



Stroming rond Sluis 0

Hydrodynamische analyse

Inter Contracting

5 mei 2020

Project Stroming rond Sluis 0
Opdrachtgever Inter Contracting

Document Hydrodynamische analyse
Status Definitief
Datum 5 mei 2020
Referentie 118399/20-007.040

Projectcode 118399
Projectleider ir. M.H.P.Jansen
Projectdirecteur ir. R. Bouw

Auteur(s) ir. S.J.H.A. Gradussen
Gecontroleerd door ir. A.L. De Jongste
Goedgekeurd door ir. M.H.P. Jansen

Paraaf 

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Blaak 16
Postbus 2397
3000 CJ Rotterdam
+31 (0)10 244 28 00
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|------|---|-----------|
| 1 | INLEIDING | 5 |
| 2 | ANALYSE BESCHIKBARE DATA SPUIDEBIETEN | 6 |
| 2.1 | Inleiding | 6 |
| 2.2 | Validatie van de data | 6 |
| 2.3 | Analyse data | 7 |
| | 2.3.1 Seizoenafhankelijke variatie | 7 |
| | 2.3.2 Overschrijdingspercentages | 9 |
| 3 | STROOMVELDEN EN -SNELHEDEN RONDOM SLUIS 0 | 11 |
| 3.1 | Inleiding | 11 |
| 3.2 | Uitgangspunten | 11 |
| 3.3 | Nivelleren van de sluis | 12 |
| 3.4 | Methodiek | 13 |
| | 3.4.1 Toetsing toelaatbare stroomsnelheden | 14 |
| | 3.4.2 Indicatieve bodembescherming | 17 |
| 3.5 | Segment 1 | 18 |
| | 3.5.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet | 18 |
| | 3.5.2 Indicatieve bodembescherming | 19 |
| 3.6 | Segment 2 | 21 |
| | 3.6.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet | 21 |
| | 3.6.2 Indicatieve bodembescherming | 23 |
| 3.7 | Segment 3 | 23 |
| | 3.7.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet | 24 |
| | 3.7.2 Indicatieve bodembescherming | 26 |
| 3.8 | Segment 4 | 26 |
| | 3.8.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet | 26 |
| | 3.8.2 Indicatieve bodembescherming | 28 |
| 3.9 | Conclusie: toelaatbare afvoeren voor recreatievaart | 28 |
| 3.10 | Conclusie: gevaar voor drenkelingen | 30 |
| 3.11 | Conclusie: indicatieve bodembescherming | 31 |

| | | |
|-------|---|------------------------|
| 4 | STROOMVELDEN EN -SNELHEDEN RONDOM DE ORTHENBRUG EN KASTERENBRUG | 32 |
| 4.1 | Uitgangspunten | 32 |
| 4.2 | Orthenbrug | 33 |
| 4.2.1 | Stroomveld en toelaatbaar debiet | 34 |
| 4.2.2 | Indicatieve bodembescherming | 35 |
| 4.3 | Kasterenbrug | 36 |
| 4.3.1 | Stroomveld en toelaatbaar debiet | 36 |
| 4.3.2 | Indicatieve bodembescherming | 37 |
| 5 | DISCUSSIE | 39 |
| 5.1 | Dataset spuidebieten | 39 |
| 5.2 | Aannames hydraulische belasting | 39 |
| 5.2.1 | Stroming | 39 |
| 5.2.2 | Translatiegolven | 39 |
| 5.3 | Indicatieve bodembescherming | 40 |
| 6 | CONCLUSIE | 41 |
| 6.1 | Sluis 0 | 41 |
| 6.2 | Orthenbrug en Kasterenbrug | 43 |
| 6.3 | Opmerkingen over positie steiger | 43 |
| 7 | REFERENTIES | 45 |
| | Laatste pagina | 45 |
| | Bijlage(n) | Aantal pagina's |
| I | Jaarlijkse statistiek | 3 |
| II | Uitleestabellen met overschrijdingspercentages | 16 |
| III | Uitleestabellen met het aantal dagen passende bij spuidebieten en overschrijdingsduren in vaarseizoen | 2 |
| IV | Analytische uitwerking nivelleerdebiet | 2 |

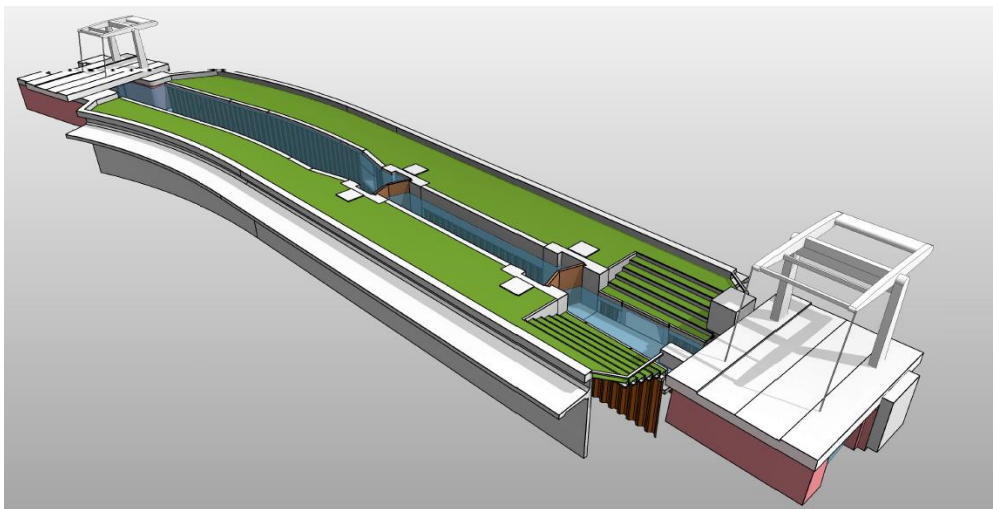
1

INLEIDING

In de afgelopen jaren heeft Sluis 0 in 's-Hertogenbosch haar functie verloren voor de binnenvaart. Daarom is het plan ontwikkeld om de sluis, en haar directe omgeving, te gaan herbestemmen. De functie voor recreatievaart zal behouden blijven. De kolk zal verkleind worden waardoor er ruimte vrijkomt voor de aanleg van een stadspark. Het wordt hierdoor tevens mogelijk om vaker te schutten zodat het gebruik voor recreatievaart wordt vergroot indien er bovenstrooms van Sluis 0 voldoende water beschikbaar is. Op deze manier wordt gestreefd naar het creëren van een aantrekkelijk verblijfsgebied in de binnenstad.

In het vernieuwde sluiscomplex zullen 2 spuibuizen worden geïntegreerd. Deze spuibuizen dragen bij aan het peilbeheer in de Zuid-Willemsvaart en het Maximákanaal. Hiervoor is het van belang om onafhankelijk van de schutsluis te kunnen spuien door de spuibuizen. Het voorontwerp voor het sluiscomplex Sluis 0 is weergegeven in afbeelding 1.1.

Afbeelding 1.1 Voorontwerp voor het complex Sluis 0



Om inzicht te krijgen in de stroming in en rondom de sluis is allereerst een analyse uitgevoerd naar de optredende debieten in historische data. Op basis hiervan is de stroming in en rondom de sluis bepaald. Deze zijn vergeleken met de eisen met betrekking tot recreatievaart en veiligheid voor drenkelingen. In deze studie is gekozen voor een relatief lichte analysemethode: het intekenen van stroombanen in de ontwerptekeningen van het sluiscomplex. Deze vereenvoudigde aanpak volstaat dankzij de relatief eenvoudige geometrie. Daarnaast zal een globale indicatie worden gegeven van de benodigde bodembescherming.

Als onderdeel van Sluis 0, zullen ook de stroombanen en de benodigde bodembescherming rondom de Hinthamerbrug en de Anthoniebrug worden beschouwd met het oog op groot onderhoud. Binnen dit integrale project zijn ook de stroombanen en benodigde bodembescherming van 2 nabij gelegen bruggen bestudeerd: de Orthenbrug en de Kasterenbrug.

2

ANALYSE BESCHIKBARE DATA SPUIDEBIETEN

2.1 Inleiding

De nieuwe sluis moet via de spuikanalen debiet kunnen afvoeren. Door Rijkswaterstaat is een tijdreeks aangeleverd van de debieten bij het aflatwerk Poeldonk voor een tijdsdomein van 2 januari 2015 tot en met 27 november 2019 met een tijdsinterval van 10 minuten. Het aflatwerk Poeldonk ligt in het verlengde van Sluis 0 (afbeelding 2.1). Tussen Poeldonk en Sluis 0 bevinden zich geen onttrekkingen of lozingen. Deze data is gebruikt voor een statistische analyse voor de spuidebieten die kunnen optreden door het nieuwe sluiscomplex.

Afbeelding 2.1 Locatie Sluis 0 en Poeldonk. Bron: Google Earth



Voordat de data gebruikt kan worden, dient de data eerst gevalideerd te worden. Witteveen+Bos heeft dit in het verleden uitgevoerd [ref. 2]. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 5.1. De verkregen data is vervolgens geanalyseerd op basis van seizoenafhankelijkheid en herhaaltijden van spuidebieten om in de volgende hoofdstukken een indicatie te geven over de kans van voorkomen van bepaalde stromingscondities.

2.2 Validatie van de data

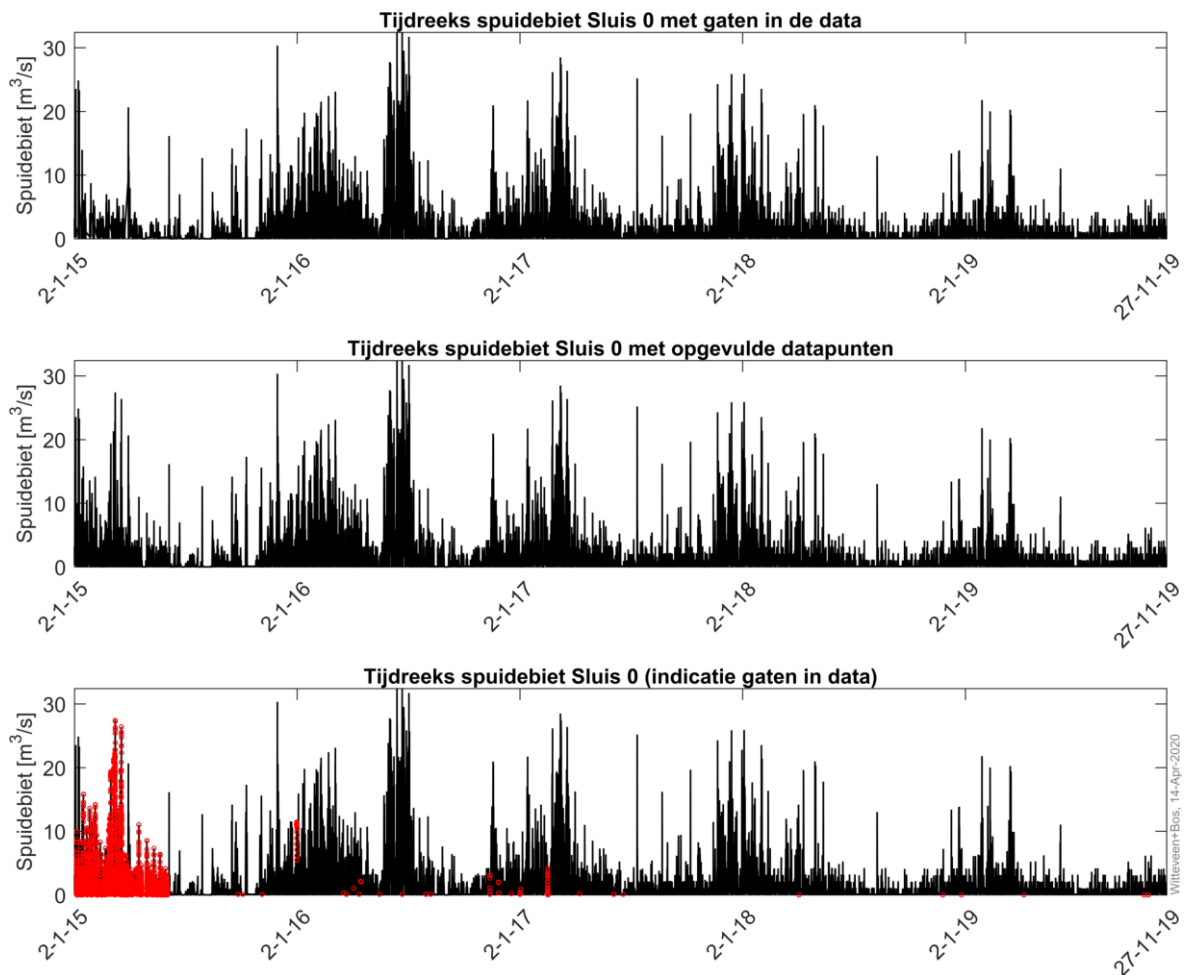
In de dataset komen negatieve waarden voor. De negatieve waarden in de dataset liggen dicht bij 0 en bedragen uiterlijk $-0,11 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is fysisch niet mogelijk omdat water maar 1 richting kan opstromen bij aflatwerk Poeldonk. Het wordt verondersteld dat deze waarden negatief zijn geworden door kleine

onnauwkeurigheden in de berekening of dataverwerking gezien de kleine afwijking van de 0. Deze negatieve waarden zijn daardoor vervangen door 0.

Een tweede complicatie is het ontbreken van datapunten in de dataset. Deze gaten in de dataset kunnen leiden tot een slechte representatie van de seizoenafhankelijke spuidebieten. Als de ontbrekende punten bijvoorbeeld in een droog seizoen vallen, zal de bijdrage van de afvoeren in een droog seizoen relatief worden onderschat. In totaal mist ongeveer 4,5 % van het totaal aantal datapunten. Het is opvallend dat de meeste gaten in de data voorkomen in het eerste jaar van de dataset: 2015.

Om de seizoenafhankelijkheid te waarborgen, zijn de lege datapunten vervangen door de spuidebieten die exact 2 jaar later voorkomen in de dataset. Aangezien het grootste deel van de ontbrekende punten in 2015 valt en 2017 een gemiddeld jaar is, is ervoor gekozen de lege punten uit 2015 vervangen met data van 2017. De verschillen tussen de datasets zijn te zien in afbeelding 2.2.

Afbeelding 2.2 Boven: de datareeks inclusief ontbrekende datapunten. Midden: De datareeks inclusief opgevulde datapunten
Onder: het verschil tussen de 2 reeksen (gaten in data) met rode markering aangeduid



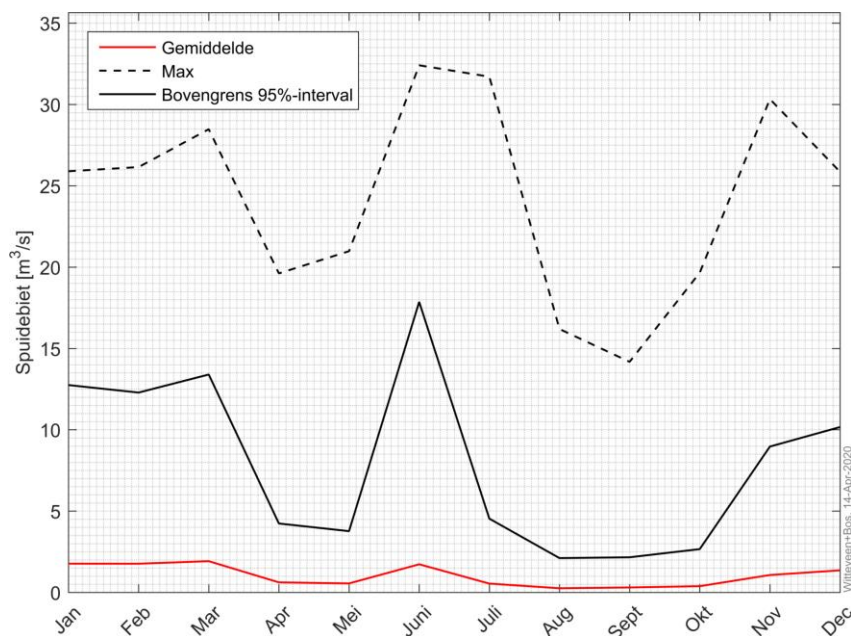
2.3 Analyse data

2.3.1 Seizoenafhankelijke variatie

In afbeelding 2.2 is af te lezen dat het spuidebiet sterk varieert over de seizoenen. Om inzicht te krijgen in de maandelijkse statistiek, is de dataset per maand geanalyseerd voor de 5 jaar aan beschikbare data. Hieruit is per maand een minimum, gemiddelde en maximum bepaald. Tevens is het 95 %-zekerheidsinterval afgeleid.

Dit laatste geeft de variatie aan spuidebieten weer waarbinnen 95 % van de datapunten valt. Het resultaat is weergegeven in afbeelding 2.3. De maandelijkse minima en de ondergrens van het 95 %-zekerheidsinterval liggen in elke maand dicht rond de 0. Daarom zijn deze niet weergegeven in afbeelding 2.3.

Afbeelding 2.3 Maandelijkse statistiek van de spuidebieten voor de jaren 2015-2019



In de winterperiode van november tot en met maart zijn de spuidebieten relatief hoog. Dit zijn de maanden met de meeste neerslag. Er is echter ook in juni een piek te vinden in het spuidebiet. In juni zijn tevens de meest extreme spuidebieten gevonden. Het is bekend dat in juni 2016 relatief veel neerslag viel¹. Deze extreme maanden vertalen zich door naar de statistiek van de totale 5 jaar. De statistiek voor de afzonderlijke jaren is bijgevoegd in bijlage I. Hierin is de statistische variatie tussen de verschillende jaren goed te zien.

Tijdens de zomermaanden juli tot en met september zijn de spuidebieten relatief het laagst. De waarden uit afbeelding 2.3 zijn samengevat in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Maandelijkse statistiek van de spuidebieten (in m³/s)

| [m³/s] | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Juni | Juli | Aug | Sep | Okt | Nov | Dec |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| min | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 95 % onder | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |
| gemiddelde | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 0,6 | 0,6 | 1,7 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 1,1 | 1,4 |
| 95 % boven | 12,7 | 12,3 | 13,4 | 4,2 | 3,8 | 17,9 | 4,5 | 2,1 | 2,2 | 2,7 | 9,0 | 10,2 |
| max | 25,9 | 26,1 | 28,5 | 19,6 | 21,0 | 32,4 | 31,7 | 16,2 | 14,2 | 19,7 | 30,3 | 25,9 |

Het gemiddelde spuidebiet van de dataset bedraagt 1,0 m³/s. Wanneer een vaarseizoen wordt gedefinieerd dat duurt van april tot en met oktober, kan de statistiek worden afgeleid zoals deze is gepresenteerd in tabel 2.2. In totaal bevat het vaarseizoen 214 dagen.

¹ <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2016/juni> (10 februari 2020).

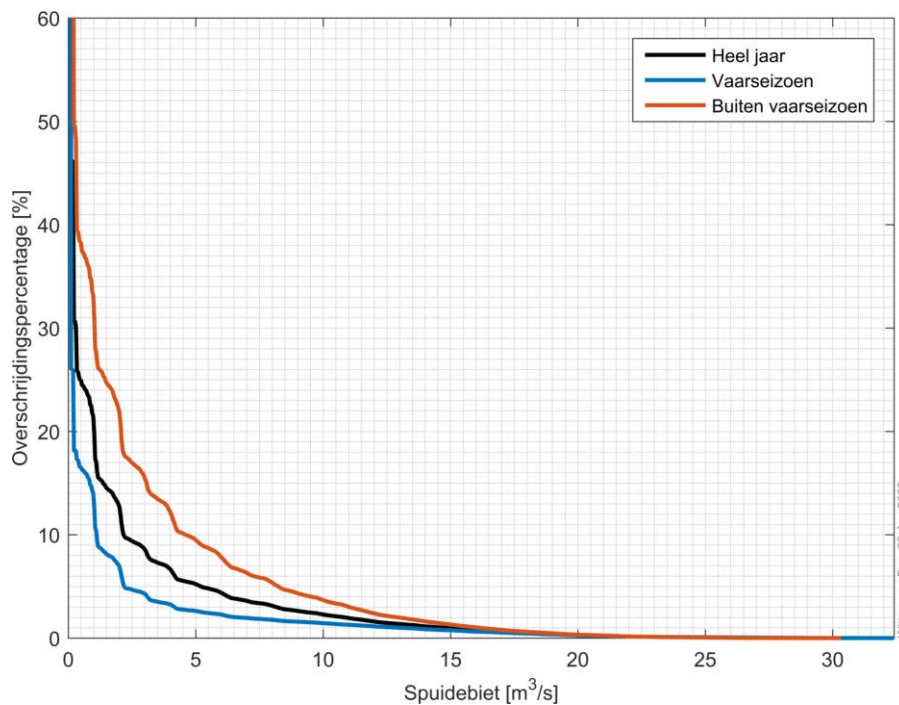
Tabel 2.2 Statistiek van de spuidebieten tijdens het vaarseizoen en buiten het vaarseizoen (in m³/s)

| [m ³ /s] | Vaarseizoen [april - oktober] | Buiten vaarseizoen [november - maart] |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| min | 0 | 0 |
| 95 % onder | 0 | 0,1 |
| gemiddelde | 0,6 | 1,6 |
| 95 % boven | 2,2 | 8,2 |
| max | 32,4 | 30,3 |

2.3.2 Overschrijdingspercentages

Als volgende stap is de data geanalyseerd met het oog op het vaststellen van een overschrijdingspercentage voor de bandbreedte aan spuidebieten in de dataset. Dit percentage staat voor het percentage van de tijd dat een specifiek spuidebiet zal worden overschreden. Het resultaat van een dergelijke analyse voor de dataset is weergegeven in afbeelding 2.4.

