaarts de Bernardsluizen passeert moet een schip een snelheid hebben ten opzichte van het water om het roer te kunnen gebruiken. Zowel voor de maximale veilige snelheid om een nauwe passage zoals de kolken te passeren, als voor de hoeveel vaarsnelheid die nodig is voor voldoende roerdruk is geen vaststaand criterium op basis waarvan hier gezegd kan worden in welke scenario's veilig stroomafwaarts gevaren kan worden. We kunnen constateren dat bij de lagere debieten er slechts een kleine snelheidstoename plaatsvindt wat slechts tot een gering achteruitgang van de veiligheid leidt. Bij een debiet van 75 m³/s over beide kolken is de snelheidstoename nog beperkt tot 1,4 – 1,8 km/u, wat ten opzichte van de ordegrootte van een voldoende vaarsnelheid van ca. 10 km/u nog beperkt is. Wat de bovengrens is voor een veilig debiet dient nog nader vastgesteld te worden, zie ook punt 8.
6. De dwarsstrooming op het kruispunt ARK – Lek heeft geen grote snelheid, maar werkt wel over een grote breedte, met een groot debiet. Hierdoor is volgens de richtlijn vaarwegen maatwerk nodig om een inschatting te maken van de toelaatbaarheid. Op basis van de relatief geringe maximale stroomsnelheid is het waarschijnlijk dat onder een groot deel van de scenario's geen problemen zullen ontstaan. Of dit ook geldt voor de scenario's met de kleinste diepte en grootste afvoer kan nu niet worden vastgesteld.

5.2.3 Groot risico op knelpunt

7. Passage van de Bernardsluizen onder tegenstrooming gaat onder een aanzienlijk deel van de scenario's een knelpunt opleveren. Conclusies voor beide kolken open:
 - 7.1. Bij 50 m³/s aanvoer is er voor een deel van het verkeer sprake van een knelpunt. De grootste beladen schepen niet meer kunnen passeren.
 - 7.2. Bij 75 m³/s kunnen de grootste schepen alleen leeg passeren, ook voor de grootste lege schepen wordt passeren moeilijk bij lage afvoer bij Lobith (800 of 600 m³/s).
 - 7.3. Bij 100 m³/s kunnen ook cat. Vb schepen alleen nog gebruik maken van de grotere oostelijke sluis bij lage afvoer bij Lobith (600 – 800 m³/s)
8. Bij het stroomafwaarts passeren van de Bernardsluizen bij grote debieten, of gebruik van één kolk signaleren we dat de tegengestelde eisen aan de vaarsnelheid: langzaam om veilig de nauwe passage te passeren, maar met voldoende snelheid om genoeg roerdruk te hebben. Deze tegengestelde eisen hebben een negatieve impact op de veiligheid, in welke mate dit een probleem vormt moet zeker wanneer grote debieten worden overwogen, of het spuien door 1 kolk wordt overwogen nader worden bepaald. Voorlopig schatten we het als een groot risico op een knelpunt in, wellicht blijkt het bij nadere beschouwing mee te vallen.
9. Conclusies voor scenario 1 kolk open, 1 kolk doorvaart zonder stroming:
 - 9.1. Er bestaat een groot risico op een grote dwarsstrooming bij het in en uitvaren van de kolk door de hoge stroomsnelheden in de naastgelegen kolk. Deze dwarsstrooming moet verder worden onderzocht indien deze optie wordt overwogen; op basis hiervan moeten maatregelen om de dwarsstrooming te verminderen worden overwogen.

- 9.2. De langssnelheden lopen snel op wanneer door één kolk water wordt ingelaten. Bij stroomafwaarts varen moet erg snel gevaren worden om voldoende roerdruk te houden. Bij stroomopwaarts varen wordt de te overwinnen combinatie van weerstand en tegenstroming al snel te veel. Varen door de kolk die open staat is voor veel schepen niet haalbaar of veilig.
10. De aanvoer van water over het Betuwepand verlaagt het peil op de Waal, het Betuwepand en stuwpand Hagestein. Dit leidt tot een verminderde aflaaddiepte voor schepen.
 - 10.1. Er is een duidelijke afname van de waterdiepte op de Waal door een extra onttrekking op het ARK, elke 25 m³/s extra onttrekking zorgt voor ca. 7 cm waterstanddaling, de maximale waterstandsdaling is ca. 30 cm. Deze verandering van de waterstand is een worst-case scenario voor de verandering van de vaardieptebeperking. In de praktijk zal deze waarschijnlijk lager uitvallen omdat de bekende knelpunten buiten het gebied liggen waar de maximale waterstandsdaling plaatsvindt.
 - 10.2. De diepte op de Lek het neemt maximaal met ca. 40 cm af door de extra aanvoer van water over het Betuwepand. Het knelpunt op de Lek ligt waarschijnlijk ter hoogte van rkm 933, hier steekt de stroomdraad over tussen twee bochten en is een ondiepte zichtbaar. Het is te verwachten dat de beschikbare waterdiepte hier geringer is dan op het Betuwepand.

5.2.4 Beheersmaatregelen

Bij bovenstaande conclusies moet worden bedacht dat bij afvoeren van 600 en 800 m³/s bij Lobith de scheepvaart op de rijntakken voor aanzienlijke knelpunten komt te staan, in mindere mate geldt dit ook al bij 1000 m³/s. Knelpunten moeten in relatie tot elkaar en de routes die schepen varen worden gezien.

Schutten (zonder waterstandsverschil) over Bernardsluizen om zo zonder stroming het kunstwerk te passeren is mogelijk een veilige optie om een nautisch knelpunt te verhelpen. De dwarsstroming is echter een groot risico. Het verdient daarom aanbeveling deze in meer detail te onderzoeken en vervolgens eventueel maatregelen te nemen om de dwarsstroming te verminderen. Ook de bodembescherming moet waarschijnlijk verbeterd worden.

Of de afname van de waterdiepte op de Waal en Lek werkelijk tot een grotere vaardieptebeperking leiden hangt af van de andere knelpunten op de door de schepen gevaren routes. Daarom zou voor de belangrijkste routes een knelpunt analyse gemaakt kunnen worden om de hier gevonden waterstandsdaling op waarde te schatten.

5.3 Onderschrijding drempel waterinlaatpunten

5.3.1 Geen knelpunt

1. De waterstand bij het Van Beuningengemaal blijft boven de drempelwaterstand.

5.3.2 Klein risico op knelpunt

2. De waterstand bij het Gemaal Drielandenpunt komt alleen bij het meest extreme scenario onder de drempelwaarde. Mogelijk vindt ook bij minder extreme scenario's een capaciteitsafname plaats.

5.3.3 Groot risico op knelpunt

3. Inlaat Kromme Rijn blijkt onder alle beschouwde omstandigheden een capaciteitstekort te hebben.
 - 3.1. Bij de scenario's met een afvoer van 600 m³/s wordt bij alle onttrekkingen de drempelwaarde overschreden; water inname is niet mogelijk.
 - 3.2. Bij de scenario's met een afvoer van 800 en 1000 m³/s ontstaat bij alle onttrekkingen een knelpunt; water inname is mogelijk maar met sterk beperkte capaciteit, namelijk maximaal ca 1 – 2 m³/s. De veronderstelde watervraag is ca. 10 m³/s.
4. De grootte van de onttrekking richting het Betuwepand heeft invloed op de inlaatmogelijkheden bij:
 - 4.1. Inlaat Tiel bij een Rijnaafvoer rond de 800 m³/s.
 - 4.2. Inlaat Prins Bernardsluis bij een Rijnaafvoer rond de 1000 m³/s.

Beide onttrekkingen zijn klein van omvang, de impact van een beperkte inlaat is niet onderzocht in deze studie.

5.3.4 Beheersmaatregelen

Waterinname naar de Kromme Rijn kan ook plaatsvinden via gemaal Caspargouw aan het Noordpand van het ARK. Dit pand heeft een peil van NAP -0,4m en heeft geen last van uitzakkende peilen. Wel moet het onttrekkingsdebiet worden aangevuld met zoet water om verzilting tegen te gaan. Het onttrekkingsdebiet naar de Kromme Rijn kan via de Irenesluizen worden aangevoerd.

5.4 Overige onderwerpen

5.4.1 Geen knelpunt

1. De afvoerverdeling op de Pannerdense Kop verandert niet door de extra onttrekking bij Tiel via het ARK. De toename van de onttrekking gaat dus vrijwel geheel ten koste van het debiet richting de Merwede; het debiet richting het PK is vrijwel constant.
2. De waterstanden bij de Pannerling zijn hierdoor hoger dan wanneer een extra water via Driel aangevoerd zou worden in plaats van over het Betuwepand.
3. De stroomsnelheidstoename in de sluiskolken van de Marijkesluizen is dermate klein dat geen problemen met het open houden van de puntdeuren te verwachten zijn.

5.4.2 Klein risico op knelpunt

4. Het binnenhoofd van de westsluis van de Prins Bernhardsluizen is uitgevoerd met puntdeuren. Bij een stroming van de Waal naar het Betuwepand zal de stroming een kracht uitoefenen op de deuren. Het water zal parallel langs de deur stromen, waarbij de punt van de puntdeur tegen de stroming in gericht staat. Getoetst dient te worden of de deur in de open positie gehouden kan worden bij een langsstroom.

5.4.3 Groot risico op knelpunt

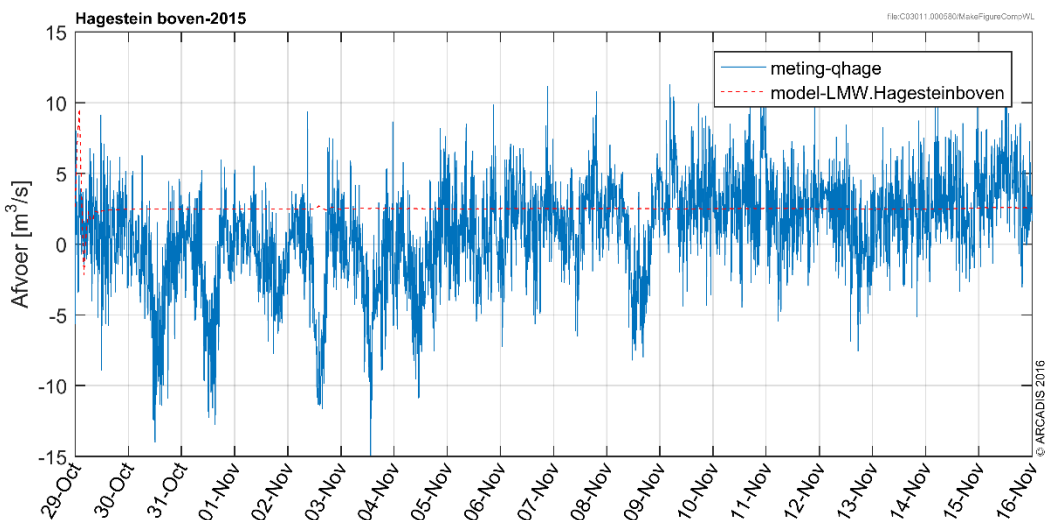
5.4.4 Beheersmaatregelen

REFERENTIES

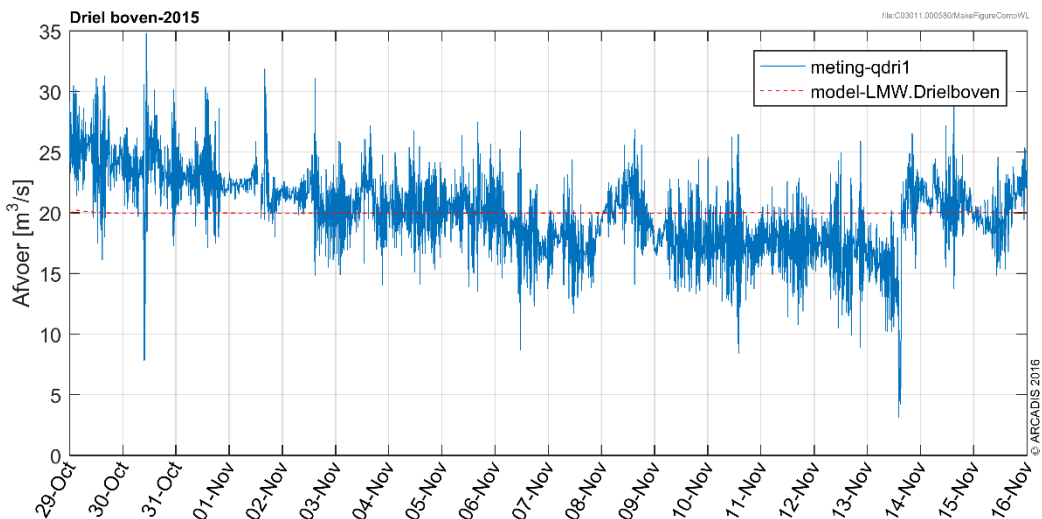
- Ref. 1 Toegepaste Vloeistofmechanica; hydraulica voor waterbouwkundigen; ir. I.W. Nortier
- Ref. 2 Vloeistofmechanica, J.A. Battjes
- Ref. 3 Slim Watermanagement Nederrijn – Lek, P741, Hydrologic 2016
- Ref. 4 RWS (April 2016) Handreiking voor de interpretatie van de tabellen met waternormalen. Gedownload van: <http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-aterberichtgeving/metingen/waternormalen/index.aspx>
- Ref. 5 Vaarwegen in Nederland, editie november 2016. Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening.
- Ref. 6 Egbert Ijmker mondelinge opmerking in startoverleg d.d. 03-10-2016
- Ref. 7 Deltares (2014) Rijn-modellen 5^e generatie, Bouw kalibratie en verificatie van SOBEK 3.2 modellen voor de Rijntakken. 1209449-003-ZWS-0015-v1-r-Rijn-modellen 5e generatie SOBEK 3.2_concept.pdf
- Ref. 8 RWS (2011) Richtlijnen Vaarwegen 2011
- Ref. 9 Hydrologic (2013) Waterverdelings- en verziltingsvraagstukken in het hoofdwatersysteem in West- en Midden-Nederland, Eindrapport. P475
- Ref. 10 Factsheet uitwisselingspunten 2010-05-31. Verkenning Waterverdeling Midden Nederland, Bijlage 5. Email Rene van den Heuvel RWS 04-10-2016 aan Arjan Tuijnder.
- Ref. 11 Regionale verkenning Zoetwater Rivierengebied Fase 4, Wittenveen en Bos, Ref. TL248-1/15-009.311 juni 2015
- Ref. 12 Certicon Verkennend waterbodemonderzoek NVN 5720, Betuwepand ARK vak 24 km 62,10 – 62,30 Oktober 2008
- Ref. 13 Certicon Verkennend waterbodemonderzoek NVN 5720, Betuwepand ARK vak 25 km 63,00 – 64,30 Oktober 2008
- Ref. 14 Certicon Verkennend waterbodemonderzoek NVN 5720, Betuwepand ARK vak 26 km 64,70 – 68,60 Oktober 2008
- Ref. 15 Certicon Verkennend waterbodemonderzoek NVN 5720, Betuwepand ARK vak 27 km 68,70 – 70,90 Oktober 2008
- Ref 16. Brownlie, W. R., 1981, Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels, *Report* No. KH-R-43A, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, 232 p.
- Ref 17. Marcelo Garcia, Sedimentation Engineering ASCE manuals and Reports on Engineering Practice ASCE No. 110.
- Ref 18. Betrekkingslijnen 2012, Uitvoer ws-duurlijn 2012 per kmr 1901-2009.xls geleverd door RWS-ON.
- Ref 19. CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- Ref 20. Deltares SOBEK 3, D-Flow 1D, User Manual. Versie 3.4.0 14 september 2015.
- Ref 21 J.S. Ribberink, S.J.M.H. Hulscher River Dynamics part 1: Shallow – Water Flows. College Dictaat March 2012 Universiteit Twente
- Ref 22 Email Ton Drost 24/02/2017 aan Wim Werkman en Arjan Tuijnder

BIJLAGE 1A GRAFIEKEN KALIBRATIE

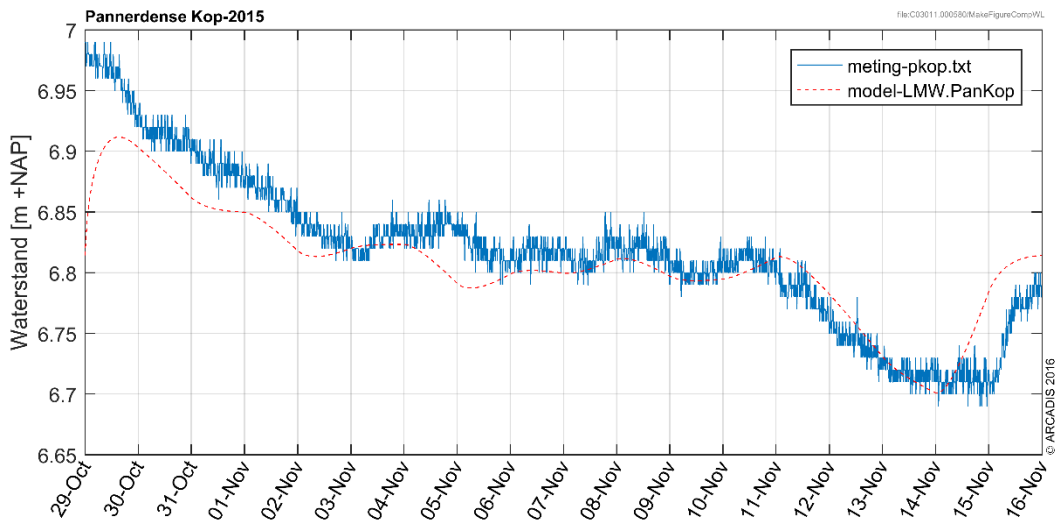
In onderstaande figuren zijn de vergelijkingen gegeven voor de berekende waterstanden in de kalibratiesom en de gemeten waarden langs de rivier. Het doel van de kalibratie was het reproduceren van de juiste afvoerverdeling op de splitsingspunten (zie Figuur 6 in de hoofdtekst) en de juiste waterstanden langs de Waal, met name bij Tiel, het Betuwepand en stuwpand Hagestein. Het model is gekalibreerd voor stationaire omstandigheden, deze kwam in de beschouwde meetreeks bij benadering voor tussen 3 tot 11 november 2015.



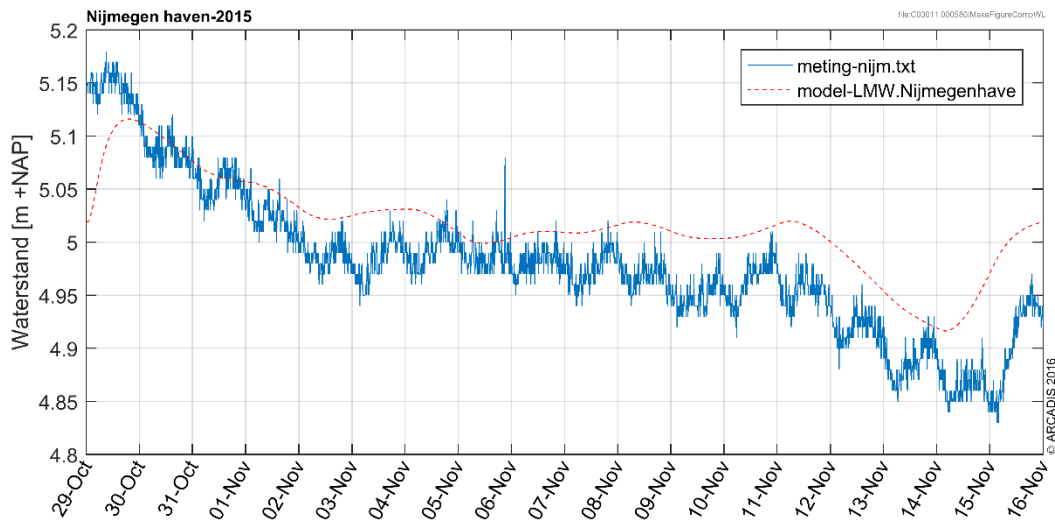
Figuur 43 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Hagestein Boven



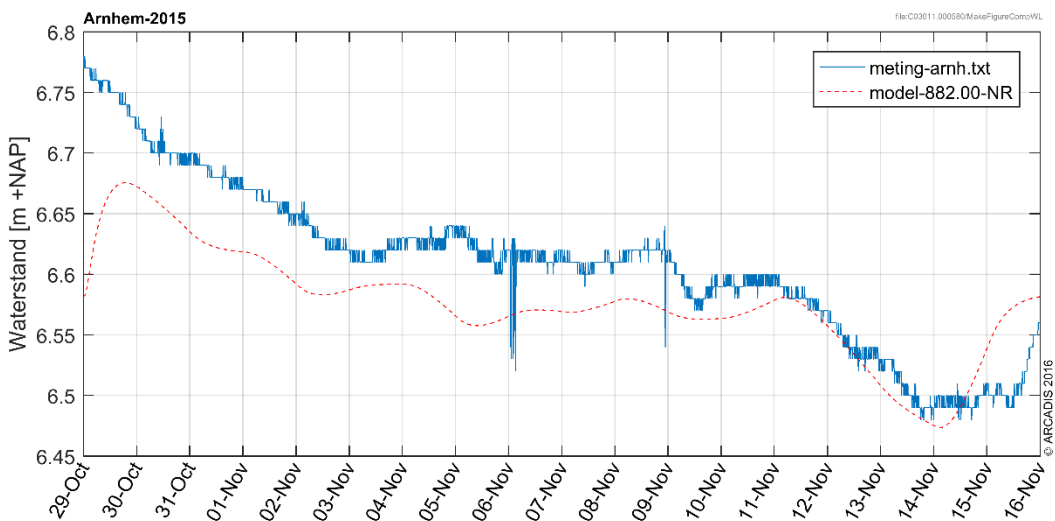
Figuur 44 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Driel Boven



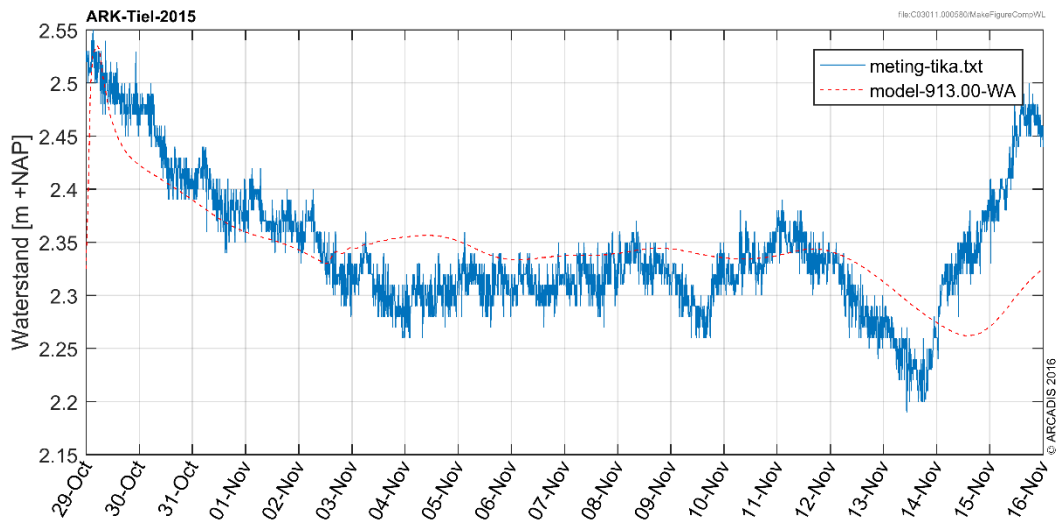
Figuur 45 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Pannerdse Kop



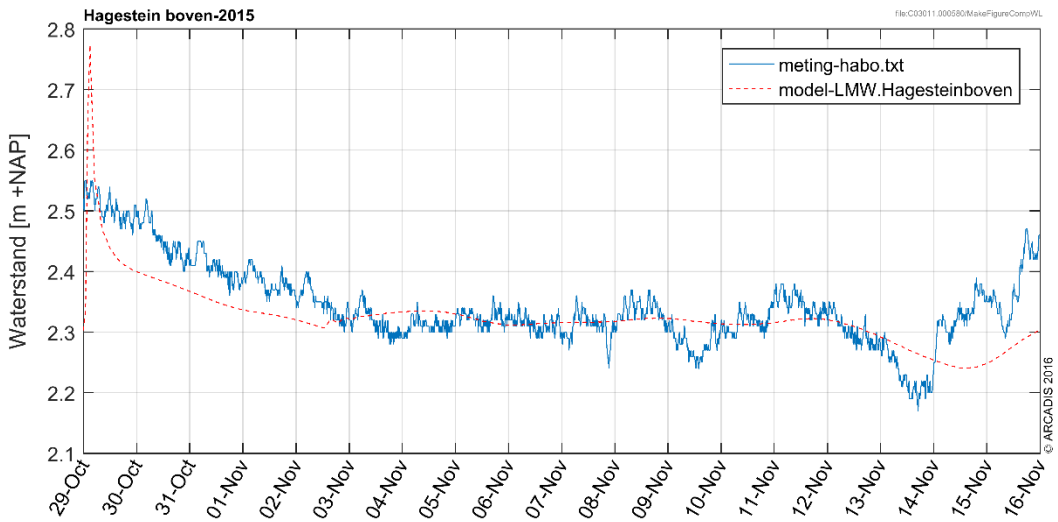
Figuur 46 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Nijmegen Haven



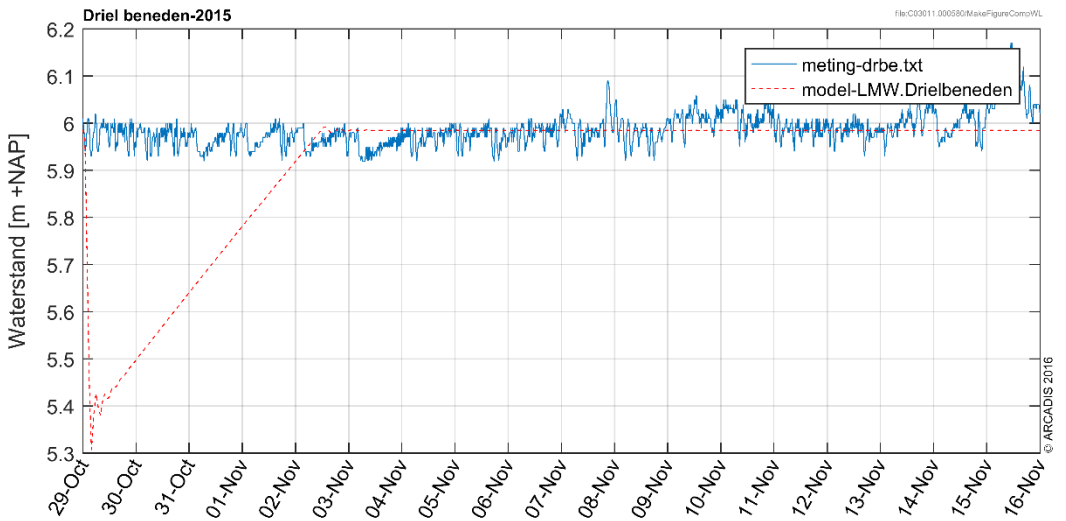
Figuur 47 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Arnhem



Figuur 48 Vergelijking berekende en gemeten waterstand ARK-Tiel



Figuur 49 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Hagestein Boven



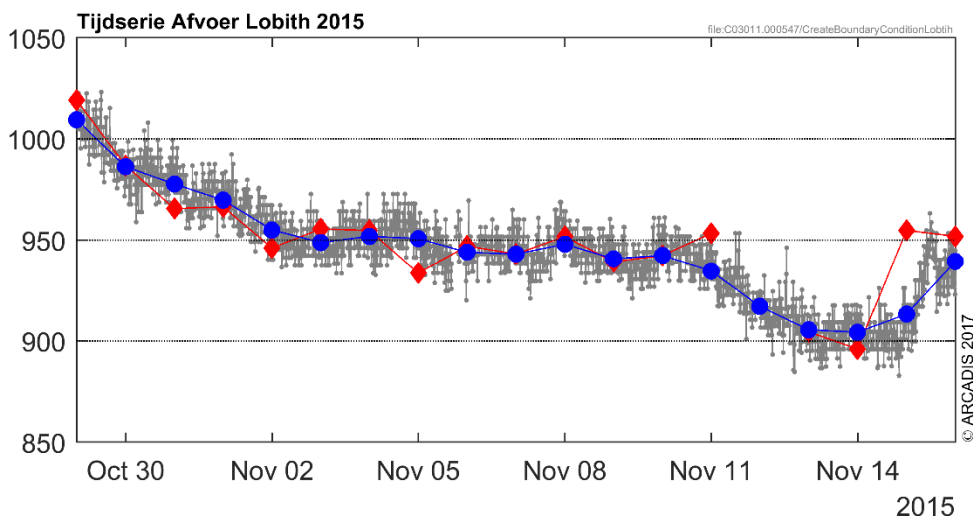
Figuur 50 Vergelijking berekende en gemeten waterstand Driel Beneden

BIJLAGE 1B VALIDATIE GEBRUIKTE RANDVOORWAARDE KALIBRATIE

Voor het kalibreren van het Sobek 3 rijntakken model voor lage afvoeren (<1000 m³/s) is gebruik gemaakt van de tijdserie van dagelijkse gemiddelde afvoeren zoals geleverd door RWS.

