

RAPPORT

Waterdunen veilig & functioneel

Klant: Provincie Zeeland

Referentie: T&PBG8389-103-100/R001F0.2

Status: S0/P01.01

Datum: 10 december 2020

Stationsplein 21
4461 HP GOES
Netherlands
Transport & Planning
Trade register number: 56515154

+31 88 348 98 00 **T**
info.goes@nl.rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Waterdunen veilig & functioneel

Ondertitel: Getijdenduiker Waterdunen
Referentie: T&PBG8389-103-100/R001F0.2
Status: Definitief
Datum: 10 december 2020
Projectnaam: Waterdunen
Projectnummer: BG8389-103-100

Opgesteld door: Geert-Jan van der Sanden, Maarten
Schoemaker, Jerry van den Dries, Simeon
Moons

Gecontroleerd door: Jarda van Spengen

Datum: 10 december 2020 *Jarda van Spengen*

Vrijgave door: Jerry van den Dries

Datum: 10 december 2020 *Jerry van den Dries*

Classificatie

Vertrouwelijk

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden veeveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Versiegeschiedenis

Versie	Datum	Omschrijving	Opgesteld	Gecontroleerd	Goedgekeurd
D0.1	10 november 2020	Eerste concept (exclusief managementsamenvatting)	Geert-Jan van der Sanden, Maarten Schoemaker, Jerry van den Dries & Simeon Moons	Jarda van Spengen	Jerry van den Dries
D0.2	2 december 2020	Eerste concept (inclusief managementsamenvatting)	Geert-Jan van der Sanden, Maarten Schoemaker, Jerry van den Dries & Simeon Moons	Jarda van Spengen	Jerry van den Dries
F0.1	10 december 2020	Definitief (inclusief managementsamenvatting)	Geert-Jan van der Sanden, Maarten Schoemaker, Jerry van den Dries & Simeon Moons	Jarda van Spengen	Jerry van den Dries

Inhoudsopgave

1	Introductie	7
1.1	Waterdunen	7
1.2	Probleembeschrijving	8
1.3	Probleemdefinitie	8
1.4	Doelstelling van dit rapport	8
1.5	Aanpak/strategie	8
1.6	Scope van de opdracht	9
2	Randvoorwaarden & uitgangspunten	10
2.1	Hydraulische randvoorwaarden	10
2.2	Resultaten vanuit de monitoring	13
2.3	Conclusie hoofdstuk 2	13
3	Eisen & belangen	14
3.1	Eisen waterveiligheid en wateroverlast	14
3.2	Eisen installatie	19
3.3	Belangen ecologie	19
3.4	Belangen partners	22
3.5	Conclusie hoofdstuk 3	22
4	Gebuurde modellen	23
4.1	Digitaal model Waterdunen	23
4.2	SOBEK-model	31
4.3	Theorie/model ecologie	35
4.4	Conclusie hoofdstuk 4	35
5	Beschrijving en beoordeling huidige situatie	36
5.1	Beschrijving huidige installatie	36
5.2	Beoordeling huidige installatie	38
5.3	Beschrijving huidige aansturing	41
5.4	Beoordeling getijdenduiker op waterveiligheid en -overlast	44
5.5	Beoordeling systeem Waterdunen op ecologische belangen	48
5.6	Conclusie hoofdstuk 5	53
6	Maatregelen	54
6.1	Fysieke maatregelen	54
6.2	Niet-fysieke maatregelen	56
6.3	Conclusie hoofdstuk 6	58

7	Gekozen maatregelen & investering	59
7.1	Constructieve maatregelen	59
7.2	Niet-constructieve maatregelen	62
7.3	Gevolgen maatregelen op waterveiligheid	74
7.4	Gevolgen maatregelen op ecologie	75
7.5	Doorkijk zeespiegelstijging	81
7.6	Conclusie hoofdstuk 7	85
8	Conclusie & aanbevelingen	86
8.1	Conclusie	86
8.2	Aanbevelingen	86

Bijlagen

- A1. Referenties
- A2. Functiediagram aansturing schuiven getijdenduiker
- A3. Nadere onderbouwing SOBEK-model
- A4. Geotechnische notitie

Voorwoord

Voorliggende rapportage is opgesteld door Royal HaskoningDHV in samenwerking met de provincie Zeeland (opdrachtgever) en het waterschap Scheldestromen. Deze rapportage is bedoeld als technische basis/onderbouwing die gebruikt kan worden voor een Toets op Maat in het kader van de wettelijke beoordeling op waterveiligheid, WBI2017. Het rapport is geschreven met inhoudelijke specialisten als doelgroep, met name op het gebied van waterveiligheid en wateroverlast.

In maart 2020 is er een eerdere rapportage opgesteld om Waterdunen veilig te laten functioneren. In die rapportage zijn verschillende oplossingen gegeven met betrekking tot waterveiligheid en waterbezwaar. De rapportage met referentie T&PBG8389-101-100/R001F0.2 omschrijft stappen (hydrauliek en software) ten behoeve van waterveiligheid, ecologie, waterbezwaar en beheer, alsmede de mogelijke aanpassingen aan de rand van Waterdunen.