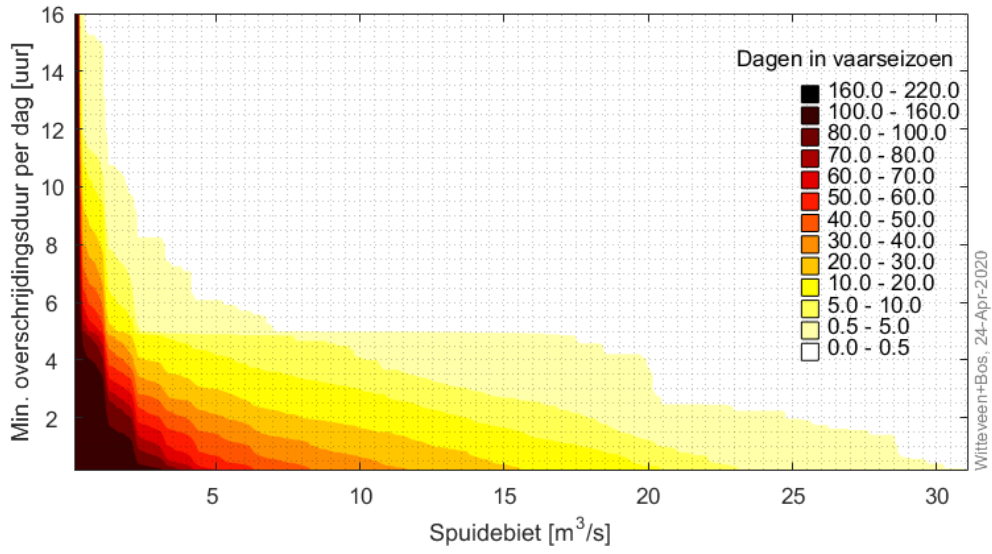
Afbeelding 2.4 Overschrijdingspercentage als functie van het spuidebiet voor de geanalyseerde dataset voor de jaren 2015-2019



Afbeelding 2.4 toont aan dat het ontwerp spuidebiet van 31 m³/s gemiddeld 0,003 % van het jaar wordt overschreden. Daarnaast wordt duidelijk dat de afvoeren in het algemeen lager zijn tijdens het vaarseizoen, maar dat de meest extreme spuidebieten in de dataset in het vaarseizoen vallen. Uitleestabellen met overschrijdingspercentages passende bij afbeelding 2.4 zijn toegevoegd in bijlage II.

Naast een absoluut overschrijdingspercentage, kan ook het gemiddeld aantal dagen in het vaarseizoen (april tot en met oktober) waarop een spuidebiet gedurende een gegeven overschrijdingsduur wordt overschreden worden gedefinieerd. Het resultaat voor het vaarseizoen is gepresenteerd in afbeelding 2.5. Op de verticale as staat de minimale overschrijdingsduur tijdens 1 dag. Op de horizontale as staat het spuidebiet. De contourkleuren geven aan hoeveel dagen gemiddeld per vaarseizoen het spuidebiet gedurende minimaal de periode op de verticale as wordt overschreden. Deze afbeelding is in tabelvorm opgenomen in bijlage III.

Afbeelding 2.5 Gemiddeld aantal losse dagen waarop een spuidebiet gedurende een minimale overschrijdingsduur wordt overschreden tijdens het vaarseizoen



3

STROOMVELDEN EN -SNELHEDEN RONDOM SLUIS 0

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de stroomvelden worden rond Sluis 0 worden bepaald. Op basis van de stroomvelden kunnen stroomsnelheden op maatgevende doorsnedes worden vastgesteld.

Het doel van dit hoofdstuk is het bepalen van de maatgevende spuidebieten voor de recreatievaart, op basis van de Richtlijn Vaarwegen [ref. 3]. Daarnaast kan ook de maximaal toelaatbare stroomsnelheid voor drenkelingen bepaald worden, zoals gebaseerd op [ref. 4] in combinatie met [ref. 5]. De eisen zijn samengevat in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Eisen met betrekking tot stroomsnelheid rondom Sluis 0

| Eis | Limiet |
|---|---|
| recreatievaart [ref. 3] | 0,5 m/s benedenstrooms; [langsricting] |
| recreatievaart mits 50 m uitloop [ref. 3] | 0,8 m/s (lokaal in vernauwingen) [langsricting] |
| recreatievaart dwarsstroming [ref. 3] | 0,3 m/s [dwarsricting] 0,45 m/s [dwarsricting bij onttrekking] |
| drenkelingen [ref. 4] en [ref. 5] | 0,4 m/s [absoluut] |

Naast het toetsen van de eisen in tabel 3.1, dient ook een voorstel te worden geschreven met betrekking tot indicatieve bodembescherming rondom en in het sluiscomplex. Hiervoor zal per segment ook een berekening worden uitgevoerd voor de indicatieve benodigde bodembescherming.

3.2 Uitgangspunten

Een belangrijk uitgangspunt is dat het debiet tussen stroombanen constant is. Door het bepalen van de stroombanen kan het debiet en daarmee de stroomsnelheden bepaald worden. Daarnaast wordt verondersteld dat het stroomveld onveranderlijk is voor verschillende spuidebieten.¹

Als maatgevende conditie wordt uitgegaan van het minimum peil in het boven- en benedenpand bij het bepalen van stroomsnelheden. Dit is een conservatieve aanname die alleen geldt als water eenvoudig naar de Maas kan worden afgevoerd. Dit is meestal het geval tijdens het vaarseizoen.

¹ De aanname dat stroombanen niet veranderen geldt alleen als de variatie in waterdiepte niet veel verandert bij verschillende afvoeren. Het geldt vooral bij diepe rechte waterlopen zonder flauw talud en bijvoorbeeld niet als uiterwaarden gaan meestromen.

Het maximale spuidebiet door de omloopkanalen bedraagt $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie paragraaf 2.3) en maximaal $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per omloopkanaal bij 2 kanalen. Voor het bepalen van de stroomvelden worden 2 afzonderlijke situaties beschouwd:

- gelijk verdeeld spuien door beide omloopkanalen;
- spuien door het Noordelijke (of Zuidelijke) omloopkanaal.

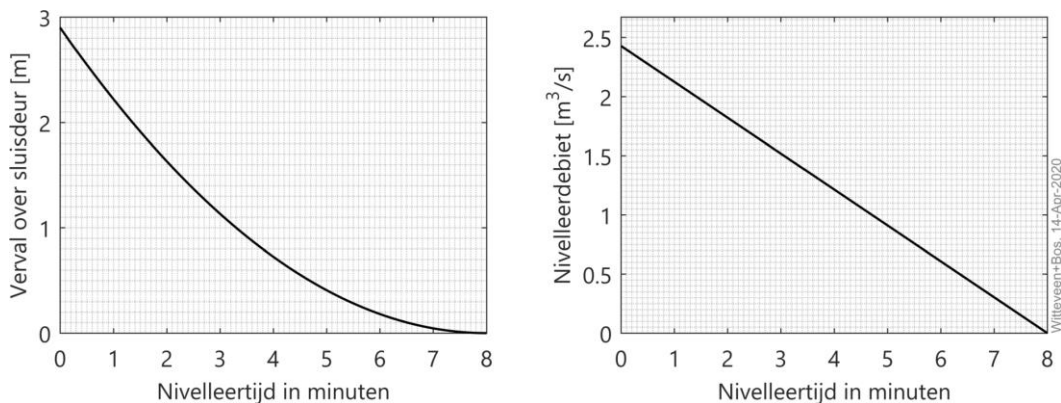
Voor zover mogelijk, is gebruik gemaakt van beschikbare technische tekeningen om geometrieën te bepalen. Waar nodig, is deze informatie aangevuld met Google Earth data.

In alle tekeningen treedt stroming op van rechts (bovenstrooms) naar links (benedenstrooms).

3.3 Nivelleren van de sluis

Het totale debiet dat door het kanaal zal stromen bestaat uit een combinatie van het spuidebiet en het nivelleerdebiet. Ook tijdens het nivelleren van de schutsluis moet aan de eisen worden voldaan. Het is daarom belangrijk een inschatting te maken van de nivelleerafvoeren van de sluis. Er is gerekend met een maximaal verval van $2,9 \text{ m}$ over de sluis¹. De sluis heeft een lengte van $33,5 \text{ m}$ en een breedte van 6 m . Voor binnenvaartsluizen met het formaat van Sluis 0, worden doorgaans nivelleertijden van 8-10 minuten gehanteerd [ref. 10]. In 8 minuten nivelleertijd dient een watervolume van 580 m^3 te worden genivelleerd. Het nivelleren wordt gestuurd door gravitatie. Dit zorgt initieel voor een relatief snelle afname van het verval. De mate van daling van de waterstand in de sluiskamer neemt geleidelijk af met de tijd tot er geen verval meer is over de sluisdeur. Het bijhorende verloop van het verval en het nivelleerdebiet is in afbeelding 3.1 weergegeven. De analytische berekening die hiervoor is uitgevoerd is toegevoegd in bijlage IV.

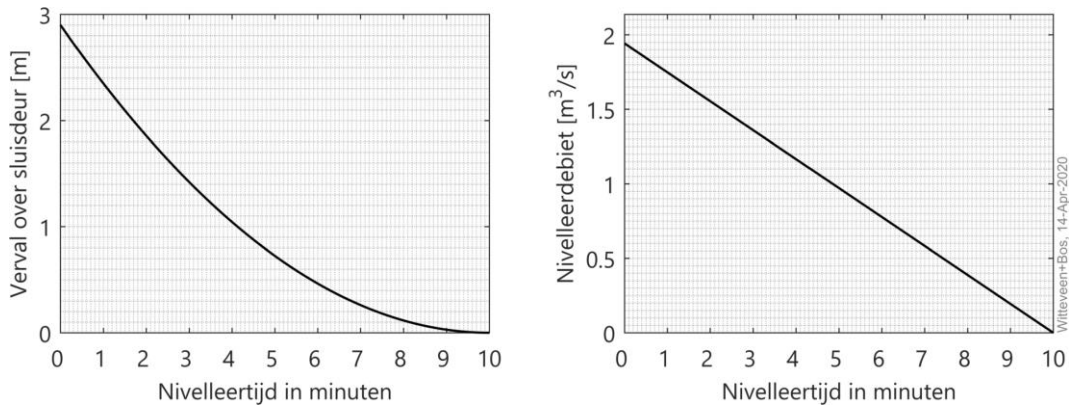
Afbeelding 3.1 Links: verloop van het verval over de sluisdeur; Rechts: het nivelleerdebiet voor een nivelleertijd van 8 minuten



Bij het nivelleren zal dus rekening moeten worden gehouden met een toename in debiet door het kanaal van maximaal $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Wanneer wordt uitgegaan van een nivelleertijd van 10 minuten, zal dit maximale, initiële spuidebiet afnemen tot $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, zoals in afbeelding 3.2 is te zien.

¹ Maximaal schutpeil NAP+4,9m en minimaal peil benedenpand NAP +2,0 m

Afbeelding 3.2 Links: verloop van het verval over de sluisdeur; Rechts: het nivelleerdebiet voor een nivelleertijd van 10 minuten



Niet altijd hoeft de combinatie van spuien en nivelleren in acht te worden genomen. Zo wordt er direct boven- en benedenstrooms van de sluis niet gevaren tijdens het nivelleren, dus geldt hier dat voor recreatievaart alleen het spuidebiet maatgevend is. De boten liggen dan te wachten in de aanmeerplaats in het beneden- of bovenpand. Daarnaast zal tijdens spuidebieten die recreatievaart niet mogelijk maken ook niet worden genivelleerd door de sluis.

3.4 Methodiek

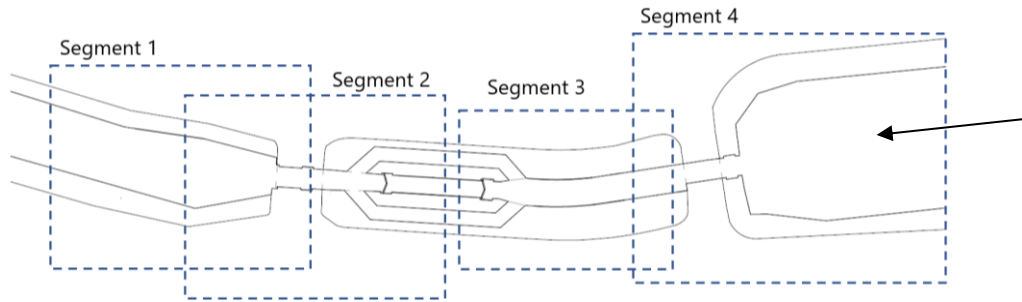
De studie van stroomvelden en -snelheden is opgedeeld in 4 segmenten, zodat de lokale hydrodynamische effecten gedetailleerd kunnen worden bestudeerd. Voor elk segment is een berekening gemaakt. Voor het bepalen van de stroombanen is de AutoCAD-tekening van het originele ontwerpdocument gebruikt [ref. 1]. Hierin zijn alle details verwijderd zodat alleen de geometrie van Sluis 0 en het aansluitende kanaalpand is overgebleven. afbeelding 3.3 toont hoe deze tekening zich verhoudt tot de omgeving.

Afbeelding 3.3 Projectie van de ontwerp-tekening (in het witte kader) op een Google Earth onderlaag



De opdeling van de ontwerp-tekening in 4 segmenten is weergegeven in afbeelding 3.4. Elk segment wordt in de volgende paragrafen afzonderlijk bestudeerd. De stroomsnelheden worden voor elk segment getoetst aan de hand van de eisen uit tabel 3.1.

Afbeelding 3.4 Opdeling van de ontwerptekening in 4 segmenten



Aan het einde van dit hoofdstuk is een globale conclusie gepresenteerd die de resultaten van de verschillende segmenten combineert. Hieruit zal blijken tot welke afvoeren de sluis voldoet aan de eisen en welk deel van de tijd dat zal zijn.

3.4.1 Toetsing toelaatbare stroomsnelheden

De stroomsnelheden in de segmenten zijn afgeleid voor de maatgevende stroombaan op verschillende doorsnedes die zijn aangeduid met behulp van gestreepte lijnen. Elke stroombaan bevat eenzelfde deel van het totale debiet. In ieder segment zijn acht stroombanen ingetekend. Dit houdt in dat door elke stroombaan $1/8^e$ deel van het totale debiet Q wordt afgevoerd. Het debiet in 1 stroombaan wordt aangeduid met de parameter Q_s . Vergelijking 3-1 vat dit samen.

Vergelijking 3-1

$$Q_s = \frac{1}{8} Q$$

Aan de hand van deze afvoer kan de stroomsnelheid evenwijdig aan de stroombaan worden bepaald met behulp van vergelijking 3-2.

Vergelijking 3-2

$$U_s = \frac{Q_s}{b_s h_s} = \frac{Q}{8b_s h_s}$$

Hierin is b_s de breedte van de stroombaan en staat h_s voor de lokale waterdiepte. Uit vergelijking 3-2 toont aan dat de lokale stroomsnelheid toeneemt voor een toenemend spuidebiet, en toeneemt voor een kleinere breedte of waterdiepte. De stroom in dwars- en langsricting wordt berekend door de snelheidsvector te ontbinden zodat de component in dwarsrichting kan worden bepaald:

Vergelijking 3-3

$$U_{dwars} = U_s * \sin(\beta) \text{ en } U_{langs} = U_s \cos(\beta)$$

Waarin β de hoek tussen de richting van de stroombaan en de as van het kanaal representeert. Door substitutie van vergelijking 3-3 in vergelijking 3-2 volgt:

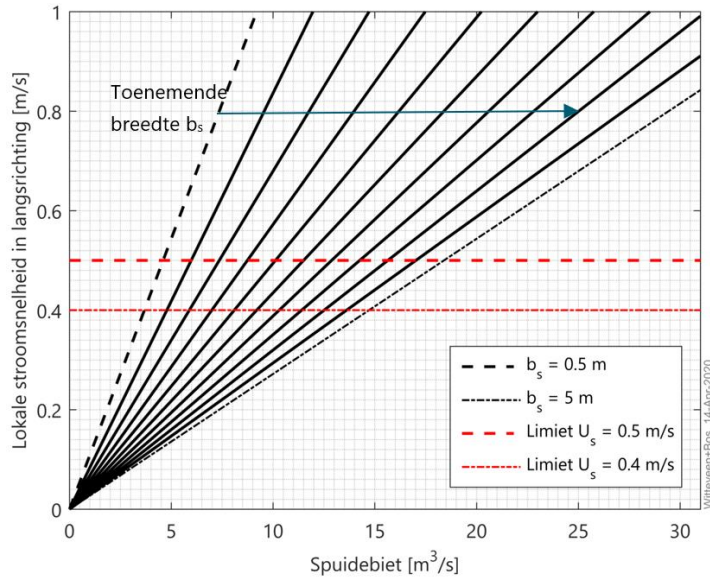
Vergelijking 3-4

$$U_{dwars} = \frac{\sin(\beta) Q}{8b_s h_s} \text{ en } U_{langs} = \frac{\cos(\beta) Q}{8b_s h_s}$$

Op deze manier kan de relatie tussen stroomsnelheid en het spuidebiet voor een variërende breedte en diepte van de stroombaan worden uitgedrukt. Dit resulteert in een grafiek die is weergegeven in afbeelding 3.5. Elke zwarte lijn representeert de relatie tussen het spuidebiet en de lokale stroomsnelheid (evenwijdig aan de stroombaan) voor een bepaalde breedte van de stroombaan b_s . Waar deze zwarte lijnen snijden met de horizontale rode gestreepte lijnen (toelatingseisen met betrekking tot bijvoorbeeld

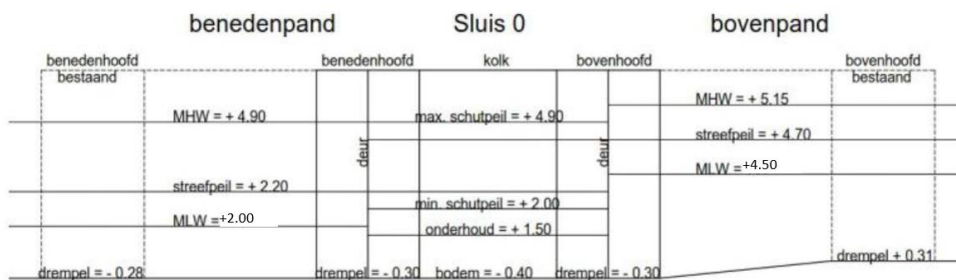
recreatievaart (0,5 m/s) en gevaar voor drenkelingen (0,4 m/s)) kan het corresponderende toelaatbare debiet door de maatgevende stroomlijn worden uitgelezen op de horizontale as.

Afbeelding 3.5 Relatie spuidebiet en lokale stroomsnelheid voor een minimum peil voor een variërende breedte van de stroombaan b_s en constante waterdiepte h_s



Voor de berekeningen is uitgegaan van de maatgevende situatie waarin beneden een minimum waterpeil van NAP +2,0 m wordt aangenomen (Minimaal peil, opmerking RWS). Bovenstrooms is dit minimum waterpeil op NAP +4,5 m vastgesteld.¹ Het bodemniveau van het kanaal is uniform verondersteld en is gebaseerd op de beschikbare ontwerptekeningen [ref. 1; ref. 8]. De doorsnede van Sluis 0 in afbeelding 3.6 toont de verschillende waterstanden en bodemniveaus.

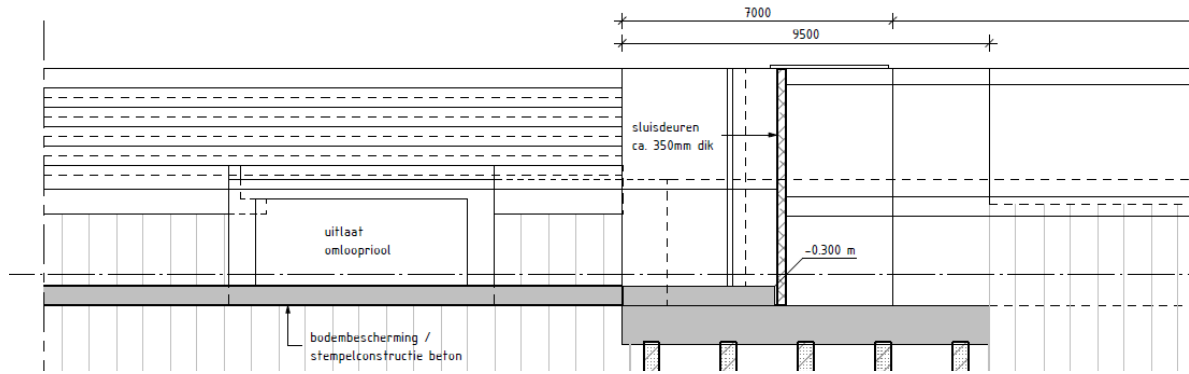
Afbeelding 3.6 Ontwerptekening [ref. 1] aangevuld met informatie uit [ref. 8] en mailconversatie met P. Zebregs op 7 februari 2020. Ten opzichte van NAP



Een technische doorsnede van het benedenpand van Sluis 0 is weergegeven in afbeelding 3.7 [ref. 1]. Hieruit is af te leiden dat de bodem in het benedenpand een uniforme hoogteligging heeft van NAP -0,3 m.

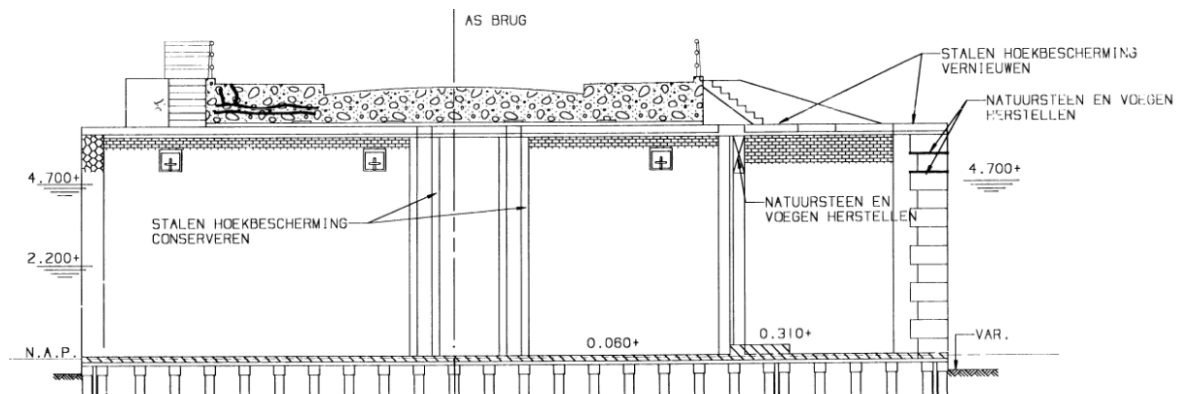
¹ Mailconversatie met de heer P. Zebregs op 7 februari 2020

Afbeelding 3.7 Doorsnede in de langsrichting van het benedenpand van Sluis 0 [ref. 1]



Een doorsnede van het bovenhoofd onder de Anthoniebrug is weergegeven in afbeelding 3.8. Hierin is af te leiden dat de bodem rondom de Anthoniebrug een bodemhoogte heeft van NAP +0,0 m, met een lokale drempel die een hoogte heeft van NAP +0,3 m.