Later zijn hoogfrequenter gegevens geleverd, namelijk voor elke 10 minuten een waarde. In deze levering zijn ook de waterstanden bij Tiel en op het PK geleverd. Met deze gegevens is het model op waterstanden en afvoerverdeling gekalibreerd. Omdat bij de begeleidingsgroep vragen ontstonden over het effect van de afwijkingen tussen het dagelijkse signaal en het hoogfrequente signaal is de kalibratiesom herhaald met een lopend gemiddelde van de hoogfrequente data over 1 dag.

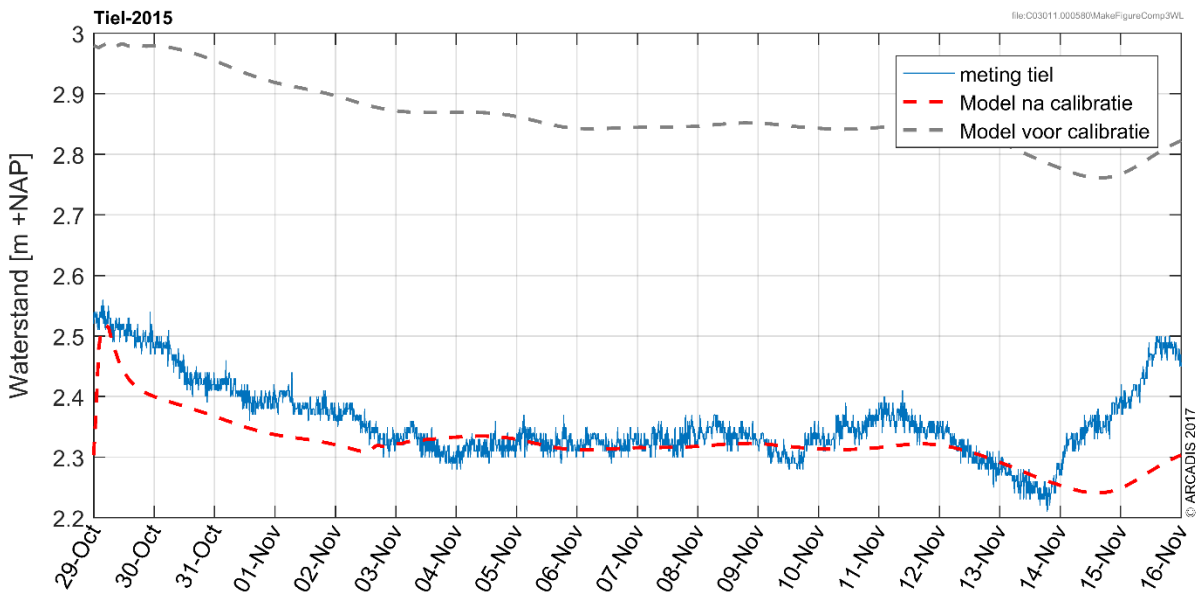
Het onderstaande figuur vergelijkt de oorspronkelijk gebruikte dagelijkse waarden (rood), het lopend gemiddelde (blauw) en de hoogfrequente data (grijs). Te zien is dat de blauwe lijn de grijze lijn beter volgt.



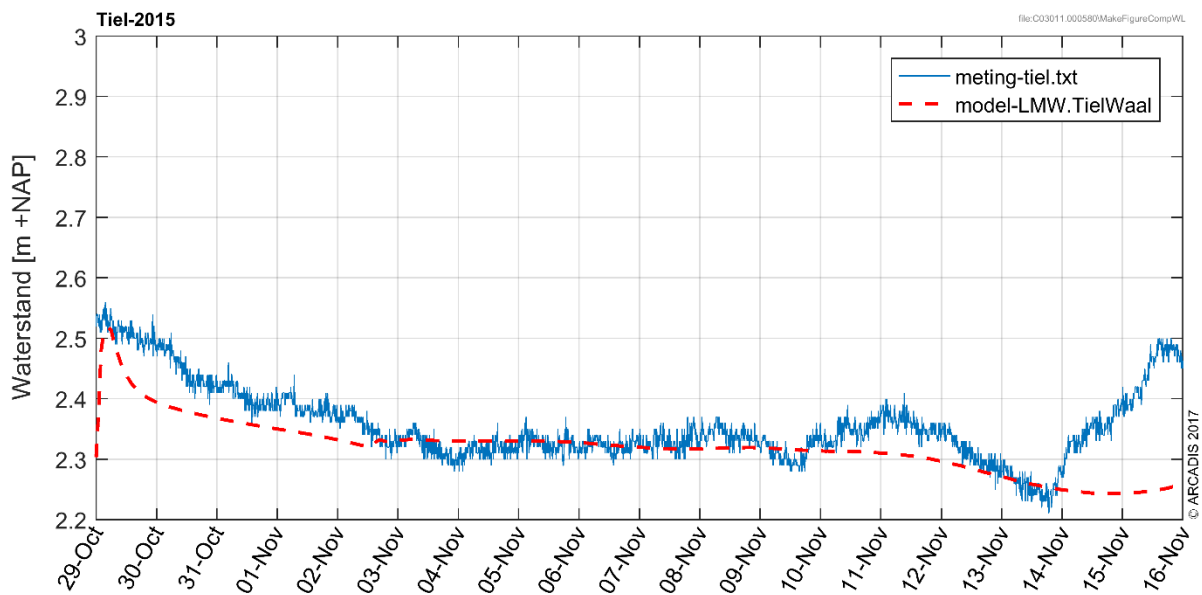
Figuur 51 Vergelijking tijdseries voor de afvoer bij Lobith

De vraag is nu of we een wezenlijk ander kalibratie resultaat zouden hebben verkregen als we het de blauwe lijn in plaats van de rode lijn als randvoorwaarde voor de kalibratie zouden hebben gebruikt.

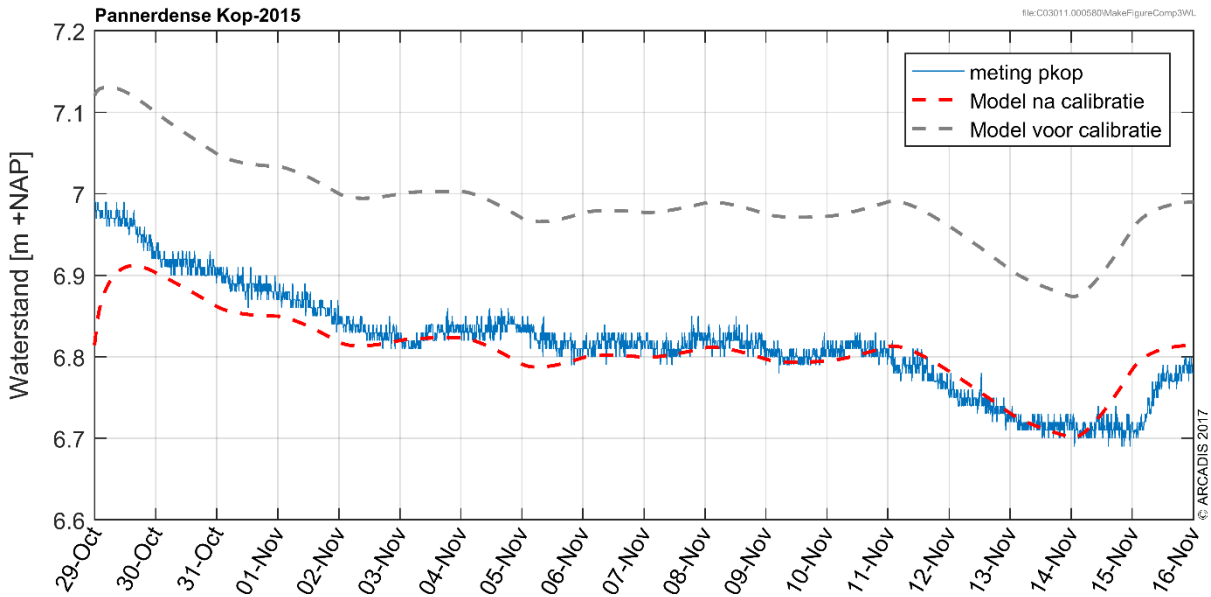
In de volgende figuren wordt een vergelijking gemaakt tussen de model resultaten met gebruik van de dagelijkse waarden en het lopende gemiddelde over een dag van de hoogfrequente data. De ruwheden zijn voor beide sommen gelijk, namelijk de ruwheden die volgden uit de kalibratie met de dagelijkse waarden. Te zien is dat de resultaten voor de bij benadering stationaire periode van 3 tot 10 november niet veel verschillen en dat de het resultaat voor het lopende gemiddelde iets beter uitpakt. Op basis hiervan concluderen we dat het niet zinvol is de ruwheidskalibratie te herhalen met hoogfrequente data.



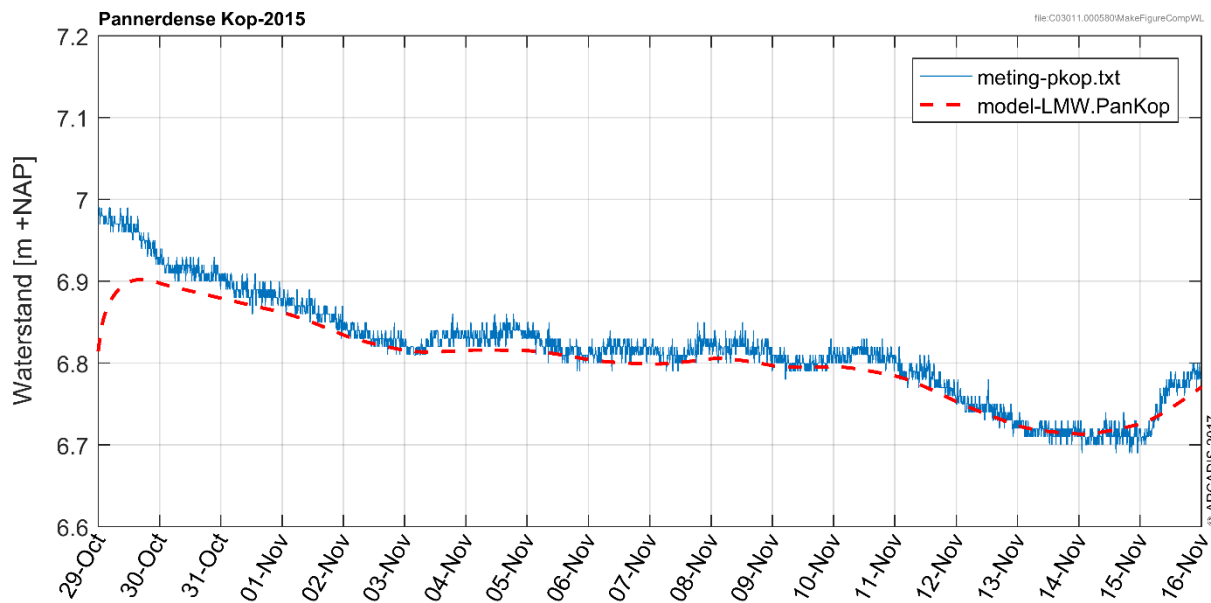
Figuur 52 Waterstand bij Tiel gekalibreerd met tijdserie dagelijkse waarden RWS (rood in Figuur 51)



Figuur 53 Waterstand bij Tiel gekalibreerd met het lopende gemiddelde over een dag van de hoogfrequente tijdserie (blauw in Figuur 51)



Figuur 54 Waterstand bij Pannerdense Kop gekalibreerd met tijdserie dagelijkse waarden RWS (rood in Figuur 51)



Figuur 55 Waterstand bij Pannerdense Kop gekalibreerd met het lopende gemiddelde over een dag van de
hoogfrequente tijdserie (blauw in Figuur 51)

BIJLAGE 2

CEMT klasse	typering duwstel	breedte (m)	lengte (m)	diepgang geladen (m)	laadvermogen (ton)
I	1 voorspanbak	5,2	55	1,9	≤ 400
II	1 voorspanbak	6,6	60 – 70	2,6	401-600
III	1 voorspanbak	8,2	85	2,7	601-1250
IV	1 voorspanbak type Europa I	9,5	85 – 105	3,0	1251-1800
Va	1 voorspanbak type Europa II	11,4	95 – 135	3,5 - 4,0	1801-3950
Vb	2 bakken Europa II lange formatie	11,4	170 – 190	3,5 - 4,0	3951-7050
VIa	2 bakken Europa II brede formatie	22,8	95 – 145	3,5 - 4,0	3951-7050
VIb	4 bakken Europa II	22,8	185 – 195	3,5 - 4,0	7051-12000
VIc	6 bakken Europa II lange formatie	22,8	270	3,5 - 4,0	12001-18000
VIIa	6 bakken Europa II brede formatie	34,2	195	3, 5 - 4,0	12001-18000

Tabel 30 Scheepskenmerken koppelverbanden cf. Richtlijn Vaarwegen 2011

klasse	minimum vaarwegprofiel (m)				
	diepte D*	breedte		zijwindtoeslag Δ_w	
		Wt	Wd	landstreek	kuststreek
normaal profiel					
I	3,1 - 3,5	20,4	10,2	2	4
II	3,5 - 3,6	26,4	13,2	3	6
III	3,5 - 3,8	32,8	16,4	4	8
IV	3,9 - 4,2	38,0	19,0	5	11
Va	4,9	46,0	22,8	5	11
Vb	5,6	46,0	22,8	9	18
krap profiel					
I	2,9 - 3,3	15,3	10,2	3	5
II	3,3 - 3,4	19,8	13,2	4	7
III	3,3 - 3,5	24,6	16,4	5	10
IV	3,6 - 3,9	28,5	19,0	7	15
Va	4,6	34,0	22,8	7	15
Vb	5,2	34,0	22,8	12	24
enkelstrooksprofiel					
I	2,9 - 3,3	10,2	5,1	nader te bepalen	nader te bepalen
II	3,3 - 3,4	13,2	6,6		
III	3,3 - 3,5	16,4	8,2		
IV	3,6 - 3,9	19,0	9,5		
Va	4,6	22,8	11,4		
Vb	5,2	22,8	11,4		

* = gegarandeerde nautische diepte excl. marge voor onderhoud

Tabel 31 Minimale vaarwegprofielen cf. Richtlijn vaarwegen 2011

BIJLAGE 3 BEREKENING SCHEEPSGEÏNDUCEERDE BELASTINGEN

Project: Verkenning vergrote aanvoer water via BP-ARK onder droge omstandigheden
Project nummer: C03011.000580
Onderwerp: Scheepsgeïnduceerde belastingen kanaalprofiel Betuwepand
Datum: 01-12-2016
Status: versie 1.0
Opgesteld door: H.G. Tuin
Gecontroleerd door: -
Vrijgegeven door: Arjan Tuijnder

ORIGIN := 1

Beschrijving sheet:

In deze sheet worden de scheepsgeïnduceerde bepaald voor het kanaalprofiel van het Betuwepand

De bodem kan op de volgende manieren worden belast:

- Scheepsgeïnduceerde belastingen (retourstromingen, schroefstromingen door hoofdschroef en boegschroef)
- Natuurlijke stromingen a.g.v afvoer, onttrekking en schutten
- Mechanische belastingen, zoals vallende ankers, etc

In deze sheet wordt de scheepsgeïnduceerde belastingen bepaald.

Gebruikte basisinformatie

- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London
- Delft Hydraulics (1997). DIPRO 3.02n (Gebruikershandleiding)
- TUDelft, Ir. J. Bouwmeester (1987). Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen, Havens en scheepvaartwegen I

Gegevens:

De invoer van de getoetste locaties/situaties is ingevoerd in een excel sheet welke opgenomen is in deze sheet. In totaal worden 8 situaties doorgerekend.

Kenmerk := 8

N_{var} := Kenmerk

Teller voor de for-loops

N := 1 .. N_{var}

In totaal worden twee berekeningen uitgevoerd. D.m.v. onderstaande checkbox kan de juiste checkbox geselecteerd worden voor de berekening.

nr :=

- CEMENT VIb
 CEMENT Vb

nr = 2.00

Data_{V**I**b} :=

		CEMT klasse V I b							
		Q600		Q800		Q1000		OLR	
		Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen
Variabele	eenh.	1	2	3	4	5	6	7	8
Maatgevende waterstand	[m]	1,2	1,2	1,7	1,7	2,1	2,1	2,7	2,7
Bodemniveau	[m]	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
Nat oppervlak kanaaldoorsnede	[m ²]	536,5	536,5	609	609	667	667	754	754
Taludhelling	[-]	4	4	4	4	4	4	4	4
Diepgang	[m]	2,5	2	2,9	2	3,2	2	3,6	2
Breedte schip	[m]	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
Scheepslengte	[m]	195	195	195	195	195	195	195	195
Blok coefficient	[-]	1	1	1	1	1	1	1	1
Coefficient voor secundaire golven	[-]	1	1	1	1	1	1	1	1
Grenssnelheid	[-]	75	90	75	90	75	90	75	90
Vermogen hoofdschroef		2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Aantal schroeven		3	3	3	3	3	3	3	3

Data_{V**b**} :=

		CEMT klasse V b							
		Q600		Q800		Q1000		OLR	
		Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen	Geladen	Ongeladen
Variabele	eenh.	1	2	3	4	5	6	7	8
Maatgevende waterstand	[m]	1,2	1,2	1,7	1,7	2,1	2,1	2,7	2,7
Bodemniveau	[m]	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
Nat oppervlak kanaaldoorsnede	[m ²]	547,6	547,6	621,6	621,6	680,8	680,8	769,6	769,6
Taludhelling	[-]	4	4	4	4	4	4	4	0
Diepgang	[m]	2,5	2	2,9	2	3,2	2	3,6	2
Breedte schip	[m]	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Scheepslengte	[m]	135	135	135	135	135	135	135	135
Blok coefficient	[-]	1	1	1	1	1	1	1	1
Coefficient voor secundaire golven	[-]	1	0,35	1	0,35	1	0,35	1	0,35
Grenssnelheid	[-]	75	90	75	90	75	90	75	90
Vermogen hoofdschroef		1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750
Aantal schroeven		2	2	2	2	2	2	2	2

Data := $\begin{cases} \text{Data}_{V**I**b} & \text{if } nr = 1 \\ \text{Data}_{V**b**} & \text{if } nr = 2 \end{cases}$ nr = 2.00

$$\text{Data} = \begin{pmatrix} 1.20 & 1.20 & 1.70 & 1.70 & 2.10 & 2.10 & 2.70 & 2.70 \\ -2.50 & -2.50 & -2.50 & -2.50 & -2.50 & -2.50 & -2.50 & -2.50 \\ 547.60 & 547.60 & 621.60 & 621.60 & 680.80 & 680.80 & 769.60 & 769.60 \\ 4.00 & 4.00 & 4.00 & 4.00 & 4.00 & 4.00 & 4.00 & 0.00 \\ 2.50 & 2.00 & 2.90 & 2.00 & 3.20 & 2.00 & 3.60 & 2.00 \\ 11.40 & 11.40 & 11.40 & 11.40 & 11.40 & 11.40 & 11.40 & 11.40 \\ 135.00 & 135.00 & 135.00 & 135.00 & 135.00 & 135.00 & 135.00 & 135.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 0.35 & 1.00 & 0.35 & 1.00 & 0.35 & 1.00 & 0.35 \\ 75.00 & 90.00 & 75.00 & 90.00 & 75.00 & 90.00 & 75.00 & 90.00 \\ 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 & 1.75 \times 10^3 \\ 2.00 & 2.00 & 2.00 & 2.00 & 2.00 & 2.00 & 2.00 & 2.00 \end{pmatrix}$$

Data

$$\text{SWL} := \text{submatrix}(\text{Data}, 1, 1, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (1.2 \ 1.2 \ 1.7 \ 1.7 \ 2.1 \ 2.1 \ 2.7 \ 2.7) \text{m}$$

$$h_{\text{h}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 2, 2, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (-2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ -2.5 \ -2.5) \text{m}$$

$$m_{\text{slope}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 4, 4, 1, N_{\text{var}}) = (4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 0)$$

$$h := \text{SWL} - h_{\text{h}} = (3.7 \ 3.7 \ 4.2 \ 4.2 \ 4.6 \ 4.6 \ 5.2 \ 5.2) \text{m}$$

$$A_{\text{c}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 3, 3, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m}^2 = (547.6 \ 547.6 \ 621.6 \ 621.6 \ 680.8 \ 680.8 \ 769.6 \ 769.6) \text{m}^2$$

$$b_{\text{b}} := \frac{\overrightarrow{A_{\text{c}} - m_{\text{slope}} \cdot h^2}}{h} = (133.20 \ 133.20 \ 131.20 \ 131.20 \ 129.60 \ 129.60 \ 127.20 \ 148.00) \text{m}$$

$$b_{\text{w}} := \overrightarrow{(b_{\text{b}} + 2m_{\text{slope}} \cdot h)} = (162.80 \ 162.80 \ 164.80 \ 164.80 \ 166.40 \ 166.40 \ 168.80 \ 148.00) \text{m}$$

$$\rho_{\text{w}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Factor voor bepalen van de vaarsnelheid cf. Rock Manual pagina 437

$$f_{\text{v}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 10, 10, 1, N_{\text{var}}) \cdot \% = (75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00) \cdot \%$$

$$I_{\%} := 100\%$$

Ontwerpwaterstanden

Bodemligging (NAP +m)

Taludhelling 1:mslope; voor bakprofiel; mslope=0

Diepte van het kanaal

Nat oppervlak van de kanaaldoorsnede (Volgt uit AutoCad)

Breedte van het kanaal op kanaalpeil

Waterspiegelbreedte

Dichtheid zoet water

Inzet van hoofdmotor voor varende schepen



Scheepsdata

$$T_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 5, 5, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (2.5 \ 2 \ 2.9 \ 2 \ 3.2 \ 2 \ 3.6 \ 2) \text{ m}$$

Diepgang

$$b_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 6, 6, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4) \text{ m}$$

Scheepsbreedte

$$L_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 7, 7, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135) \text{ m}$$

Lengte

$$C_m := \text{submatrix}(\text{Data}, 8, 8, 1, N_{\text{var}}) = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$$

Blok coefficient (Rock Manual pag. 436)

Coefficient voor geladen/ongeladen schepen m.b.t. secundaire sloopgolven (Rock Manual pag. 440)

$$\alpha_i := \text{submatrix}(\text{Data}, 9, 9, 1, N_{\text{var}}) = (1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35)$$

$$y := 0 \text{ m}$$

Positie van het schip ten opzichte van de as van het kanaal.

$$P_{\text{max_schip}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 11, 11, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{kW}$$

Vermogen hoofdschroef (RVW 2011)

$$n_{\text{schroef}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 12, 12, 1, N_{\text{var}})$$

Aantal schroeven

$$y_t := 20 \text{ cm}$$

Afstand tussen onderkant schroef & onderkant schip

$$\alpha := 1$$

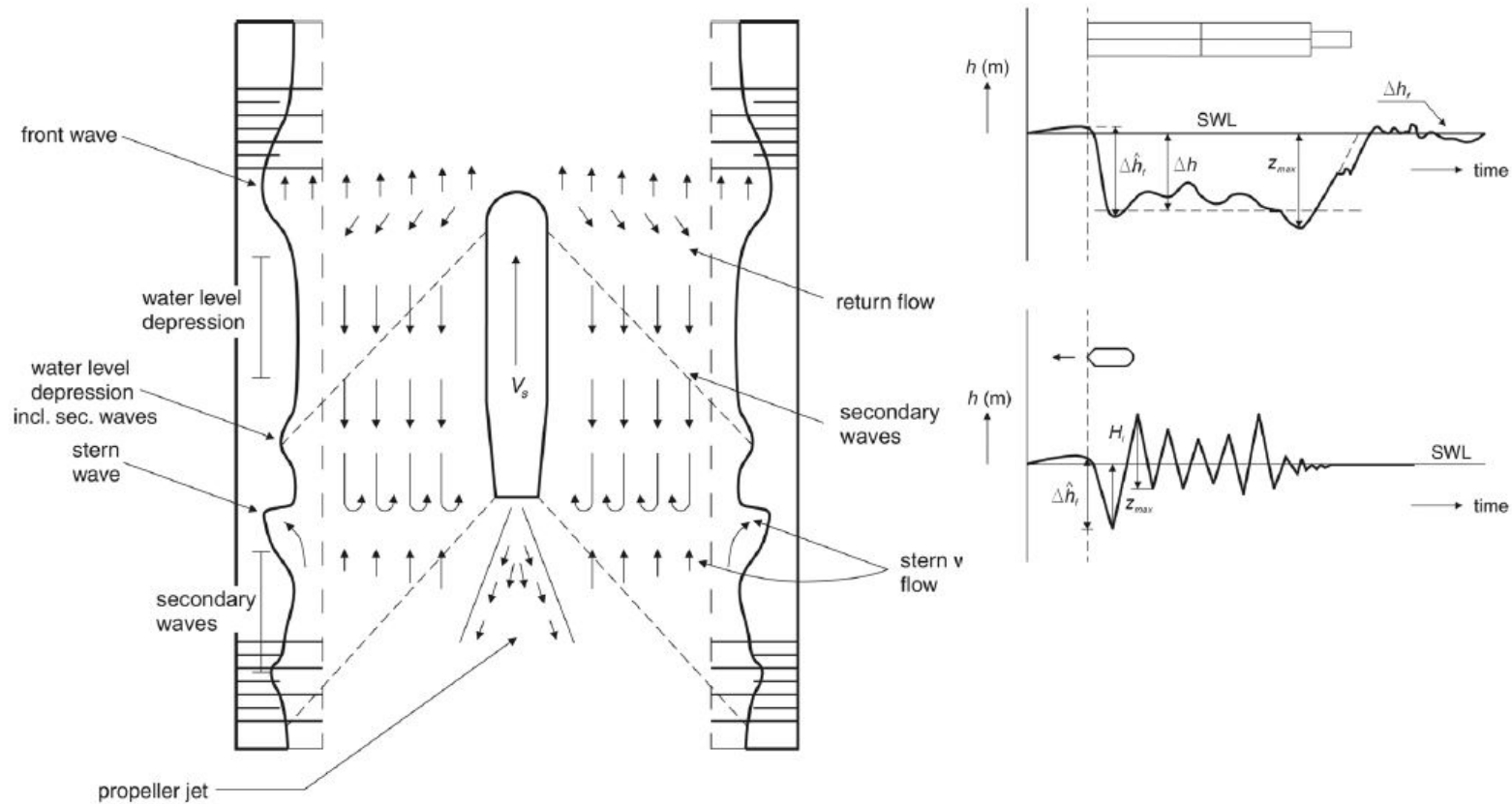
Effectieve diameter schroef (CUR 201, pag 28)





Berekening van de maatgevende retourstroming

Onderstaande methode is uitgevoerd conform de Rock Manual paragraaf 4.3.4.1. De retourstroom is gevisualiseerd in de onderstaande definitieschets uit de Rock Manual.