Afbeelding 3.8 Doorsnede in langsrichting van het bovenhoofd onder de Anthoniebrug¹



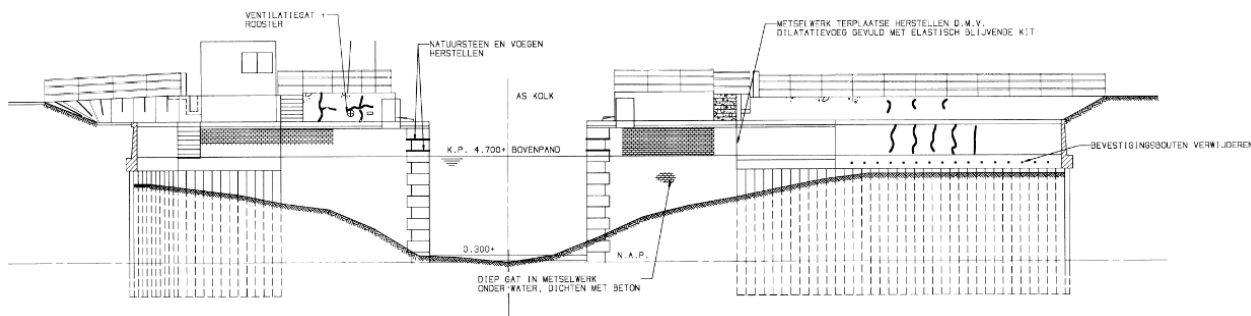
De doorsnede van het kanaal benedenstrooms van de sluis kan geschat worden aan de hand van historische dwarsdoorsneden van het kanaal, zie afbeelding 3.9. Het kanaal heeft een profiel in de vorm van een trapezium met het diepste deel op de as van het kanaal. Voor een minimum peil zal de diepte op de kanaalas 2,7 m bedragen. Aan de oevers is dit 1,1 m. Afbeelding 3.10 geeft de geometrie weer voor het bovenstroomse kanaal. De bodem wordt hier vastgesteld op NAP +0,3 m.

Afbeelding 3.9 Dwarsdoorsnede die het profiel van het benedenstroomse kanaal illustreert [ref. 12]



¹ Mail conversatie met de heer H. Knapen op 10 april 2020

Afbeelding 3.10 Dwarsdoorsnede die het profiel van het bovenstroomse kanaal illustreert¹



Per segment worden de toelaatbare spuidebieten weergegeven. Aan het einde van dit hoofdstuk wordt een integrale conclusie besproken.

3.4.2 Indicatieve bodembescherming

De combinatie van stroomsnelheid en turbulentie in het kanaal kan leiden tot bodemerosie indien de bodem van het kanaal uit erodeerbaar materiaal bestaat. In dat geval is het van belang een bodembescherming aan te brengen. In deze studie wordt een indicatie gegeven van de benodigde diameter van een breukstenen bodembescherming. Ter indicatie zal een vertaalslag worden gemaakt naar een steengradatie die hanteerbaar is in de praktijk. Dit is echter een indicatie en mag niet gebruikt worden voor het uiteindelijk ontwerp. Er wordt alleen gekeken naar belasting door stroming [ref. 7]. De belasting ten gevolge van schroefstalen wordt niet maatgevend geacht. In deze berekening wordt de hydraulische belasting door spuien in rekening gebracht en zal alleen de D_{n50} van de toplaag worden bepaald met behulp van de Pilarczyk (1995)-formule:

Vergelijking 3-5

$$D_{n50} = 1,1 * \frac{\phi_{sc} 0,035}{\Delta \Psi_c} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U_c^2}{2g}$$

Hierin is 1,1 een veiligheidsfactor. Conform [ref. 7] volgt dat $\Delta = 1,60$, $\Psi_c = 0,035$, $\phi_{sc} = 1,5$ (uitgaande van een stenen bodembescherming met blootliggende randen). k_h brengt het niet-ontwikkelde snelheidsprofiel in rekening (afhankelijk van D_{n50}), $k_{sl} = 1$ en k_t^2 bedraagt 1 (voor evenwijdige stroomlijnen), 1,5 (voor zones met vergrootte turbulentie of contractie van stroombanen) en 2,0 (voor zones met sterke turbulentie onder andere door vertraging). Aan de hand van een vuistregel kan de dikte van de aan te brengen toplaag worden bepaald:

Vergelijking 3-6

$$z = 2 * D_{n50}$$

Het wordt geadviseerd in een vervolgstudie een meer gedetailleerde berekening uit te voeren om de daarbij benodigde filters te bepalen en de dikte en afmetingen van de indicatieve bodembescherming te verifiëren. Op het moment van het uitvoeren van deze studie is onvoldoende informatie beschikbaar over de huidige bodembescherming om uitspraken te doen over de geschiktheid van deze bodembescherming voor toekomstige eisen.

3.5 Segment 1

Segment 1 betreft het deel benedenstrooms van Sluis 0.

3.5.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

In afbeelding 3.11 is het stroombeeld voor segment 1 getekend. Direct na de uitstroomopening (ter plaatse van doorsnede 3) wordt het profiel wijder. Bij een plotselinge verbreding van de doorstroombreedte is de stroming niet in staat zich direct aan te passen aan deze geometrie. Ter plaatse van de scherpe hoeken ontstaat loslating van de stroming met als resultaat een stromingsluwe zone en neervorming over de lengte tot waar de stroomlijnen de zijdes van het kanaalpand weer bereiken. De lengte van deze neer (wervel) is afhankelijk van de mate van verbreding van het kanaalpand. Aan de Noordzijde en Zuidzijde van het kanaal treedt een verbreding Z_1 en Z_2 van ongeveer 2 m op. Volgens [ref. 6] zal de neer een lengte aannemen die varieert tussen de 5 à 8 maal de verbreding. Dit levert een neerlengte op van 10 à 16 m.

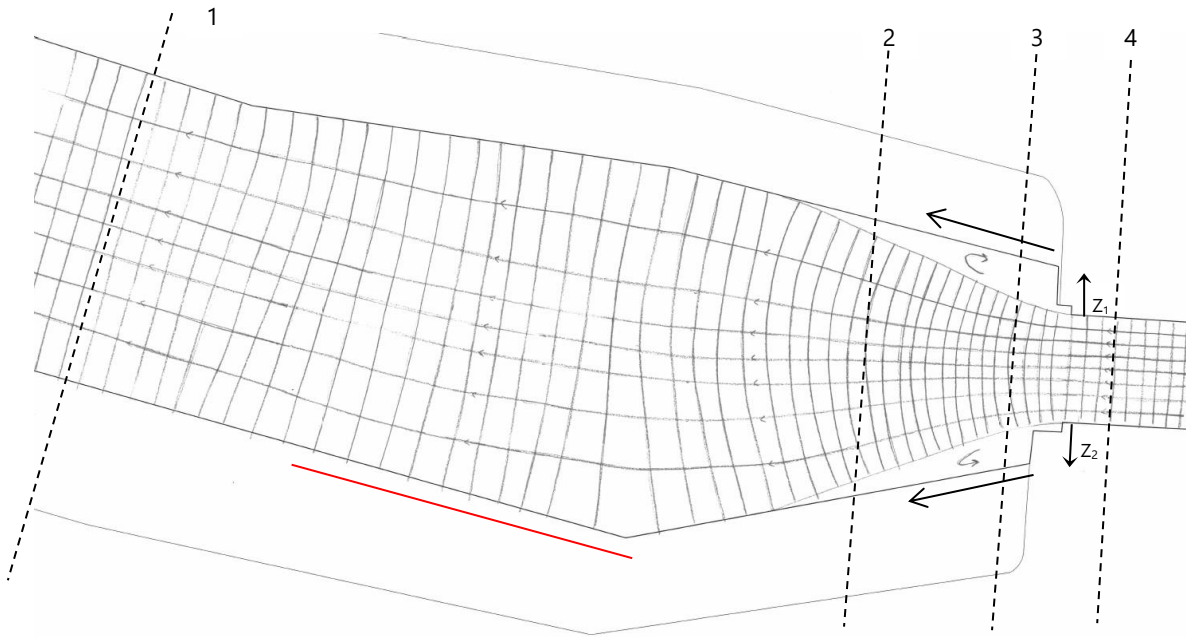
Op deze manier kunnen de stroomsnelheden worden bepaald voor de 4 doorsnedes uit afbeelding 3.11. De resultaten zijn samengevat in tabel 3.2. Voor doorsnedes 1-3 is uitgegaan van een waterdiepte van 2,7 m omdat deze zich in het benedenstroomse kanaal bevinden. Voor doorsnede 4 is de waterdiepte 2,3 m voor een minimum peil van NAP +2,0 m en een bodemhoogte van NAP -0,3 m, zoals volgt uit afbeelding 3.6.

Over het hele segment is er voldoende uitloop voor recreatievaart. Daarom wordt de eis voor <0,5 m/s langsstroom vervangen door de eis voor <0,8 m/s langsstroom. Hieruit volgt dat ter plaatse van doorsnede 4 wordt voldaan aan een maximale afvoer van 13,0 m³/s. De eis voor dwarsstroom <0,3 m/s resulteert in een lagere toelaatbare afvoer op doorsnede 2 en 3. Dit is echter de dwarsstroom aan de buitenranden van de stroomlijnen achter het remmingswerk. Hier zullen geen boten varen. De eis voor <0,8 m/s is maatgevend, indien de kans op drenkelingen wordt geminimaliseerd. Voor de maatgevende doorsnede hoeft het maximale nivelleerdebiet niet in rekening te worden gebracht omdat er niet genivelleerd zal worden tijdens de passage van boten.

Mochten drenkelingen op dit segment te water komen, geldt dat tot een totaal debiet van 6,5 m³/s wordt voldaan aan de veiligheidseisen voor drenkelingen. Wanneer hier het maximale nivelleerdebiet vanaf wordt getrokken, blijft er een spuidebiet over van 4,4 m³/s waarbij drenkelingen geen gevaar lopen.

Op het brede stuk tussen doorsnede 1 en 2 zou een veilige wachtplaats voor recreatievaart gerealiseerd kunnen worden. Hier is met name aan de zuidkant voldoende ruimte. Hier zijn de stroomsnelheden relatief het laagst (toelaatbaar tot 31 m³/s), treedt praktisch geen dwarsstroom op en belemmeren de wachtende boten de passerende boten niet. Deze zone is gemarkeerd met een rode lijn in afbeelding 3.11.

Afbeelding 3.11 Stroombanen in segment 1. De rode lijn markeert de mogelijke locatie voor een wachtplaats



Tabel 3.2 Overzicht van toelaatbare debieten aan de hand van de gestelde eisen voor de 4 doorsnedes in afbeelding 3.11

| | Doorsnede 1 | Doorsnede 2 | Doorsnede 3 | Doorsnede 4 |
|--|--|--|--|--|
| | $b_s = 1,80 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 1,16 \text{ m [center]}$ $b_s = 1,30 \text{ m [zij]}$ $\beta = 20^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 0,90 \text{ m [center]}$ $b_s = 1,20 \text{ m [zij]}$ $\beta = 15^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 0,88 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ |
| eis <0,5 m/s langsstroom | 19,4 m ³ /s | 12,5 m ³ /s | 9,7 m ³ /s | 8,1 m ³ /s |
| eis <0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 31,1 m ³ /s | 20,0 m ³ /s | 15,6 m ³ /s | 13,0 m ³ /s |
| eis < 0,3 m/s dwarsstroom | n.v.t. | 10,0 m ³ /s | 12,2 m ³ /s | n.v.t. |
| eis < 0,4 m/s drenkelingen | 15,6 m ³ /s | 10,0 m ³ /s | 7,8 m ³ /s | 6,5 m ³ /s |

3.5.2 Indicatieve bodembescherming

Voor de 4 doorsnedes in afbeelding 3.11 is de vereiste indicatieve bodembescherming voor het maatgevende spuidebiet van 31 m³/s. Ter plaatse van doorsnede 4 bedraagt de diepte 2,3 m, gebaseerd op afbeelding 3.6. Op de andere doorsnedes wordt de diepte op 2,7 m gesteld, gebaseerd afbeelding 3.9 voor een minimum peil.

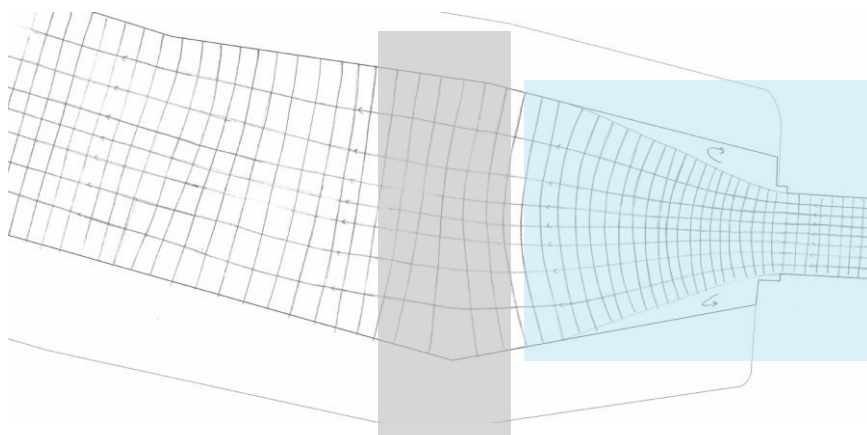
Tabel 3.3 Berekening D_{n50} voor de karakteristieke afvoer van $31,0 \text{ m}^3/\text{s}$

| | Uc | D_{n50} (z = laagdikte) |
|---|---------|---------------------------|
| doorsnede 1 ($k_t^2 = 1$; evenwijdig) | 0,8 m/s | 0,01 m (z = 0,02 m) |
| doorsnede 2 ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,2 m/s | 0,08 m (z = 0,16 m) |
| doorsnede 3 ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,6 m/s | 0,15 m (z = 0,30 m) |
| doorsnede 4 ($k_t^2 = 1$; evenwijdig) | 1,9 m/s | 0,10 m (z = 0,20 m) |

De berekende breuksteendiameter valt binnen de standaardklasse 10-60 kg. Afhangende van het nu aanwezige bodemmateriaal, dient de bodembescherming te worden aangebracht in combinatie met een filter zodat het onderliggende bodemmateriaal niet erodeert. Een geotextiel kan worden aangebracht als onderlaag. Een alternatieve optie is het aanbrengen van een open filter, waarbij meerdere lagen stenen worden aangebracht onder de berekende toplaag. Dit resulteert echter in een reductie van de vaardiepte. Een verdere technische uitwerking van de indicatieve bodembescherming kan in een vervolgstudie worden uitgevoerd. Een alternatief is het aanbrengen van breuksteen ingegoten met colloïdaal beton als bodembescherming. Dit is een praktische optie zodra de bodembescherming een D_{n50} heeft die groter is dan 100-150 mm. Dit is voor het deel in het sluispand een goede optie.

In afbeelding 3.12 zijn de verschillende typen bodembescherming aangegeven binnen segment 1. Hierin stelt het blauwe kader een betonnen stortlaag voor. De grijze markering stelt een stortstenen bodembescherming voor. Benedenstrooms van de stortstenen bodembescherming zal een erosiekuil kunnen ontstaan. Deze zal door de zwaartekracht worden opgevuld met stortsteen door middel van een 'falling apron'¹ effect. De diepte van deze erosiekuil dient in een meer gedetailleerde berekening te worden bepaald om na te gaan of de oeverbescherming niet ondermijnd wordt. Een ander aandachtspunt is de overgang van de colloïdaal betonnen stortlaag op eventuele stortstenen bodembescherming direct benedenstrooms van de Hinthamerbrug. Hier is de bodembescherming lokaal kwetsbaarder door blootligging. Dit effect wordt doorgaans door middel van correctiefactoren op de benodigde steendiameter in rekening gebracht [ref. 7].

Afbeelding 3.12 Zonering van typen indicatieve bodembescherming voor segment 1



¹ Een falling apron is de benaming voor een bodembescherming die zich aanpast aan de erosiepatronen die rondom de bodembescherming ontstaan. De stortstenen bodembescherming 'valt' in de erosiekuil om te voorkomen dat deze zich verder uitbreidt.

3.6 Segment 2

Op een vergelijkbare manier als voor segment 1 zijn de toelaatbare debieten berekend voor segment 2. Voor dit segment geldt een minimaal peil van NAP +2,0 m en een bodemhoogte van NAP -0,3 m. Hieruit volgt een waterdiepte van 2,3 m. Tevens zal in paragraaf 3.6.2 een indicatie worden gegeven van de benodigde bodembescherming.

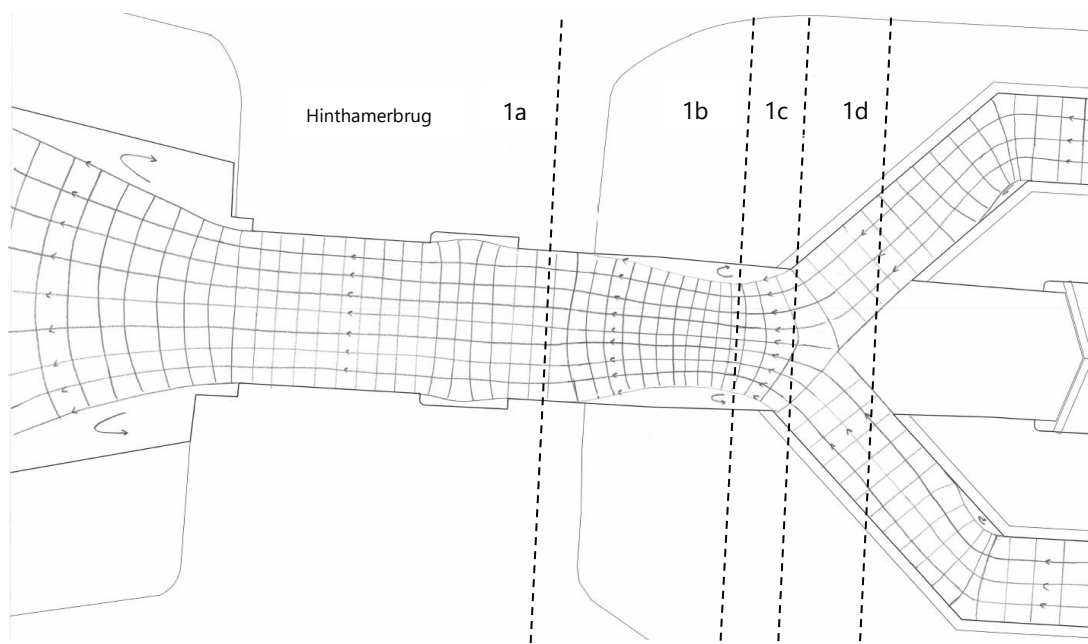
3.6.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

Voor dit segment zijn 2 situaties beschouwd:

- spuien door beide kanaalpanden;
- spuien door 1 van de 2 kanaalpanden.

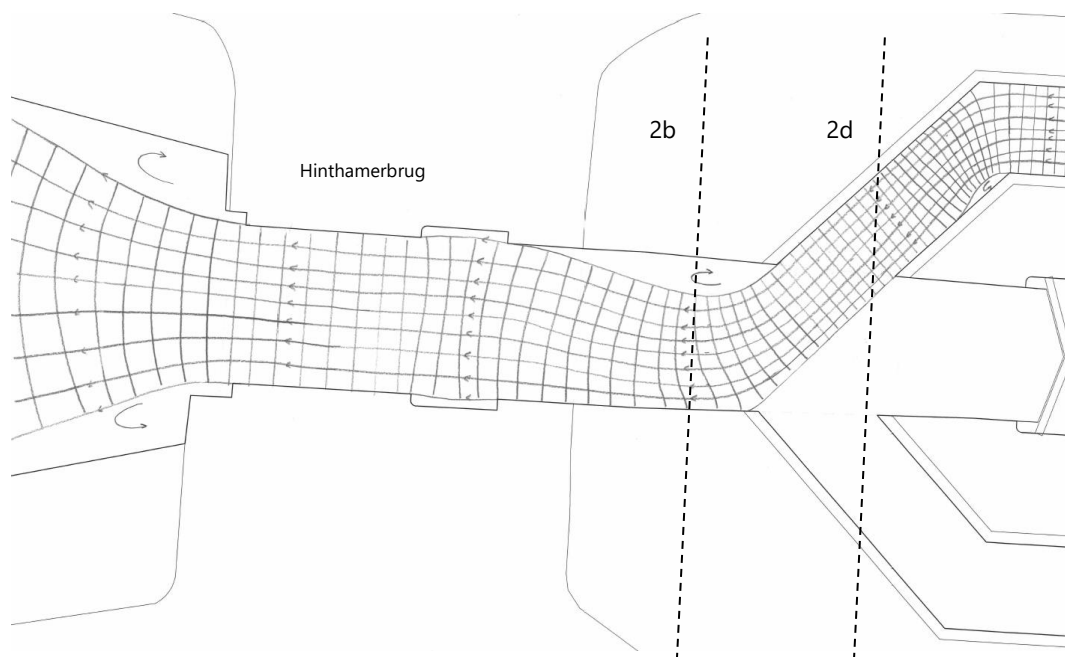
Eerst zullen de toelaatbare stroomsnelheden worden bepaald op 4 locaties in het geval er wordt gespuid door beide kanalen, zoals aangegeven in afbeelding 3.13. Waar het spuidebiet van de 2 omloopkanalen uitmondt, ontstaat een zone van sterke contractie en een versnellende stroming (locatie 1b). Hier zullen de hoogste stroomsnelheden optreden. Aan beide zijdes van deze contractie zal een korte neer ontstaan. Waar de stroming uit de omloopkanalen stroomt (locatie 1d), wordt de grootste dwarsstroom verwacht.

Afbeelding 3.13 Stroomveld voor de situatie waarin wordt gespuid door beide omloopkanalen, inclusief de 4 doorsnedes. De ontwerperconditie voor dit scenario is een spuidebiet van 31 m³/s



Daarnaast zullen 2 doorsnedes in afbeelding 3.14 worden beschouwd bij het spuien door 1 omloopkanaal. De stroming in de overige doorsnedes zijn gelijk aan die van afbeelding 3.10.