Blok 1: ondergedompelde doorsnede van het schip

Berekenen van ondergedompelde doorsnede van het schip voor geladen schip (Rock Manual formule 4.167)

$$A_m := \overline{(C_m \cdot b_s \cdot T_s)}$$

Blok 2: bepaling van de grenssnelheid

De factor F_L , nodig voor de berekening van de grenssnelheid, wordt berekend door middel van een impliciete functie

$$F_{L_guess} := 0.5$$

Guess waarde voor het oplossen van de impliciete functie

$$F_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} F_{L_fnc}(F_L) \leftarrow \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{A_m^{(i)}}{A_c^{(i)}} + 0.5 F_L^2 \right) \right]^{\frac{3}{2}} \\ F_{L_guess} \leftarrow 0.5 \\ F_L^{(i)} \leftarrow \text{root}(F_{L_fnc}(F_{L_guess}) - F_{L_guess}, F_{L_guess}) \end{array} \right. \\ F_L \end{matrix} = (0.73 \ 0.75 \ 0.72 \ 0.77 \ 0.72 \ 0.78 \ 0.72 \ 0.79)$$

$$V_{L_schijf} := \left(F_L \cdot \sqrt{g \cdot \frac{A_c}{b_w}} \right) = (4.17 \ 4.33 \ 4.39 \ 4.68 \ 4.57 \ 4.93 \ 4.83 \ 5.66) \frac{m}{s} \quad \text{Grenssnelheid (Rock Manual formule 4.168)}$$

Grenssnelheid op basis van scheepslengte

$$V_{L_length} := \sqrt{\frac{g \cdot L_s}{2 \cdot \pi}} = (14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.169)}$$

Grenssnelheid op basis van waterdiepte

$$V_{L_dep} := \sqrt{g \cdot h} = (6.02 \ 6.02 \ 6.42 \ 6.42 \ 6.72 \ 6.72 \ 7.14 \ 7.14) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.170)}$$

Bepaling optredende grenssnelheid

De optredende grenssnelheid is de minimale van de bovenstaande berekende grenssnelheden (op basis van Schijf, waterdiepte en scheepslengte)

$$V_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} V_L^{(i)} \leftarrow \min(V_{L_schijf}^{(i)}, V_{L_dep}^{(i)}, V_{L_length}^{(i)}) \end{array} \right. \\ V_L \end{matrix} = (15 \ 15.59 \ 15.82 \ 16.83 \ 16.46 \ 17.76 \ 17.39 \ 20.36) \cdot \frac{km}{hr}$$

Blok 3: bepaling van de werkelijke snelheid

De maatgevende vaarsnelheid is gedefinieerd in eis FE 0.1.4. en bedraagt $f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \%$ van de grenssnelheid, ofwel:

$$V_{\text{schip}} := \overrightarrow{(f_v \cdot V_L)} = (3.13 \ 3.9 \ 3.3 \ 4.21 \ 3.43 \ 4.44 \ 3.62 \ 5.09) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{maatgevende vaarsnelheid t.o.v. het water}$$

Blok 4: bepaling gemiddelde waterspiegeldaling en retourstroom

$$\alpha_s := 1.4 - 0.4 \cdot \frac{V_{\text{schip}}}{V_L} = (1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04) \quad \text{Factor voor het uitdrukken van de vaarsnelheid, relatief gezien tot de grenssnelheid}$$

Gemiddelde spiegel daling (Rock Manual formule 4.173)

$$\Delta h := \begin{cases} i \leftarrow N_{\text{var}} & = (0.19 \ 0.27 \ 0.22 \ 0.29 \ 0.23 \ 0.31 \ 0.26 \ 0.4) \text{m} \\ \text{for } i \in N \\ \quad A_{c_ster}(\Delta h) \leftarrow b_b^{(i)}(h^{(i)} - \Delta h) + m_{\text{slope}}^{(i)}(h^{(i)} - \Delta h)^2 - A_m^{(i)} \\ \quad \Delta h_{\text{guess}} \leftarrow 0.3 \text{m} \\ \quad \Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}) \leftarrow \frac{(V_{\text{schip}}^{(i)})^2}{2g} \left[\alpha_s^{(i)} \left(\frac{A_c^{(i)}}{A_{c_ster}} \right)^2 - 1 \right] \\ \quad \Delta h^{(i)} \leftarrow \text{root}(\Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}(\Delta h_{\text{guess}})) - \Delta h_{\text{guess}}, \Delta h_{\text{guess}}) \\ \Delta h \end{cases}$$

Oppervlak v.d. vaarweg naast het schip (Rock Manual pagina 437)

$$A_{c_ster} := \overrightarrow{[b_b \cdot (h - \Delta h) + m_{\text{slope}} \cdot (h - \Delta h)^2 - A_m]} = (488.05 \ 481.73 \ 553.25 \ 550.95 \ 605.67 \ 606.34 \ 684.93 \ 687.61) \text{m}^2$$

Berekening van de gemiddelde retourstroom (Rock Manual formule 4.174)

$$u_r := \overrightarrow{\left[V_{\text{schip}} \cdot \left(\frac{A_c}{A_{c_ster}} - 1 \right) \right]} = (0.381 \ 0.533 \ 0.407 \ 0.54 \ 0.425 \ 0.545 \ 0.448 \ 0.607) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Blok 5: bepaling extreme waterspiegeldaling en retourstroom

$$A_{w_ster} := \frac{y \cdot h}{A_c}$$

Bepaal vermenigvuldigingsfactoren voor waterspiegeldaling en retourstroom:

$$\gamma_{\Delta h} := \begin{array}{l} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{\Delta h}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + 2 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ (1 + 4 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{\Delta h} \end{array} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \quad \text{Berekening van ratio voor spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)}$$

$$\gamma_{ur} := \begin{array}{l} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{ur}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ [1 + (3A_{w_ster}^{(i)})] & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{ur} \end{array} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \quad \text{Berekening van ratio voor retourstroom (Rock Manual formule 4.176)}$$

$$\Delta h_{max} := \overrightarrow{(\gamma_{\Delta h} \cdot \Delta h)} \quad \text{Maximale spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)}$$

$$u_{r_max} := \overrightarrow{(\gamma_{ur} \cdot u_r)} \quad \text{Maximale retourstroming (Rock Manual formule 4.176)}$$

De retourstroomsnelheid onder het schip kan worden benaderd volgens:

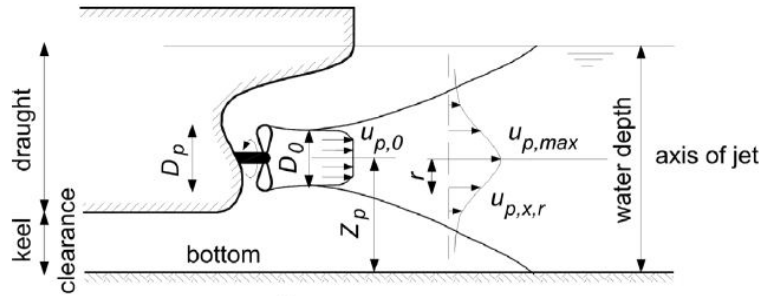
$$u_{r_belowkeel_onder} := 1.5 \cdot u_{r_max} = (0.57 \ 0.80 \ 0.61 \ 0.81 \ 0.64 \ 0.82 \ 0.67 \ 0.91) \frac{m}{s} \quad \text{Retourstroom ondergrens (Rock Manual formule 4.183)}$$

$$u_{r_belowkeel_boven} := 2 \cdot u_{r_max} = (0.76 \ 1.07 \ 0.81 \ 1.08 \ 0.85 \ 1.09 \ 0.90 \ 1.21) \frac{m}{s} \quad \text{Retourstroom bovengrens (Rock Manual formule 4.183)}$$



Berekening van de maatgevende schroefstromen a.g.v. de hoofdschroef

De schroefstroom is berekend volgens paragraaf 4.3.4.3 van de Rock Manual met een aanvulling van een invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992 . Een definitieschets is hieronder weergegeven.



$$P_{schroef} := \frac{P_{max_schip}}{n_{schroef}} = (875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875) \cdot kW \quad \text{Schroefvermogen}$$

Invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992

$$f_n := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \end{matrix} = (1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50)$$

$$f_{n_i} \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } (n_{schroef}^T)_i = 1 \\ 1.5 & \text{if } (n_{schroef}^T)_i = 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D_p := 0.0133 \cdot \left(\frac{P_{schroef}}{W} \right)^{0.365} \cdot m = (1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96) m$$

$$D_0 := (\alpha \cdot D_p) = (1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96) m \quad \text{Effectieve diameter}$$

$$z_p := h - T_s + y_t + 0.5D_p = (2.38 \ 2.88 \ 2.48 \ 3.38 \ 2.58 \ 3.78 \ 2.78 \ 4.38) m \quad \text{Afstand van bodem tot straalas}$$

$$u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) := 1.15 \left(\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Snelheid direct achter de propellor (Rock Manual formule 4.187)

$$u_x(x, D_0, P, \rho_w) := 2.8 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \frac{D_0}{x}$$

Snelheid langs de as van de propellor (Rock Manual formule 4.188)

$$u_{p_max_bed}(z, D_0, P, \rho_w) := 0.3 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \left(\frac{D_0}{z} \right)^1$$

Maximale snelheid op de bodem (Rock Manual formule 4.190)

$$P_{\%} := P_{schroef} \cdot I_{\%} \quad I_{\%} = 1.00$$

Vermogen bij inzet van schroef

$$u_{\%} := \overrightarrow{(f_n \cdot u_{p_max_bed}(z_p, D_0, P_{\%}, \rho_w))} = (2.6 \ 2.15 \ 2.5 \ 1.83 \ 2.4 \ 1.64 \ 2.23 \ 1.41) \frac{m}{s} \quad \text{Stroomsnelheid bij } I_{\%} \text{ inzet}$$

Conform CUR 201, formule 20 kan voor varende schepen de stroomsnelheid t.g.v. de hoofdschroef gecorrigeerd worden volgens $u = u_{100\%} - 0.5 \cdot V_s$. Echter wanneer $0.5 \cdot V_s$ groter is dan de schroefinzet, dan zal in de onderstaande loop een negatieve waarde overschreven worden met een waarde 0.

Stroomsnelheid t.g.v. schroefstraal tijdens varen (CUR 201 formule 20).

$$u_{varend} := \begin{cases} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left| \begin{array}{l} u_{varend_i} \leftarrow (u_{\%}^T)_i - 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \text{ if } (u_{\%}^T)_i \geq 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \\ u_{varend_i} \leftarrow 0 \frac{m}{s} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ u_{varend}^T \end{cases} = (1.04 \ 0.20 \ 0.85 \ 0.00 \ 0.69 \ 0.00 \ 0.42 \ 0.00) \frac{m}{s}$$

Overzicht van stroomsnelheden

Nummering van de genoemde kenmerken. Deze nummers komen terug in de eerste rij van elke tabel en vertegenwoordigen steeds de uitgevoerde berekening betreffende het kenmerk.

Kenmerk = 8.00

$f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \% \text{ Grenssnelheid}$

$u_r = (0.38 \ 0.53 \ 0.41 \ 0.54 \ 0.43 \ 0.55 \ 0.45 \ 0.61) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$u_{r_max} = (0.38 \ 0.53 \ 0.41 \ 0.54 \ 0.43 \ 0.55 \ 0.45 \ 0.61) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$u_{r_belowkeel_onder} = (0.57 \ 0.80 \ 0.61 \ 0.81 \ 0.64 \ 0.82 \ 0.67 \ 0.91) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$u_{r_belowkeel_boven} = (0.76 \ 1.07 \ 0.81 \ 1.08 \ 0.85 \ 1.09 \ 0.9 \ 1.21) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$\Delta h = (0.19 \ 0.27 \ 0.22 \ 0.29 \ 0.23 \ 0.31 \ 0.26 \ 0.40) \text{m}$

$\Delta h_{max} = (0.19 \ 0.27 \ 0.22 \ 0.29 \ 0.23 \ 0.31 \ 0.26 \ 0.40) \text{m}$

$u_{varend} = (1.04 \ 0.20 \ 0.85 \ 0.00 \ 0.69 \ 0.00 \ 0.42 \ 0.00) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Gemiddelde retourstroom

Maximale retourstroom kanaal t.g.v. excentrisch varen

Retourstroom onder schip (ondergrens)

Maximale retourstroom onder schip (bovengrens)

Gemiddelde spiegeldaling

Maximale spiegeldaling t.g.v. excentrisch varen

Netto schroefstroom op bodem

Berekening van de secundaire scheepsgolven

De secundaire scheepsgolven zijn berekend volgens blok 8 van paragraaf 4.3.4.2 van de Rock Manual. Een definitieschets waarin de secundaire scheepsgolven in weergegeven zijn is te vinden aan het begin van deze rekensheet/bijlage.

Secundaire scheepsgolven kunnen berekend worden wanneer aan de onderstaande voorwaarde wordt voldaan:

$$\text{geldigheid} := \begin{cases} i \leftarrow N_{\text{var}} & = (\text{"geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"} \text{ "geldig"}) \\ \text{for } i \in N & \\ \text{geldigheid}_i \leftarrow \begin{cases} \text{"geldig"} & \text{if } \frac{(V_{\text{schip}}^T)_i}{\sqrt{g \cdot (h^T)_i}} < 0.8 \\ \text{"Niet geldig"} & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{geldigheid}^T & \end{cases}$$

$$\alpha_i = (1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35)$$

Coefficient afhankelijk van het scheepstype en geladen/ongeladen

Positie van het schip ten opzichte van de oever (gelijk aan de bembreedte) (Rock manual pag. 435 & afbeelding 10 uit CUR 201).

$$y_s := 0.5 \cdot b_w - y - 0.5 b_s = (75.70 \ 75.70 \ 76.70 \ 76.70 \ 77.50 \ 77.50 \ 78.70 \ 68.30) \text{ m}$$

Hoogte van secundaire scheepsgolf (Rock Manual, formule 4.184)

$$H_{i_sec} := \left[1.2 \cdot \alpha_i \cdot h \cdot \left(\frac{y_s}{h} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{V_{\text{schip}}^4}{(g \cdot h)^2} \right] = (0.12 \ 0.10 \ 0.13 \ 0.12 \ 0.15 \ 0.14 \ 0.17 \ 0.24) \text{ m}$$

Golflengte van secundaire scheepsgolf (Rock Manual, formule 4.185)

$$L_{i_sec} := \left(4.2 \cdot \frac{V_{\text{schip}}^2}{g} \right) = (4.18 \ 6.51 \ 4.65 \ 7.59 \ 5.03 \ 8.45 \ 5.62 \ 11.09) \text{ m}$$

Golfperiode van secundaire scheepsgolven (Rock Manual formule 4.186)

$$T_{i_sec} := 5.1 \cdot \frac{V_{\text{schip}}}{g} = (1.63 \ 2.03 \ 1.71 \ 2.19 \ 1.78 \ 2.31 \ 1.88 \ 2.65) \text{ s}$$

Berekening van de frontgolf

De frontgolven zijn berekend volgens blok 6 van paragraaf 4.3.4.1 van de Rock Manual. Een definitieschets waarin de secundaire sloopgolven in weergegeven zijn is te vinden aan het begin van deze rekensheet/bijlage.

$$\Delta h_f := 0.1 \cdot \Delta h + \Delta h_{\max} = (0.21 \quad 0.29 \quad 0.24 \quad 0.32 \quad 0.26 \quad 0.34 \quad 0.29 \quad 0.44) \text{ m}$$

Berekening van de haalgolf

De haalgolven zijn berekend volgens blok 6 van paragraaf 4.3.4.1 van de Rock Manual. Een definitieschets waarin de secundaire sloopgolven in weergegeven zijn is te vinden aan het begin van deze rekensheet/bijlage.

$$z_{\max} := 1.5 \Delta h_{\max} = (0.29 \quad 0.40 \quad 0.32 \quad 0.44 \quad 0.35 \quad 0.47 \quad 0.39 \quad 0.60) \text{ m}$$

Project: Verkenning vergrote aanvoer water via BP-ARK onder droge omstandigheden
Project nummer: C03011.000580
Onderwerp: Scheepsgeïnduceerde belastingen te Prins Bernhardsluizen te Tiel
Datum: 25-11-2016
Status: versie 1.0
Opgesteld door: H.G. Tuin
Gecontroleerd door: -
Vrijgegeven door: Arjan Tuijnder

ORIGIN := 1

Beschrijving sheet:

In deze sheet worden de scheepsgeïnduceerde bepaald voor de Prinsens Bernhardsluizen.

De bodem kan op de volgende manieren worden belast:

- Scheepsgeïnduceerde belastingen (retourstromingen, schroefstromingen door hoofdschroef en boegschroef)
- Natuurlijke stromingen a.g.v afvoer, onttrekking en schutten
- Mechanische belastingen, zoals vallende ankers, etc

In deze sheet wordt de scheepsgeïnduceerde belastingen bepaald.

Gebruikte basisinformatie

- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London
- Delft Hydraulics (1997). DIPRO 3.02n (Gebruikershandleiding)
- TUDelft, Ir. J. Bouwmeester (1987). Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen, Havens en scheepvaartwegen I

Gegevens:

De invoer van de getoetste locaties/situaties is ingevoerd in een excel sheet welke opgenomen is in deze sheet. In totaal worden 10 situaties doorgerekend.

Kenmerk := 10

N_{var} := Kenmerk

Teller voor de for-loops

N := 1 .. N_{var}

In totaal worden drie berekeningen uitgevoerd. Twee voor de Westsluis en een voor de Oostsluis. D.m.v. onderstaande checkbox kan de juiste checkbox geselecteerd worden voor de berekening.

nr := Westsluis CEMT VIb nr = 3.00
 Westsluis CEMT Vb
 Oostsluis CEMT Vb

Data

$$\text{SWL} := \text{submatrix}(\text{Data}, 1, 1, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (1.2 \ 1.2 \ 1.7 \ 1.7 \ 2.1 \ 2.1 \ 2.7 \ 2.7 \ 4.5 \ 4.5) \text{m}$$

$$h_{\text{h}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 2, 2, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (-2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35) \text{m}$$

$$m_{\text{slope}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 4, 4, 1, N_{\text{var}}) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$h := \text{SWL} - h_{\text{h}} = (3.55 \ 3.55 \ 4.05 \ 4.05 \ 4.45 \ 4.45 \ 5.05 \ 5.05 \ 6.85 \ 6.85) \text{m}$$

$$A_{\text{c}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 3, 3, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m}^2 = (63.9 \ 63.9 \ 72.9 \ 72.9 \ 80.1 \ 80.1 \ 90.9 \ 90.9 \ 123.3 \ 123.3) \text{m}^2$$

$$b_{\text{b}} := \frac{\overrightarrow{A_{\text{c}} - m_{\text{slope}} \cdot h^2}}{h} = (18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00) \text{m}$$

$$b_{\text{w}} := \overrightarrow{(b_{\text{b}} + 2m_{\text{slope}} \cdot h)} = (18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00 \ 18.00) \text{m}$$

$$\rho_{\text{w}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f_{\text{v}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 10, 10, 1, N_{\text{var}}) \cdot \% = (75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00) \cdot \%$$

Manual

$$I_{0\%} := 100\%$$

Ontwerpwaterstanden

Bodemligging (NAP +m)

Taludhelling 1:mslope; voor bakprofiel; mslope=0

Diepte van het kanaal

Nat oppervlak van de kanaaldoorsnede (Volgt uit AutoCad)

Breedte van het kanaal op kanaalpeil

Waterspiegelbreedte

Dichtheid zoet water

Factor voor bepalen van de vaarsnelheid cf. Rock

pagina 437

Inzet van hoofdmotor voor varende schepen



Scheepsdata

$T_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 5, 5, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (2.5 \ 2 \ 2.9 \ 2 \ 3.2 \ 2 \ 3.6 \ 2 \ 4 \ 2) \text{ m}$	Diepgang
$b_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 6, 6, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4 \ 11.4) \text{ m}$	Scheepsbreedte
$L_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 7, 7, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135 \ 135) \text{ m}$	Lengte
$C_m := \text{submatrix}(\text{Data}, 8, 8, 1, N_{\text{var}}) = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$	Blok coefficient (Rock Manual pag. 436)

Coefficient voor geladen/ongeladen schepen m.b.t. secundaire sloopgolven (Rock Manual pag. 440)

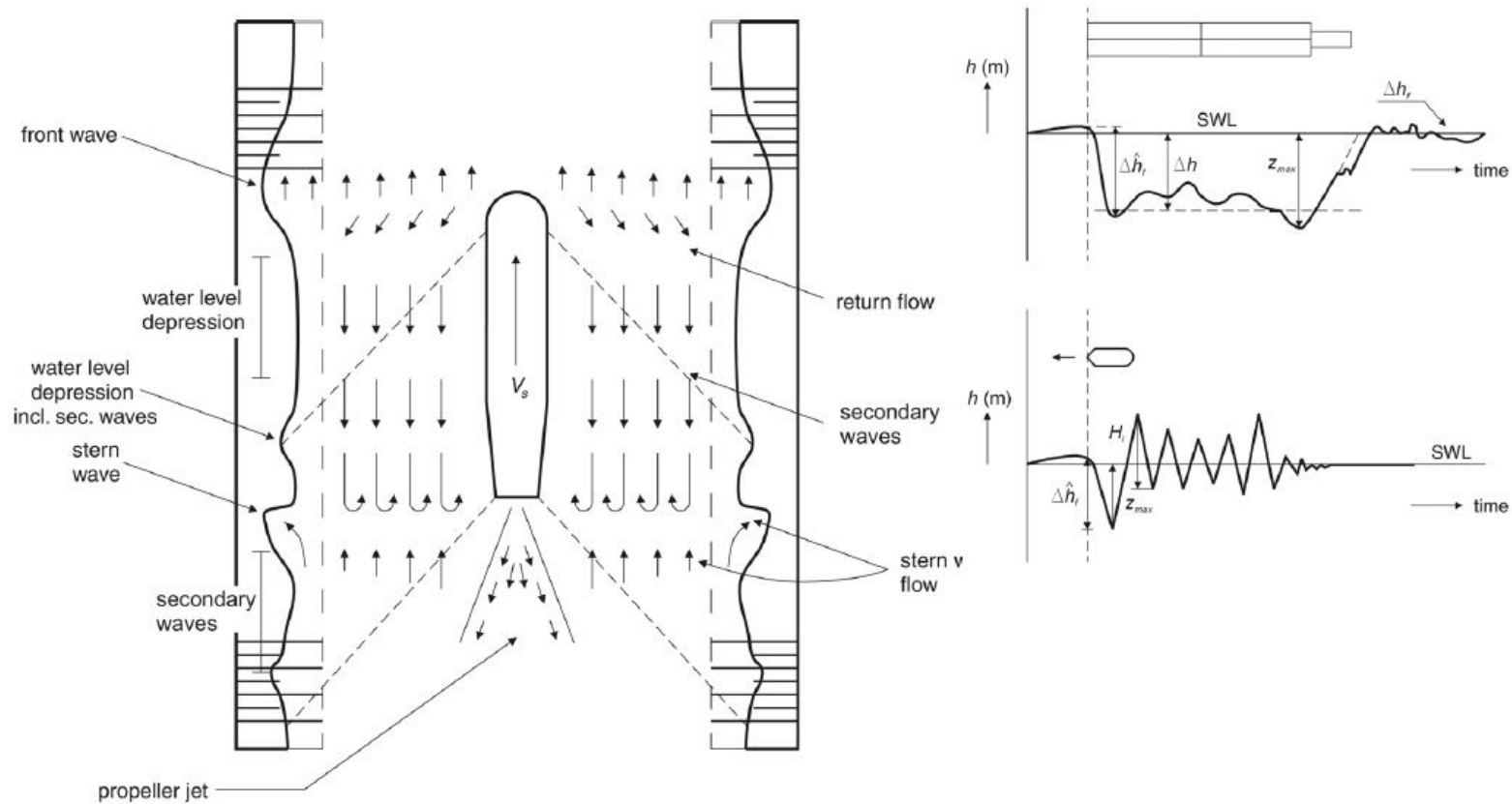
$\alpha_i := \text{submatrix}(\text{Data}, 9, 9, 1, N_{\text{var}}) = (1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35 \ 1.00 \ 0.35)$	
$y := 0 \text{ m}$	Positie van het schip ten opzichte van de as van het kanaal.
$P_{\text{max_schip}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 11, 11, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{kW}$	Vermogen hoofdschroef (RVW 2011)
$n_{\text{schroef}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 12, 12, 1, N_{\text{var}})$	Aantal schroeven
$y_t := 20 \text{ cm}$	Afstand tussen onderkant schroef & onderkant schip
$\alpha := 1$	Effectieve diameter schroef (CUR 201, pag 28)





Berekening van de maatgevende retourstroming

Onderstaande methode is uitgevoerd conform de Rock Manual paragraaf 4.3.4.1. De retourstroom is gevisualiseerd in de onderstaande definitieschets uit de Rock Manual.