Afbeelding 3.14 Stroomveld voor de situatie waarin wordt gespuid door het Noordelijke omloopkanaal. De ontwerprichting voor dit scenario is een spuidebiet van 15,5 m³/s



Tabel 3.4 Overzicht van toelaatbare debieten aan de hand van de gestelde eisen voor de 4 doorsnedes in afbeelding 3.13 en afbeelding 3.14

| | Spuien door 2 kanalen | | | | Spuien door 1 kanaal | |
|---|--|--|--|--|--|---|
| | Doorsnede 1a | Doorsnede 1b | Doorsnede 1c | Doorsnede 1d | Doorsnede 2b | Doorsnede 2d |
| | $b_s = 0,88 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ | $b_s = 0,63 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ | $b_s = 1,0 \text{ m}$ $\beta = 40^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ | $b_s = 1,0 \text{ m}$ $\beta = 45^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ | $b_s = 0,67 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ | $b_s = 0,50 \text{ m}$ $\beta = 45^\circ$ $h = 2,3 \text{ m}$ |
| eis < 0,5 m/s langsstroom | 8,1 m ³ /s | 5,8 m ³ /s | 12,0 m ³ /s | 13,0 m ³ /s | 6,4 m ³ /s | 6,5 m ³ /s |
| eis < 0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 13,0 m ³ /s | 9,3 m ³ /s | 19,2 m ³ /s | 20,8 m ³ /s | 9,9 m ³ /s | 10,4 m ³ /s |
| eis < 0,3 m/s dwarsstroom | n.v.t. | n.v.t. | 8,6 m ³ /s | 7,8 m ³ /s | n.v.t. | 3,9 m ³ /s |
| eis < 0,4 m/s drenkelingen | 6,5 m ³ /s | 4,6 m ³ /s | 7,4 m ³ /s | 7,4 m ³ /s | 4,9 m ³ /s | 3,7 m ³ /s |

Uit tabel 3.4 is een aantal conclusies af te leiden.

Wanneer wordt gespuid door 1 omloopkanaal, wordt het maximale toelaatbare debiet bepaald door de eis voor recreatievaart met betrekking tot dwarsstroom ter plekke van doorsnede 2d. Het toelaatbare debiet voor recreatievaart wordt in dat geval 3,9 m³/s. Wanneer door 2 omloopkanalen wordt gespuid, wordt het toelaatbare debiet bepaald door de eis van < 0,5 m/s langsstroom ter plekke van doorsnede 1b: 5,8 m³/s. Hier hebben de boten geen uitloop van 50 m wanneer deze in bovenstroomse richting varen en is dus de eis

van <0,5 m/s maatgevend¹. Voor een hoger spuidebiet dan 5,8 m³/s zal het niet veilig zijn voor recreatievaart om gebruik te maken van de sluis. Deze debieten hoeven niet gereduceerd te worden door het maximale nivelleerdebiet aangezien tijdens nivelleren niet wordt gevaren in dit segment, maar schepen of in de sluis of op de wachtplaats liggen te wachten tot ze gebruik kunnen maken van de sluis.

In dit segment treden er bij spuien door 1 kanaal gevaarlijke situaties op voor drenkelingen bij een totaal debiet van 3,7 m³/s. Wanneer het maximale nivelleerdebiet hier vanaf wordt getrokken blijft er een spuidebiet over van 1,3 m³/s. Tijdens spuien door 2 kanalen leidt een spuidebiet groter dan 2,2 m³/s tot onveilige situaties. Gezien de hoge mate van turbulentie en de lokale wervelvorming, wordt het ten zeerste geadviseerd te voorkomen dat drenkelingen op dit segment te water komen en dit segment onbereikbaar te maken voor recreanten te land.

3.6.2 Indicatieve bodembescherming

Voor de indicatieve bodembescherming wordt uitgegaan van de maatgevende afvoer van 31 m³/s. Het wordt aangenomen dat de stroming evenredig wordt verdeeld over de breedte van het kanaal in dit segment.

De factoren in vergelijking 3-5 variëren ter plaatse van doorsnedes voor segment 2. De verschillende zones van contractie en loslating van de stroming rond scherpe hoeken heeft invloed op de factor k_t^2 .

Tabel 3.5 Indicatie van de toplaag van de indicatieve bodembescherming in segment 2

| | Uc | D _{n50} (z = laagdikte) |
|--|---------|----------------------------------|
| doorsnede 1a ($k_t^2 = 1$; evenwijdig) | 1,9 m/s | 0,10 m (z = 0,20 m) |
| doorsnede 1b ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 2,7 m/s | 0,38 m (z = 0,76 m) |
| doorsnede 1c ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,7 m/s | 0,18 m (z = 0,36 m) |
| doorsnede 1d ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,7 m/s | 0,18 m (z = 0,36 m) |

De berekende diameters van de toplaag voor de bodembescherming op doorsnedes 1b, 1c en 1d zijn relatief groot ten opzichte van de waterdiepte, waardoor de vaardiepte verder afneemt. Daarom is het beter om de bodem van segment 2 te voorzien een 10-60 kg stortstenen laag gestort in colloïdaal beton. Op basis van oude tekeningen van de Hinthamerbrug, is er momenteel een betonnen stortlaag aanwezig. Of deze voldoet aan de toekomstige eisen, moet nader worden bepaald.

3.7 Segment 3

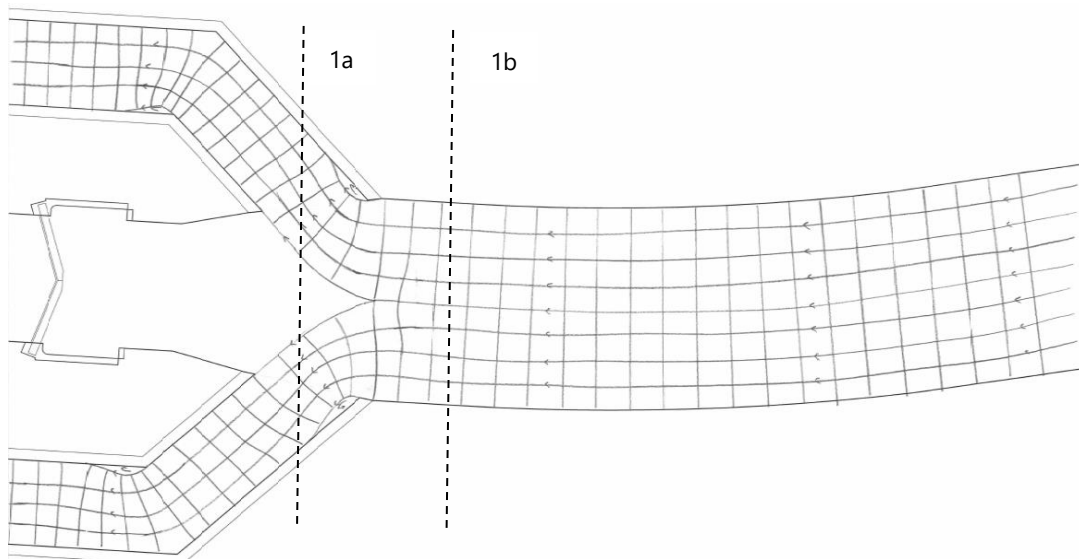
Segment 3 bevindt zich tussen de bovenstroomse sluisdeuren en het aanvoerkanaal naar de sluis. In deze zone is wederom uitgegaan van een minimum peil en is de ontwerptekening gebruikt om de dieptes te bepalen (afbeelding 3.6). Bovenstrooms wordt de bodemhoogte gelijk genomen aan de bodemhoogte benedenstrooms: NAP -0,3 m (afbeelding 3.6). Het minimumpeil bovenstrooms bedraagt NAP +4,5 m. Dit resulteert in een minimale diepte van 4,8 m. Indien benedenstrooms ook wordt uitgegaan van een minimum peil, leidt dit tot een maximaal verval van 2,5 m en een maximaal nivelleerdebiet van 2,1 m³/s bij een nivelleertijd van 8 minuten.

¹ Wanneer schepen in bovenstroomse richting varen en de stroomsnelheid groter is dan 0,5 m/s, dan moeten ze flinke kracht zetten met hun motoren om tegen de stroming in te varen. Omdat direct bovenstrooms van de kanaalopening de stroming wegvalt hebben ze geen tijd en uitlooptmogelijkheden om het schip te stoppen, wat leidt tot gevaarlijke situaties.

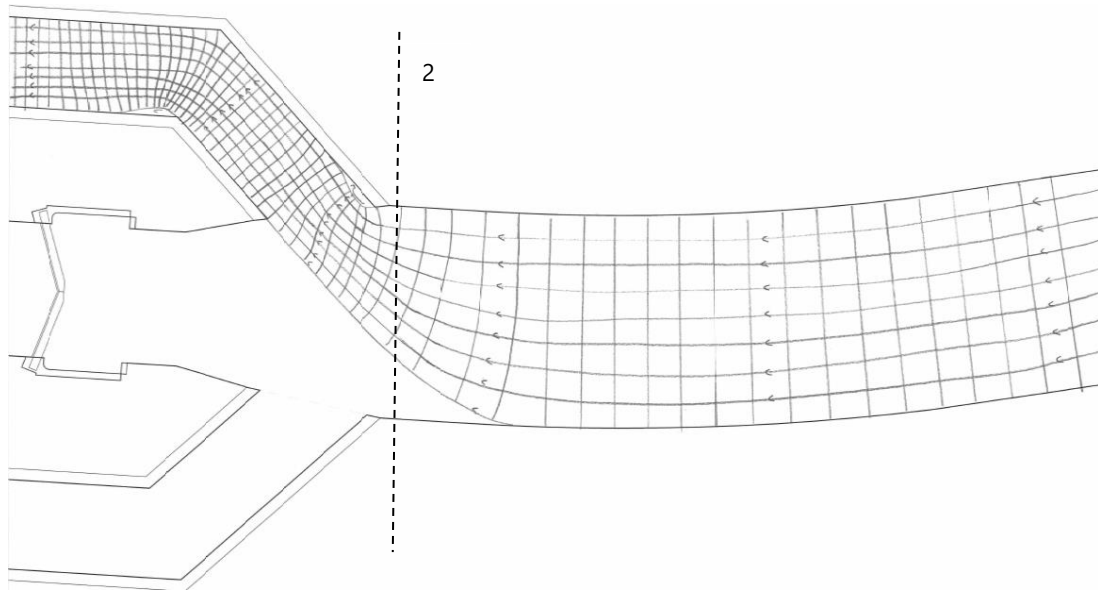
3.7.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

De stroombanen zijn bepaald voor de 2 situaties waarin wordt gespuid door beide kanalen (afbeelding 3.15) en tijdens spuien door het Noordelijke kanaal (afbeelding 3.16). De stroomlijnen van het nivelleerdebiet worden aan de bovenrand evenredig over de breedte van het kanaal verondersteld omdat de bodem horizontaal vlak is. Voor de situatie in afbeelding 3.15 worden 2 doorsnedes beschouwd. Voor de situatie in afbeelding 3.16 wordt 1 aparte doorsnedes beschouwd. De stroming in doorsnede 1a is bij een bodem op NAP -0,3 m sterk driedimensionaal en kan eigenlijk niet goed met de methodiek berekend worden omdat de neerwaartse versnelling verwaarloosd wordt. Bij grote debieten (rond $15 \text{ m}^3/\text{s}$ per riool) kan dit leiden tot gevaarlijke vortexvorming. Voor een gedetailleerde vervolgstudie kan een (lokale) numerieke simulatie hier meer inzicht in verschaffen. Voor het huidige stadium van deze studie geeft deze methodiek echter een eerste indicatie.

Afbeelding 3.15 Stroomveld voor de situatie waarin wordt gespuid door beide omloopkanalen. De ontwerpcnditie van dit scenario is een afvoer van $31 \text{ m}^3/\text{s}$



Afbeelding 3.16 Stroomveld voor de situatie waarin wordt gespuid door het Noordelijke omloopkanaal. De ontwerprichting van dit scenario is een afvoer van 15,5 m³/s



De 4 eisen met betrekking tot stroomsnelheid zijn opnieuw gebruikt om voor dit segment de toelaatbare debieten te berekenen. Deze zijn samengevat in tabel 3.6 voor een waterdiepte van 4,8 m.

Tabel 3.6 Overzicht toelaatbare debieten door segment 3

| | Spuien door 2 kanalen | | Spuien door 1 kanaal |
|--|---|--|---|
| | Doorsnede 1a | Doorsnede 1b | Doorsnede 2 |
| | $b_s = 0,88 \text{ m}$ $\beta = 45^\circ$ $h = 4,8 \text{ m}$ | $b_s = 1,19 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 4,8 \text{ m}$ | $b_s = 0,63 \text{ m}$ $\beta = 45^\circ$ $h = 4,8 \text{ m}$ |
| eis <0,5 m/s langsstroom | 23,9 m ³ /s | 22,8 m ³ /s | 17,1 m ³ /s |
| eis <0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 38,2 m ³ /s | 36,6 m ³ /s | 27,4 m ³ /s |
| eis < 0,45 m/s dwarsstroom (onttrekking) | 21,5 m ³ /s | n.v.t. | 15,4 m ³ /s |
| eis < 0,4 m/s drenkelingen | 13,5 m ³ /s | 18,3 m ³ /s | 9,7 m ³ /s |

Uit tabel 3.6 blijkt dat de maatgevende conditie voor recreatievaart optreedt op doorsnede 2, dus voor het geval waarbij er gespuid wordt met enkel het Noordelijke kanaal. De eis van dwarsstroom voor recreatievaart is in het geval van recreatievaart maatgevend. Het totaal toelaatbare debiet door de sluis in het geval van 1 omloopkanaal bedraagt 15,4 m³/s. Dus boven een debiet van 15,4 m³/s is het verstandig om met 2 kanalen te spuien. Bij spuien door 2 omloopkanalen bedraagt het totaal toelaatbare spuidebiet 21,5 m³/s. Ook in dit segment zal niet worden gevaren tijdens het nivelleren van de sluis. Daarom hoeft voor het bepalen van het toelaatbare debiet voor bevaarbaarheid geen rekening te worden gehouden met het nivelleerdebiet.

Beide debieten zijn groter dan de maatgevende debieten zoals deze zijn afgeleid voor segment 2 (3,9 m³/s door het Noordelijke spuikanaal en 5,8 m³/s bij spuien door 2 omloopkanalen). De toelaatbare debieten op segment 3 zijn dus niet bepalend voor de bevaarbaarheid van de sluis.

De eis met betrekking tot drenkelingenveiligheid is hier ook een maatgevende eis en vormt een relatief groot risico door de aanwezigheid van het omliggende stadspark. Wanneer hier een nivelleerdebiet van 2,1 m³/s van wordt afgetrokken¹, geldt een spuilimiet van 7,6 m³/s voor het geval van spuien met 1 omloopkanaal. Tijdens het gebruik van 2 kanalen wordt dit 11,4 m³/s. Echter kunnen bij de inlaatopeningen van de spuikanalen lokaal gevaarlijke kolken en wervels ontstaan. Dit vergroot het risico voor drenken in dit segment. Het wordt geadviseerd om de zone rondom het sluiscomplex af te sluiten voor recreanten te land of de recreanten nadrukkelijk te wijzen op de gevaren door middel van signalering.

3.7.2 Indicatieve bodembescherming

De maatgevende conditie is de ontwerpafvoer voor doorsnede 1a en 1b van 31 m³/s in combinatie met een minimaal peil bovenstrooms. De turbulentieparameter k_t^2 wordt in deze berekening op 1,5 gesteld voor alle doorsnedes, omdat hier contractie optreedt. De resultaten zijn gepresenteerd in tabel 3.7.

Tabel 3.7 Indicatie van de toplaag van de bodembescherming in segment 3

| | Uc | D _{n50} (z = laagdikte) |
|--|---------|----------------------------------|
| doorsnede 1a ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 0,9 m/s | 0,02 m (z = 0,05 m) |
| doorsnede 1b ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 0,7 m/s | 0,01 m (z = 0,02 m) |

Voor dit segment geldt ook dat enkel de toplaag van de bodembescherming is berekend. Met het oog op uitvoerbaarheid wordt geadviseerd een 10-60 kg stortlaag in te gieten in colloïdaal beton, net zoals de rest van het sluispand.

3.8 Segment 4

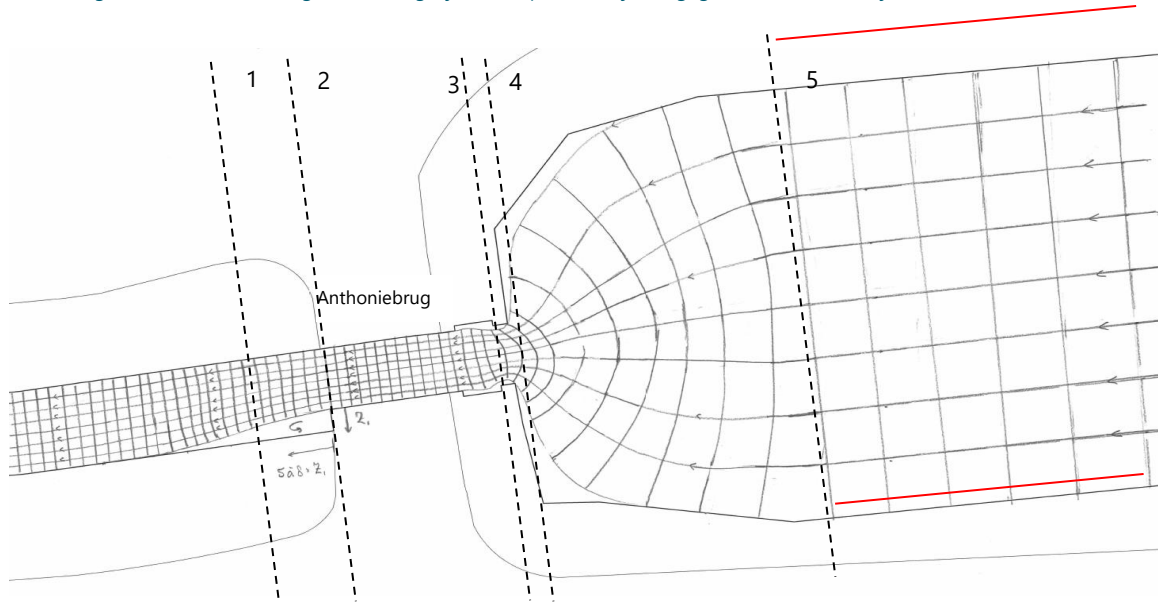
Segment 4 bevindt zich bovenstrooms van segment 3. De analyse voor toelaatbare stroomsnelheden en een indicatie voor de bodembescherming is ook uitgevoerd voor dit segment. In dit segment heerst een minimaal waterpeil van NAP +4,5 m en een bodemhoogte van NAP +0,0 m ter plaatse van doorsnede 1 en 2 (minimale waterdiepte 4,5 m), en een bodemhoogte van NAP +0,3 m op doorsnede 3-5 (afbeelding 3.6). Dit levert een minimale waterdiepte op van 4,2 m.

3.8.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

Het kanaal bovenstrooms een breedte heeft van ongeveer 45 m. Daardoor zijn stroomsnelheden relatief laag en treden er aan de zuidoever van het kanaal vrijwel geen wervels op. Onder de Anthoniebrug neemt de kanaalbreedte af tot ongeveer 7 m. Dit resulteert in contractie van de stroom. Benedenstrooms van de brug verbreedt het kanaal naar 9,5 m. Deze plotselinge verandering in breedte resulteert in een neer over een lengte van 12 tot 20 m. De stroomsnelheden zullen voor de 5 doorsnedes worden beschouwd die zijn aangegeven in afbeelding 3.17. De toelaatbare debieten voor de 5 doorsnedes zijn samengevat in tabel 3.8.

¹ Afgeleid voor een waterstandsverschil passend bij een minimum waterpeil zowel beneden- als bovenstrooms. Dit is de maatgevende conditie.

Afbeelding 3.17 Stroomveld in segment 4. Mogelijke wachtplaatsen zijn aangegeven met de rode lijn



Tabel 3.8 Overzicht toelaatbare debieten in segment 4

| | Doorsnede 1 | Doorsnede 2 | Doorsnede 3 | Doorsnede 4 | Doorsnede 5 |
|---|--|--|--|--|---|
| | $b_s = 1,0 \text{ m}$ $\beta = 10^\circ$ $h = 4,5 \text{ m}$ | $b_s = 0,88 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 4,5 \text{ m}$ | $b_s = 0,74 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 4,2 \text{ m}$ | $b_s = 1,1 \text{ m}$ $\beta = 45^\circ$ $h = 4,2 \text{ m}$ | $b_s = 5,6 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 4,2 \text{ m}$ |
| eis <0,5 m/s langsstroom | 18,3 m ³ /s | 15,8 m ³ /s | 12,4 m ³ /s | 26,1 m ³ /s | 94,1 m ³ /s |
| eis <0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 29,4 m ³ /s | 25,3 m ³ /s | 19,9 m ³ /s | 41,8 m ³ /s | 150,5 m ³ /s |
| eis < 0,45 m/s dwarsstroom (onttrekking) | 93,3 m ³ /s | n.v.t. | n.v.t. | 23,5 m ³ /s | n.v.t. |
| eis < 0,4 m/s drenkelingen | 14,4 m ³ /s | 12,7 m ³ /s | 9,9 m ³ /s | 14,8 m ³ /s | 75,3 m ³ /s |

Aan de eis van <0,5 m/s langsstroom hoeft niet te worden voldaan omdat er voldoende uitloop van minstens 50 m is in segment 4. Daardoor wordt deze eis vervangen door de eis van <0,8 m/s langsstroom. Hieruit blijkt dat 19,9 m³/s de maatgevende toelaatbare afvoer is ter plaatse van doorsnede 3. Wanneer hier een maximaal nivelleerdebiet van 2,1 m³/s van wordt afgetrokken, blijft 17,8 m³/s over voor spuien. Dit is groter dan de toelaatbare afvoer zoals bepaald in segment 2. De eis die is bepaald op segment 2 blijft maatgevend.