Blok 1: ondergedompelde doorsnede van het schip

Berekenen van ondergedompelde doorsnede van het schip voor geladen schip (Rock Manual formule 4.167)

$$A_m := \overline{(C_m \cdot b_s \cdot T_s)}$$

Blok 2: bepaling van de grenssnelheid

De factor F_L , nodig voor de berekening van de grenssnelheid, wordt berekend door middel van een impliciete functie

$$F_{L_guess} := 0.5$$

Guess waarde voor het oplossen van de impliciete functie

$$F_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} F_{L_fnc}(F_L) \leftarrow \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{A_m^{(i)}}{A_c^{(i)}} + 0.5 F_L^2 \right) \right]^{\frac{3}{2}} \\ F_{L_guess} \leftarrow 0.5 \\ F_L^{(i)} \leftarrow \text{root}(F_{L_fnc}(F_{L_guess}) - F_{L_guess}, F_{L_guess}) \end{array} \right. \\ F_L \end{matrix} = (0.24 \ 0.31 \ 0.24 \ 0.35 \ 0.24 \ 0.38 \ 0.24 \ 0.42 \ 0.3 \ 0.49)$$

$$V_{L_schijf} := \left(F_L \cdot \sqrt{g \cdot \frac{A_c}{b_w}} \right) = (1.43 \ 1.85 \ 1.49 \ 2.23 \ 1.56 \ 2.51 \ 1.68 \ 2.93 \ 2.48 \ 4.05) \frac{m}{s} \quad \text{Grenssnelheid (Rock Manual formule 4.168)}$$

Grenssnelheid op basis van scheepslengte

$$V_{L_length} := \sqrt{\frac{g \cdot L_s}{2 \cdot \pi}} = (14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52 \ 14.52) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.169)}$$

Grenssnelheid op basis van waterdiepte

$$V_{L_dep} := \sqrt{g \cdot h} = (5.9 \ 5.9 \ 6.3 \ 6.3 \ 6.61 \ 6.61 \ 7.04 \ 7.04 \ 8.2 \ 8.2) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.170)}$$

Bepaling optredende grenssnelheid

De optredende grenssnelheid is de minimale van de bovenstaande berekende grenssnelheden (op basis van Schijf, waterdiepte en scheepslengte)

$$V_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} V_L^{(i)} \leftarrow \min(V_{L_schijf}^{(i)}, V_{L_dep}^{(i)}, V_{L_length}^{(i)}) \end{array} \right. \\ V_L \end{matrix} = (5.15 \ 6.66 \ 5.38 \ 8.02 \ 5.61 \ 9.05 \ 6.04 \ 10.53 \ 8.93 \ 14.57) \cdot \frac{km}{hr}$$

Blok 3: bepaling van de werkelijke snelheid

De maatgevende vaarsnelheid is gedefinieerd in eis FE 0.1.4. en bedraagt $f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \%$ van de grenssnelheid, ofwel:

$$V_{\text{schip}} := \overrightarrow{(f_v \cdot V_L)} = (1.07 \ 1.67 \ 1.12 \ 2 \ 1.17 \ 2.26 \ 1.26 \ 2.63 \ 1.86 \ 3.64) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{maatgevende vaarsnelheid t.o.v. het water}$$

Blok 4: bepaling gemiddelde waterspiegeldaling en retourstroom

$$\alpha_s := 1.4 - 0.4 \cdot \frac{V_{\text{schip}}}{V_L} = (1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04) \quad \text{Factor voor het uitdrukken van de vaarsnelheid, relatief gezien tot de grenssnelheid}$$

Gemiddelde spiegdaling (Rock Manual formule 4.173)

$$\Delta h := \begin{cases} i \leftarrow N_{\text{var}} & = (0.2 \ 0.36 \ 0.23 \ 0.42 \ 0.25 \ 0.47 \ 0.29 \ 0.54 \ 0.42 \ 0.72) \text{m} \\ \text{for } i \in N \\ \quad A_{c_ster}(\Delta h) \leftarrow b_b^{(i)} (h^{(i)} - \Delta h) + m_{\text{slope}}^{(i)} (h^{(i)} - \Delta h)^2 - A_m^{(i)} \\ \quad \Delta h_{\text{guess}} \leftarrow 0.3 \text{m} \\ \quad \Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}) \leftarrow \frac{(V_{\text{schip}}^{(i)})^2}{2g} \left[\alpha_s^{(i)} \left(\frac{A_c^{(i)}}{A_{c_ster}} \right)^2 - 1 \right] \\ \quad \Delta h^{(i)} \leftarrow \text{root}(\Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}(\Delta h_{\text{guess}})) - \Delta h_{\text{guess}}, \Delta h_{\text{guess}}) \\ \Delta h \end{cases}$$

Oppervlak v.d. vaarweg naast het schip (Rock Manual pagina 437)

$$A_{c_ster} := \overrightarrow{[b_b \cdot (h - \Delta h) + m_{\text{slope}} \cdot (h - \Delta h)^2 - A_m]} = (31.74 \ 34.64 \ 35.71 \ 42.52 \ 39.09 \ 48.87 \ 44.7 \ 58.46 \ 70.06 \ 87.59) \text{m}^2$$

Berekening van de gemiddelde retourstroom (Rock Manual formule 4.174)

$$u_r := \overrightarrow{\left[V_{\text{schip}} \cdot \left(\frac{A_c}{A_{c_ster}} - 1 \right) \right]} = (1.087 \ 1.407 \ 1.167 \ 1.432 \ 1.225 \ 1.446 \ 1.302 \ 1.461 \ 1.413 \ 1.485) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Blok 5: bepaling extreme waterspiegeldaling en retourstroom

$$A_{w_ster} := \frac{y \cdot h}{A_c}$$

Bepaal vermenigvuldigingsfactoren voor waterspiegeldaling en retourstroom:

$$\gamma_{\Delta h} := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{\Delta h}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + 2 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ (1 + 4 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{\Delta h} \end{matrix} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \quad \text{Berekening van ratio voor spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)}$$

$$\gamma_{ur} := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{ur}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ [1 + (3A_{w_ster}^{(i)})] & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{ur} \end{matrix} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \quad \text{Berekening van ratio voor retourstroom (Rock Manual formule 4.176)}$$

$$\gamma_{ur}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ [1 + (3A_{w_ster}^{(i)})] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta h_{max} := \overrightarrow{(\gamma_{\Delta h} \cdot \Delta h)} \quad \text{Maximale spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)}$$

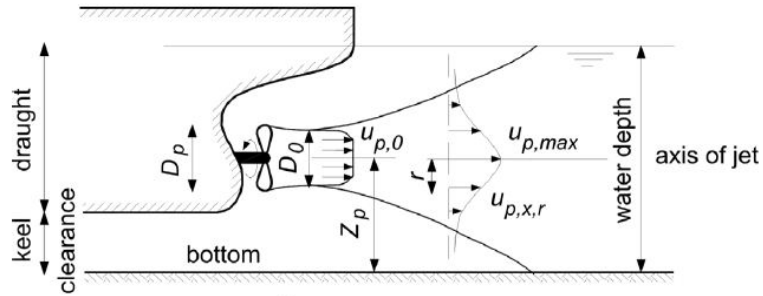
$$u_{r_max} := \overrightarrow{(\gamma_{ur} \cdot u_r)} \quad \text{Maximale retourstroming (Rock Manual formule 4.176)}$$

$$u_{r_belowkeel_onder} := 1.5 \cdot u_{r_max} = (1.63 \ 2.11 \ 1.75 \ 2.15 \ 1.84 \ 2.17 \ 1.95 \ 2.19 \ 2.12 \ 2.23) \frac{m}{s} \quad \text{Retourstroom ondergrens (Rock Manual formule 4.183)}$$

$$u_{r_belowkeel_boven} := 2 \cdot u_{r_max} = (2.17 \ 2.81 \ 2.33 \ 2.86 \ 2.45 \ 2.89 \ 2.60 \ 2.92 \ 2.83 \ 2.97) \frac{m}{s} \quad \text{Retourstroom bovengrens (Rock Manual formule 4.183)}$$

Berekening van de maatgevende schroefstromen a.g.v. de hoofdschroef

De schroefstroom is berekend volgens paragraaf 4.3.4.3 van de Rock Manual met een aanvulling van een invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992 . Een definitieschets is hieronder weergegeven.



$$P_{\text{schroef}} := \frac{P_{\text{max_schip}}}{n_{\text{schroef}}} = (875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875 \ 875) \cdot \text{kW} \quad \text{Schroefvermogen}$$

Invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992

$$f_n := \begin{matrix} i \leftarrow N_{\text{var}} \\ \text{for } i \in N \end{matrix} = (1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50 \ 1.50)$$

$$\begin{matrix} \left| \begin{array}{l} f_{n_i} \leftarrow 1 \text{ if } (n_{\text{schroef}}^T)_i = 1 \\ f_{n_i} \leftarrow 1.5 \text{ if } (n_{\text{schroef}}^T)_i = 2 \\ f_{n_i} \leftarrow 2 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ f_n^T \end{matrix}$$

$$D_p := 0.0133 \cdot \left(\frac{P_{\text{schroef}}}{W} \right)^{0.365} \cdot \text{m} = (1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96) \text{m}$$

$$D_0 := (\alpha \cdot D_p) = (1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96 \ 1.96) \text{m} \quad \text{Effectieve diameter}$$

$$z_p := h - T_s + y_t + 0.5D_p = (2.23 \ 2.73 \ 2.33 \ 3.23 \ 2.43 \ 3.63 \ 2.63 \ 4.23 \ 4.03 \ 6.03) \text{m} \quad \text{Afstand van bodem tot straalas}$$

$$u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) := 1.15 \left(\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Snelheid direct achter de propellor (Rock Manual formule 4.187)

$$u_x(x, D_0, P, \rho_w) := 2.8 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \frac{D_0}{x}$$

Snelheid langs de as van de propellor (Rock Manual formule 4.188)

$$u_{p_max_bed}(z, D_0, P, \rho_w) := 0.3 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \left(\frac{D_0}{z} \right)^1$$

Maximale snelheid op de bodem (Rock Manual formule 4.190)

$$P_{\%} := P_{schroef} \cdot I_{\%} \quad I_{\%} = 1.00$$

Vermogen bij inzet van schroef

$$u_{\%} := \overrightarrow{(f_n \cdot u_{p_max_bed}(z_p, D_0, P_{\%}, \rho_w))} = (2.78 \ 2.27 \ 2.66 \ 1.92 \ 2.55 \ 1.71 \ 2.36 \ 1.46 \ 1.54 \ 1.03) \frac{m}{s} \quad \text{Stroomsnelheid bij } I_{\%} \text{ inzet}$$

Conform CUR 201, formule 20 kan voor varende schepen de stroomsnelheid t.g.v. de hoofdschroef gecorrigeerd worden volgens $u = u_{100\%} - 0.5 \cdot V_s$. Echter wanneer $0.5 \cdot V_s$ groter is dan de schroefinzet, dan zal in de onderstaande loop een negatieve waarde overschreven worden met een waarde 0.

Stroomsnelheid t.g.v. schroefstraal tijdens varen (CUR 201 formule 20).

$$u_{varend} := \begin{cases} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left| \begin{array}{l} u_{varend_i} \leftarrow (u_{\%}^T)_i - 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \text{ if } (u_{\%}^T)_i \geq 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \\ u_{varend_i} \leftarrow 0 \frac{m}{s} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ u_{varend}^T \end{cases} = (2.24 \ 1.44 \ 2.10 \ 0.92 \ 1.97 \ 0.58 \ 1.73 \ 0.15 \ 0.61 \ 0.00) \frac{m}{s}$$

Overzicht van stroomsnelheden

Nummering van de genoemde kenmerken. Deze nummers komen terug in de eerste rij van elke tabel en vertegenwoordigen steeds de uitgevoerde berekening betreffende het kenmerk.

Kenmerk = 10.00

$f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \% \text{ Grenssnelheid}$

$u_r = (1.09 \ 1.41 \ 1.17 \ 1.43 \ 1.23 \ 1.45 \ 1.30 \ 1.46 \ 1.41 \ 1.48) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Gemiddelde retourstroom

$u_{r_max} = (1.09 \ 1.41 \ 1.17 \ 1.43 \ 1.23 \ 1.45 \ 1.30 \ 1.46 \ 1.41 \ 1.48) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Maximale retourstroom kanaal t.g.v. excentrisch varen

$u_{r_belowkeel_onder} = (1.63 \ 2.11 \ 1.75 \ 2.15 \ 1.84 \ 2.17 \ 1.95 \ 2.19 \ 2.12 \ 2.23) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Retourstroom onder schip (ondergrens)

$u_{r_belowkeel_boven} = (2.17 \ 2.81 \ 2.33 \ 2.86 \ 2.45 \ 2.89 \ 2.6 \ 2.92 \ 2.83 \ 2.97) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Maximale retourstroom onder schip (bovengrens)

$\Delta h = (0.20 \ 0.36 \ 0.23 \ 0.42 \ 0.25 \ 0.47 \ 0.29 \ 0.54 \ 0.42 \ 0.72) \text{m}$

Gemiddelde spiegeldaling

$\Delta h_{max} = (0.20 \ 0.36 \ 0.23 \ 0.42 \ 0.25 \ 0.47 \ 0.29 \ 0.54 \ 0.42 \ 0.72) \text{m}$

Maximale spiegeldaling t.g.v. excentrisch varen

$u_{varend} = (2.24 \ 1.44 \ 2.10 \ 0.92 \ 1.97 \ 0.58 \ 1.73 \ 0.15 \ 0.61 \ 0.00) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Netto schroefstroom op bodem

Project: Verkenning vergrote aanvoer water via BP-ARK onder droge omstandigheden
Project nummer: C03011.000580
Onderwerp: Hydraulische belastingen te Ravenswaaij door varende schepen
Datum: 25-11-2016
Status: versie 1.0
Opgesteld door: H.G. Tuin
Gecontroleerd door: -
Vrijgegeven door: Arjan Tuijnder

ORIGIN := 1

Beschrijving sheet:

In deze sheet wordt de maatgevende stroombelasting bepaald voor de doorvaartopening te Ravenswaaij. Verkend wordt wat de effecten zijn van de stroombelasting op de bodem & drempel.

De bodem kan op de volgende manieren worden belast:

- Scheepsgeïnduceerde belastingen (retourstromingen, schroefstromingen door hoofdschroef en boegschroef)
- Natuurlijke stromingen a.g.v afvoer, onttrekking en schutten
- Mechanische belastingen, zoals vallende ankers, etc (wordt in een andere bijlage beschouwd.)

In deze sheet wordt alleen de scheepsgeïnduceerde belastingen berekend.

Gebruikte basisinformatie

- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London
- CUR 201, Natuurvriendelijke oevers: belasting en sterkte, 1999
- Delft Hydraulics (1997). DIPRO 3.02n (Gebruikershandleiding)
- TUDelft, Ir. J. Bouwmeester (1987). Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen I

Gegevens:

De invoer van de getoetste locaties/situaties is ingevoerd in een excel sheet welke opgenomen is in deze sheet. In totaal worden 10 situaties doorgerekend.

Kenmerk := 10

$N_{var} :=$ Kenmerk

Teller voor de for-loops

N := 1 .. N_{var}

Data

$$SWL := \text{submatrix}(\text{Data}, 1, 1, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (1.2 \ 1.2 \ 1.7 \ 1.7 \ 2.1 \ 2.1 \ 2.7 \ 2.7 \ 4.5 \ 4.5) \text{m}$$

Ontwerpwaterstanden

$$h_b := \text{submatrix}(\text{Data}, 2, 2, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m} = (-2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35 \ -2.35) \text{m}$$

Bodemligging (NAP +m)

$$m_{\text{slope}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 4, 4, 1, N_{\text{var}}) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

Taludhelling 1:mslope; voor bakprofiel; mslope=0

$$h := SWL - h_b = (3.55 \ 3.55 \ 4.05 \ 4.05 \ 4.45 \ 4.45 \ 5.05 \ 5.05 \ 6.85 \ 6.85) \text{m}$$

Diepte van het kanaal

$$A_c := \text{submatrix}(\text{Data}, 3, 3, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{m}^2 = (284 \ 284 \ 324 \ 324 \ 356 \ 356 \ 404 \ 404 \ 548 \ 548) \text{m}^2$$

Nat oppervlak van de kanaaldoorsnede

$$b_b := \frac{\overrightarrow{A_c - m_{\text{slope}} \cdot h^2}}{h} = (80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00) \text{m}$$

Breedte van het kanaal op kanaalpeil

$$b_w := \overrightarrow{(b_b + 2m_{\text{slope}} \cdot h)} = (80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00 \ 80.00) \text{m}$$

Waterspiegelbreedte

$$\rho_w := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichtheid zoet water

Factor voor bepalen van de vaarsnelheid cf. Rock Manual pagina 437

$$f_v := \text{submatrix}(\text{Data}, 10, 10, 1, N_{\text{var}}) \cdot \% = (75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00 \ 75.00 \ 90.00) \cdot \%$$

$$I_{\%} := 100\%$$

Inzet van hoofdmotor voor varende schepen



Scheepsdata

$$T_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 5, 5, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (2.5 \ 2 \ 2.9 \ 2 \ 3.2 \ 2 \ 3.6 \ 2 \ 4 \ 2) \text{ m}$$

Diepgang

$$b_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 6, 6, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8 \ 22.8) \text{ m}$$

Scheepsbreedte

$$L_s := \text{submatrix}(\text{Data}, 7, 7, 1, N_{\text{var}}) \text{ m} = (195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195 \ 195) \text{ m}$$

Lengte

$$C_m := \text{submatrix}(\text{Data}, 8, 8, 1, N_{\text{var}}) = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$$

Blok coefficient (Rock Manual pag. 436)

Coefficient voor geladen/ongeladen schepen m.b.t. secundaire sloopgolven (Rock Manual pag. 440)

$$\alpha_i := \text{submatrix}(\text{Data}, 9, 9, 1, N_{\text{var}}) = (1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00)$$

Positie van het schip ten opzichte van de as van het kanaal.

$$y := \left[0.5b_w - \left(T_s m_{\text{slope}} + 0.5b_s + 0.5b_s \right) \right] = (17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20 \ 17.20) \text{ m}$$

$$P_{\text{max_schip}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 11, 11, 1, N_{\text{var}}) \cdot \text{kW}$$

Vermogen hoofdschroef (RVW 2011)

$$n_{\text{schroef}} := \text{submatrix}(\text{Data}, 12, 12, 1, N_{\text{var}})$$

Aantal schroeven

$$y_t := 20 \text{ cm}$$

Afstand tussen onderkant schroef & onderkant schip

$$\alpha := 1$$

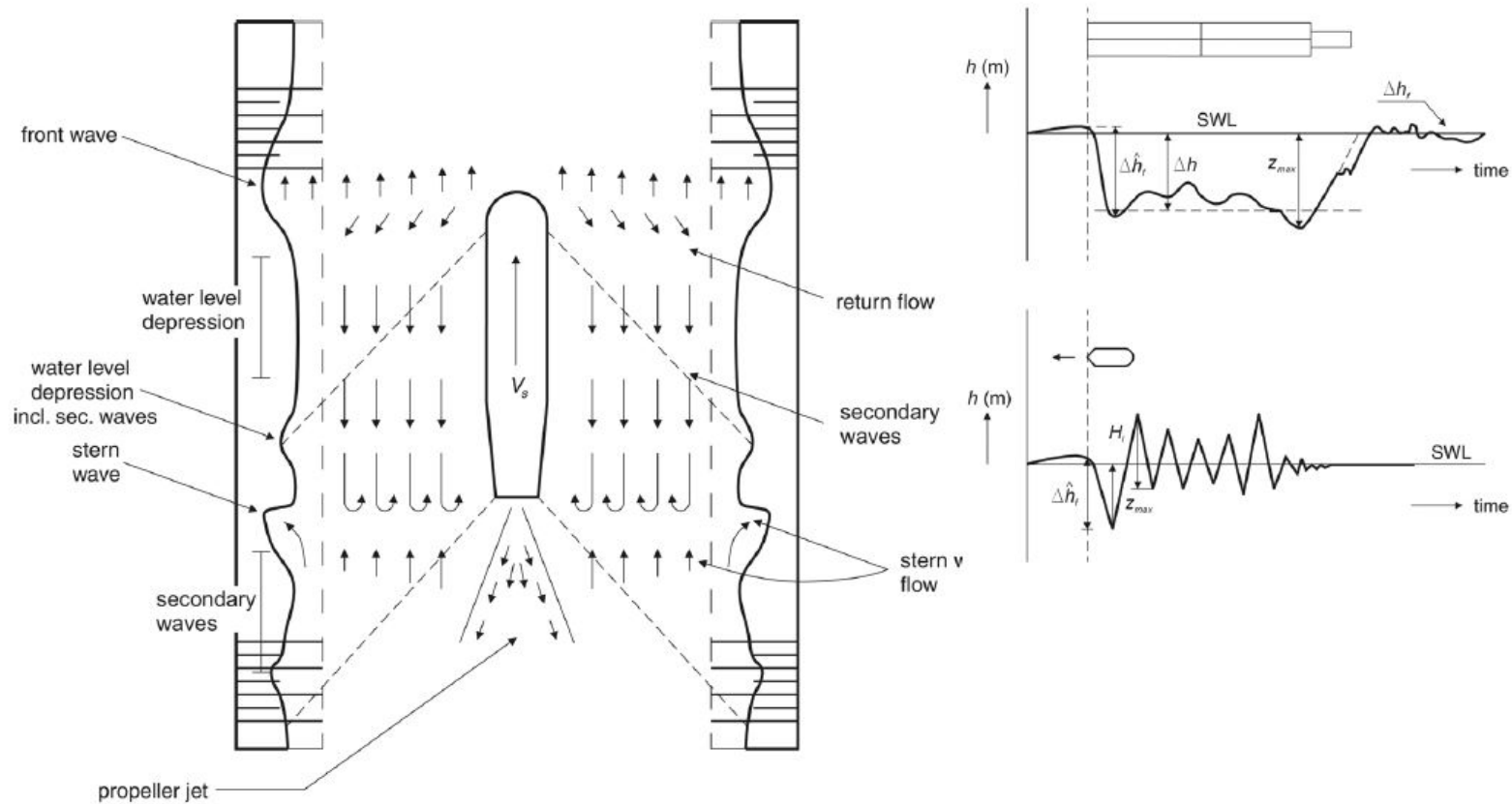
Effectieve diameter schroef (CUR 201, pag 28)





Berekening van de maatgevende retourstroming

Onderstaande methode is uitgevoerd conform de Rock Manual paragraaf 4.3.4.1. De retourstroom is gevisualiseerd in de onderstaande definitieschets uit de Rock Manual.



Blok 1: ondergedompelde doorsnede van het schip

Berekenen van ondergedompelde doorsnede van het schip voor geladen schip (Rock Manual formule 4.167)

$$A_m := \overline{(C_m \cdot b_s \cdot T_s)}$$

Blok 2: bepaling van de grenssnelheid

De factor F_L , nodig voor de berekening van de grenssnelheid, wordt berekend door middel van een impliciete functie

$$F_{L_guess} := 0.5$$

Guess waarde voor het oplossen van de impliciete functie

$$F_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} F_{L_fnc}(F_L) \leftarrow \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{A_m^{(i)}}{A_c^{(i)}} + 0.5 F_L^2 \right) \right]^{\frac{3}{2}} \\ F_{L_guess} \leftarrow 0.5 \\ F_L^{(i)} \leftarrow \text{root}(F_{L_fnc}(F_{L_guess}) - F_{L_guess}, F_{L_guess}) \end{array} \right. \\ F_L \end{matrix} = (0.47 \ 0.53 \ 0.47 \ 0.56 \ 0.47 \ 0.58 \ 0.47 \ 0.6 \ 0.52 \ 0.65)$$

$$V_{L_schijf} := \left(F_L \cdot \sqrt{g \cdot \frac{A_c}{b_w}} \right) = (2.79 \ 3.11 \ 2.96 \ 3.5 \ 3.09 \ 3.8 \ 3.31 \ 4.22 \ 4.25 \ 5.37) \frac{m}{s} \quad \text{Grenssnelheid (Rock Manual formule 4.168)}$$

Grenssnelheid op basis van scheepslengte

$$V_{L_length} := \sqrt{\frac{g \cdot L_s}{2 \cdot \pi}} = (17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45 \ 17.45) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.169)}$$

Grenssnelheid op basis van waterdiepte

$$V_{L_dep} := \sqrt{g \cdot h} = (5.9 \ 5.9 \ 6.3 \ 6.3 \ 6.61 \ 6.61 \ 7.04 \ 7.04 \ 8.2 \ 8.2) \frac{m}{s} \quad \text{(Rock Manual formule 4.170)}$$

Bepaling optredende grenssnelheid

De optredende grenssnelheid is de minimale van de bovenstaande berekende grenssnelheden (op basis van Schijf, waterdiepte en scheepslengte)

$$V_L := \begin{matrix} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left[\begin{array}{l} V_L^{(i)} \leftarrow \min(V_{L_schijf}^{(i)}, V_{L_dep}^{(i)}, V_{L_length}^{(i)}) \end{array} \right. \\ V_L \end{matrix} = (2.79 \ 3.11 \ 2.96 \ 3.5 \ 3.09 \ 3.8 \ 3.31 \ 4.22 \ 4.25 \ 5.37) \frac{m}{s}$$

Blok 3: bepaling van de werkelijke snelheid

De maatgevende vaarsnelheid is gedefinieerd in eis FE 0.1.4. en bedraagt $f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \%$ van de grenssnelheid, ofwel:

$$V_{\text{schip}} := \overrightarrow{(f_v \cdot V_L)} = (2.1 \ 2.8 \ 2.22 \ 3.15 \ 2.32 \ 3.42 \ 2.48 \ 3.8 \ 3.19 \ 4.83) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{maatgevende vaarsnelheid t.o.v. het water}$$

Blok 4: bepaling gemiddelde waterspiegeldaling en retourstroom

$$\alpha_s := 1.4 - 0.4 \cdot \frac{V_{\text{schip}}}{V_L} = (1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04 \ 1.1 \ 1.04) \quad \text{Factor voor het uitdrukken van de vaarsnelheid, relatief gezien tot de grenssnelheid}$$

Gemiddelde spiegedaling (Rock Manual formule 4.173)

$$\Delta h := \begin{cases} i \leftarrow N_{\text{var}} & = (0.23 \ 0.37 \ 0.27 \ 0.41 \ 0.29 \ 0.44 \ 0.33 \ 0.49 \ 0.45 \ 0.63) \text{ m} \\ \text{for } i \in N \\ \quad A_{c_ster}(\Delta h) \leftarrow b_b^{(i)} (h^{(i)} - \Delta h) + m_{\text{slope}}^{(i)} (h^{(i)} - \Delta h)^2 - A_m^{(i)} \\ \quad \Delta h_{\text{guess}} \leftarrow 0.3 \text{ m} \\ \quad \Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}) \leftarrow \frac{(V_{\text{schip}}^{(i)})^2}{2g} \left[\alpha_s^{(i)} \left(\frac{A_c^{(i)}}{A_{c_ster}} \right)^2 - 1 \right] \\ \quad \Delta h^{(i)} \leftarrow \text{root}(\Delta h_{\text{fnc}}(A_{c_ster}(\Delta h_{\text{guess}})) - \Delta h_{\text{guess}}, \Delta h_{\text{guess}}) \\ \Delta h \end{cases}$$