Voor drenkelingenveiligheid is doorsnede 3 bepalend. Tot 9,9 m³/s (en dus een spuidebiet van 7,8 m³/s) treden er veilige stroomsnelheden op voor drenkelingen. Door de contractie van de stroom kan het gevaar echter groter zijn door een lokale (onverwachte) stroomversnelling en wervelvorming. Daarom is het niet verstandig dichtbij doorsnede 3 of 4 een plateau te maken, waar personen in het water kunnen raken. Het is verstandig om dit plateau te verplaatsen naar het brede gedeelte bij doorsnede 5.

Een veilige wachtplaats kan bovenstrooms voorbij doorsnede 5 worden geplaatst. De toelaatbare debieten die volgen uit de 4 eisen zijn hier hoger dan het ontwerpdebiet van 31 m³/s. Tevens is dit de breedste

doorsnede van het kanaal en zal de minste hinder worden ondervonden door passerende boten. De wachtplaatsen zijn gemarkeerd in afbeelding 3.17.

3.8.2 Indicatieve bodembescherming

De benodigde diameters voor de toplaag van de indicatieve bodembescherming voor een maatgevend debiet van 31 m³/s. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3.9.

Tabel 3.9 Overzicht benodigde diameter voor de toplaag van stortstenen bodembescherming voor segment 4

| | Uc | D _{n50} (z = laagdikte) |
|---|---------|----------------------------------|
| doorsnede 1 ($k_t^2=2$; vertraging) | 0,9 m/s | 0,03 m (z = 0,06 m) |
| doorsnede 2 ($k_t^2=2$; vertraging) | 1,0 m/s | 0,04 m (z = 0,08 m) |
| doorsnede 3 ($k_t^2=1,5$; contractie) | 1,2 m/s | 0,05 m (z = 0,10 m) |
| doorsnede 4 ($k_t^2=1,5$; contractie) | 0,8 m/s | 0,02 m (z = 0,04 m) |
| doorsnede 5 ($k_t^2=1$; evenwijdig) | 0,2 m/s | n.v.t. |

Ook op segment 4 neemt de vaardiepte af door relatief grote diameter van de stortstenen toplaag ten opzichte van de waterdiepte. Het wordt daarom geadviseerd op doorsnedes 1-3 10-60 kg stortsteen in te gieten in colloïdaal beton, net als voor segment 2 en 3. Op doorsnede 4 voldoet een stortstenen bodembescherming van klasse 10-60 kg als toplaag. Ter plaatse van doorsnede 5 is een bodembescherming overbodig.

3.9 Conclusie: toelaatbare afvoeren voor recreatievaart

De toelaatbare spuidebieten zijn in de vorige paragrafen afgeleid voor de afzonderlijke segmenten. Deze segmenten zijn echter geschakeld. De minimale toelaatbare eis voor de 4 segmenten is dus bepalend voor de bevaarbaarheid door Sluis 0. De resultaten met betrekking tot recreatievaart uit de vorige paragrafen zijn gecombineerd in een beheerstrategie voor het gebruiken van de spuikanalen in Sluis 0.

Met het oog op het duurzaam beheer van de spuikanalen, ligt de voorkeur bij het spuien door 1 omloopkanaal. Het tweede kanaal wordt pas open gezet zodra de toelaatbare afvoer door 1 kanaal wordt overschreden. De beheerstrategie voor recreatievaart door Sluis 0 is samengevat in tabel 3.10.

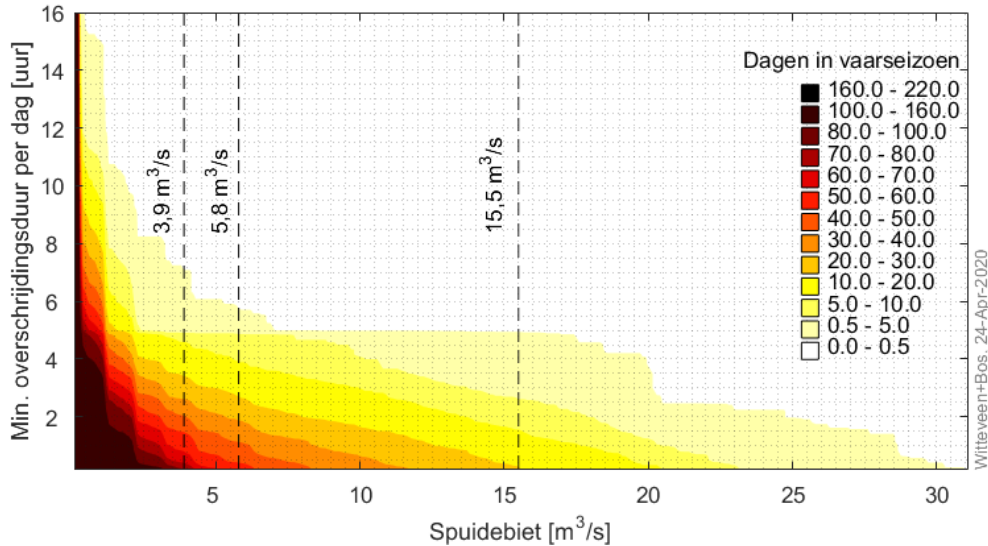
Tabel 3.10 Beheerstrategie spuidebiet door Sluis 0.

| Spuiregime [m ³ /s] | Veilig voor recreatievaart | Gemiddeld jaarlijks overschrijdingspercentage [%] | Spuikanalen in gebruik |
|--------------------------------|----------------------------|---|------------------------|
| 0 - 3,9 | ja | 6,9 | 1 spuikanaal |
| 3,9 - 5,8 | ja | 4,9 | 2 spuikanalen |
| 3,9 - 15,5 | nee | 0,9 | 1 spuikanaal |
| 15,5 - 31,0 | nee | 0,003 | 2 spuikanalen |

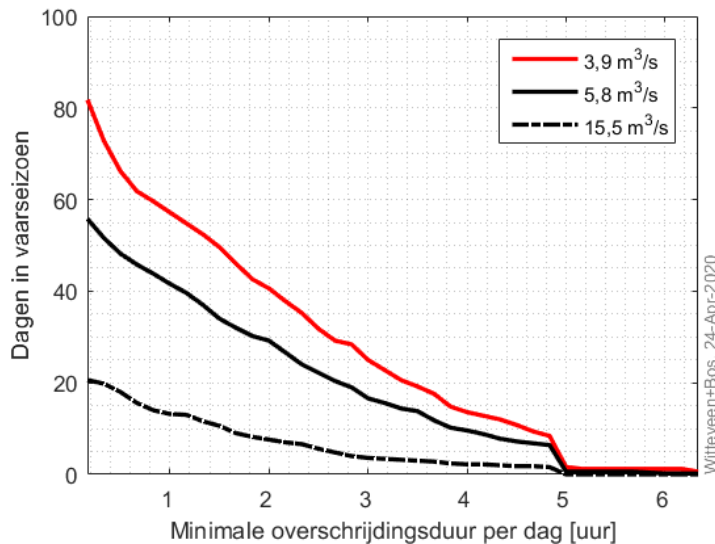
Tot een debiet van 3,9 m³/s kan de recreatievaart veilig gebruik maken van de sluis waarbij de afvoer door 1 spuikanaal plaatsvindt. Tussen 3,9 m³/s en 5,8 m³/s is het ook veilig om de sluis te gebruiken maar moet door 2 spuikanalen gespuid worden. Boven een spuidebiet van 5,8 m³/s kan de recreatievaart geen gebruik

maken van de sluis. Implicaties op de bruikbaarheid van de sluis voor recreatievaart zijn zichtbaar in afbeelding 3.18. Afhankelijk van de overschrijdingsduur, kan voor de spuidebieten uit tabel 3.10 worden afgeleid hoeveel dagen in het vaarseizoen deze spuidebieten gemiddeld worden overschreden. De gestreepte lijnen in afbeelding 3.18 markeren de grenzen uit tabel 3.10. Deze lijnen zijn uitgelicht in afbeelding 3.19.

Afbeelding 3.18 Markering van de spuilimieten ten opzichte van de overschrijdingscurves van de spuidebieten



Afbeelding 3.19 Curves die laten zien hoeveel dagen in het vaarseizoen de afvoeren met een minimale duur worden overschreden. Hieruit volgt het aantal dagen in het vaarseizoen waarop Sluis 0 (deels) bruikbaar is voor recreatievaart.



Diverse conclusies kunnen worden getrokken uit afbeelding 3.18 en afbeelding 3.19. Een selectie wordt hier toegelicht. Het totale aantal dagen in een vaarseizoen is 214:

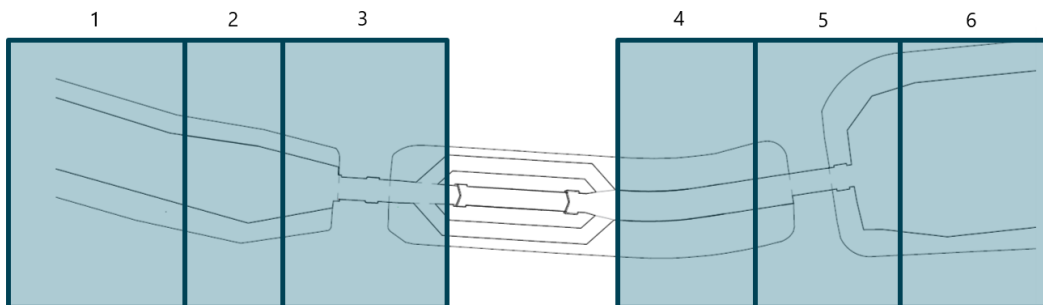
- het gemiddeld aantal dagen in het vaarseizoen waarop een spuidebiet van 3,9 m³/s gedurende minstens 1 uur wordt overschreden is 57. Voor een minimale overschrijdingsduur van 2 uur is dit 41 dagen;
- het gemiddeld aantal dagen in het vaarseizoen waarop een spuidebiet van 5,8 m³/s gedurende minstens 1 uur wordt overschreden is 42. Voor een minimale overschrijdingsduur van 2 uur is dit 29 dagen;

- het gemiddeld aantal dagen in het vaarseizoen waarop een spuidebiet van 15,5 m³/s gedurende minstens 1 uur wordt overschreden is 13. Voor een minimale overschrijdingsduur van 2 uur is dit 8 dagen;
- het gemiddeld aantal dagen in het vaarseizoen waarop een spuidebiet groter dan 3,9 m³/s gedurende minstens 5 uur wordt overschreden is 1 tot 2.

3.10 Conclusie: gevaar voor drenkelingen

De sluis is een waterbouwkundig kunstwerk en daar mag niet worden gezwommen. Er moeten daarom ook maatregelen getroffen worden om dit te voorkomen. Er bestaat echter een risico dat er toch mensen in het water vallen/komen door de aanwezigheid van het omliggend stadspark. Er kunnen zones worden aangewezen waar drenkelingen gevaar lopen indien de toelaatbare debieten worden overschreden. De bevindingen uit voorgaande paragrafen worden besproken aan de hand van 6 gemarkeerde zones in afbeelding 3.20.

Afbeelding 3.20 Zones met betrekking tot gevaar voor drenkelingen



De zones zijn hieronder toegelicht aan de hand van de toelaatbare eis voor veiligheid van drenkelingen.

Voor de zones 4, 5 en 6 is uitgegaan van de hoogteligging van de bodem volgens afbeelding 3.6:

- 1 benedenstrooms van de sluis wordt veiligheid voor drenkelingen gegarandeerd tot een totale afvoer van 15,6 m³/s, en dus een spuidebiet van 13,2 m³/s (jaarlijks gemiddeld 1,3 % van de tijd overschreden);
- 2 in deze zone lopen drenkelingen geen gevaar tot een totale afvoer van 10 m³/s en dus een spuidebiet van 7,6 m³/s (jaarlijks gemiddeld 3,3 % van de tijd overschreden);
- 3 in deze zone zijn de stroomsnelheden het hoogst, ontstaan wervels en passeren boten. Drenkelingen lopen hier gevaar vanaf een totaal debiet van 3,7 m³/s bij het gebruik van 1 spuislot en dus een spuidebiet van 1,3 m³/s (jaarlijks gemiddeld 15,2 % van de tijd overschreden). Bij 2 spuisloten is dit totaal debiet 4,6 m³/s en dus een spuidebiet van 2,2 m³/s (jaarlijks gemiddeld 9,7 % van de tijd overschreden). Lokale stroomversnellingen en wervels vergroten het risico voor drenkelingen;
- 4 in deze zone zijn de risico's het grootst. Door onttrekking via de spuisloten ontstaan hier lokale wervels, kolken en stroomversnellingen. Naast deze factoren, vormen stroomsnelheden ook een risico. Indien er wordt gespuid door 1 kanaal, lopen drenkelingen gevaar vanaf een totaal debiet van 9,7 m³/s en dus een spuidebiet van 7,6 m³/s (jaarlijks gemiddeld 3,3 % van de tijd overschreden). Indien er gespuid wordt door 2 kanalen, lopen drenkelingen in zone 4 gevaar vanaf een totaal debiet van 13,5 m³/s en dus een spuidebiet van 11,4 m³/s (jaarlijks gemiddeld 1,8 % van de tijd overschreden);
- 5 in deze zone ontstaat contractie van de stroming, ontstaan wervels en passeren boten. Ter plaatse van de Antoniebrug lopen drenkelingen gevaar vanaf een totaal debiet van 9,9 m³/s en dus een spuidebiet van 7,8 m³/s (jaarlijks gemiddeld 3,3 % van de tijd overschreden);
- 6 in deze zone lopen drenkelingen praktisch geen gevaar indien deze op tijd het water kunnen verlaten en niet in zone 5 terecht komen.

In de sluiskamer zelf zullen de stroomsnelheden dermate klein zijn dat deze tijdens het nivelleren geen gevaar vormen voor drenkelingen. Wel ontstaan lokale wervels en kolken ter plaatse van de in- en uitstroomopeningen van de nivelleeropeningen die risico's kunnen vormen voor drenkelingen.

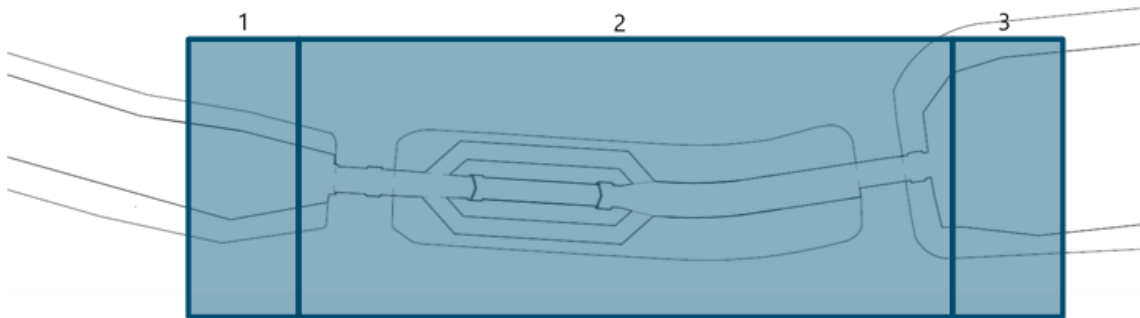
3.11 Conclusie: indicatieve bodembescherming

De berekende toplaag van de indicatieve bodembescherming kan als volgt worden samengevat in 3 zones (zie afbeelding 3.21):

- 1 stortstenen bodembescherming die functioneert als een 'falling apron' met een toplaag met een minimaal benodigde D_{n50} van 0,10 m. Met de standaard steenklasse 10-60 kg wordt aan deze eis voldaan. De dikte van de indicatieve bodembescherming bedraagt 0,20 m;
- 2 het plaatsen van stortsteen met de benodigde diameter in het sluiscomplex leidt tot een significante afname in vaardiepte. Daarnaast wordt lokaal rond de uitlaatopening van de omloopkanalen een geconcentreerde stroming verwacht. Daarom wordt geadviseerd uit te gaan van het instorten van 10-60 kg in een laag colloïdaal beton om voldoende weerstand te bieden tegen hoge stroomsnelheden, maar de vaardiepte zo min mogelijk te beperken;
- 3 in deze zone voldoet een indicatieve bodembescherming met een toplaag met een minimaal benodigde D_{n50} van 0,10 m met een dikte van 0,20 m. Ook hier voldoet de steenklasse 10-60 kg.

De benodigde filterlagen en de dikte van de laag colloïdaal beton zijn niet bepaald in deze studie. Enkel een indicatie van het type bodembescherming en een bijbehorende dimensie is gegeven. Daarnaast dient de bepaalde bodembescherming geverifieerd te worden in een vervolgstudie.

Afbeelding 3.21 Zones met verschillende typen indicatieve bodembescherming



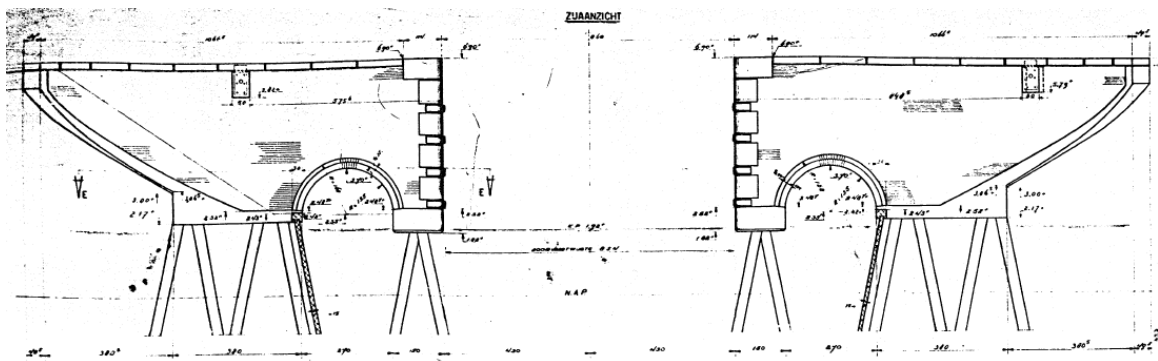
4

STROOMVELDEN EN -SNELHEDEN RONDOM DE ORTHENBRUG EN KASTERENBRUG

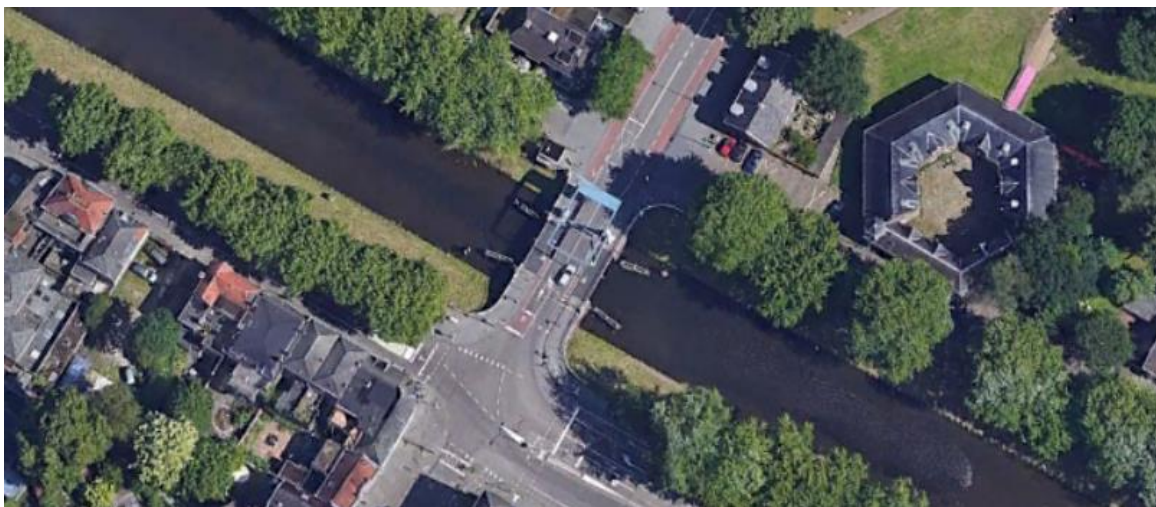
4.1 Uitgangspunten

Inzicht in de constructie van beide bruggen onder water is essentieel voordat stroombanen kunnen worden bepaald. De opdrachtgever heeft diverse beschikbare tekeningen geleverd van de Orthenbrug (afbeelding 4.1) en de Kasterenbrug (afbeelding 4.3). Afmetingen die onleesbaar waren of ontbraken, zoals de dimensies van het kanaal, zijn gebaseerd op schattingen met behulp van Google Earth (afbeelding 4.2 en afbeelding 4.4).

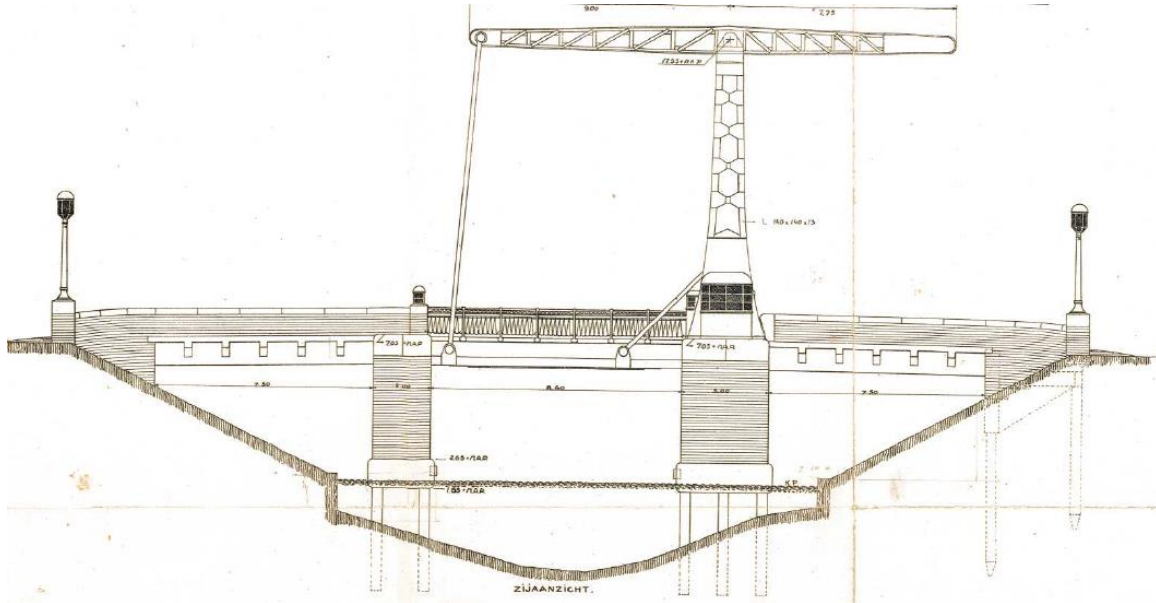
Afbeelding 4.1 Technisch zijaanzicht van de Orthenbrug



Afbeelding 4.2 Bovenaanzicht van de Orthenbrug. Bron: Google Earth



Afbeelding 4.3 Technisch zijaanzicht van de Kasterenbrug (waterpeil aangegeven met KP 'kanaalpeil')



Afbeelding 4.4 Bovenaanzicht van de Kasterenbrug. Bron: Google Earth



Uit zowel afbeelding 4.1 als afbeelding 4.3 wordt duidelijk dat de pijlers van de bruggen op palen zijn gefundeerd die tot kanaalpeil doorlopen. De stroming onder de bruggen zal voor beide gevallen dus worden beïnvloed door de palen en niet zozeer door de pijlers.

Voor de berekening van stroomsnelheden is uitgegaan van een minimum peil en een kanaalbodem die geschat is aan de hand van afbeelding 4.3. Volgens de tekening is de maximale diepte tijdens streefpeil 2,9 m. Tijdens een minimaal peil bedraagt de waterdiepte dus 2,7 m op de as van het kanaal. Aan de zijkanten neemt de diepte af naar 1,1 m. Voor het berekenen van de benodigde (indicatieve) bodembescherming is uitgegaan van het maximale spuidebiet van 31 m³/s.

4.2 Orthenbrug

De Orthenbrug is de meest Noordelijk gelegen brug op de Zuid Willemsvaart. Deze brug wordt gekenmerkt door 2 kleinere bogen aan weerszijden van de doorvaartpassage (afbeelding 4.5).

Afbeelding 4.5 Zicht op de Orthenbrug. Bron: [ref. 11]

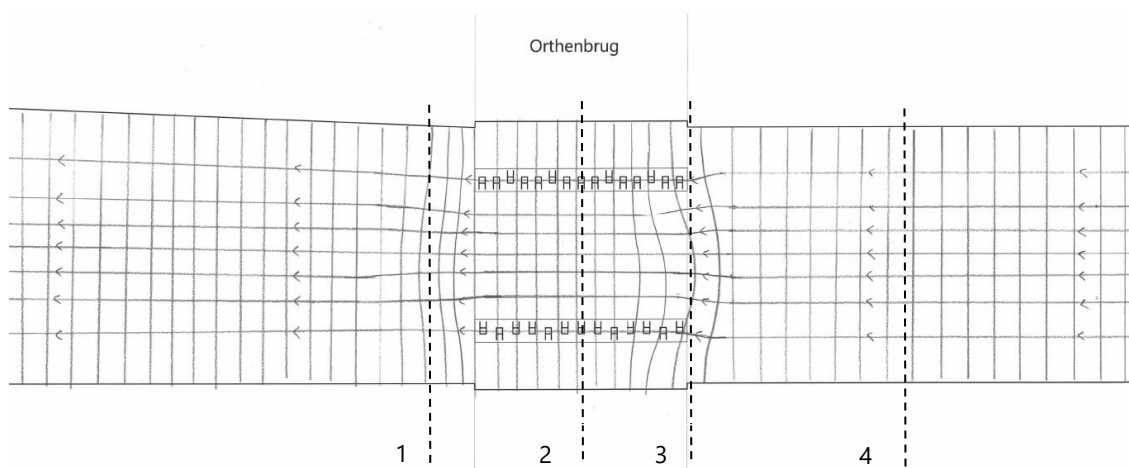


4.2.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

Bovenstrooms van de Orthenbrug heeft het kanaal een breedte van 16,8 m. Ter plaatse van de brug zal de stroming deels worden geblokkeerd door de aanwezige onderwaterpalen. Aangezien geen informatie beschikbaar is over de waterdiepte onder de bogen, is een veilige aanname dat het kanaal hier minder diep is en de weerstand door deze bogen dus groter is dan de weerstand van de doorvaaropening. Daardoor wordt verondersteld dat er lichte contractie optreedt van de stroombanen net voor de doorvaaropening van de brug. Dit resulteert in een versnelling van de stroom. Benedenstrooms zal de stroming verwijden en vertragen. Benedenstrooms van de brug neemt de breedte van het kanaal toe en mondt uiteindelijk uit in de Dieze.

In afbeelding 4.6 resulteert het kanaalprofiel (zoals deze is weergegeven in afbeelding 4.3) in een verdeling van stroombanen met verschillende breedtes. Daar waar de diepte het grootst is, zijn de stroombanen het smalst, zodat elke stroombaan hetzelfde debiet bevat.

Afbeelding 4.6 Stroomveld rond de Orthenbrug



De toelaatbare afvoeren zijn op een vergelijkbare manier als in hoofdstuk 3 bepaald voor de 4 doorsnedes in afbeelding 4.6. De resultaten zijn samengevat in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Toelaatbare afvoeren aan de hand van de vooraf gestelde eisen rondom de Orthenbrug

| | Doorsnede 1 | Doorsnede 2 | Doorsnede 3 | Doorsnede 4 |
|--|--|---|--|---|
| | bs = 1,41 m $\beta = 10^\circ$ h = 2,7 m | bs = 1,21 m $\beta = 0^\circ$ h = 2,7 m | bs = 1,62 m $\beta = 15^\circ$ h = 2,7 m | bs = 1,62 m $\beta = 0^\circ$ h = 2,7 m |
| eis <0,5 m/s langsstroom | 15,5 m ³ /s | 13,1 m ³ /s | 18,1 m ³ /s | 17,5 m ³ /s |
| eis <0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 24,7 m ³ /s | 20,9 m ³ /s | 29,0 m ³ /s | 28,0 m ³ /s |
| eis < 0,3 m/s dwarsstroom | 52,6 m ³ /s | n.v.t. | 40,6 m ³ /s | n.v.t. |
| eis < 0,4 drenkelingen | 12,2 m ³ /s | 10,5 m ³ /s | 14,0 m ³ /s | 14,0 m ³ /s |

De eerste eis van <0,5 m/s langsstroom zal niet maatgevend zijn aangezien er voldoende uitloop is over de rondom de brug. Hierdoor wordt de maatgevende eis voor langsstroom volgens [ref. 3] bepaald door de eis voor <0,8 m/s. De eis op doorsnede 2 is maatgevend en resulteert in een toelaatbaar debiet van 20,9 m³/s. Hier hoeft het nivelleerdebiet niet te worden meegerekend, omdat voor deze afvoeren de sluis niet bevaarbaar zal zijn. Dit spuidebiet wordt in het vaarseizoen gemiddeld 4-5 dagen gedurende ten minste 1 uur overschreden. Veiligheid voor drenkelingen kan worden gegarandeerd tot een debiet van 10,5 m³/s.

4.2.2 Indicatieve bodembescherming

De karakteristieke diameter van een indicatieve bodembescherming is berekend aan de hand van de kritieke stroomsnelheden die optreden bij een debiet van 31 m³/s aan de hand van dezelfde methode als is in hoofdstuk 3. De resultaten zijn voor de 4 doorsnedes samengevat in tabel 4.2.

Tabel 4.2 Overzicht benodigde diameter voor de toplaag van stortstenen bodembescherming rondom de Orthenbrug

| | Uc | D _{n50} (z = laagdikte) |
|---|---------|----------------------------------|
| doorsnede 1 ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,0 m/s | 0,05 m (z = 0,10 m) |
| doorsnede 2 ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 1,2 m/s | 0,05 m (z = 0,10 m) |
| doorsnede 3 ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 0,9 m/s | 0,02 m (z = 0,05 m) |
| doorsnede 4 ($k_t^2 = 1$; evenwijdig) | 0,9 m/s | 0,01 m (z = 0,03 m) |

De toepassing van breuksteen rondom de brug is praktische oplossing gezien de beperkte diameter en laagdikte van de toplaag van de indicatieve bodembescherming. De steenklasse 10-60 kg is ook hier van toepassing. Benedenstrooms van de bodembescherming wordt een beperkte erosiekuil verwacht. Deze wordt opgevuld door middel van een 'falling apron' principe waarbij de erosiekuil wordt opgevuld met het materiaal van de aanwezige bodembescherming.

Doordat binnenvaart jarenlang gebruik heeft gemaakt van de Zuid-Willemsvaart zijn ook ter plaatse van de bruggen erosiekuilen ontstaan. Deze kuilen zijn door Rijkswaterstaat opgevuld voordat zij het kanaal overdroegen. Verwacht mag worden dat de stroomsnelheden door een langsvarend schip ook rond de 0,5 m/s tot 0,8 m/s liggen, zodat vergelijkbare erosiekuilen kunnen ontstaan.

4.3 Kasterenbrug

Ten Zuiden van de Orthenbrug ligt de Kasterenbrug (afbeelding 4.7). Deze stalen ophaalbrug brug is gebouwd op 2 in het water staande pijlers die, net als de Orthenbrug, zijn gefundeerd op palen waarvan de bovenzijde rijkt tot rond het waterpeil in het kanaal. Het doorstroomoppervlak van het water in het kanaal is dus groter dan het beeld boven water doet vermoeden. De stroomvelden en de indicatieve bodembescherming rond de brug worden bestudeerd in deze paragraaf.

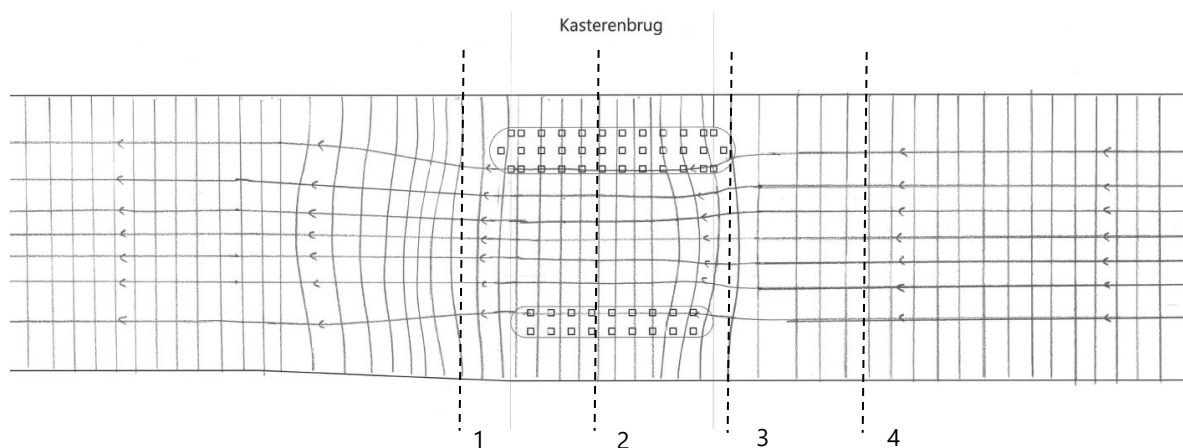
Afbeelding 4.7 Zicht op de Kasterenbrug. Bron: [ref. 11]



4.3.1 Stroomveld en toelaatbaar debiet

Bovenstrooms van de Kasterenbrug heeft het kanaal een breedte van 18,5 m. Ook hier zal ter plaatse van de brug de stroming deels worden geblokkeerd door de aanwezige onderwaterpalen. Omdat het kanaal aan beide buitenzijdes van de pijlers relatief ondiep is, zal de meeste stroming de weg van de minste weerstand kiezen en door de uitvaartopening stromen. Hier ontstaat een zone van contractie. Benedenstrooms van de Kasterenbrug zal de stroming verwijden en treedt er lichte vertraging van de hoofdstroom op. Verder benedenstrooms neemt de kanaalbreedte af tot een breedte van 17,8 m. De stroomsnelheden zullen worden getoetst op de aangegeven doorsneden in afbeelding 4.8.

Afbeelding 4.8 Stroomveld rond de Kasterenbrug



De resultaten zijn samengevat in tabel 4.3.

Tabel 4.3 Toelaatbare afvoeren aan de hand van de vooraf gestelde eisen rondom de Kasterenbrug

| | Doorsnede 1 | Doorsnede 2 | Doorsnede 3 | Doorsnede 4 |
|--|---|--|---|--|
| | $b_s = 1,31 \text{ m}$ $\beta = 10^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 1,21 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 1,72 \text{ m}$ $\beta = 15^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ | $b_s = 1,72 \text{ m}$ $\beta = 0^\circ$ $h = 2,7 \text{ m}$ |
| eis <0,5 m/s langsstroom | 14,4 m ³ /s | 13,1 m ³ /s | 19,2 m ³ /s | 18,6 m ³ /s |
| eis <0,8 m/s langsstroom mits 50 m uitloop (versmalling) | 23,0 m ³ /s | 20,9 m ³ /s | 30,8 m ³ /s | 29,7 m ³ /s |
| eis < 0,3 m/s dwarsstroom | 48,9 m ³ /s | n.v.t. | 43,1 m ³ /s | n.v.t. |
| eis < 0,4 m/s drenkelingen | 11,3 m ³ /s | 10,5 m ³ /s | 14,9 m ³ /s | 14,9 m ³ /s |

Het kanaal biedt rondom de brug voldoende uitloop, zodat de eis voor <0,5 m/s langsstroom vervalt. Het toelaatbare debiet rondom de brug bedraagt 20,9 m³/s volgens de eis voor <0,8 m/s langsstroom waarbij de condities voor recreatievaart voldoen aan [ref. 3]. Dit is hetzelfde limiet als het limiet dat geldt voor de Orthenbrug. Voor drenkelingen kan een veilige situatie worden gegarandeerd tot een totaal debiet van 10,5 m³/s.

4.3.2 Indicatieve bodembescherming

De karakteristieke diameter van een indicatieve bodembescherming is berekend aan de hand van de kritieke stroomsnelheden die optreden bij een debiet van 31 m³/s. Op doorsnede 1 wordt een vertraging van de stroom waargenomen. Daarom is gerekend met een k_t^2 van 2 op doorsnede 1. Op de doorsnedes onder de brug is wegens contractie $k_t^2 = 1,5$ genomen. Bovenstreams geldt $k_t^2 = 1$. De resultaten zijn voor de 4 doorsnedes samengevat in tabel 4.4.

Tabel 4.4 Overzicht benodigde diameter voor de toplaag van stortstenen bodembescherming rondom de Kasterenbrug

| | Uc | D _{n50} (z = laagdikte) |
|---|---------|----------------------------------|
| doorsnede 1 ($k_t^2 = 2$; vertraging) | 1,1 m/s | 0,06 m (z = 0,12 m) |
| doorsnede 2 ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 1,2 m/s | 0,05 m (z = 0,10 m) |
| doorsnede 3 ($k_t^2 = 1,5$; contractie) | 0,8 m/s | 0,02 m (z = 0,04 m) |
| doorsnede 4 ($k_t^2 = 1$; evenwijdig) | 0,8 m/s | 0,01 m (z = 0,03 m) |

Voor de Kasterenbrug is het een praktische oplossing om te kiezen voor een breukstenen bodembescherming rondom de brug. De steenklasse 10-60 kg kan hiervoor worden gebruikt. Hier geldt ook dat benedenstreams van de indicatieve bodembescherming een beperkte erosiekuil wordt verwacht. Deze wordt opgevuld door middel van een 'falling apron' principe waarbij de erosiekuil wordt opgevuld met het materiaal van de aanwezige bodembescherming.

Doordat binnenvaart jarenlang gebruik heeft gemaakt van de Zuid-Willemsvaart zijn ook ter plaatse van de bruggen erosiekuilen ontstaan. Deze kuilen zijn door Rijkswaterstaat opgevuld voordat zij het kanaal

overdroegen. Verwacht mag worden dat de stroomsnelheden door een langsvarend schip rond de 0,5 m/s tot 0,8 m/s liggen, zodat vergelijkbare erosiekuilen kunnen ontstaan.

Voor beide bruggen is de toepassing van filterlagen buiten beschouwing gelaten.

5

DISCUSSIE

Diverse keuzes die zijn gemaakt tijdens deze studie vergen nadere toelichting. Deze zijn in dit hoofdstuk onderbouwd.

5.1 Dataset spuidebieten

Als input voor de data-analyse is een dataset gebruikt die 5 jaar beslaat. Het is aangetoond in bijlage I dat de statistiek tussen verschillende jaren varieert. Een dergelijke statistische analyse die meer jaren aan data beslaat geeft meer zekerheid over statistische parameters.

Daarnaast is er onzekerheid over de gebruikte kalibratieparameter van het model dat is gebruikt voor het generen van de data van spuidebieten. In [ref. 2] wordt aangetoond dat de gebruikte kalibratieparameter mogelijk een onderschatting van de spuidebieten oplevert.

Een van de indicatoren voor de bruikbaarheid van de sluis is het aantal gemiddelde dagen per vaarseizoen dat een spuidebiet gedurende een minimale tijd wordt overschreden. Er is geen onderscheid gemaakt tussen dag of nacht. Indien het beheer het toelaat, zouden relatief hoge spuidebieten 's nachts kunnen worden afgevoerd. 's Nachts wordt de sluis niet gebruikt door recreatievaart. Op die manier kan door middel van het planmatig beheren van het peil de sluis een groter deel van de tijd beschikbaar zijn voor recreatievaart. Bovendien kunnen op deze manier risico's voor drenkelingenveiligheid worden gereduceerd.

5.2 Aannames hydraulische belasting

5.2.1 Stroming

Voor de berekening van de stroomsnelheden is zowel beneden- als bovenstrooms uitgegaan van een minimum peil. Aangezien tijdens deze conditie het doorstroomoppervlak in het kanaal het kleinst is, vormt dit de meest extreme conditie. Een interessante vervolgstap is het analyseren van een mogelijke correlatie tussen het waterpeil en het spuidebiet, in relatie tot het wel of niet kunnen spuien op de Maas. Indien een duidelijke correlatie aanwezig is, kan dit leiden tot een toename in toelaatbare spuidebieten.

De dwarsdoorsnede van het kanaal boven- en benedenstrooms van Sluis 0 zijn een bron van onzekerheid. Het profiel van het kanaal is bepalend voor de stroombanen. Benedenstrooms is een inschatting gemaakt op basis van afbeelding 3.9. Aangezien het kanaal bovenstrooms relatief breed is, wordt de invloed van een mogelijk aanwezig talud van de oevers op de stroombanen relatief klein geacht.

5.2.2 Translatiegolven

Bij het plotseling spuien of nivelleren ontstaan translatiegolven. De hoogte van een golffront van een translatiegolf kan worden geschat aan de hand van vergelijking 5-1.

$$\delta h = \frac{\delta Q}{B\sqrt{gh}}$$

Voor een ontwerpdebiet van 31 m³/s leidt dit direct benedenstrooms van de spuikanalen tot een golfhoogte van 1 m. Benedenstrooms in het kanaal bedraagt de golfhoogte ongeveer 0,4 m. Dit leidt tot een relatief grote verandering in de waterstand. Daarom is het verstandig om het debiet geleidelijk te laten oplopen zodat de translatiegolf gering is. Als dat niet kan dan dienen de damwanden van het kanaal hierop te worden getoetst. Direct bovenstrooms van de spuikanalen ontstaan een translatiegolf met een verlaging van de waterstand met 0,5 m direct bovenstrooms van Sluis 0. Deze effecten zijn niet in rekening gebracht bij de berekening van toelaatbare spuidebieten. Benedenstrooms van Sluis 0 leidt dit tot een conservatievere berekening. Bovenstrooms van Sluis 0 worden stroomsnelheden licht onderschat met ongeveer 10 % voor de situatie met een maximaal spuidebiet en een minimaal waterpeil.

5.3 Indicatieve bodembescherming

In deze studie is enkel de benodigde D_{n50} van de toplaag en een schatting voor de laagdikte van een benodigde bodembescherming berekend. Andere essentiële karakteristieken als filterlagen en uitvoerbaarheid zijn niet behandeld. Dit vereist een meer gedetailleerde beschouwing.

Daarnaast is ook enkel de invloed van stroming meegenomen in deze berekening. De retourstroom van boten is niet maatgevend geacht: de retourstroom onder boten is kleiner dan de maximale stroomsnelheid bij het bestudeerde ontwerpdebiet. Dit kan met behulp van een eerste inschatting worden aangetoond, gebruik makende van het Schijf-diagram [ref. 9]. Als wordt aangenomen dat het frontale oppervlak van een boot 10 % beslaat van het totale doorstroomoppervlak van het kanaal, een boot onder de 80 % van zijn grenssnelheid vaart en het kanaal een gemiddelde diepte heeft van 2,3 m, bedraagt de retourstroom ongeveer 0,3 - 0,5 m/s. Dit is lager dan de berekende stroomsnelheden die volgen uit de ontwerpconditie voor het spuidebiet van 31 m³/s.

6

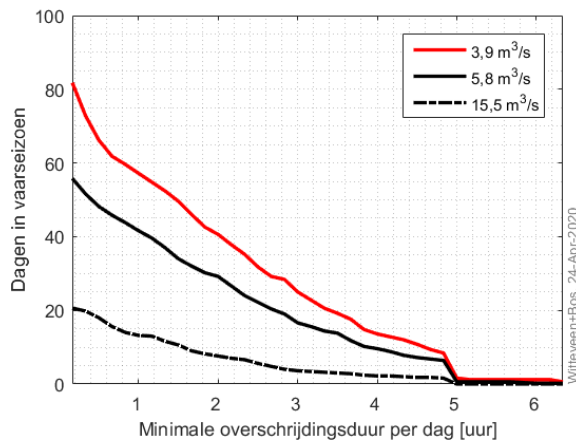
CONCLUSIE

6.1 Sluis 0

Eisen voor recreatievaart

De analyses van stroombanen rondom Sluis 0 tonen aan dat in het geval door 1 omloopkanaal gespuid wordt, tot een spuidebiet tot $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ aan de eisen voor recreatievaart wordt voldaan. Indien door 2 kanalen wordt gespuid, kan recreatievaart tot een toelaatbaar spuidebiet van $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ nog gebruik maken van de sluis. Deze condities worden in het vaarseizoen (april - oktober; 214 dagen) gemiddeld gedurende respectievelijk 57 en 42 dagen per jaar ten minste 1 uur per dag overschreden. Voor een minimale overschrijdingsduur van 2 uur zijn dit respectievelijk 41 en 29 dagen. Voor overige minimale overschrijdingsduren kan het aantal dagen waarop de spuidebieten worden overschreden worden uitgelezen uit afbeelding 6.1 en de tabellen in bijlage III. Deze condities zijn onafhankelijk van het nivelleren van de sluis omdat tijdens het nivelleren recreatievaart in de sluiskamer of bij de wachtplaatsen zal zijn en niet in de nabijheid van de sluis zal varen. Op deze locatie is de eis maatgevende toelaatbare afvoer gedefinieerd. Een beheerstrategie voor het inzetten van de omloopkanalen is samengevat in tabel 6.1.