Oppervlak v.d. vaarweg naast het schip (Rock Manual pagina 437)

$$A_{c_ster} := \overrightarrow{[b_b \cdot (h - \Delta h) + m_{\text{slope}} \cdot (h - \Delta h)^2 - A_m]} = (208.26 \ 209.14 \ 236.49 \ 245.65 \ 259.53 \ 274.97 \ 295.25 \ 319.09 \ 421.05 \ 452.18) \text{ m}^2$$

Berekening van de gemiddelde retourstroom (Rock Manual formule 4.174)

$$u_r := \overrightarrow{\left[V_{\text{schip}} \cdot \left(\frac{A_c}{A_{c_ster}} - 1 \right) \right]} = (0.762 \ 1.001 \ 0.821 \ 1.005 \ 0.863 \ 1.008 \ 0.915 \ 1.011 \ 0.961 \ 1.024) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Blok 5: bepaling extreme waterspiegeldaling en retourstroom

$$A_{w_ster} := \frac{y \cdot h}{A_c}$$

Bepaal vermenigvuldigingsfactoren voor waterspiegeldaling en retourstroom:

Berekening van ratio voor spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)

$$\gamma_{\Delta h} := \begin{cases} i \leftarrow N_{var} & = (1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43 \ 1.43) \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{\Delta h}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + 2 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ (1 + 4 \cdot A_{w_ster}^{(i)}) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{\Delta h} \end{cases}$$

Berekening van ratio voor retourstroom (Rock Manual formule 4.176)

$$\gamma_{ur} := \begin{cases} i \leftarrow N_{var} & = (1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22 \ 1.22) \\ \text{for } i \in N \\ \gamma_{ur}^{(i)} \leftarrow \begin{cases} (1 + A_{w_ster}^{(i)}) & \text{if } \frac{b_w^{(i)}}{L_s^{(i)}} < 1.5 \\ [1 + (3A_{w_ster}^{(i)})] & \text{otherwise} \end{cases} \\ \gamma_{ur} \end{cases}$$

$$\Delta h_{max} := \overrightarrow{(\gamma_{\Delta h} \cdot \Delta h)}$$

Maximale spiegeldaling (Rock Manual formule 4.175)

$$u_{r_max} := \overrightarrow{(\gamma_{ur} \cdot u_r)}$$

Maximale retourstroming (Rock Manual formule 4.176)

De retourstroomsnelheid onder het schip kan worden benaderd volgens:

$$u_{r_belowkeel_onder} := 1.5 \cdot u_{r_max} = (1.39 \ 1.82 \ 1.50 \ 1.83 \ 1.57 \ 1.84 \ 1.67 \ 1.84 \ 1.75 \ 1.87) \frac{m}{s}$$

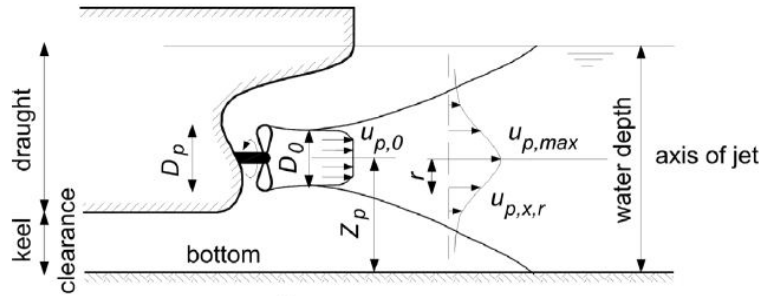
Retourstroom ondergrens (Rock Manual formule 4.183)

$$u_{r_belowkeel_boven} := 2 \cdot u_{r_max} = (1.85 \ 2.43 \ 2.00 \ 2.44 \ 2.10 \ 2.45 \ 2.22 \ 2.46 \ 2.33 \ 2.49) \frac{m}{s}$$

Retourstroom bovengrens (Rock Manual formule 4.183)

Berekening van de maatgevende schroefstromen a.g.v. de hoofdschroef

De schroefstroom is berekend volgens paragraaf 4.3.4.3 van de Rock Manual met een aanvulling van een invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992 . Een definitieschets is hieronder weergegeven.



$$P_{\text{schroef}} := \frac{P_{\text{max_schip}}}{n_{\text{schroef}}} = (800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800 \ 800) \cdot \text{kW} \quad \text{Schroefvermogen}$$

Invloedsfactor voor meerdere schroeven conform Proceedings, 10th International Harbour congress, Antwerp 1992

$$f_n := \begin{matrix} i \leftarrow N_{\text{var}} \\ \text{for } i \in N \\ \left| \begin{array}{l} f_{n_i} \leftarrow 1 \text{ if } (n_{\text{schroef}}^T)_i = 1 \\ f_{n_i} \leftarrow 1.5 \text{ if } (n_{\text{schroef}}^T)_i = 2 \\ f_{n_i} \leftarrow 2 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ f_n^T \end{matrix} = (2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00)$$

$$D_p := 0.0133 \cdot \left(\frac{P_{\text{schroef}}}{W} \right)^{0.365} \cdot \text{m} = (1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90) \text{m}$$

$$D_0 := (\alpha \cdot D_p) = (1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90 \ 1.90) \text{m} \quad \text{Effectieve diameter}$$

$$z_p := h - T_s + y_t + 0.5D_p = (2.20 \ 2.70 \ 2.30 \ 3.20 \ 2.40 \ 3.60 \ 2.60 \ 4.20 \ 4.00 \ 6.00) \text{m} \quad \text{Afstand van bodem tot straalas}$$

$$u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) := 1.15 \left(\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Snelheid direct achter de propellor (Rock Manual formule 4.187)

$$u_x(x, D_0, P, \rho_w) := 2.8 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \frac{D_0}{x}$$

Snelheid langs de as van de propellor (Rock Manual formule 4.188)

$$u_{p_max_bed}(z, D_0, P, \rho_w) := 0.3 \cdot u_{p_0}(D_0, P, \rho_w) \cdot \left(\frac{D_0}{z} \right)^1$$

Maximale snelheid op de bodem (Rock Manual formule 4.190)

$$P_{\%} := P_{schroef} \cdot I_{\%} \quad I_{\%} = 1.00$$

Vermogen bij inzet van schroef

$$u_{\%} := \overrightarrow{(f_n \cdot u_{p_max_bed}(z_p, D_0, P_{\%}, \rho_w))} = (3.61 \ 2.94 \ 3.45 \ 2.48 \ 3.31 \ 2.2 \ 3.05 \ 1.89 \ 1.98 \ 1.32) \frac{m}{s} \text{ Stroomsnelheid bij } I_{\%} \text{ inzet}$$

Conform CUR 201, formule 20 kan voor varende schepen de stroomsnelheid t.g.v. de hoofdschroef gecorrigeerd worden volgens $u = u_{100\%} - 0.5 \cdot V_s$. Echter wanneer $0.5 \cdot V_s$ groter is dan de schroefinzet, dan zal in de onderstaande loop een negatieve waarde overschreven worden met een waarde 0.

Stroomsnelheid t.g.v. schroefstraal tijdens varen (CUR 201 formule 20).

$$u_{varend} := \begin{cases} i \leftarrow N_{var} \\ \text{for } i \in N \\ \left| \begin{array}{l} u_{varend_i} \leftarrow (u_{\%}^T)_i - 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \text{ if } (u_{\%}^T)_i \geq 0.5 \cdot (V_{schip}^T)_i \\ u_{varend_i} \leftarrow 0 \frac{m}{s} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{c} T \\ u_{varend} \end{array} \right\} = (2.56 \ 1.54 \ 2.34 \ 0.90 \ 2.15 \ 0.49 \ 1.81 \ 0.00 \ 0.39 \ 0.00) \frac{m}{s}$$

Overzicht van stroomsnelheden

Nummering van de genoemde kenmerken. Deze nummers komen terug in de eerste rij van elke tabel en vertegenwoordigen steeds de uitgevoerde berekening betreffende het kenmerk.

Kenmerk = 10.00

$$u_{r_max} = (0.93 \ 1.22 \ 1.00 \ 1.22 \ 1.05 \ 1.22 \ 1.11 \ 1.23 \ 1.17 \ 1.24) \frac{m}{s}$$

Maximale retourstroom kanaal bij $f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \%$

van grenssnelheid

$$u_{r_min} := u_{r_belowkeel_onder} = (1.39 \ 1.82 \ 1.50 \ 1.83 \ 1.57 \ 1.84 \ 1.67 \ 1.84 \ 1.75 \ 1.87) \frac{m}{s} \text{ Retourstroom onder schip (ondergrens)}$$

$$u_{r_des} := u_{r_belowkeel_boven} = (1.85 \ 2.43 \ 2 \ 2.44 \ 2.1 \ 2.45 \ 2.22 \ 2.46 \ 2.33 \ 2.49) \frac{m}{s} \text{ Maximale retourstroom onder schip (bovengrens)}$$

Overzicht van stroomsnelheden

Nummering van de genoemde kenmerken. Deze nummers komen terug in de eerste rij van elke tabel en vertegenwoordigen steeds de uitgevoerde berekening betreffende het kenmerk.

Kenmerk = 10.00

$f_v = (75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90 \ 75 \ 90) \cdot \% \text{ Grenssnelheid}$

$u_r = (0.76 \ 1.00 \ 0.82 \ 1.00 \ 0.86 \ 1.01 \ 0.91 \ 1.01 \ 0.96 \ 1.02) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Gemiddelde retourstroom

$u_{r_max} = (0.93 \ 1.22 \ 1.00 \ 1.22 \ 1.05 \ 1.22 \ 1.11 \ 1.23 \ 1.17 \ 1.24) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Maximale retourstroom kanaal t.g.v. excentrisch varen

$u_{r_belowkeel_onder} = (1.39 \ 1.82 \ 1.50 \ 1.83 \ 1.57 \ 1.84 \ 1.67 \ 1.84 \ 1.75 \ 1.87) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Retourstroom onder schip (ondergrens)

$u_{r_belowkeel_boven} = (1.85 \ 2.43 \ 2 \ 2.44 \ 2.1 \ 2.45 \ 2.22 \ 2.46 \ 2.33 \ 2.49) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Maximale retourstroom onder schip (bovengrens)

$\Delta h = (0.23 \ 0.37 \ 0.27 \ 0.41 \ 0.29 \ 0.44 \ 0.33 \ 0.49 \ 0.45 \ 0.63) \text{m}$

Gemiddelde spiegeldaling

$\Delta h_{max} = (0.33 \ 0.52 \ 0.38 \ 0.59 \ 0.42 \ 0.63 \ 0.48 \ 0.70 \ 0.64 \ 0.90) \text{m}$

Maximale spiegeldaling t.g.v. excentrisch varen

$u_{varend} = (2.56 \ 1.54 \ 2.34 \ 0.90 \ 2.15 \ 0.49 \ 1.81 \ 0.00 \ 0.39 \ 0.00) \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Netto schroefstroom op bodem

Naamgeving := $\left(\begin{array}{c} \text{"Grenssnelheid"} \\ \text{"Vaarsnelheid (km/hr)}" \\ \text{"Gemiddelde retourstroom"} \\ \text{"Retourstroom t.g.v. excentrisch varen"} \\ \text{"Retourstroom onder schip (ondergrens)}" \\ \text{"Retourstroom onder schip (bovengrens)}" \\ \text{"Gemiddelde spiegeldaling"} \\ \text{"Spiegeldaling t.g.v. excentrisch varen"} \\ \text{"Netto schroefstroom op bodem"} \end{array} \right)$

Resultaat :=

for i ∈ 1..Kenmerk

$$A_{i+1,1} \leftarrow f_{v_{1,i}} \cdot 100$$

$$A_{i+1,2} \leftarrow V_{\text{schip}_{1,i}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(\frac{\text{km}}{\text{hr}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

$$A_{i+1,3} \leftarrow u_{r_{1,i}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

$$A_{i+1,4} \leftarrow u_{r_{\text{max}_{1,i}}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

$$A_{i+1,5} \leftarrow u_{r_{\text{belowkeel_onder}_{1,i}}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

$$A_{i+1,6} \leftarrow u_{r_{\text{belowkeel_boven}_{1,i}}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

$$A_{i+1,7} \leftarrow \Delta h_{1,i} (\text{m})^{-1}$$

$$A_{i+1,8} \leftarrow \Delta h_{\text{max}_{1,i}} (\text{m})^{-1}$$

$$A_{i+1,9} \leftarrow u_{\text{varend}_{1,i}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-1}$$

for j ∈ 1..rows(Naamgeving)

$$A_{1,j} \leftarrow \text{Naamgeving}_j$$

$$A \leftarrow A$$

Resultaat ^T =	"Grenssnelheid"	75.00	90.00	75.00	90.00	75.00	90.00	75.00	90.00	75.00	90.00
	"Vaarsnelheid (km/hr)"	7.55	10.07	7.99	11.34	8.36	12.31	8.94	13.68	11.47	17.39
	"Gemiddelde retourstroom"	0.76	1.00	0.82	1.00	0.86	1.01	0.91	1.01	0.96	1.02
	"Retourstroom t.g.v. excentrisch varen"	0.93	1.22	1.00	1.22	1.05	1.22	1.11	1.23	1.17	1.24
	"Retourstroom onder schip (ondergrens)"	1.39	1.82	1.50	1.83	1.57	1.84	1.67	1.84	1.75	1.87
	"Retourstroom onder schip (bovengrens)"	1.85	2.43	2.00	2.44	2.10	2.45	2.22	2.46	2.33	2.49
	"Gemiddelde spiegeldaling"	0.23	0.37	0.27	0.41	0.29	0.44	0.33	0.49	0.45	0.63
	"Spiegeldaling t.g.v. excentrisch varen"	0.33	0.52	0.38	0.59	0.42	0.63	0.48	0.70	0.64	0.90
	"Netto schroefstroom op bodem"	2.56	1.54	2.34	0.90	2.15	0.49	1.81	0.00	0.39	0.00

Debiet door ARK excl. scheepvaart

NAP := 0m

Referentieniveau

$$Q_{\text{ARK}} := (25 \ 50 \ 75 \ 100) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Debiet door ARK

$$h_{\text{NR}} := \text{NAP} + (1.2 \ 1.7 \ 2.1 \ 2.7 \ 4.5) \text{m}$$

Waterhoogte behorend bij gegeven debieten

$$h_{\text{bodem}} := \text{NAP} - 2.35 \text{m}$$

Bodemhoogte

$$d_{\text{NR}} := h_{\text{NR}} - h_{\text{bodem}}$$

Diepte te Ravenswaaij

$$d_{\text{NR}} = (3.55 \ 4.05 \ 4.45 \ 5.05 \ 6.85) \text{m}$$

$$B_{\text{Rav}} := 80 \text{m} + 18.02 \text{m} + 18.02 \text{m}$$

Vaarwegbreedte te Ravenswaaij

$$A_{\text{NR}} := B_{\text{Rav}} \cdot d_{\text{NR}}$$

Nat oppervlak te Ravenswaaij

$$A_{\text{NR}} = (411.94 \ 469.96 \ 516.38 \ 586.00 \ 794.87) \text{m}^{2.00}$$

$$u_{\text{NR}} := \frac{Q_{\text{ARK}}}{A_{\text{NR}_{1,1}}} = (0.06 \ 0.12 \ 0.18 \ 0.24) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stroomsnelheid te Ravenswaaij bij

$$A_{\text{NR}_{1,1}} = 411.94 \text{m}^{2.00}$$

$$u_{\text{NR}} := \frac{Q_{\text{ARK}}}{A_{\text{NR}_{1,2}}} = (0.05 \ 0.11 \ 0.16 \ 0.21) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stroomsnelheid te Ravenswaaij bij

$$A_{\text{NR}_{1,2}} = 469.96 \text{m}^{2.00}$$

$$u_{\text{NR}} := \frac{Q_{\text{ARK}}}{A_{\text{NR}_{1,3}}} = (0.05 \ 0.10 \ 0.15 \ 0.19) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stroomsnelheid te Ravenswaaij bij

$$A_{\text{NR}_{1,3}} = 516.38 \text{m}^{2.00}$$

$$u_{\text{NR}} := \frac{Q_{\text{ARK}}}{A_{\text{NR}_{1,4}}} = (0.04 \ 0.09 \ 0.13 \ 0.17) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stroomsnelheid te Ravenswaaij bij

$$A_{\text{NR}_{1,4}} = 586.00 \text{m}^{2.00}$$

$$u_{\text{NR}} := \frac{Q_{\text{ARK}}}{A_{\text{NR}_{1,5}}} = (0.03 \ 0.06 \ 0.09 \ 0.13) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stroomsnelheid te Ravenswaaij bij

$$A_{\text{NR}_{1,5}} = 794.87 \text{m}^{2.00}$$

BIJLAGE 4 HYDRAULSICHE ANALYSE VAN AFVOEREN DOOR DE SLUISCOMPLEXEN

Project:	Verkenning vergrote aanvoer water via BP-ARK onder droge omstandigheden
Project number ARCADIS:	C03011.000580
Subject:	Berekening Hydraulica Prins Bernhardsluizen
Date:	23 november 2016
Prepared by:	Henry Tuin
Checked by:	
Released by:	Arjan Tuijnder

Status: **Concept**

ORIGIN := 1 NAP := 0m

Kenmerken sluiskolk Duwvaartsluis (Oostsluis)

$L_{os} := 260m$	Lengte oostsluis
$B_{os} := 24m$	Breedte oostsluis
$d_{os} := NAP - 2.35m$	Drempelhoogte oostsluis
$A_{os}(h_{ark}) := B_{os} \cdot (h_{ark} - d_{os})$	Natte doorsnede oostsluis
$n_{os} := 1$	Aantal omloopriolen
$k_{os} := 5mm$	Ruwheidshoogte beton (Nortier tabel 5.1)

Kenmerken sluiskolk C.A. (Westsluis)

$L_{ws} := 350m$	Lengte westsluis
$B_{ws} := 18m$	Breedte westsluis
$d_{ws} := NAP - 2.35m$	Drempelhoogte westsluis
$A_{ws}(h_{ark}) := B_{ws} \cdot (h_{ark} - d_{ws})$	Natte doorsnede westsluis
$n_{ws} := 2$	Aantal omloopriolen
$k_{ws} := 5mm$	Ruwheidshoogte beton (Nortier tabel 5.1)

Kenmerken spuirool

$B_{sr} := 320mm$	Breedte spuirool
$H_{sr} := 365mm$	Hoogte spuirool
$A_{sr} := B_{sr} \cdot H_{sr} = 0.117m^2$	Natte doorsnede spuirool
$P_{sr} := 2 \cdot B_{sr} + 2 \cdot H_{sr}$	Natte perimeter spuirool
$R_{spui} := \frac{A_{sr}}{P_{sr}}$	Hydraulische straal
$k_{spui} := 5mm$	Ruwheidshoogte beton (Nortier tabel 5.1)
$n_{sr} := 3$	Aantal spuiroliolen

Afvoer door Duwvaartsluis

$$\xi_{\text{in}} := 0.8$$

Verliescoëfficiënt voor instroom (Nortier paragraaf 7.2)

$$R_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{A_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}{B_{\text{os}} + 2 \cdot (h_{\text{ark}} - d_{\text{os}})}$$

Hydraulische straal

$$\text{Ch}(h_{\text{ark}}) := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}{k_{\text{os}}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda(h_{\text{ark}}) := \frac{8g}{\text{Ch}(h_{\text{ark}})^2}$$

Wrijvingsfactor (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{wr_os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{\lambda(h_{\text{ark}}) \cdot L_{\text{os}}}{4 \cdot R_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}$$

Verliescoëfficiënt voor wrijving (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{uit}} := 1$$

Verlies voor uitstroom (Nortier paragraaf 4.8)

$$\xi_{\text{tot_os}}(h_{\text{ark}}) := \xi_{\text{in}} + \xi_{\text{uit}} + \xi_{\text{wr_os}}(h_{\text{ark}})$$

Totale verliescoëfficiënt

$$c_{\text{ol_os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_os}}(h_{\text{ark}})}}$$

Afvoercoëfficiënt (Nortier paragraaf 4.15)

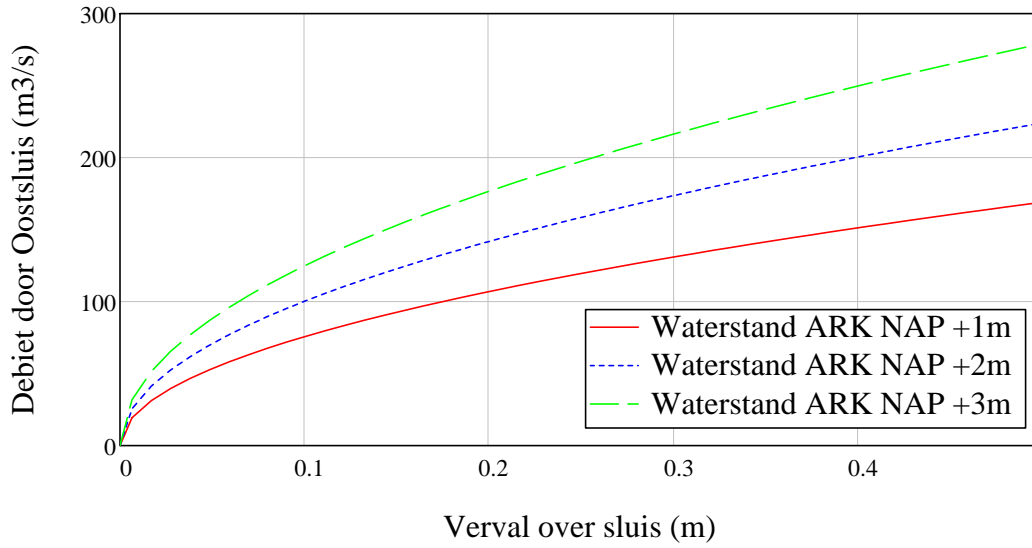
$$Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := c_{\text{ol_os}}(h_{\text{ark}}) \cdot A_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door sluis (Nortier formule 4.6)

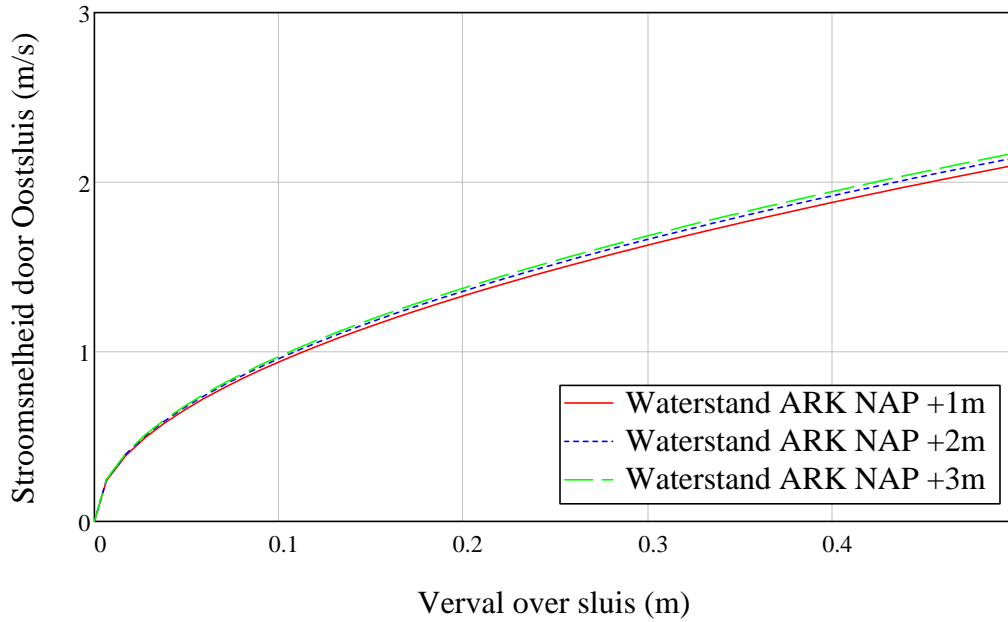
$$u_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := \frac{Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}})}{A_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}$$

Profielgemiddelde stroomsnelheid in sluis

Debiet door oostsluis



Stroomsnelheid door Oostsluis



Afvoer door sluiskolk C.A. (Westsluis)

$$\xi_{in} := 0.8$$

Instroomverlies (Nortier paragraaf 7.2)

$$R_{ws}(h_{ark}) := \frac{A_{ws}(h_{ark})}{B_{ws} + 2 \cdot (h_{ark} - d_{ws})}$$

Hydraulische straal

$$Ch(h_{ark}) := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{ws}(h_{ark})}{k_{ws}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda(h_{ark}) := \frac{8g}{Ch(h_{ark})^2}$$

Wrijvingsfactor (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{wr_ws}(h_{ark}) := \frac{\lambda(h_{ark}) \cdot L_{ws}}{4 \cdot R_{ws}(h_{ark})}$$

Verliescoefficient voor wrijving (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{uit} := 1$$

Verlies voor uitstroom (Nortier paragraaf 4.8)

$$\xi_{tot_ws}(h_{ark}) := \xi_{in} + \xi_{uit} + \xi_{wr_ws}(h_{ark})$$

Totale verliescoefficient

$$c_{ol_ws}(h_{ark}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{tot_ws}(h_{ark})}}$$

Afvoercoefficient (Nortier paragraaf 4.15)

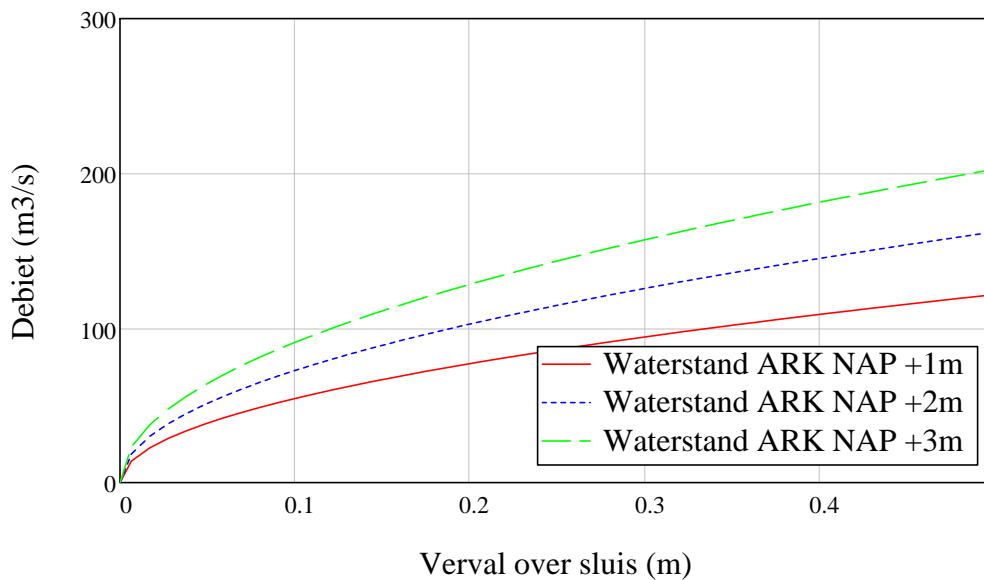
$$Q_{ws}(\Delta h, h_{ark}) := c_{ol_ws}(h_{ark}) \cdot A_{ws}(h_{ark}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door sluis (Nortier formule 4.6)