Afbeelding 6.1 Curves die het gemiddeld aantal dagen tijdens het vaarseizoen beschrijven waarop een minimale overschrijdingsduur per dag van de spuidebieten optreedt



Tabel 6.1 Beheerstrategie spuidebiet door Sluis 0

| Spuiregime [m ³ /s] | Veilig voor recreatievaart | Gemiddeld jaarlijks overschrijdings-percentage [%] | Spuikanalen in gebruik |
|-----------------------------------|----------------------------|---|------------------------|
| 0 - 3,9 | ja | 6,9 | 1 spuikanaal |
| 3,9 - 5,8 | ja | 4,9 | 2 spuikanalen |
| 3,9 - 15,5 | nee | 0,9 | 1 spuikanaal |
| 15,5 - 31,0 | nee | 0,003 | 2 spuikanalen |

Als er geen recreatievaart is kan er tot een debiet van 15,5 m³/s door 1 spuikanaal gespuid worden. Dit treedt jaarlijks ongeveer 0,9% van de tijd op. Daarboven moet gespuid worden door 2 kanalen. Het ontwerp spuidebiet van 31 m³/s wordt ongeveer 0,003 % van de tijd overschreden.

De toelaatbare afvoeren zijn afhankelijk van het ontwerp van de sluis en de omloopkanalen. Dit houdt in dat een optimalisatie van het ontwerp kan leiden tot een verhoogde toelaatbare spui-afvoer door Sluis 0. Mogelijke optimalisatiestappen zijn het vergroten (verbreden) van het uitstroomoppervlak van de omloopkanalen. Daarnaast kan ook de hoek van het omloopkanaal met de kanaalas worden verkleind. Deze is nu 45°. Wanneer deze verkleind wordt, wordt de dwarsstroom in het kanaal gereduceerd. Daarnaast zal de mate van contractie benedenstrooms van de uitlaatopeningen afnemen. Een andere optie is een planmatig peilbeheer, zodat vooral 's nachts spuidebieten worden afgevoerd die recreatievaart niet mogelijk maken.

Eisen voor veiligheid drenkelingen

Rondom de sluis en de bruggen is het verboden om te zwemmen. Dit is bovendien gevaarlijk. Echter heerst er het risico dat drenkelingen te water komen door de aanwezigheid van het omliggende stadspark. In het sluiscomplex bevinden zich zones waar de stroming versnelt en vertraagt. Dit resulteert ook in wervels waardoor onveilige situaties kunnen optreden. Daarnaast leiden de in- en uitlaatopeningen van de spuikanalen tot lokale kolken waarin onveilige situaties kunnen ontstaan voor drenkelingen. Het wordt geadviseerd om recreanten hiervoor te waarschuwen, of beschermende maatregelen te treffen. De limieten waarvoor veiligheid voor drenkelingen kan worden gegarandeerd zijn samengevat in tabel 6.2.

Tabel 6.2 Conditie voor veiligheid van drenkelingen rondom Sluis 0

| Locatie | Limiet debiet | Gemiddeld jaarlijks overschrijdingspercentage van spuidebiet |
|--|---|--|
| Benedenstrooms sluiscomplex (segment 1) | 6,5 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 4,1 m ³ /s (spuidebiet) | 6,3 % |
| Benedenpand sluiscomplex (segment 2) | 1 spuikanaal 3,7 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 1,3 m ³ /s (spuidebiet) | 15,2 % |
| | 2 spuikanalen 4,6 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 2,2 m ³ /s (spuidebiet) (!) Bij de uitlaat van de spuikanalen ontstaan naast hoge stroomsnelheden ook een grote mate van turbulentie en wervelvorming. Deze locatie vormt een gevarezone voor drenkelingen | 9,8 % |
| In sluiskamer | >2,4 m ³ /s (nivelleerdebiet) (!) Tijdens nivelleren ontstaat een grote mate van turbulentie en wervelvorming. Net als in iedere | n.v.t. |

| Locatie | Limiet debiet | Gemiddeld jaarlijks overschrijdingspercentage van spuidebiet |
|---------------------------------------|---|--|
| Bovenpand sluiscomplex (segment 3) | andere schutsluis is de sluiskamer een gevaarlijke zone voor drenkelingen. | |
| | 1 spuikanaal 9,7 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 7,6 m ³ /s (spuidebiet) | 3,3 % |
| Bovenstrooms sluiscomplex (segment 4) | 2 spuikanalen 13,5 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 11,4 m ³ /s (spuidebiet) (!) Bij de inlaten van de spuikanalen ontstaan naast hoge stroomsnelheden ook turbulentie en sterke wervelvorming. De locatie vormt een gevarezone voor drenkelingen | |
| | 9,9 m ³ /s (totaal debiet incl. nivelleren) 7,8 m ³ /s (spuidebiet) (!) Door de contractie van de stroming onder de Anthoniebrug treden plotselinge stroomversnellingen en wervels op met als gevolg een verhoogd risico voor drenkelingen | 3,3 % |

6.2 Orthenbrug en Kasterenbrug

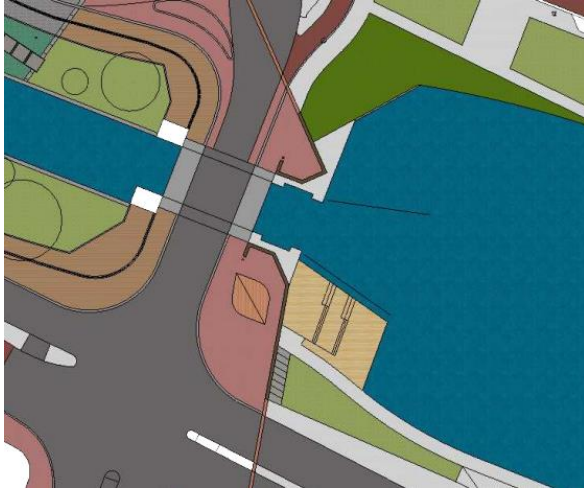
Aan de hand van de stroomvelden is afgeleid dat de aanwezigheid van de Orthenbrug en de Kasterenbrug niet leidt tot een significante afname van het doorstroomoppervlak van het kanaal. De stroming zal beperkt worden beïnvloed door de aanwezige onderwaterpalen. Hierdoor treedt lichte contractie van de stroming op. Ter plaatse van de bruggen zal de stroming iets versnellen en benedenstrooms weer vertragen. Hiervoor wordt een stortstenen bodembescherming met een D_{n50} van circa 5-7 cm berekend rondom beide bruggen. De Hinthamerbrug en de Anthoniebrug zijn beide meegenomen in de bepaling van stroomvelden en indicatieve bodembescherming rondom Sluis 0.

Uit de analyses van stroombanen volgt dat de Zuid-Willemsvaart benedenstrooms van Sluis 0 bevaarbaar is tot een totaal debiet van 20,9 m³/s. Dit debiet wordt gemiddeld 4-5 dagen per vaarseizoen minimaal 1 uur per dag overschreden. Voor overige overschrijdsduren wordt verwezen naar bijlage III. Veiligheid voor drenkelingen rondom de brug wordt gegarandeerd tot 10,5 m³/s (jaarlijks overschrijdingspercentage van 2,1 % van de tijd).

6.3 Opmerkingen over positie steiger

De opdrachtgever heeft aangegeven een steiger aan te willen leggen direct bovenstrooms van de Anthoniebrug (afbeelding 6.2). Dit wordt echter afgeraden. De analyse van stroombanen heeft aangetoond dat de stroming versnelt en contractie plaatsvindt rondom de brug. Deze stroomversnelling leidt tot onveilige situaties in het geval een drenkeling te water valt en onder de brug wordt meegevoerd. De kans op dit laatste wordt vergroot door het plaatsen van een steiger op de genoemde locatie. Een betere locatie is bovenstrooms in de Zuid-Willemsvaart, op voldoende afstand van de brug (bijvoorbeeld ter hoogte van doorsnede 5 in afbeelding 3.17).

Afbeelding 6.2 De voorgestelde locatie van steiger



7

REFERENTIES

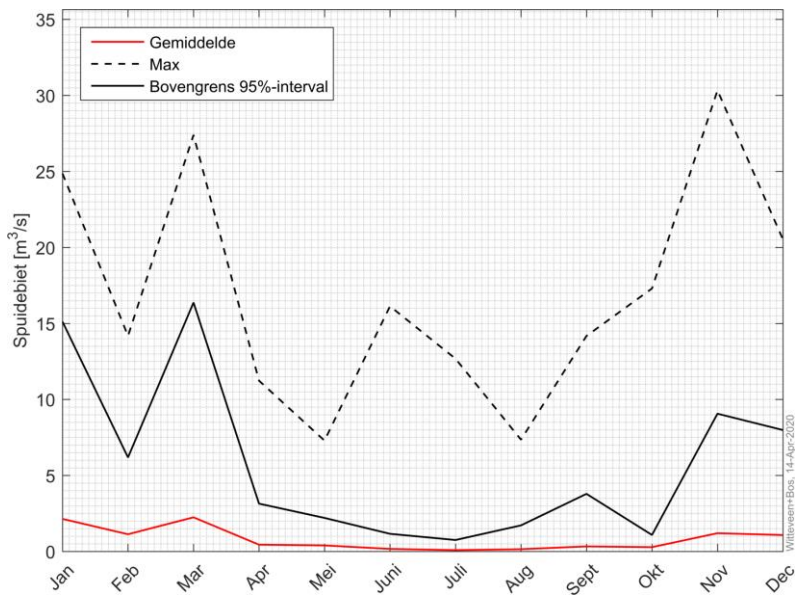
1. Wagemaker (2018). Structuurontwerp Sluis 0, Ontwerpnota.
2. Witteveen+Bos (2019). Aanbeveling debietberekening aflatwerk Poeldonk.
3. Rijkswaterstaat (2017). Richtlijn Vaarwegen.
4. Rijkswaterstaat Waterdienst december (2008), Fysieke Veiligheid Zwemmers in Oppervlaktewater, ACHTERGRONDRAPPORT, registratienummer: MD-WR20080560, dossier: C1259.
5. Reddingsbrigade Nederland (2004).
6. Nortier, I. W. en De Koning, P. (1996). Toegepaste vloeistofmechanica. Hydraulica voor waterbouwkundigen, 7^e druk. Noordhoff Uitgevers B.V. ISBN 9789040103186.
7. CIRIA (2007). The CUR Rock Manual.
8. Wagemaker (2018). Structuurontwerp Sluis Tekening nr W17229 TEK-002, 18-06-2018.
9. Groenveld (2002). Inland Waterways: Ports, waterways and inland navigation. Lecture notes CT4330 TU Delft.
10. Rijkswaterstaat (2000). Ontwerpen van Schutsluizen.
11. Groeten Uit Den Bosch. Via: groetenuitdenbosch.nl (bezoekt op 15 april 2020).

Bijlage(n)

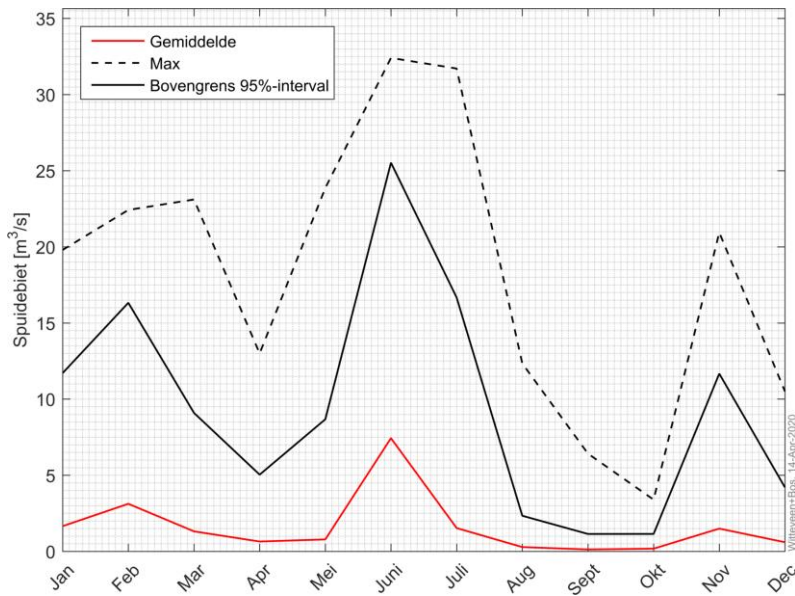
BIJLAGE: JAARLIJKSE STATISTIEK

De minima en ondergrenzen van de 95 %-intervallen liggen praktisch op de 0-lijn en zijn daarom niet weergegeven in de onderstaande afbeeldingen.

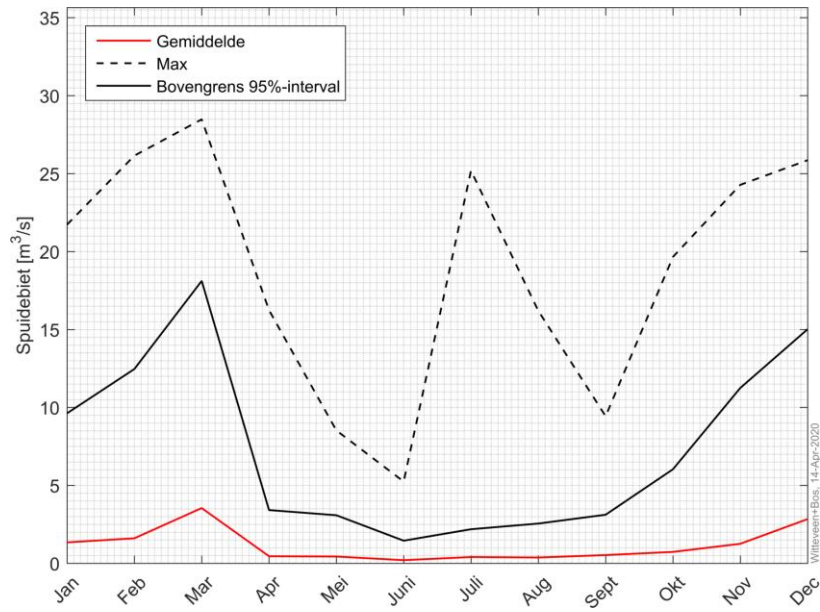
1.1 Maandelijkse statistiek van 2015



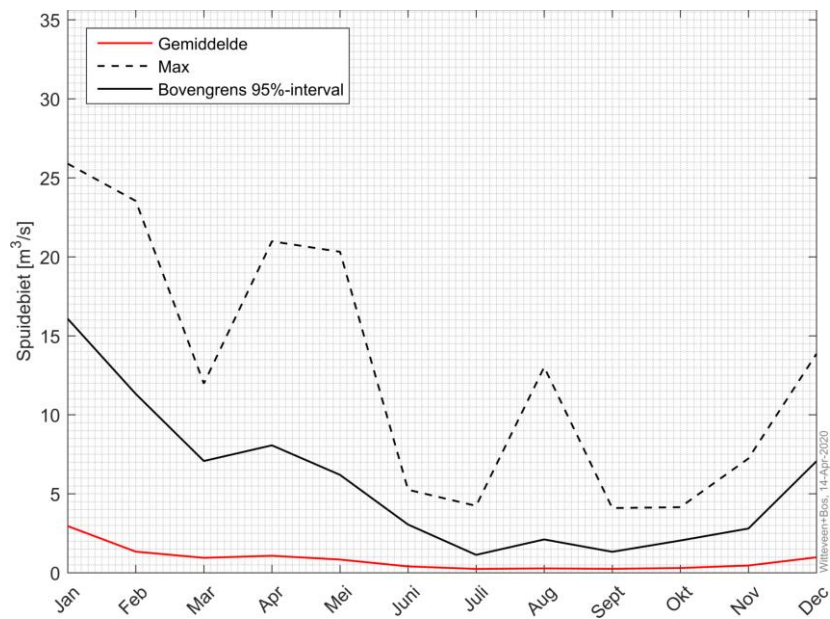
1.2 Maandelijkse statistiek van 2016



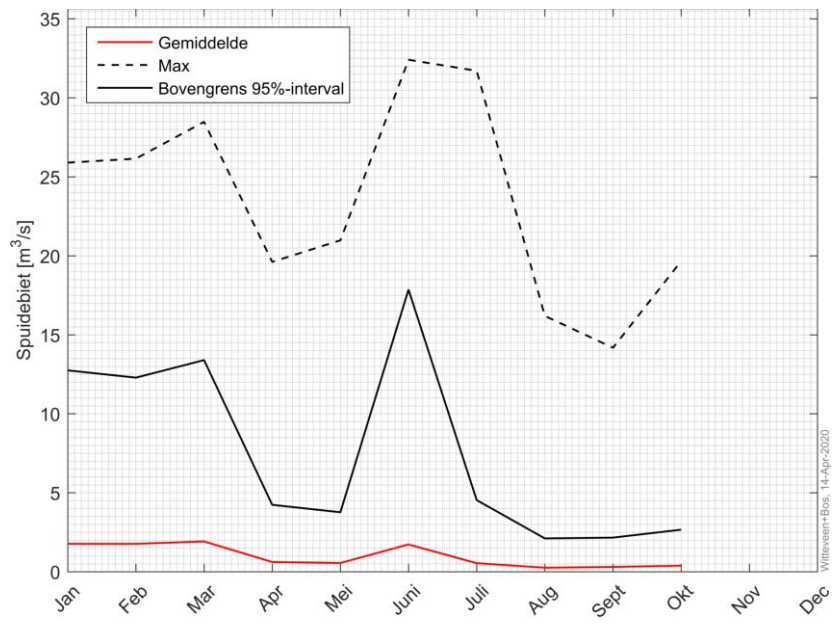
1.3 Maandelijkse statistiek van 2017



1.4 Maandelijkse statistiek van 2018



1.5 Maandelijkse statistiek van 2019





BIJLAGE: UITLEESTABELLEN MET OVERSCHRIJDINGSPERCENTAGES

II.1 Overschrijdingspercentages voor het hele jaar

Tabel II.1 Uitleestabel overschrijdingspercentages spuidebieten voor het hele jaar

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage gedurende het hele jaar [%] |
|--------------------------------|---|
| 32,41 | 0 |
| 25,53 | 0,06 |
| 22,88 | 0,12 |
| 21,62 | 0,17 |
| 20,67 | 0,23 |
| 19,91 | 0,29 |
| 19,32 | 0,35 |
| 18,8 | 0,41 |
| 18,33 | 0,47 |
| 17,75 | 0,52 |
| 17,3 | 0,58 |
| 16,89 | 0,64 |
| 16,53 | 0,7 |
| 16,11 | 0,76 |
| 15,73 | 0,82 |
| 15,44 | 0,87 |
| 15,13 | 0,93 |
| 14,78 | 0,99 |
| 14,46 | 1,05 |
| 14,14 | 1,11 |
| 13,88 | 1,16 |
| 13,66 | 1,22 |
| 13,39 | 1,28 |
| 13,13 | 1,34 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage gedurende het hele jaar [%] |
|--------------------------------|---|
| 12,84 | 1,4 |
| 12,54 | 1,46 |
| 12,29 | 1,51 |
| 12,07 | 1,57 |
| 11,92 | 1,63 |
| 11,75 | 1,69 |
| 11,59 | 1,75 |
| 11,4 | 1,8 |
| 11,22 | 1,86 |
| 11,04 | 1,92 |
| 10,91 | 1,98 |
| 10,76 | 2,04 |
| 10,54 | 2,1 |
| 10,37 | 2,15 |
| 10,19 | 2,21 |
| 10,04 | 2,27 |
| 9,9 | 2,33 |
| 9,78 | 2,39 |
| 9,59 | 2,44 |
| 9,36 | 2,5 |
| 9,19 | 2,56 |
| 9,01 | 2,62 |
| 8,86 | 2,68 |
| 8,67 | 2,74 |
| 8,47 | 2,79 |
| 8,37 | 2,85 |
| 8,29 | 2,91 |
| 8,21 | 2,97 |
| 8,12 | 3,03 |
| 8,05 | 3,08 |
| 7,97 | 3,14 |
| 7,9 | 3,2 |
| 7,81 | 3,26 |
| 7,69 | 3,32 |
| 7,49 | 3,38 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage gedurende het hele jaar [%] |
|--------------------------------|---|
| 7,3 | 3,43 |
| 7,17 | 3,49 |
| 7,09 | 3,55 |
| 6,99 | 3,61 |
| 6,88 | 3,67 |
| 6,75 | 3,72 |
| 6,62 | 3,78 |
| 6,47 | 3,84 |
| 6,37 | 3,9 |
| 6,32 | 3,96 |
| 6,26 | 4,02 |
| 6,22 | 4,07 |
| 6,18 | 4,13 |
| 6,14 | 4,19 |
| 6,1 | 4,25 |
| 6,05 | 4,31 |
| 6,01 | 4,37 |
| 5,97 | 4,42 |
| 5,92 | 4,48 |
| 5,87 | 4,54 |
| 5,81 | 4,6 |
| 5,73 | 4,66 |
| 5,62 | 4,71 |
| 5,54 | 4,77 |
| 5,45 | 4,83 |
| 5,33 | 4,89 |
| 5,25 | 4,95 |
| 5,19 | 5,01 |
| 5,14 | 5,06 |
| 5,1 | 5,12 |
| 5,04 | 5,18 |
| 4,99 | 5,24 |
| 4,94 | 5,3 |
| 4,84 | 5,35 |
| 4,73 | 5,41 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage gedurende het hele jaar [%] |
|--------------------------------|---|
| 4,62 | 5,47 |
| 4,53 | 5,53 |
| 4,43 | 5,59 |
| 4,33 | 5,65 |
| 4,27 | 5,7 |
| 4,24 | 5,76 |
| 4,23 | 5,82 |
| 4,21 | 5,88 |
| 4,2 | 5,94 |
| 4,18 | 5,99 |
| 4,18 | 6,05 |
| 4,16 | 6,11 |
| 4,14 | 6,17 |
| 4,12 | 6,23 |
| 4,1 | 6,29 |
| 4,1 | 6,34 |
| 4,08 | 6,4 |
| 4,06 | 6,46 |
| 4,05 | 6,52 |
| 4,03 | 6,58 |
| 4,01 | 6,63 |
| 3,99 | 6,69 |
| 3,96 | 6,75 |
| 3,93 | 6,81 |
| 3,91 | 6,87 |
| 3,88 | 6,93 |
| 3,85 | 6,98 |
| 3,8 | 7,04 |
| 3,74 | 7,1 |
| 3,66 | 7,16 |
| 3,59 | 7,22 |
| 3,52 | 7,27 |
| 3,46 | 7,33 |
| 3,43 | 7,39 |
| 3,36 | 7,45 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage gedurende het hele jaar [%] |
|--------------------------------|---|
| 3,3 | 7,51 |
| 3,25 | 7,57 |
| 3,22 | 7,62 |
| 3,19 | 7,68 |
| 3,17 | 7,74 |
| 3,15 | 7,8 |
| 3,14 | 7,86 |
| 3,13 | 7,91 |
| 3,12 | 7,97 |
| 3,11 | 8,03 |
| 3,1 | 8,09 |
| 3,09 | 8,15 |
| 3,08 | 8,21 |
| 3,07 | 8,26 |
| 3,06 | 8,32 |
| 3,05 | 8,38 |
| 3,04 | 8,44 |
| 3,02 | 8,5 |
| 3 | 8,56 |
| 2,99 | 8,61 |
| 2,97 | 8,67 |
| 2,95 | 8,73 |
| 2,93 | 8,79 |
| 2,9 | 8,85 |
| 2,87 | 8,9 |
| 2,84 | 8,96 |