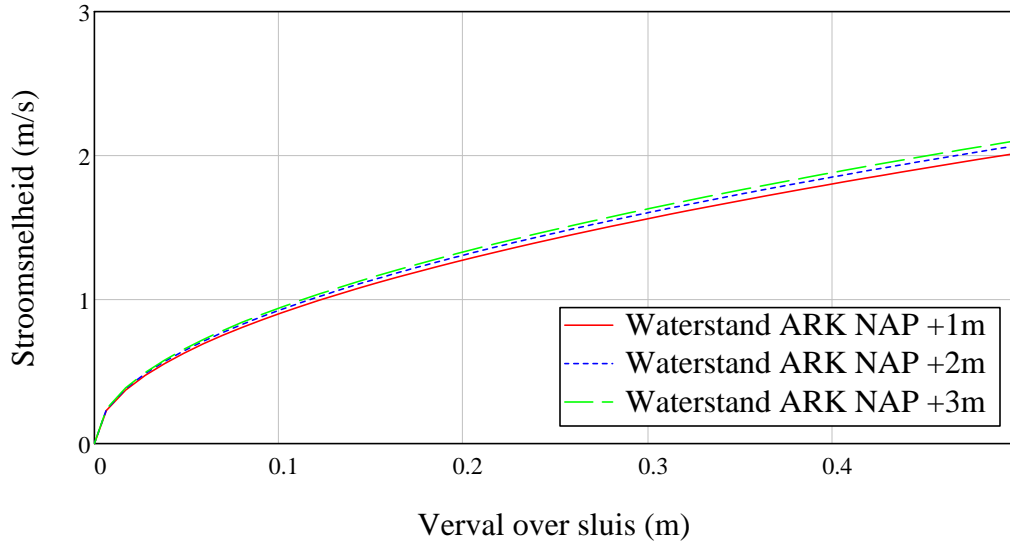
$$u_{ws}(\Delta h, h_{ark}) := \frac{Q_{ws}(\Delta h, h_{ark})}{A_{ws}(h_{ark})}$$

Profielgemiddelde stroomsnelheid door sluis

Debiet door Westsluis



Stroomsnelheid door Westsluis



Afvoer door spuirool

$$\xi_{\text{in}} := 0.5$$

Instroomverlies (Nortier tabel 4.4)

$$\xi_{\text{uit}} := 1$$

Verlies voor uitstroom (Nortier paragraaf 4.8)

$$Ch := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{\text{spui}}}{k_{\text{spui}}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda := \frac{8g}{Ch^2}$$

$$\xi_{\text{wrijv_ws}} := \frac{\lambda \cdot L_{\text{ws}}}{4 \cdot R_{\text{spui}}}$$

Verliescoefficient voor wrijving spuirool westsluis (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{wrijv_os}} := \frac{\lambda \cdot L_{\text{os}}}{4 \cdot R_{\text{spui}}}$$

Verliescoefficient voor wrijving spuirool oostsluis (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{tot_ws}} := \xi_{\text{in}} + \xi_{\text{wrijv_ws}} + \xi_{\text{uit}} = 48.001$$

Totale wrijvingsverlies westsluis

$$\xi_{\text{tot_os}} := \xi_{\text{in}} + \xi_{\text{wrijv_os}} + \xi_{\text{uit}} = 36.044$$

Totale wrijvingsverlies oostsluis

$$Q_{\text{sp_ws}}(\Delta h) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_ws}}}} \cdot A_{\text{sr}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door spuirool westsluis (Nortier formule 4.6)

$$Q_{\text{sp_os}}(\Delta h) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_os}}}} \cdot A_{\text{sr}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door spuirool oostsluis (Nortier formule 4.6)

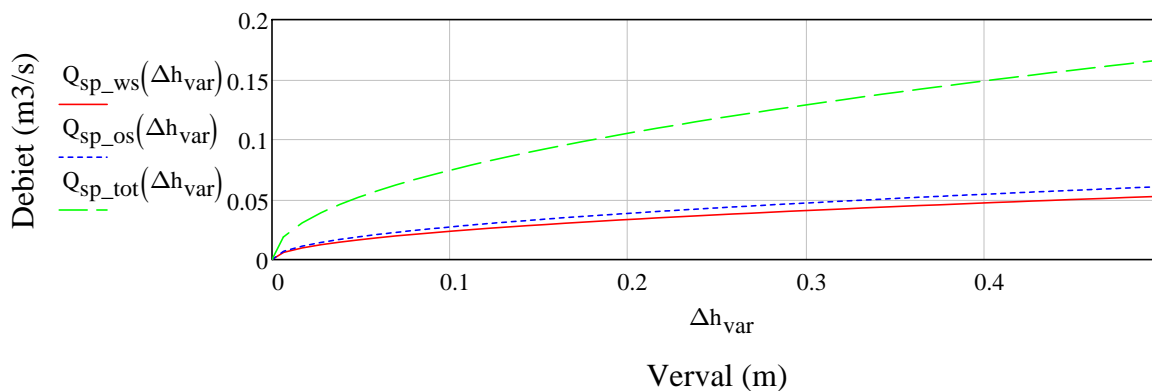
$$Q_{\text{sp_tot}}(\Delta h) := n_{\text{ws}} \cdot Q_{\text{sp_ws}}(\Delta h) + n_{\text{os}} \cdot Q_{\text{sp_os}}(\Delta h)$$

Totaal debiet door spuiroolen

$$c_{\text{sp_os}}(h_{\text{var}}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_os}}}}$$

$$c_{\text{sp_ws}}(h_{\text{var}}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_ws}}}}$$

Debiet door spuirool



Totaal stroming door Prins Bernhardsluizen

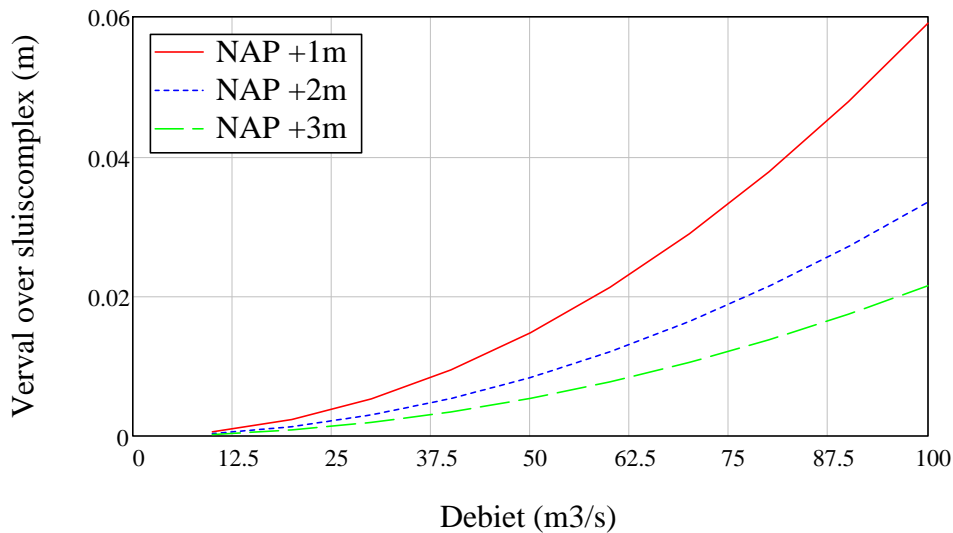
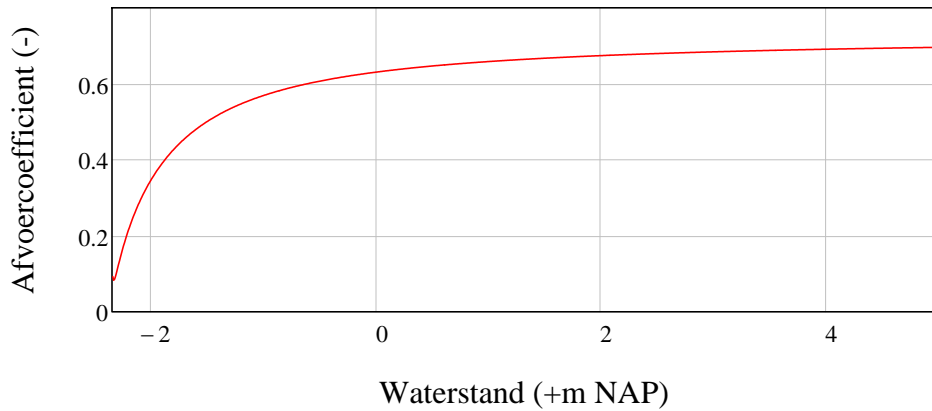
$$Q_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := Q_{\text{sp_tot}}(\Delta h) + Q_{\text{ws}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) + Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) \quad \text{Debiet door de Prins Bernhardsluizen}$$

$$\Delta h_{\text{guess}} := 0.001\text{m}$$

$$\Delta h(h_{\text{ark}}, Q_{\text{ARK}}) := \text{root}(Q_{\text{tot}}(\Delta h_{\text{guess}}, h_{\text{ark}}) - Q_{\text{ARK}}, \Delta h_{\text{guess}}) \quad \text{Verval over de sluis als functie van debiet}$$

$$\mu_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := \frac{Q_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}})}{(A_{\text{ws}}(h_{\text{ark}}) + A_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) + 3 \cdot A_{\text{sr}}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}} \quad \text{Bepaling van de afvoercoefficient voor totaal complex}$$

$$Q_{\text{var}} := 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, 20 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \dots 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Voor drie scenario's zijn voor enkele debieten in Sobek de waterstand bij de sluis bepaald. Onderstaand wordt de debiet met de bijbehorende waterstand ingeladen.

$$\text{Data}_{Q600} := \begin{pmatrix} 25 & 1.49 \\ 50 & 1.42 \\ 75 & 1.35 \\ 100 & 1.27 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_{Q800} := \begin{pmatrix} 25 & 1.93 \\ 50 & 1.86 \\ 75 & 1.79 \\ 100 & 1.72 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_{Q1000} := \begin{pmatrix} 25 & 2.34 \\ 50 & 2.27 \\ 75 & 2.21 \\ 100 & 2.14 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_Q := \text{Data}_{Q600} \begin{matrix} \langle 1 \rangle^T \\ \cdot \\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{matrix} = (25 \ 50 \ 75 \ 100) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Uitlezen data voor de model-afvoeren

$$\text{Data}_{h600} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q600} \begin{matrix} \langle 2 \rangle^T \\ \cdot \\ \text{m} \end{matrix} = (1.49 \ 1.42 \ 1.35 \ 1.27) \text{m}$$

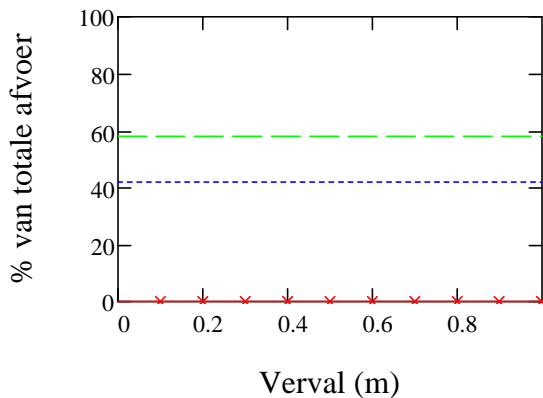
Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q600

$$\text{Data}_{h800} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q800} \begin{matrix} \langle 2 \rangle^T \\ \cdot \\ \text{m} \end{matrix} = (1.93 \ 1.86 \ 1.79 \ 1.72) \text{m}$$

Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q800

$$\text{Data}_{h1000} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q1000} \begin{matrix} \langle 2 \rangle^T \\ \cdot \\ \text{m} \end{matrix} = (2.34 \ 2.27 \ 2.21 \ 2.14) \text{m}$$

Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q1000



Debiet door kolken

$$\frac{Q_{ws}(0.1\text{m}, 2\text{m})}{Q_{tot}(0.1\text{m}, 2\text{m})} + \frac{Q_{os}(0.1\text{m}, 2\text{m})}{Q_{tot}(0.1\text{m}, 2\text{m})} = 99.956916\%$$

Effect van spuirollen is te verwaarlozen. De bijdrage door de spuirollen is zeer klein. De verdere beschouwing gaat alleen uit van de afvoer door de kolken.

- *** Bijdrage van spuirollen
- Bijdrage van Westkolk
- Bijdrage van Oostkolk

Totale debiet door Prins Bernhardsluizen. De variabelen X_{ws} en X_{os} zijn opgenomen om de sluis mee te rekenen of juist niet mee te rekenen. De waarde van X_{ws} en X_{os} is gelijk aan 1 (opnemen in de berekening) of 0 (niet opnemen in de berekening)

$$Q_{tot}(\Delta h, h_{ark}, X_{ws}, X_{os}) := X_{ws} \cdot Q_{ws}(\Delta h, h_{ark}) + X_{os} \cdot Q_{os}(\Delta h, h_{ark})$$

Het verval over de Prins Bernhardsluizen wordt berekend voor een debiet Q_{ARK} . De vergelijking wordt impliciet opgelost.

$$\Delta h(h_{ark}, Q_{ARK}, X_{ws}, X_{os}) := \text{root}(Q_{tot}(\Delta h_{guess}, h_{ark}, X_{ws}, X_{os}) - Q_{ARK}, \Delta h_{guess})$$

In onderstaande loop wordt voor de volgende scenario's de stroming door de kolken berekend:

- Westkolk en Oostkolk open
- Oostkolk open
- Westkolk open.

De berekening wordt gemaakt voor Q600, Q800 en Q1000.

Naamgeving :=

"Debiet ARK"
"Waterstand sluis (+m NAP)"
"Verval over Oost & West (m)"
"Stroming door Oost (m/s)"
"Stroming door West (m/s)"
"Totaal debiet Oost & West (m3/s)"
"Verval over Oost (m)"
"Stroming door Oost (m/s)"
"Totaal Debiet Oost (m3/s)"
"Verval over West (m)"
"Stroming door West (m/s)"
"Totaal Debiet West (m3/s)"

Een matrix met de naamgeving van de resultaten wordt aangemaakt. Deze naamgeving wordt gekoppeld aan de tabel met resultaten.

Na het resultaat met de storming door de kolk wordt o.b.v. de storming het debiet door de kolk berekend. Dit is een check. Het berekende debiet moet gelijk zijn aan de invoerresultaten opgenomen in de eerste kolom.

$R_Q(Data_Q) :=$

for $i \in 1 \dots rows(Data_Q)$

$$A_{i+1,1} \leftarrow Data_{Q_{i,1}}$$

$$A_{i+1,2} \leftarrow Data_{Q_{i,2}}$$

$$A_{i+1,3} \leftarrow \Delta h \left[Data_{Q_{i,2}} \cdot m, Data_{Q_{(i,1)}} \cdot \frac{m^3}{s}, 1, 1 \right] \cdot m^{-1}$$

$$A_{i+1,4} \leftarrow u_{OS} \left(A_{i+1,3} \cdot m, Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \left(\frac{m}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,5} \leftarrow u_{WS} \left(A_{i+1,3} \cdot m, Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \left(\frac{m}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,6} \leftarrow \left(A_{i+1,4} \cdot \frac{m}{s} A_{OS} \left(Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) + A_{i+1,5} \cdot \frac{m}{s} A_{WS} \left(Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \right) \left(\frac{m^3}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,7} \leftarrow \Delta h \left[Data_{Q_{i,2}} \cdot m, Data_{Q_{(i,1)}} \cdot \frac{m^3}{s}, 0, 1 \right] \cdot m^{-1}$$

$$A_{i+1,8} \leftarrow u_{OS} \left(A_{i+1,7} \cdot m, Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \left(\frac{m}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,9} \leftarrow \left(A_{i+1,8} \cdot \frac{m}{s} A_{OS} \left(Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \right) \left(\frac{m^3}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,10} \leftarrow \Delta h \left[Data_{Q_{i,2}} \cdot m, Data_{Q_{(i,1)}} \cdot \frac{m^3}{s}, 1, 0 \right] \cdot m^{-1}$$

$$A_{i+1,11} \leftarrow u_{WS} \left(A_{i+1,10} \cdot m, Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \left(\frac{m}{s} \right)^{-1}$$

$$A_{i+1,12} \leftarrow \left(A_{i+1,11} \cdot \frac{m}{s} A_{WS} \left(Data_{Q_{i,2}} \cdot m \right) \right) \left(\frac{m^3}{s} \right)^{-1}$$

for $j \in 1 \dots rows(Naamgeving)$

$$A_{1,j} \leftarrow Naamgeving_j$$

$$A \leftarrow A$$

$$R_Q(\text{Data}_{Q600})^T =$$

	1	2	3	4	5
1	"Debiet ARK"	25	50	75	100
2	sluis (+m NAP)"	1.49	1.42	1.35	1.27
3	Oost & West (m)"	$2.743 \cdot 10^{-3}$	0.011	0.027	0.05
4	door Oost (m/s)"	0.158	0.321	0.491	0.669
5	door West (m/s)"	0.152	0.309	0.472	0.643
6	t & West (m3/s)"	25	50	75	100
7	al over Oost (m)"	$8.126 \cdot 10^{-3}$	0.034	0.079	0.148
8	door Oost (m/s)"	0.271	0.553	0.845	1.151
9	biet Oost (m3/s)"	25	50	75	100
10	al over West (m)"	0.016	0.065	0.153	0.285
11	door West (m/s)"	0.362	0.737	1.126	1.535
12	biet West (m3/s)"	25	50	75	100

$$R_Q(\text{Data}_{Q800})^T =$$

	1	2	3	4	5
1	"Debiet ARK"	25	50	75	100
2	sluis (+m NAP)"	1.93	1.86	1.79	1.72
3	Oost & West (m)"	$2.169 \cdot 10^{-3}$	$8.988 \cdot 10^{-3}$	0.021	0.039
4	door Oost (m/s)"	0.141	0.287	0.438	0.594
5	door West (m/s)"	0.136	0.277	0.422	0.572
6	t & West (m3/s)"	25	50	75	100
7	al over Oost (m)"	$6.437 \cdot 10^{-3}$	0.027	0.062	0.115
8	door Oost (m/s)"	0.243	0.495	0.755	1.024
9	biet Oost (m3/s)"	25	50	75	100
10	al over West (m)"	0.012	0.051	0.119	0.22
11	door West (m/s)"	0.325	0.66	1.006	1.365
12	biet West (m3/s)"	25	50	75	100

$$R_Q(\text{Data}_{Q1000})^T =$$

	1	2	3	4	5
1	"Debiet ARK"	25	50	75	100
2	sluis (+m NAP)"	2.34	2.27	2.21	2.14
3	Oost & West (m)"	$1.781 \cdot 10^{-3}$	$7.359 \cdot 10^{-3}$	0.017	0.031
4	door Oost (m/s)"	0.129	0.262	0.398	0.538
5	door West (m/s)"	0.124	0.252	0.384	0.519
6	t & West (m3/s)"	25	50	75	100
7	al over Oost (m)"	$5.295 \cdot 10^{-3}$	0.022	0.051	0.093
8	door Oost (m/s)"	0.222	0.451	0.685	0.928
9	biet Oost (m3/s)"	25	50	75	100
10	al over West (m)"	0.01	0.042	0.097	0.178
11	door West (m/s)"	0.296	0.601	0.914	1.237
12	biet West (m3/s)"	25	50	75	100

De maximale langsstroming in RVW 2011 is gesteld op $u_{\max} := 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Zie hiervoor onderstaande passage uit RVW 2011

3.3.4 *Langsstroming*

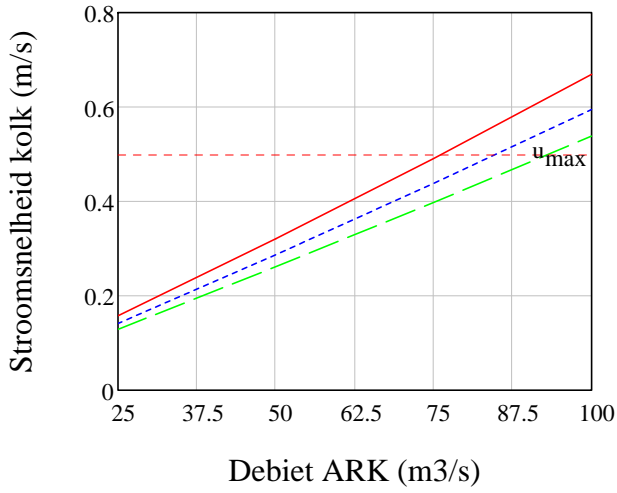
De richtlijnen zijn bedoeld voor vaarwegen zonder stroom of met lage langsstroomsnelheden. In het algemeen is op de vaarweg geen grotere langsstroming dan 0,5 m/s gemiddeld over het dwarsprofiel toelaatbaar. Deze waarde is afgestemd op de situatie bij bruggen, scherpe bochten, manoeuvreerplaatsen, splitsingspunten en dergelijke. Afvarende schepen hebben in bochten bij langsstroming meer breedte nodig, opvarende schepen weer minder. Bij een langsstroming van meer dan 0,5 m/s bij beroepsvaart is het nodig nader onderzoek uit te voeren. Deze aanbeveling geldt zowel voor bochten als voor rechtstanden, kanalen en rivieren.

Ook bij bruggen en keersluizen mag de langsstroomsnelheid, gemiddeld over het natte dwarsprofiel, niet meer bedragen dan 0,5 m/s. Als de snelheid hoger is, dan moet het dwarsprofiel worden verwijld of moet een andere oplossing worden gezocht om zeker te stellen dat het maatgevende schip tegenstrooms voldoende vermogen heeft om de lokale stroomsnelheden te overwinnen en voorstrooms voldoende manoeuvreerbaar te zijn.

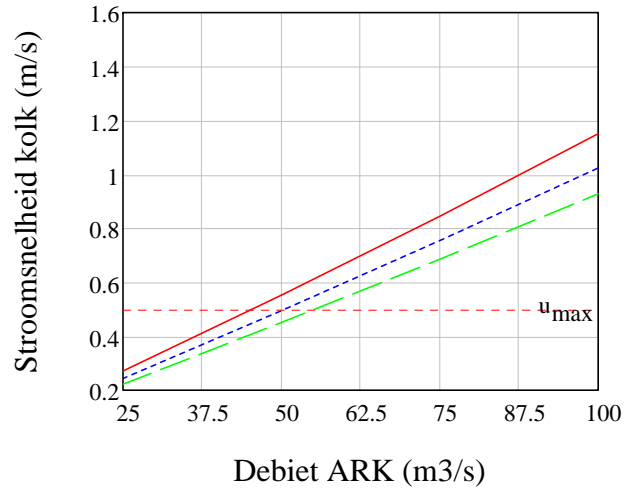
Voor de recreatievaart zijn ter plaatse van vernauwingen stroomsnelheden tot 0,8 m/s aanvaardbaar, mits boven- en benedenstrooms van de vernauwing tenminste 50 m rechte vaarweg aanwezig is.

Bij schutsluizen kan het uit waterhuishoudkundig oogpunt nodig zijn om regelmatig of incidenteel water te spuien. De omloopriolen moeten zodanig ontworpen zijn, dat het schutbedrijf tijdens het spuien zonder grote bezwaren door kan gaan.

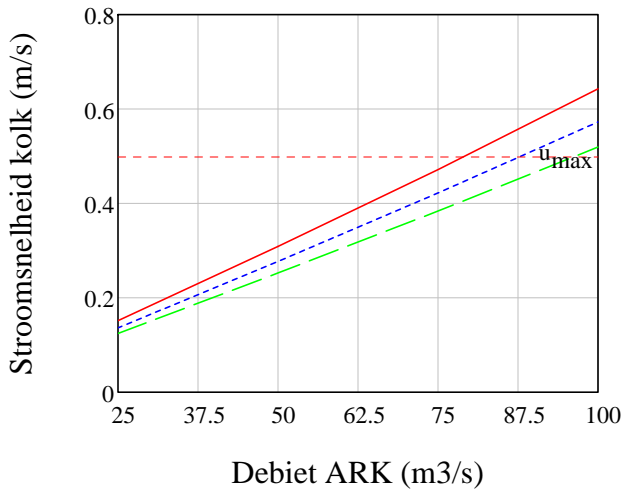
Oostkolk | Beide kolken open



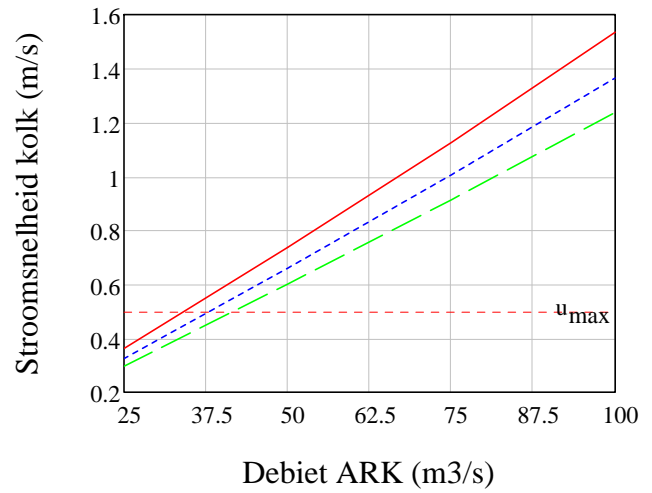
Oostkolk | Alleen Oost open

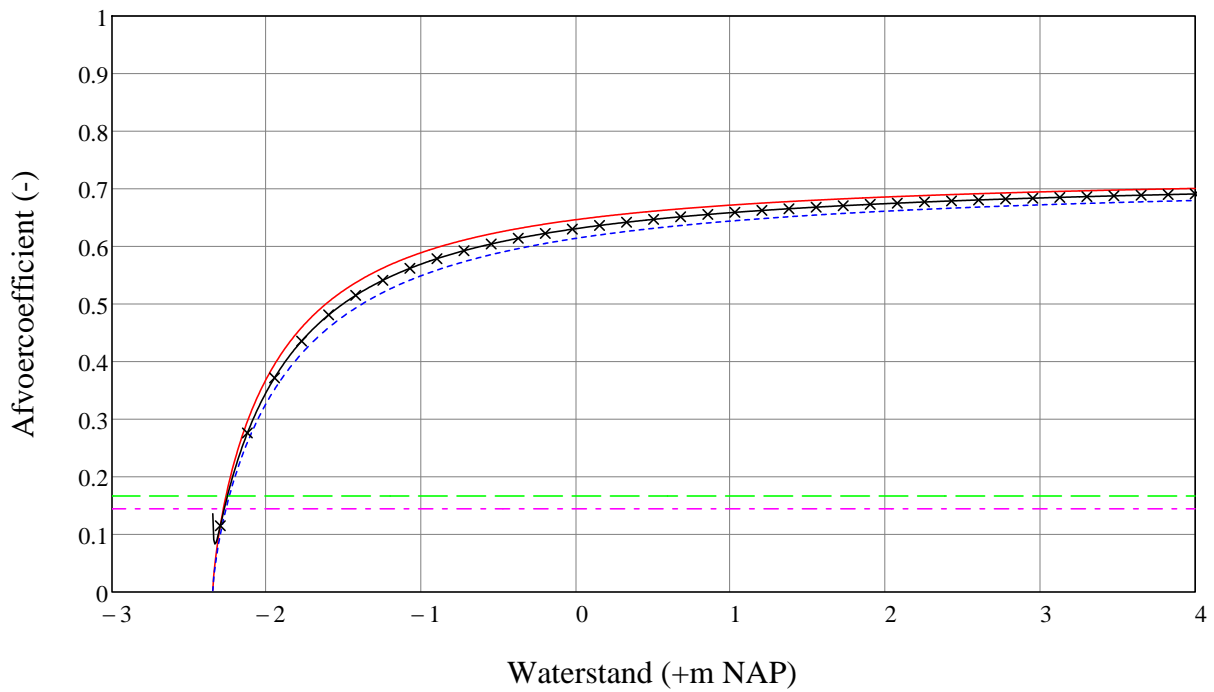


Westkolk | Beide kolken open

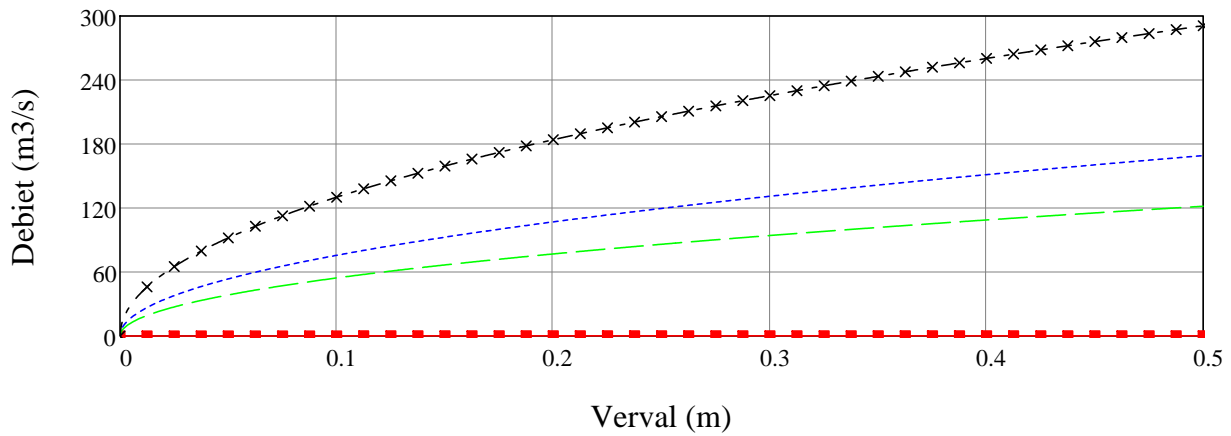


Westkolk | Alleen West open





- Afvoercoefficient Oostsluis
- - - Afvoercoefficient Westsluis
- - - Afvoercoefficient spuirool Oostsluis
- - - Afvoercoefficient spuirool Westsluis
- *** Afvoercoefficient Prins Bernhardsluizen



- ■ ■ Debiet door de spuiroolen
- - - Debiet door Oostsluis
- - - Debiet door Westsluis
- *** Totaal debiet over complex

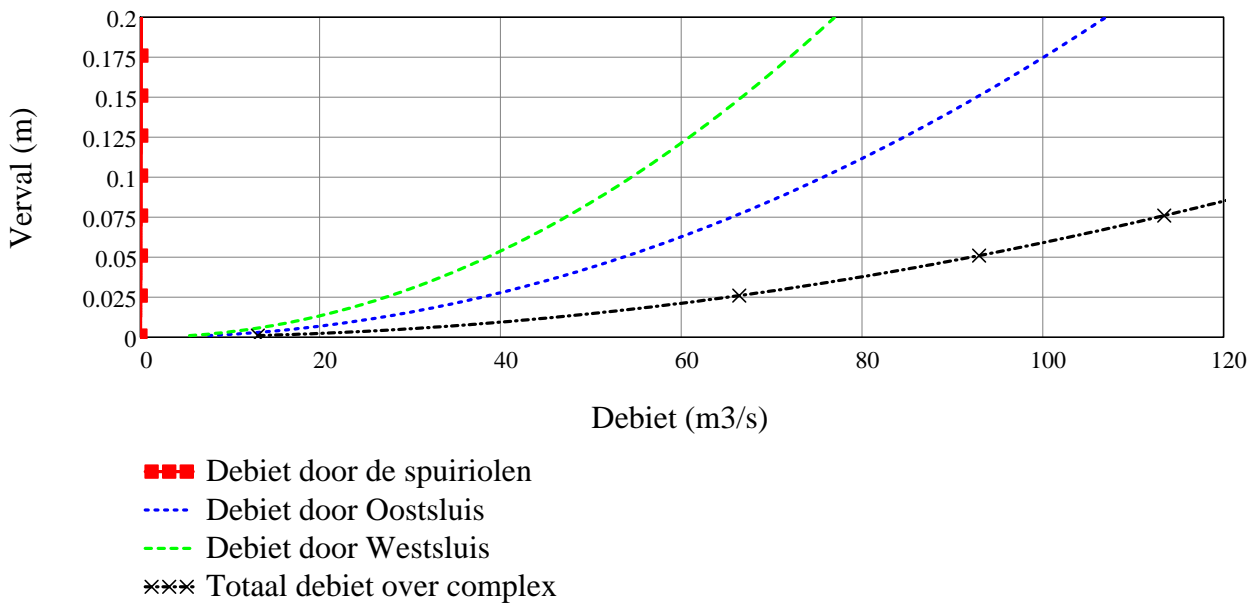
$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_Q) := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(\text{Data}_Q) \\ \quad A_{1,i} \leftarrow \text{Data}_{Q_{i,1}} \\ \quad A_{2,i} \leftarrow \Delta h \left(\text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot m, \text{Data}_{Q_{i,1}} \cdot \frac{m^3}{s}, 1, 1 \right) \cdot m^{-1} \\ \quad A_{3,i} \leftarrow \mu_{\text{tot}}(A_{2,i}, \text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot m) \\ \quad A \leftarrow A \end{cases}$$

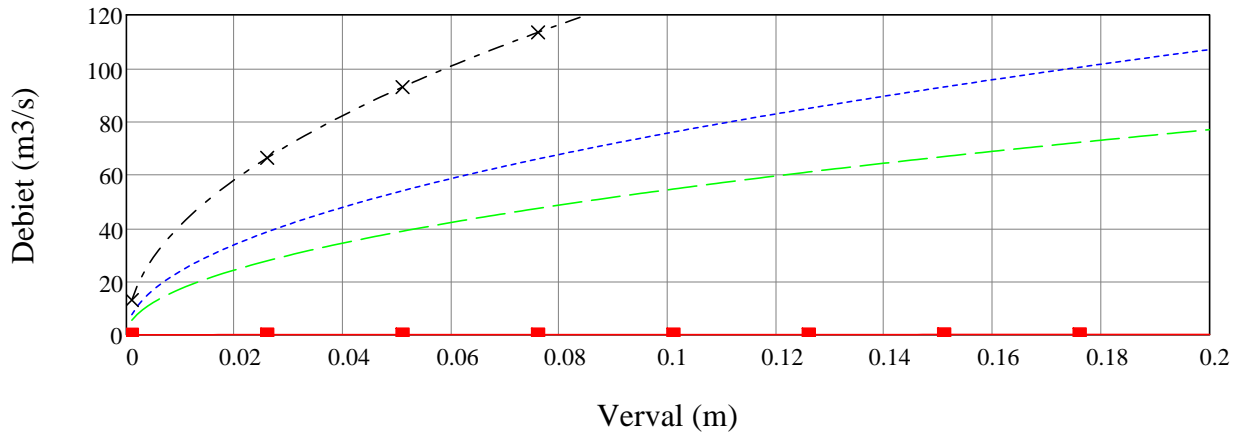
$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q600}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.00274 & 0.01142 & 0.02676 & 0.04991 \\ 0.66722 & 0.66612 & 0.66497 & 0.66362 \end{pmatrix}$$

$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q800}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.00217 & 0.00899 & 0.02097 & 0.03868 \\ 0.67334 & 0.67245 & 0.67153 & 0.67058 \end{pmatrix}$$

$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q1000}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.00178 & 0.00736 & 0.01703 & 0.0313 \\ 0.67805 & 0.6773 & 0.67665 & 0.67586 \end{pmatrix}$$

$$\Delta h_{\text{var}} := 0.001\text{m}, 0.002\text{m}.. 0.2\text{m}$$





- Debiet door de spuirolen
- - - Debiet door Oostsluis
- - - Debiet door Westsluis
- ××× Totaal debiet over complex

Project: Verkenning vergrote aanvoer water via BP-ARK onder droge omstandigheden
Project number ARCADIS: C03011.000580
Subject: Berekening Hydraulica Prinses Marijkesluizen & kering Ravenswaaij
Date: 23 november 2016

Prepared by: Henry Tuin
Checked by:
Released by: Arjan Tuijnder

Status: **Concept**

ORIGIN := 1 NAP := 0m B_{ARK} := 200m

Kenmerken sluiskolk Duwvaartsluis (Oostsluis)

$L_{OS} := 400\text{m}$ Lengte oostsluis (google maps)
 $B_{OS} := 18.02\text{m}$ Breedte oostsluis
 $d_{OS} := \text{NAP} - 2.35\text{m}$ Drempelhoogte oostsluis
 $A_{OS}(h_{ark}) := B_{OS} \cdot (h_{ark} - d_{OS})$ Natte doorsnede oostsluis
 $k_{OS} := 5\text{mm}$ Ruwheidshoogte beton (Nortier tabel 5.1)

Kenmerken sluiskolk C.A. (Westsluis)

$L_{WS} := 360\text{m}$ Lengte westsluis (google maps)
 $B_{WS} := 18.02\text{m}$ Breedte westsluis
 $d_{WS} := \text{NAP} - 2.35\text{m}$ Drempelhoogte westsluis
 $A_{WS}(h_{ark}) := B_{WS} \cdot (h_{ark} - d_{WS})$ Natte doorsnede westsluis
 $k_{WS} := 5\text{mm}$ Ruwheidshoogte beton (Nortier tabel 5.1)

Kenmerken Ravenswaaij

$L_{rav} := 360\text{m}$ Lengte Ravenswaaij (google maps)
 $B_{rav} := 80\text{m}$ Breedte te Ravenswaaij
 $d_{rav} := \text{NAP} - 2.35\text{m}$ Drempelhoogte te Ravenswaaij
 $A_{rav}(h_{ark}) := B_{rav} \cdot (h_{ark} - d_{rav})$ Natte doorsnede te Ravenswaaij
 $k_{rav} := 5\text{mm}$ Ruwheidshoogte gladgestreken aarde/breuksteen (Nortier tabel 5.1)

Afvoer door Duwvaartsluis

$$\xi_{\text{in}} := 0.8$$

Verliescoefficient voor instroom (Nortier paragraaf 7.2)

$$R_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{A_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}{B_{\text{os}} + 2 \cdot (h_{\text{ark}} - d_{\text{os}})}$$

Hydraulische straal

$$\text{Ch}(h_{\text{ark}}) := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}{k_{\text{os}}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda(h_{\text{ark}}) := \frac{8g}{\text{Ch}(h_{\text{ark}})^2}$$

Wrijvingsfactor (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{wr_os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{\lambda(h_{\text{ark}}) \cdot L_{\text{os}}}{4 \cdot R_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}$$

Verliescoefficient voor wrijving (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{uit}} := 1$$

Verlies voor uitstroom (Nortier paragraaf 4.8)

$$\xi_{\text{tot_os}}(h_{\text{ark}}) := \xi_{\text{in}} + \xi_{\text{uit}} + \xi_{\text{wr_os}}(h_{\text{ark}})$$

Totale verliescoefficient

$$c_{\text{ol_os}}(h_{\text{ark}}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_os}}(h_{\text{ark}})}}$$

Afvoercoefficient (Nortier paragraaf 4.15)

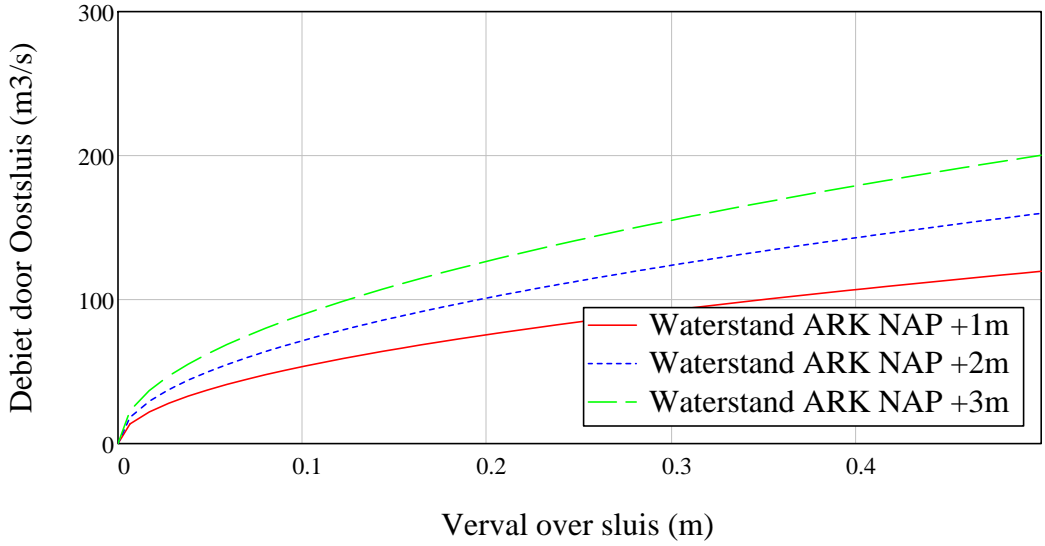
$$Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := c_{\text{ol_os}}(h_{\text{ark}}) \cdot A_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door sluis (Nortier formule 4.6)

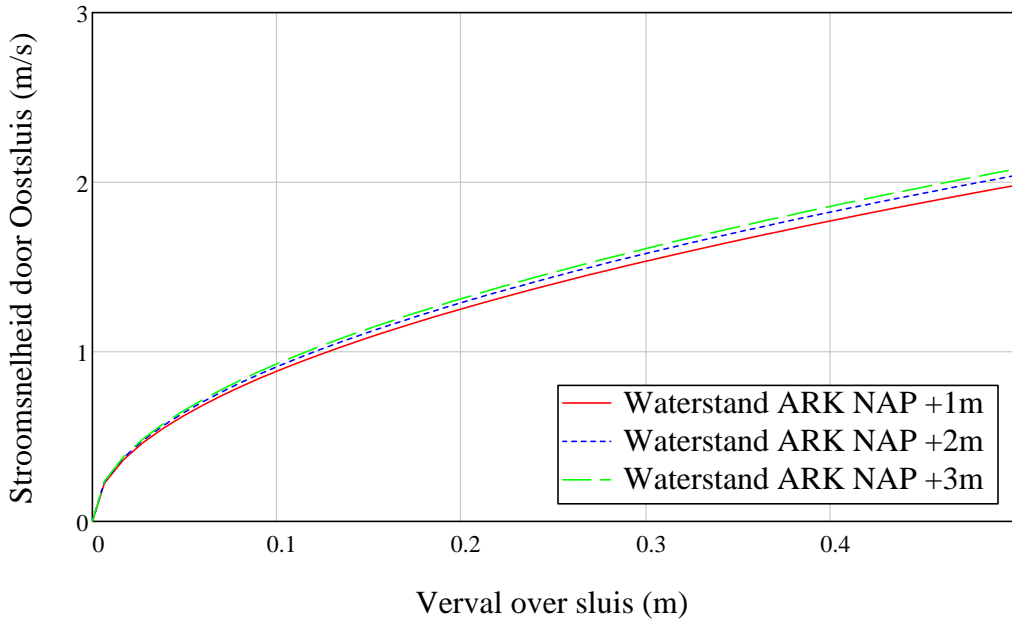
$$u_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := \frac{Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}})}{A_{\text{os}}(h_{\text{ark}})}$$

Profielgemiddelde stroomsnelheid in sluis

Debiet door oostsluis



Stroomsnelheid door Oostsluis



Afvoer door sluiskolk C.A. (Westsluis)

$$\xi_{in} := 0.8$$

Instroomverlies (Nortier paragraaf 7.2)

$$R_{ws}(h_{ark}) := \frac{A_{ws}(h_{ark})}{B_{ws} + 2 \cdot (h_{ark} - d_{ws})}$$

Hydraulische straal

$$Ch(h_{ark}) := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{ws}(h_{ark})}{k_{ws}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda(h_{ark}) := \frac{8g}{Ch(h_{ark})^2}$$

Wrijvingsfactor (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{wr_ws}(h_{ark}) := \frac{\lambda(h_{ark}) \cdot L_{ws}}{4 \cdot R_{ws}(h_{ark})}$$

Verliescoëfficiënt voor wrijving (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{uit} := 1$$

Verlies voor uitstroom (Nortier paragraaf 4.8)

$$\xi_{tot_ws}(h_{ark}) := \xi_{in} + \xi_{uit} + \xi_{wr_ws}(h_{ark})$$

Totale verliescoëfficiënt

$$c_{ol_ws}(h_{ark}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{tot_ws}(h_{ark})}}$$

Afvoercoëfficiënt (Nortier paragraaf 4.15)

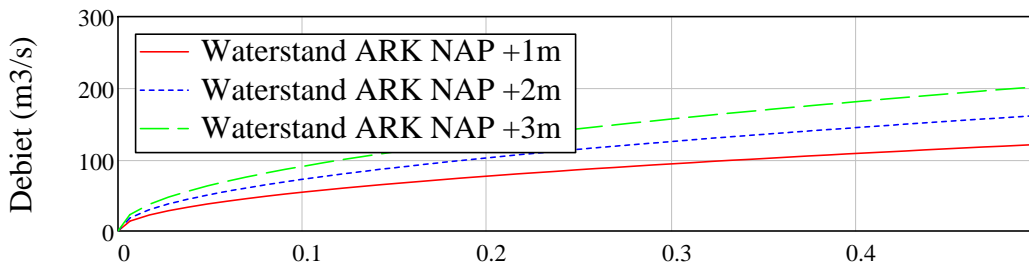
$$Q_{ws}(\Delta h, h_{ark}) := c_{ol_ws}(h_{ark}) \cdot A_{ws}(h_{ark}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door sluis (Nortier formule 4.6)

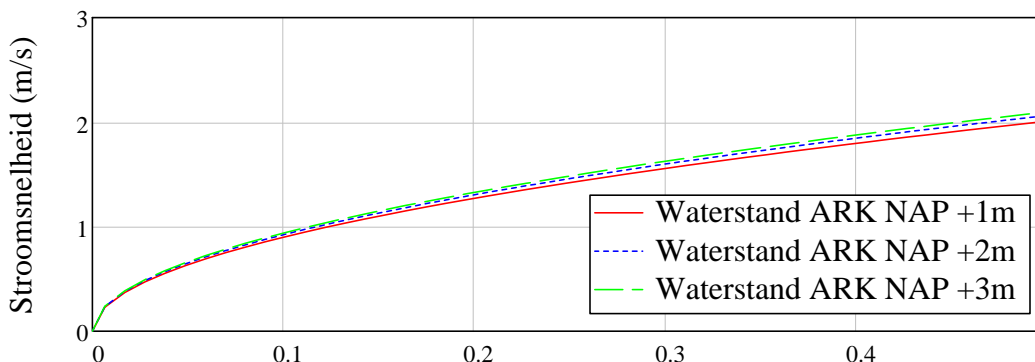
$$u_{ws}(\Delta h, h_{ark}) := \frac{Q_{ws}(\Delta h, h_{ark})}{A_{ws}(h_{ark})}$$

Profielgemiddelde stroomsnelheid door sluis

Debiet door Westsluis



Snelheid door Westsluis



Verval over sluis (m)

Afvoer door Ravenswaaij

$$\xi_{\text{in}} := 0.8$$

$$R_{\text{rav}}(h_{\text{ark}}) := \frac{A_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})}{B_{\text{rav}} + 2 \cdot (h_{\text{ark}} - d_{\text{rav}})}$$

Hydraulische straal

$$Ch(h_{\text{ark}}) := 5.75 \cdot \sqrt{g} \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})}{k_{\text{rav}}}\right)$$

Chezy ruwheid (Nortier paragraaf 5.5)

$$\lambda(h_{\text{ark}}) := \frac{8g}{Ch(h_{\text{ark}})^2}$$

Wrijvingsfactor (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{wr_rav}}(h_{\text{ark}}) := \frac{\lambda(h_{\text{ark}}) \cdot L_{\text{rav}}}{4 \cdot R_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})}$$

Verliescoefficient voor wrijving (Nortier paragraaf 4.2)

$$\xi_{\text{uit}}(h_{\text{ark}}) := \left[1 - \frac{A_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})}{B_{\text{ARK}} \cdot (h_{\text{ark}} - d_{\text{rav}})}\right]^2$$

$$\xi_{\text{uit}}(2\text{m}) = 0.36$$

$$\xi_{\text{tot_rav}}(h_{\text{ark}}) := \xi_{\text{in}} + \xi_{\text{uit}}(h_{\text{ark}}) + \xi_{\text{wr_rav}}(h_{\text{ark}})$$

Totale verliescoefficient

$$c_{\text{ol_rav}}(h_{\text{ark}}) := \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot_rav}}(h_{\text{ark}})}}$$

Afvoercoefficient (Nortier paragraaf 4.15)

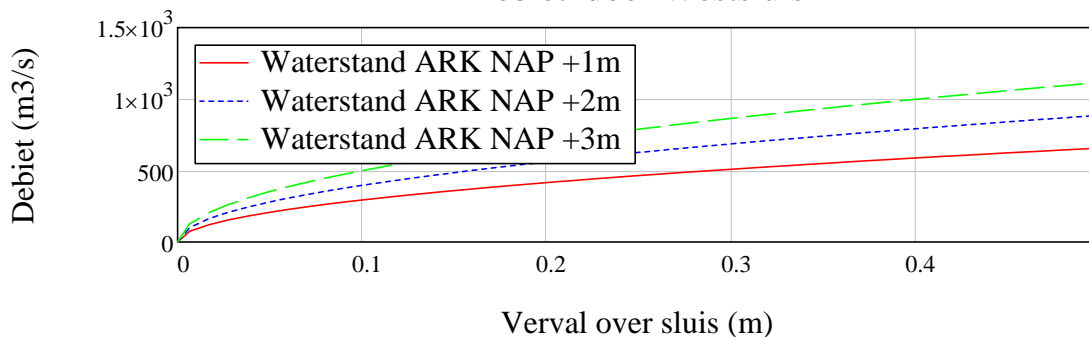
$$Q_{\text{rav}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := c_{\text{ol_rav}}(h_{\text{ark}}) \cdot A_{\text{rav}}(h_{\text{ark}}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Debiet door sluis (Nortier formule 4.6)

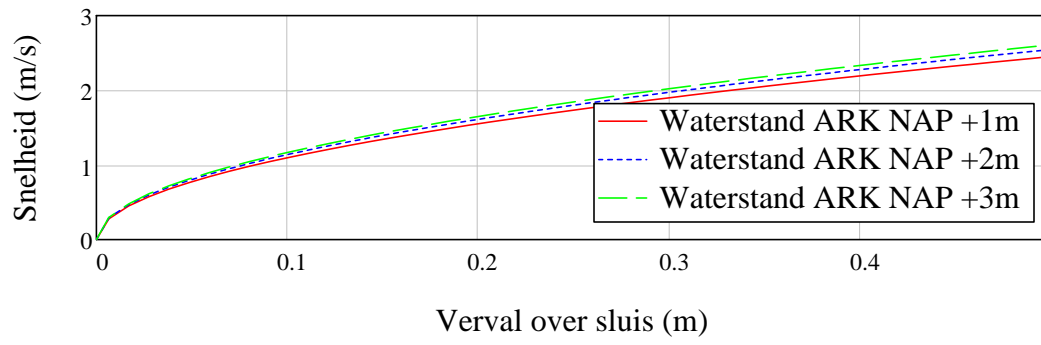
$$u_{\text{rav}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := \frac{Q_{\text{rav}}(\Delta h, h_{\text{ark}})}{A_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})}$$

Profielgemiddelde stroomsnelheid door sluis

Debiet door Westsluis



Snelheid door Westsluis



Totaal stroming door Prins Bernhardsluizen

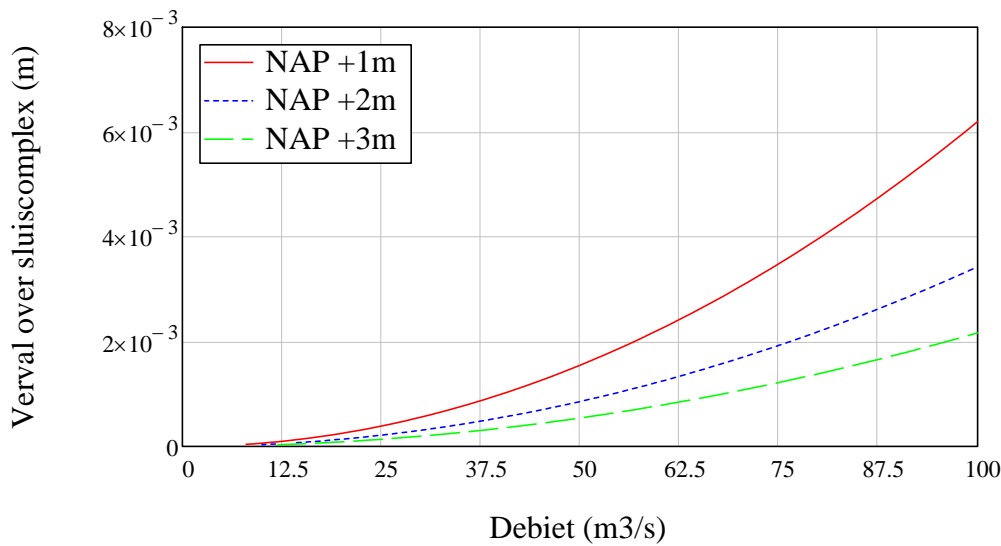
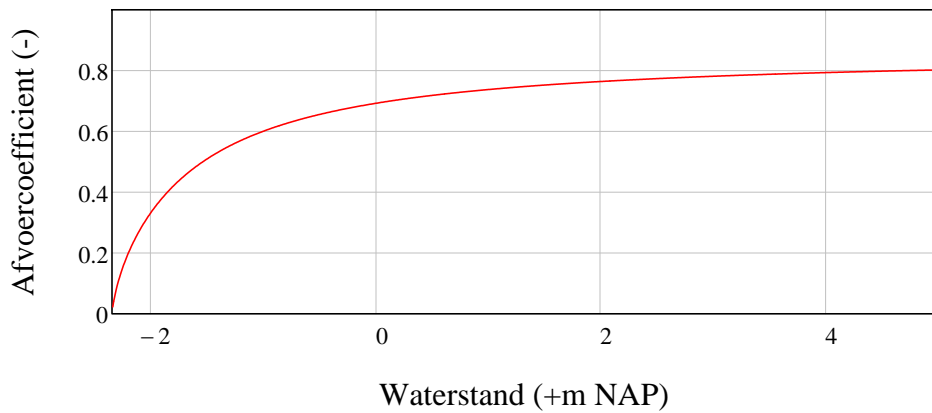
$$Q_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := Q_{\text{rav}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) + Q_{\text{ws}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) + Q_{\text{os}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) \quad \text{Debiet door de Prins Bernhardsluizen}$$

$$\Delta h_{\text{guess}} := 0.01\text{m}$$

$$\Delta h(h_{\text{ark}}, Q_{\text{ARK}}) := \text{root}(Q_{\text{tot}}(\Delta h_{\text{guess}}, h_{\text{ark}}) - Q_{\text{ARK}}, \Delta h_{\text{guess}}) \quad \text{Verval over de sluis als functie van debiet}$$

$$\mu_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}}) := \frac{Q_{\text{tot}}(\Delta h, h_{\text{ark}})}{(A_{\text{ws}}(h_{\text{ark}}) + A_{\text{os}}(h_{\text{ark}}) + A_{\text{rav}}(h_{\text{ark}})) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}} \quad \text{Bepaling van de afvoercoefficient voor totaal complex}$$

$$Q_{\text{var}} := 1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, 2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \dots 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Voor drie scenario's zijn voor enkele debieten in Sobek de waterstand bij de sluis bepaald. Onderstaand wordt de debiet met de bijbehorende waterstand ingeladen.