II.2 Overschrijdingspercentages tijdens het vaarseizoen

Tabel II.2 Uitleestabel overschrijdingspercentages spuidebieten tijdens het vaarseizoen (april - oktober)

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage tijdens vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|---|
| 32,41 | 0 |
| 26,04 | 0,07 |
| 22,76 | 0,13 |
| 21,05 | 0,2 |
| 19,99 | 0,26 |
| 19,26 | 0,33 |
| 18,56 | 0,39 |
| 17,8 | 0,45 |
| 17,19 | 0,52 |
| 16,59 | 0,58 |
| 15,75 | 0,65 |
| 15,29 | 0,71 |
| 14,71 | 0,78 |
| 14,09 | 0,84 |
| 13,71 | 0,91 |
| 13,25 | 0,97 |
| 12,75 | 1,04 |
| 12,17 | 1,1 |
| 11,82 | 1,17 |
| 11,42 | 1,23 |
| 10,91 | 1,3 |
| 10,49 | 1,36 |
| 10,1 | 1,43 |
| 9,73 | 1,49 |
| 9,26 | 1,56 |
| 8,65 | 1,62 |
| 8,29 | 1,69 |
| 8,06 | 1,75 |
| 7,71 | 1,82 |
| 7,32 | 1,88 |
| 7,02 | 1,95 |
| 6,62 | 2,01 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage tijdens vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|---|
| 6,35 | 2,08 |
| 6,22 | 2,14 |
| 6,13 | 2,21 |
| 6,03 | 2,27 |
| 5,85 | 2,34 |
| 5,6 | 2,4 |
| 5,33 | 2,47 |
| 5,19 | 2,53 |
| 5,07 | 2,6 |
| 4,9 | 2,66 |
| 4,61 | 2,73 |
| 4,38 | 2,79 |
| 4,24 | 2,86 |
| 4,21 | 2,92 |
| 4,18 | 2,99 |
| 4,14 | 3,05 |
| 4,1 | 3,12 |
| 4,07 | 3,18 |
| 4,01 | 3,24 |
| 3,93 | 3,31 |
| 3,83 | 3,37 |
| 3,65 | 3,44 |
| 3,51 | 3,5 |
| 3,42 | 3,57 |
| 3,28 | 3,63 |
| 3,21 | 3,7 |
| 3,18 | 3,76 |
| 3,15 | 3,83 |
| 3,14 | 3,89 |
| 3,12 | 3,96 |
| 3,1 | 4,02 |
| 3,07 | 4,09 |
| 3,06 | 4,15 |
| 3,04 | 4,22 |
| 3,01 | 4,28 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage tijdens vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|---|
| 2,96 | 4,35 |
| 2,89 | 4,41 |
| 2,83 | 4,48 |
| 2,71 | 4,54 |
| 2,6 | 4,61 |
| 2,52 | 4,67 |
| 2,44 | 4,74 |
| 2,31 | 4,8 |
| 2,23 | 4,87 |
| 2,2 | 4,93 |
| 2,19 | 5 |
| 2,18 | 5,06 |
| 2,17 | 5,13 |
| 2,16 | 5,19 |
| 2,15 | 5,26 |
| 2,15 | 5,32 |
| 2,15 | 5,39 |
| 2,14 | 5,45 |
| 2,13 | 5,52 |
| 2,13 | 5,58 |
| 2,12 | 5,65 |
| 2,12 | 5,71 |
| 2,11 | 5,78 |
| 2,11 | 5,84 |
| 2,1 | 5,91 |
| 2,09 | 5,97 |
| 2,08 | 6,04 |
| 2,08 | 6,1 |
| 2,07 | 6,16 |
| 2,07 | 6,23 |
| 2,06 | 6,29 |
| 2,06 | 6,36 |
| 2,05 | 6,42 |
| 2,05 | 6,49 |
| 2,04 | 6,55 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage tijdens vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|---|
| 2,04 | 6,62 |
| 2,03 | 6,68 |
| 2,03 | 6,75 |
| 2,02 | 6,81 |
| 2,01 | 6,88 |
| 2 | 6,94 |
| 1,99 | 7,01 |
| 1,97 | 7,07 |
| 1,96 | 7,14 |
| 1,94 | 7,2 |
| 1,91 | 7,27 |
| 1,89 | 7,33 |
| 1,87 | 7,4 |
| 1,86 | 7,46 |
| 1,81 | 7,53 |
| 1,79 | 7,59 |
| 1,77 | 7,66 |
| 1,77 | 7,72 |
| 1,75 | 7,79 |
| 1,69 | 7,85 |
| 1,66 | 7,92 |
| 1,59 | 7,98 |
| 1,55 | 8,05 |
| 1,49 | 8,11 |
| 1,47 | 8,18 |
| 1,46 | 8,24 |
| 1,45 | 8,31 |
| 1,38 | 8,37 |
| 1,36 | 8,44 |
| 1,35 | 8,5 |
| 1,33 | 8,57 |
| 1,28 | 8,63 |
| 1,26 | 8,7 |
| 1,24 | 8,76 |
| 1,17 | 8,83 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage tijdens vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|---|
| 1,16 | 8,89 |
| 1,16 | 8,96 |
| 1,15 | 9,02 |
| 1,15 | 9,08 |
| 1,14 | 9,15 |
| 1,14 | 9,21 |
| 1,14 | 9,28 |
| 1,13 | 9,34 |
| 1,13 | 9,41 |
| 1,13 | 9,47 |
| 1,13 | 9,54 |
| 1,13 | 9,6 |
| 1,12 | 9,67 |
| 1,12 | 9,73 |
| 1,12 | 9,8 |
| 1,12 | 9,86 |
| 1,12 | 9,93 |
| 1,12 | 9,99 |

II.3 Overschrijdingspercentages buiten het vaarseizoen

Tabel II.3 Uitleestabel overschrijdingspercentages van spuidebieten buiten vaarseizoen [november - maart]

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 30,33 | 0 |
| 23,3 | 0,1 |
| 21,54 | 0,2 |
| 20,41 | 0,3 |
| 19,4 | 0,4 |
| 18,77 | 0,5 |
| 18,03 | 0,6 |
| 17,47 | 0,7 |
| 16,93 | 0,8 |
| 16,52 | 0,9 |
| 16,13 | 1 |
| 15,75 | 1,1 |
| 15,34 | 1,2 |
| 15,04 | 1,3 |
| 14,71 | 1,4 |
| 14,37 | 1,5 |
| 14,04 | 1,6 |
| 13,78 | 1,7 |
| 13,5 | 1,8 |
| 13,26 | 1,9 |
| 12,95 | 2 |
| 12,64 | 2,1 |
| 12,35 | 2,2 |
| 12,15 | 2,3 |
| 11,98 | 2,4 |
| 11,81 | 2,5 |
| 11,67 | 2,6 |
| 11,52 | 2,7 |
| 11,33 | 2,8 |
| 11,16 | 2,9 |
| 11,03 | 3 |
| 10,92 | 3,1 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 10,79 | 3,2 |
| 10,59 | 3,3 |
| 10,39 | 3,4 |
| 10,22 | 3,5 |
| 10,1 | 3,6 |
| 9,99 | 3,7 |
| 9,86 | 3,8 |
| 9,75 | 3,9 |
| 9,54 | 4 |
| 9,36 | 4,1 |
| 9,21 | 4,2 |
| 9,05 | 4,3 |
| 8,93 | 4,4 |
| 8,79 | 4,5 |
| 8,62 | 4,6 |
| 8,46 | 4,7 |
| 8,37 | 4,8 |
| 8,31 | 4,9 |
| 8,24 | 5 |
| 8,16 | 5,1 |
| 8,09 | 5,2 |
| 8,04 | 5,3 |
| 7,97 | 5,4 |
| 7,91 | 5,5 |
| 7,85 | 5,6 |
| 7,76 | 5,7 |
| 7,64 | 5,8 |
| 7,42 | 5,9 |
| 7,26 | 6 |
| 7,15 | 6,1 |
| 7,08 | 6,2 |
| 7,01 | 6,3 |
| 6,93 | 6,4 |
| 6,83 | 6,5 |
| 6,7 | 6,6 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 6,6 | 6,7 |
| 6,46 | 6,8 |
| 6,37 | 6,9 |
| 6,32 | 7 |
| 6,28 | 7,1 |
| 6,24 | 7,2 |
| 6,2 | 7,3 |
| 6,16 | 7,4 |
| 6,12 | 7,5 |
| 6,09 | 7,6 |
| 6,05 | 7,7 |
| 6,01 | 7,8 |
| 5,97 | 7,9 |
| 5,94 | 8 |
| 5,9 | 8,1 |
| 5,87 | 8,2 |
| 5,81 | 8,3 |
| 5,75 | 8,4 |
| 5,66 | 8,5 |
| 5,58 | 8,6 |
| 5,51 | 8,7 |
| 5,4 | 8,8 |
| 5,31 | 8,9 |
| 5,24 | 9 |
| 5,18 | 9,1 |
| 5,14 | 9,2 |
| 5,09 | 9,3 |
| 5,04 | 9,4 |
| 4,99 | 9,5 |
| 4,95 | 9,6 |
| 4,89 | 9,7 |
| 4,8 | 9,81 |
| 4,71 | 9,91 |
| 4,6 | 10,01 |
| 4,51 | 10,11 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 4,42 | 10,21 |
| 4,32 | 10,31 |
| 4,27 | 10,41 |
| 4,24 | 10,51 |
| 4,23 | 10,61 |
| 4,21 | 10,71 |
| 4,2 | 10,81 |
| 4,19 | 10,91 |
| 4,18 | 11,01 |
| 4,17 | 11,11 |
| 4,15 | 11,21 |
| 4,13 | 11,31 |
| 4,12 | 11,41 |
| 4,1 | 11,51 |
| 4,09 | 11,61 |
| 4,08 | 11,71 |
| 4,06 | 11,81 |
| 4,05 | 11,91 |
| 4,03 | 12,01 |
| 4,01 | 12,11 |
| 4 | 12,21 |
| 3,98 | 12,31 |
| 3,96 | 12,41 |
| 3,93 | 12,51 |
| 3,91 | 12,61 |
| 3,89 | 12,71 |
| 3,86 | 12,81 |
| 3,83 | 12,91 |
| 3,8 | 13,01 |
| 3,75 | 13,11 |
| 3,68 | 13,21 |
| 3,6 | 13,31 |
| 3,54 | 13,41 |
| 3,47 | 13,51 |
| 3,44 | 13,61 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 3,38 | 13,71 |
| 3,32 | 13,81 |
| 3,25 | 13,91 |
| 3,22 | 14,01 |
| 3,19 | 14,11 |
| 3,16 | 14,21 |
| 3,14 | 14,31 |
| 3,13 | 14,41 |
| 3,12 | 14,51 |
| 3,11 | 14,61 |
| 3,1 | 14,71 |
| 3,09 | 14,81 |
| 3,08 | 14,91 |
| 3,07 | 15,01 |
| 3,06 | 15,11 |
| 3,04 | 15,21 |
| 3,03 | 15,31 |
| 3,01 | 15,41 |
| 2,99 | 15,51 |
| 2,98 | 15,61 |
| 2,96 | 15,71 |
| 2,95 | 15,81 |
| 2,92 | 15,91 |
| 2,89 | 16,01 |
| 2,86 | 16,11 |
| 2,84 | 16,21 |
| 2,81 | 16,31 |
| 2,77 | 16,41 |
| 2,72 | 16,51 |
| 2,67 | 16,61 |
| 2,62 | 16,71 |
| 2,57 | 16,81 |
| 2,53 | 16,91 |
| 2,48 | 17,01 |
| 2,44 | 17,11 |

| Spuidebiet [m ³ /s] | Overschrijdingspercentage buiten vaarseizoen [%] |
|--------------------------------|--|
| 2,42 | 17,21 |
| 2,37 | 17,31 |
| 2,33 | 17,41 |
| 2,27 | 17,51 |
| 2,22 | 17,61 |
| 2,2 | 17,71 |
| 2,18 | 17,81 |
| 2,16 | 17,91 |
| 2,15 | 18,01 |
| 2,15 | 18,11 |
| 2,13 | 18,21 |
| 2,12 | 18,31 |
| 2,12 | 18,41 |
| 2,11 | 18,51 |
| 2,11 | 18,61 |
| 2,11 | 18,71 |
| 2,1 | 18,81 |
| 2,1 | 18,91 |
| 2,1 | 19,01 |
| 2,09 | 19,11 |
| 2,09 | 19,21 |
| 2,09 | 19,31 |
| 2,09 | 19,41 |
| 2,08 | 19,51 |
| 2,08 | 19,61 |
| 2,08 | 19,71 |
| 2,07 | 19,81 |
| 2,07 | 19,91 |



BIJLAGE: UITLEESTABELLEN MET HET AANTAL DAGEN PASSENDE BIJ SPUIDEBIETEN EN OVERSCHRIJDINGSDUREN IN VAARSEIZOEN

De waarden in de tabellen presenteren het aantal dagen in het vaarseizoen waarop de spuidebeten op de horizontale as een minimale overschrijdingsduur hebben die op de verticale as staan weergegeven.

| | | Spuidebiet [m3/s] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|-------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 | 8 | 8,5 | 9 | 9,5 | 10 |
| Minimale overschrijdingsduur gedurende één dag [uur] | 16 | 214 | 0,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 15 | 214 | 0,6 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 14 | 214 | 0,8 | 0,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13 | 214 | 1,8 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 12 | 214 | 3 | 1,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 11 | 214 | 6,2 | 3,4 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 | 214 | 10,6 | 7 | 0,8 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 9 | 214 | 18,4 | 11,6 | 1,8 | 1 | 0,4 | 0,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 8 | 214 | 25,4 | 16,4 | 3,6 | 2,6 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 7 | 214 | 36 | 25,6 | 6 | 4,2 | 1 | 1 | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 |
| | 6 | 214 | 49,2 | 37,8 | 9,8 | 7 | 2 | 1,6 | 1,2 | 1,2 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | 5 | 214 | 70,4 | 53 | 19,8 | 13,4 | 4,6 | 3,4 | 1,8 | 1,4 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | 4 | 214 | 101,4 | 80,2 | 42,6 | 31,8 | 20 | 18,8 | 14,8 | 13,4 | 11,6 | 11 | 10 | 9,4 | 8,2 | 7,8 | 7,4 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 5,6 | 5,2 |
| | 3 | 214 | 124,2 | 107,2 | 64 | 55,4 | 35,8 | 31,8 | 26,8 | 24,6 | 20,4 | 19,8 | 17,4 | 16 | 14,2 | 13,4 | 13,2 | 12,8 | 12,2 | 11,6 | 10,2 | 9,6 |
| | 2 | 214 | 150 | 131,2 | 88,4 | 78,8 | 54,6 | 49,6 | 42 | 39,4 | 33,2 | 31,6 | 29,4 | 28 | 24,6 | 23,4 | 21,6 | 19,8 | 19 | 18 | 17,4 | 16,6 |
| | 1 | 214 | 171,4 | 160,2 | 113,6 | 105 | 74,6 | 69,2 | 58,4 | 55,2 | 47,4 | 45,8 | 41,6 | 41 | 35,2 | 34,2 | 33,4 | 32 | 29,4 | 28,8 | 28 | 26,4 |
| | 0 | 214 | 197 | 188 | 160,2 | 141 | 113,2 | 106,8 | 84,8 | 78,4 | 63,8 | 61,4 | 56,2 | 54,4 | 46,8 | 46 | 43,4 | 42,2 | 37,8 | 36 | 35,2 | 34 |

| | | Spuidebiet [m3/s] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|
| | | 10,5 | 11 | 11,5 | 12 | 12,5 | 13 | 13,5 | 14 | 14,5 | 15 | 15,5 | 16 | 16,5 | 17 | 17,5 | 18 | 18,5 | 19 | 19,5 | 20 | 20,5 | 21 |
| Minimale overschrijdingsduur gedurende één dag [uur] | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 6 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 4 | 5 | 4,6 | 4 | 3,8 | 3,6 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 2,8 | 2,6 | 2,2 | 1,8 | 1,8 | 1,4 | 1 | 1 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | 3 | 9,2 | 8,4 | 8 | 6,6 | 6,2 | 5,6 | 5,4 | 4,4 | 4 | 4 | 3,6 | 3,4 | 2,8 | 2,8 | 2,4 | 1,8 | 1,4 | 1 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 |
| | 2 | 15,8 | 15,2 | 13,8 | 12,8 | 12,6 | 10,8 | 10,2 | 8,8 | 8,6 | 8,2 | 7,6 | 6,6 | 6,4 | 5,8 | 5,2 | 5 | 4,2 | 3,4 | 3 | 2,2 | 1,8 | 1,8 |
| | 1 | 25 | 23,6 | 22,4 | 21,2 | 20 | 19,4 | 18,4 | 16,6 | 15 | 14,6 | 13,2 | 12,8 | 12,4 | 11,6 | 10,2 | 9,4 | 9 | 7,8 | 7,2 | 5,8 | 5 | 4,4 |
| | 0 | 33 | 32 | 30,8 | 29,8 | 28 | 27,2 | 25,6 | 24 | 22,6 | 21,8 | 20 | 18,8 | 17,0 | 16,4 | 14,6 | 13,6 | 13,2 | 13 | 12,2 | 10,8 | 10 | 9 |

| | Spuidebiet [m3/s] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | 21,5 | 22 | 22,5 | 23 | 23,5 | 24 | 24,5 | 25 | 25,5 | 26 | 26,5 | 27 | 27,5 | 28 | 28,5 | 29 | 29,5 | 30 | 30,5 | 31 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,2 | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,8 | 3,2 | 3 | 2,8 | 2,6 | 2 | 1,4 | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0 |
| 0 | 8,2 | 6,4 | 5,8 | 5,2 | 4,6 | 4,2 | 4,2 | 4 | 3,6 | 3 | 3 | 2,8 | 2,2 | 1,4 | 1,4 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

IV

BIJLAGE: ANALYTISCHE UITWERKING NIVELLEERDEBIET

Tabel IV.1 Parameters die zijn gebruikt in de analytische uitwerking

| Parameter | Beschrijving |
|--------------------|---|
| Q_u | Nivelleerdebiet [m^3/s] |
| Q_v | Verandering volume water in sluiskolk per seconde [m^3/s] |
| L | Lengte sluiskolk [m] |
| B | Breedte sluiskolk [m] |
| $A_1 = L \times B$ | Wateroppervlak van sluiskolk [m^2] |
| A_2 | Oppervlak uittree-opening [m^2] |
| μ | Contractiecoëfficiënt uittree-opening [-] |
| v | Stroomsnelheid door uittree-opening [m/s] |
| ΔH | Initiële verval [m] |
| g | Gravitatieversnelling $9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Δh | Tijdsafhankelijk verval [m] |
| t | Tijd in seconde [s] |
| T | Nivelleertijd [s] |

$$Q_u = \mu v A_2 = \mu A_2 \sqrt{2g\Delta h}$$

$$Q_v = A_1 \frac{d\Delta h}{dt}$$

$$Q_u = Q_v$$

$$A_1 \frac{d\Delta h}{dt} = \mu A_2 \sqrt{2g\Delta h}$$

$$\int_0^{\Delta H} \frac{1}{\sqrt{\Delta h}} d\Delta h = \frac{\mu A_2}{A_1} \sqrt{2g} \int_0^T dt$$

$$2\sqrt{\Delta H} = \frac{\mu A_2}{A_1} \sqrt{2g} T$$

Voor een gedefinieerde nivelleertijd T , moet de uittree-opening dus de volgende eigenschap hebben:

$$\mu A_2 = \frac{2\sqrt{\Delta H} A_1}{\sqrt{2g} T}$$

Voor ongedefinieerde grenzen wordt:

$$\int \frac{1}{\sqrt{\Delta h}} d\Delta h = \frac{\mu A_2}{A_1} \sqrt{2g} \int dt$$

$$\Delta h = \left(\frac{C}{2} - \frac{\mu A_2}{2A_1} \sqrt{2gt} \right)^2$$

Voor $t=0$ moet Δh gelijk zijn aan ΔH . Hieruit volgt dat:

$$C = 2\sqrt{\Delta H}$$

Wanneer de uitdrukking voor μA_2 en C worden gesubstitueerd in de uitdrukking voor Δh , volgt dat:

$$\Delta h(t) = \left(\sqrt{\Delta H} - \frac{\sqrt{\Delta H} t}{T} \right)^2$$

En het nivelleerdebiet:

$$Q_u(t) = \mu A_2 \sqrt{2g \Delta h(t)} = \frac{2\sqrt{\Delta H} A_1}{T} \left(\sqrt{\Delta H} - \frac{\sqrt{\Delta H} t}{T} \right)$$