$$\text{Data}_{Q600} := \begin{pmatrix} 25 & 1.49 \\ 50 & 1.42 \\ 75 & 1.35 \\ 100 & 1.27 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_{Q800} := \begin{pmatrix} 25 & 1.93 \\ 50 & 1.86 \\ 75 & 1.79 \\ 100 & 1.72 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_{Q1000} := \begin{pmatrix} 25 & 2.34 \\ 50 & 2.27 \\ 75 & 2.21 \\ 100 & 2.14 \end{pmatrix}$$

$$\text{Data}_Q := \text{Data}_{Q600} \cdot \frac{\langle 1 \rangle^T \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\text{s}} = (25 \ 50 \ 75 \ 100) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Uitlezen data voor de model-afvoeren

$$\text{Data}_{h600} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q600} \cdot \langle 2 \rangle^T \cdot \text{m} = (1.49 \ 1.42 \ 1.35 \ 1.27) \text{m}$$

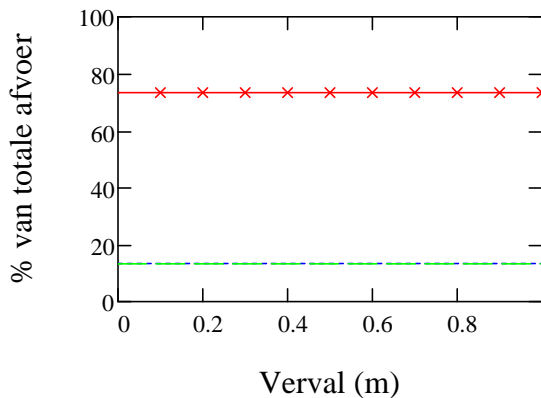
Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q600

$$\text{Data}_{h800} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q800} \cdot \langle 2 \rangle^T \cdot \text{m} = (1.93 \ 1.86 \ 1.79 \ 1.72) \text{m}$$

Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q800

$$\text{Data}_{h1000} := \text{NAP} + \text{Data}_{Q1000} \cdot \langle 2 \rangle^T \cdot \text{m} = (2.34 \ 2.27 \ 2.21 \ 2.14) \text{m}$$

Uitlezen data voor waterstanden voor scenario Q1000



Debiet door kolken

$$\frac{Q_{ws}(0.1\text{m}, 2\text{m})}{Q_{tot}(0.1\text{m}, 2\text{m})} + \frac{Q_{os}(0.1\text{m}, 2\text{m})}{Q_{tot}(0.1\text{m}, 2\text{m})} = 26.6280805\%$$

De kolken trekken maar een beperkt deel van het totaal. Ca. 75% stroomt door de kering.

- *** Bijdrage van spuirollen
- Bijdrage van Westkolk
- Bijdrage van Oostkolk

Totale debiet door Prins Bernhardsluizen. De variabelen X_{ws} en X_{os} zijn opgenomen om de sluis mee te rekenen of juist niet mee te rekenen. De waarde van X_{ws} en X_{os} is gelijk aan 1 (opnemen in de berekening) of 0 (niet opnemen in de berekening)

$$Q_{tot}(\Delta h, h_{ark}, X_{rav}, X_{ws}, X_{os}) := X_{rav} \cdot Q_{rav}(\Delta h, h_{ark}) + X_{ws} \cdot Q_{ws}(\Delta h, h_{ark}) + X_{os} \cdot Q_{os}(\Delta h, h_{ark})$$

Het verval over de Prins Bernhardsluizen wordt berekend voor een debiet Q_{ARK} . De vergelijking wordt impliciet opgelost.

$$\Delta h(h_{ark}, Q_{ARK}, X_{rav}, X_{ws}, X_{os}) := \text{root}(Q_{tot}(\Delta h_{guess}, h_{ark}, X_{rav}, X_{ws}, X_{os}) - Q_{ARK}, \Delta h_{guess})$$

In onderstaande loop wordt voor de volgende scenario's de stroming door de kolken berekend:

- Westkolk en Oostkolk open
- Oostkolk open
- Westkolk open.

De berekening wordt gemaakt voor Q600, Q800 en Q1000.

$$\text{Naamgeving} := \begin{pmatrix} \text{"Debiet ARK"} \\ \text{"Waterstand sluis (+m NAP)} \\ \text{"Verval over complex (m)} \\ \text{"Storming door Ravenswaaij (m/s)} \\ \text{"Stroming door Oostsluis (m/s)} \\ \text{"Stroming door Westsluis (m/s)} \end{pmatrix}$$

Een matrix met de naamgeving van de resultaten wordt aangemaakt. Deze naamgeving wordt gekoppeld aan de tabel met resultaten.

Na het resultaat met de storming door de kolk wordt o.b.v. de storming het debiet door de kolk berekend. Dit is een check. Het berekende debiet moet gelijk zijn aan de invoerresultaten opgenomen in de eerste kolom.

$$R_Q(\text{Data}_Q) := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{Data}_Q) \\ \left| \begin{array}{l} A_{i+1,1} \leftarrow \text{Data}_{Q_{i,1}} \\ A_{i+1,2} \leftarrow \text{Data}_{Q_{i,2}} \\ A_{i+1,3} \leftarrow \Delta h \left[\text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m}, \text{Data}_{Q_{(i,1)}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, 1, 1, 1 \right] \cdot \text{m}^{-1} \\ A_{i+1,4} \leftarrow u_{\text{rav}} \left(A_{i+1,3} \cdot \text{m}, \text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m} \right) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{-1} \\ A_{i+1,5} \leftarrow u_{\text{os}} \left(A_{i+1,3} \cdot \text{m}, \text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m} \right) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{-1} \\ A_{i+1,6} \leftarrow u_{\text{ws}} \left(A_{i+1,3} \cdot \text{m}, \text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m} \right) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{-1} \end{array} \right. \\ \text{for } j \in 1 \dots \text{rows}(\text{Naamgeving}) \\ A_{1,j} \leftarrow \text{Naamgeving}_j \\ A \leftarrow A \end{array}$$

$$R_Q(\text{Data}_{Q600})^T = \begin{pmatrix} \text{"Debiet ARK"} & 25 & 50 & 75 & 100 \\ \text{"Waterstand sluis (+m NAP)} & 1.49 & 1.42 & 1.35 & 1.27 \\ \text{"Verval over complex (m)} & 2.835 \times 10^{-4} & 1.183 \times 10^{-3} & 2.777 \times 10^{-3} & 5.188 \times 10^{-3} \\ \text{"Storming door Ravenswaaij (m/s)} & 0.06 & 0.121 & 0.186 & 0.253 \\ \text{"Stroming door Oostsluis (m/s)} & 0.048 & 0.098 & 0.149 & 0.204 \\ \text{"Stroming door Westsluis (m/s)} & 0.049 & 0.099 & 0.151 & 0.206 \end{pmatrix}$$

$$R_Q(\text{Data}_{Q800})^T = \begin{pmatrix} \text{"Debiet ARK"} & 25 & 50 & 75 & 100 \\ \text{"Waterstand sluis (+m NAP)} & 1.93 & 1.86 & 1.79 & 1.72 \\ \text{"Verval over complex (m)} & 2.22 \times 10^{-4} & 9.216 \times 10^{-4} & 2.153 \times 10^{-3} & 3.978 \times 10^{-3} \\ \text{"Storming door Ravenswaaij (m/s)} & 0.054 & 0.109 & 0.166 & 0.225 \\ \text{"Stroming door Oostsluis (m/s)} & 0.043 & 0.087 & 0.133 & 0.181 \\ \text{"Stroming door Westsluis (m/s)} & 0.043 & 0.088 & 0.135 & 0.183 \end{pmatrix}$$

$$R_Q(\text{Data}_{Q1000})^T = \begin{pmatrix} \text{"Debiet ARK"} & 25 & 50 & 75 & 100 \\ \text{"Waterstand sluis (+m NAP)"} & 2.34 & 2.27 & 2.21 & 2.14 \\ \text{"Verval over complex (m)"} & 1.81 \times 10^{-4} & 7.488 \times 10^{-4} & 1.734 \times 10^{-3} & 3.192 \times 10^{-3} \\ \text{"Storming door Ravenswaaij (m/s)"} & 0.049 & 0.099 & 0.151 & 0.204 \\ \text{"Stroming door Oostsluis (m/s)"} & 0.039 & 0.079 & 0.121 & 0.163 \\ \text{"Stroming door Westsluis (m/s)"} & 0.04 & 0.08 & 0.122 & 0.165 \end{pmatrix}$$

De maximale langsstroming in RVW 2011 is gesteld op $u_{\max} := 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Zie hiervoor onderstaande passage uit RVW 2011

3.3.4 Langsstroming

De richtlijnen zijn bedoeld voor vaarwegen zonder stroom of met lage langsstroomsnelheden. In het algemeen is op de vaarweg geen grotere langsstroming dan 0,5 m/s gemiddeld over het dwarsprofiel toelaatbaar. Deze waarde is afgestemd op de situatie bij bruggen, scherpe bochten, manoeuvreerplaatsen, splitsingspunten en dergelijke. Afvarende schepen hebben in bochten bij langsstroming meer breedte nodig, opvarende schepen weer minder. Bij een langsstroming van meer dan 0,5 m/s bij beroepsvaart is het nodig nader onderzoek uit te voeren. Deze aanbeveling geldt zowel voor bochten als voor rechtstanden, kanalen en rivieren.

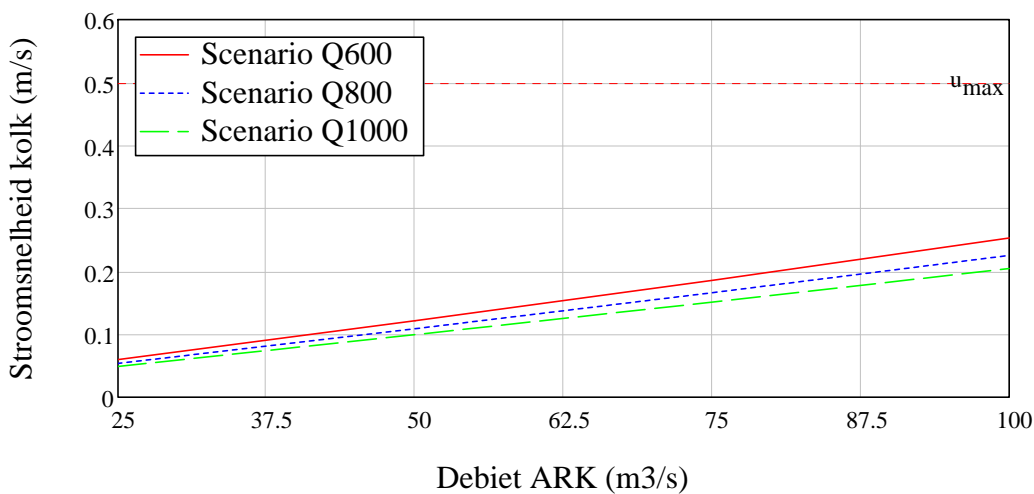
Ook bij bruggen en keersluizen mag de langsstroomsnelheid, gemiddeld over het natte dwarsprofiel, niet meer bedragen dan 0,5 m/s. Als de snelheid hoger is, dan moet het dwarsprofiel worden verwijd of moet een andere oplossing worden gezocht om zeker te stellen dat het maatgevende schip tegenstrooms voldoende vermogen heeft om de lokale stroomsnelheden te overwinnen en voorstrooms voldoende manoeuvreerbaar te zijn.

Voor de recreatievaart zijn ter plaatse van vernauwingen stroomsnelheden tot 0,8 m/s aanvaardbaar, mits boven- en benedenstrooms van de vernauwing tenminste 50 m rechte vaarweg aanwezig is.

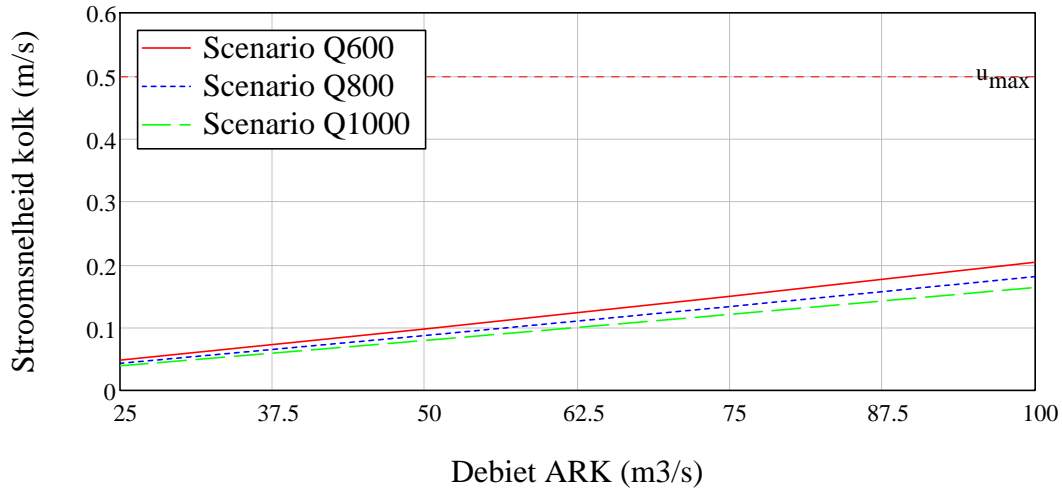
Bij schutsluizen kan het uit waterhuishoudkundig oogpunt nodig zijn om regelmatig of incidenteel water te spuien. De omloopriolen moeten zodanig ontworpen zijn, dat het schutbedrijf tijdens het spuien zonder grote bezwaren door kan gaan.

$$u_{\max} := 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

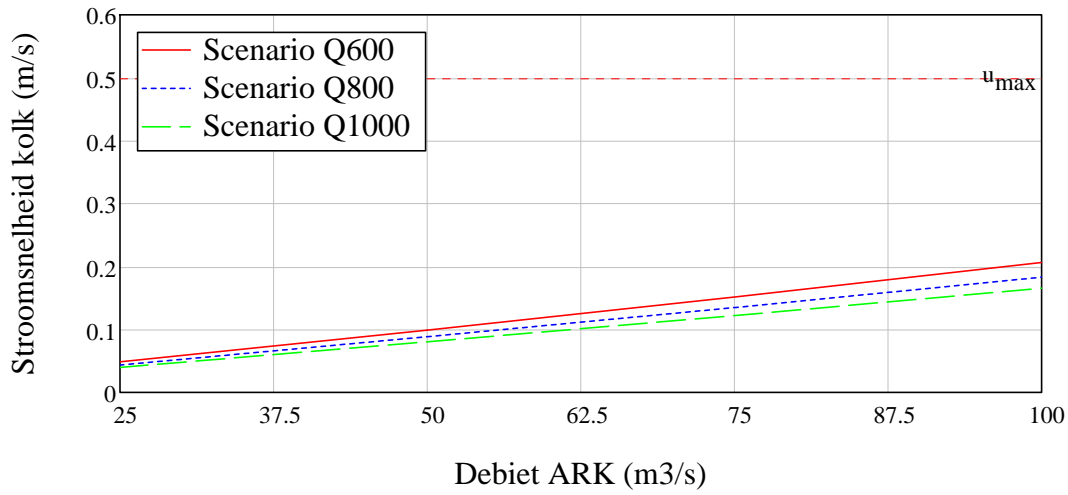
Doorvaart Ravenswaaij | Sluiskolken & kering open

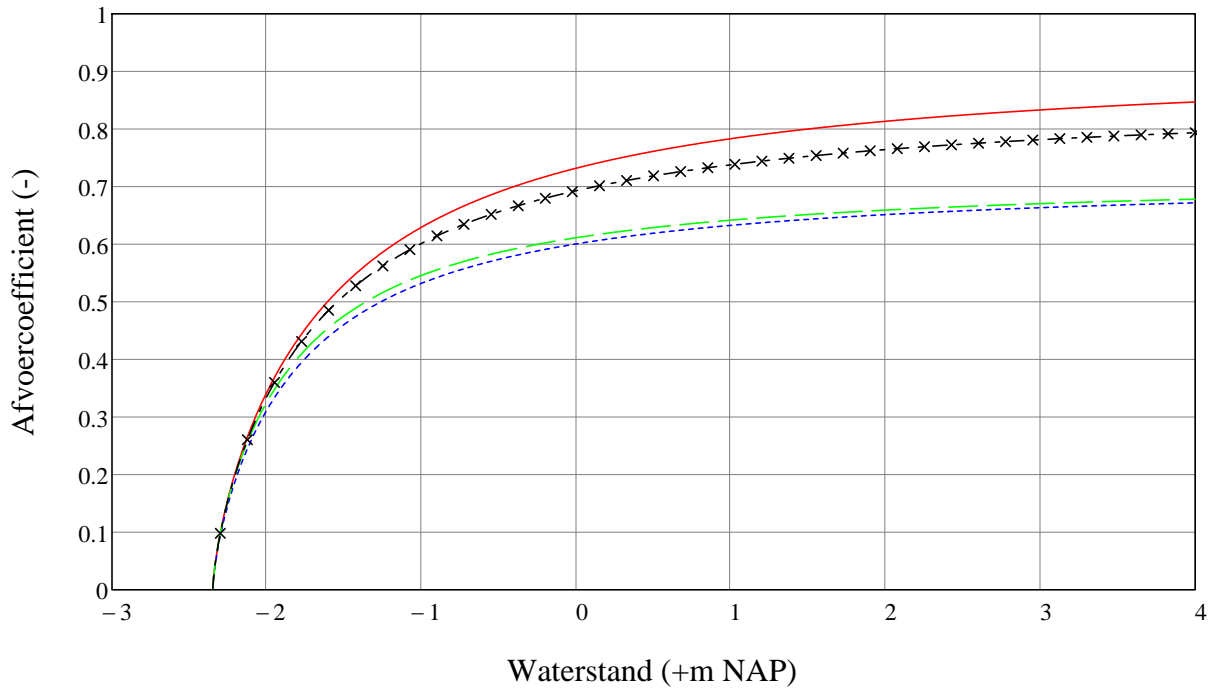


Oostelijke kolk Marijkesluizen | Sluiskolken & kering open

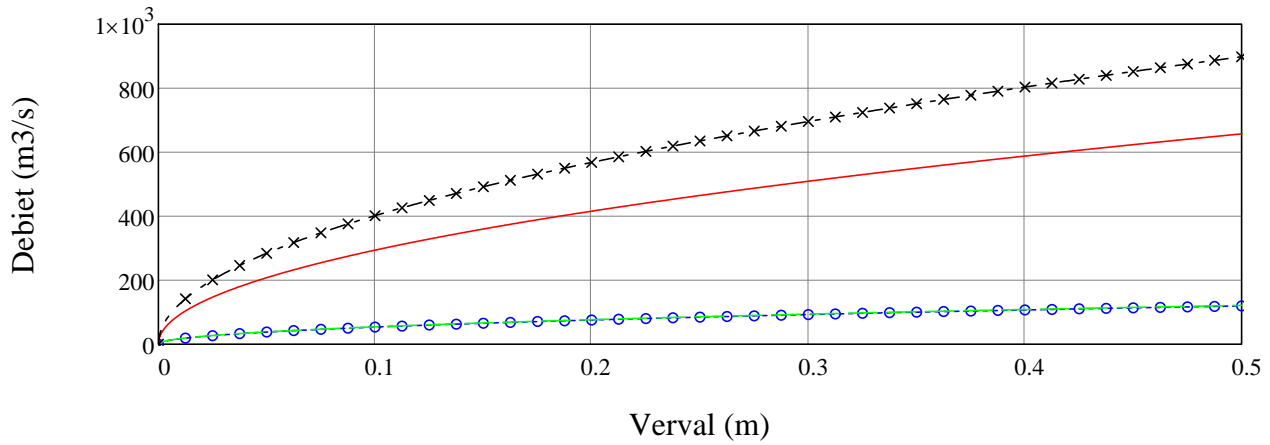


Westelijke kolk Marijkesluizen | Sluiskolken & kering open





- Afvoercoëfficiënt Ravenswaaij
- - - Afvoercoëfficiënt Oostsluis
- - - Afvoercoëfficiënt Westsluis
- *** Afvoercoëfficiënt Marijkesluizen & kering Ravenswaaij



- Debiet door Ravenswaaij
- ○ Debiet door Oostsluis
- - - Debiet door Westsluis
- *** Afvoercoëfficiënt Marijkesluizen & kering Ravenswaaij

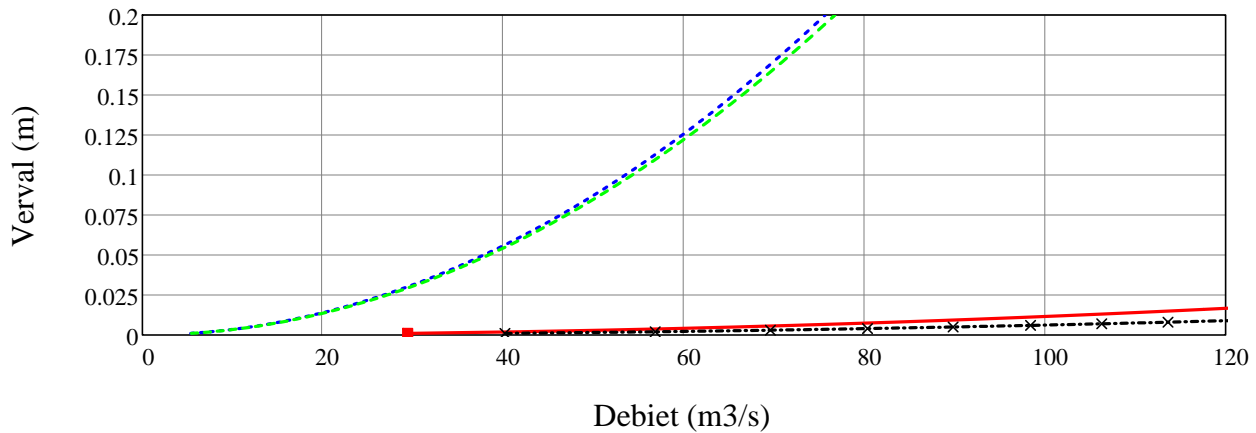
$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_Q) := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(\text{Data}_Q) \\ \left| \begin{array}{l} A_{1,i} \leftarrow \text{Data}_{Q_{i,1}} \\ A_{2,i} \leftarrow \Delta h \left(\text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m}, \text{Data}_{Q_{i,1}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, 1, 1, 1 \right) \cdot \text{m}^{-1} \cdot 1000 \\ A_{3,i} \leftarrow \mu_{\text{tot}}(A_{2,i}, \text{Data}_{Q_{i,2}} \cdot \text{m}) \end{array} \right. \\ A \leftarrow A \end{cases}$$

$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q600}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.284 & 1.183 & 2.777 & 5.188 \\ 0.752 & 0.75 & 0.749 & 0.746 \end{pmatrix}$$

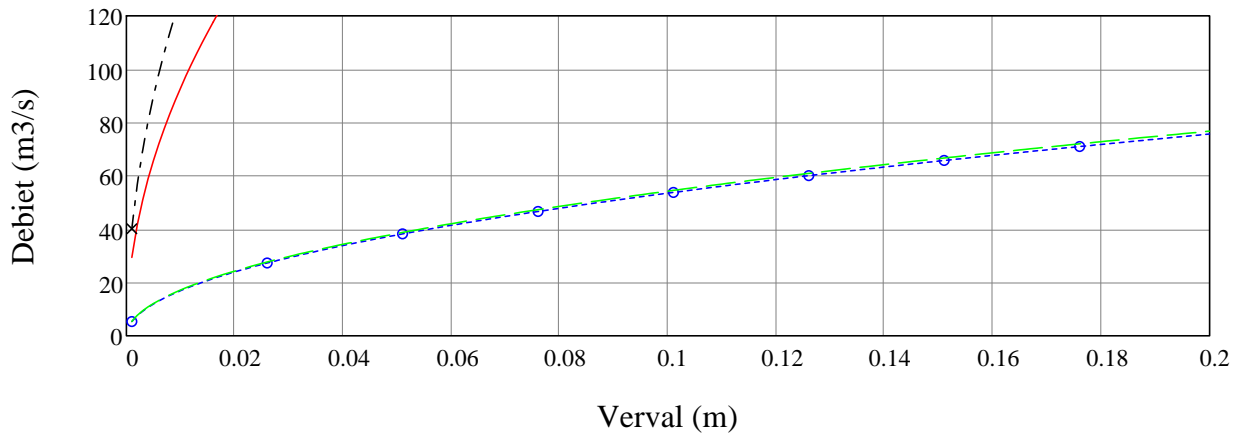
$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q800}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.222 & 0.922 & 2.153 & 3.978 \\ 0.763 & 0.761 & 0.76 & 0.758 \end{pmatrix}$$

$$\text{Res}_{\text{mod}}(\text{Data}_{Q1000}) = \begin{pmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0.181 & 0.749 & 1.734 & 3.192 \\ 0.771 & 0.77 & 0.768 & 0.767 \end{pmatrix}$$

$$\Delta h_{\text{var}} := 0.001\text{m}, 0.002\text{m}.. 0.2\text{m}$$



- ■ ■ Debiet door Ravenswaaij
- · · · Debiet door Oostsluis
- - - - Debiet door Westsluis
- × × × Totaal debiet over complex



- Debiet door Ravenswaaij
- ○ Debiet door Oostsluis
- Debiet door Westsluis
- × × × Debiet Marijkesluizen & kering Ravenswaaij

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com

Onze referentie: 079151241 0.27