Voorliggende rapportage d.d. 10 december 2020 is een losstaande rapportage en bevat alle informatie om het systeem Waterdunen (en in het bijzonder de getijdenduiker) te laten voldoen aan alle eisen, alsmede alle informatie die nodig is voor de doorkijk veiligheidsbeoordeling tot en met 2073. De meest recente inzichten zijn verwerkt.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1 geeft een **introductie** van Waterdunen, waarin een probleembeschrijving en een probleemdefinitie wordt gegeven. Tevens wordt de doelstelling van voorliggende rapportage weergegeven, namelijk een bijdrage leveren aan een veilig en functioneel Waterdunen. In dit hoofdstuk is tevens aangegeven welke aanpak/strategie en welke scope gehanteerd is. **Hoofdstuk 2** beschrijft de huidige en toekomstige **randvoorwaarden en uitgangspunten** die gelden binnen Waterdunen. **Hoofdstuk 3** geeft een uitwerking van de **eisen en belangen** weer. Hierin is een onderverdeling gemaakt in waterveiligheid en wateroverlast, (wettelijke) eisen installatie, ecologie en partnerbelangen. Vervolgens zijn in **hoofdstuk 4** de **gebruikte modellen** gericht op waterbezwaar en waterveiligheid weergegeven, tevens is de theorie achter de beoordeling van de ecologie beschreven. **Hoofdstuk 5** staat in het teken van de **beoordeling van de huidige situatie** zowel technisch, als ecologisch. In **hoofdstuk 6** worden de maatregelen besproken en wordt er een voorzet gegeven naar **hoofdstuk 7**, waar de gekozen maatregelen en investeringen zijn weergegeven met op haar beurt een onderverdeling naar constructieve en niet-constructieve maatregelen, gevolgen maatregelen op waterveiligheid en ecologie, doorkijk zeespiegelstijging en investering. Tot slot staat **hoofdstuk 8** in het kader van de **aanbevelingen** welke een logisch gevolg zijn op de **conclusies**.

Disclaimer: dit rapport is niet geschreven als juridische onderbouwing hoe er om moet worden gegaan met de componenten die niet voldoen aan de contracteisen voor de bouw van de getijdenduiker.

Managementsamenvatting

Waterdunen

Waterdunen herbergt een uniek stukje getijdennatuur dat in verbinding staat met het Westerschelde-estuarium en een wezenlijke bijdrage levert aan de natuurwaarde van het ecosysteem. Waterdunen combineert natuur, recreatie en getijdenwerking en is tot stand gekomen door een samenwerking van de provincie Zeeland, het waterschap Scheldestromen, stichting Het Zeeuwse Landschap, Molecaten en de gemeente Sluis.

De getijdenduiker speelt een cruciale rol binnen Waterdunen; het maakt namelijk getijdenwerking in Waterdunen mogelijk en beschermt het gebied tegen overstromingen bij hoge waterstanden op de Westerschelde als onderdeel van de primaire kering. De getijdenduiker is in 2015 aangelegd en in september 2019 officieel in gebruik genomen nadat de verdere gebiedsinrichting van Waterdunen gereed was. In 2018 heeft het waterschap Scheldestromen, bij de voorbereidingen van de opening van de getijdenduiker, aangegeven dat de getijdenduiker nog niet voldoet aan de gestelde veiligheidseisen. Tijdens de testen in 2019, en daar parallel aan gestart onderzoek, is duidelijk geworden dat de getijdenduiker verder moet worden geoptimaliseerd om te voldoen aan de eisen en belangen op het gebied van waterveiligheid, beheer en ecologie. In de huidige situatie functioneert de getijdenduiker nog niet automatisch, maar de waterstanden worden nu zoveel mogelijk met vooraf ingestelde schuifstanden gerealiseerd binnen de kaders van de gestelde veiligheidseisen (de huidig geldende normen peildatum december 2020).

De opgave

Om nu en in de toekomst aan de eisen van waterveiligheid en wateroverlast te voldoen en de ecologische belangen van Waterdunen te bedienen, is aanpassing van de huidige situatie nodig. Het doel van deze rapportage, is te bepalen welke set aan maatregelen hier het beste aan bijdraagt.

De vraag die voor ligt is; welke aanpassingen in het gebied, aan de getijdenduiker of in het gebruik van de getijdenduiker en het gebied zijn er nodig om optimaal functioneren te kunnen bewerkstelligen? Dat vergt eerst inzicht in het integrale systeem van Westerschelde-getijdenduiker-Waterdunen-watersysteem- en het omliggende gebied. Het onderzoek vraagt om een brede blik, bekeken vanuit verschillende brillen, zoals waterveiligheid, ecologie, recreatief gebruik, ARBO, (dagelijkse) bemensing, crisisteam en in relatie tot procedures en draaiboeken bij het waterschap Scheldestromen. Deze rapportage, welke is getoetst door zowel het waterschap Scheldestromen als de provincie Zeeland, gaat na welke optimalisaties er mogelijk zijn ten aanzien van beheer, waterbezwaar, waterveiligheid en ecologie, waarbij wordt voldaan aan de doelstellingen van Waterdunen.

In het vorige rapport is vooral gekeken naar bouwblokken en hoe stakeholders en partners zich tot deze bouwblokken verhouden. In deze studie is aangetoond dat aan alle eisen en belangen kan worden voldaan met investeringen die zich beperken tot de getijdenduiker zelf.

Digitaal model Waterdunen

Om inzicht in het integrale systeem te krijgen, is een digitaal model van Waterdunen opgesteld. In het digitale model is het functioneren van de getijdenduiker en Waterdunen gesimuleerd, voor zowel dagelijkse omstandigheden (op basis van 10 jaar waterstandsdata van Rijkswaterstaat) als voor (extreme) stormomstandigheden.

Het digitale model Waterdunen berekent de waterstanden in Waterdunen als functie van de waterstand op de Westerschelde en de positie van de regelschuiven in de drie kokers. Als de waterstanden in Waterdunen beginnen af te wijken van de gewenste 'gedempte getijdencurve', dan past de software de positie van de schuiven automatisch aan. Deze functionaliteit in de software is ook in het digitale model Waterdunen verdisconteerd. Met de resultaten van een in 2020 uitgevoerde monitoring, zijn de weerstandscoefficiënt in de koker en de stroomsnelheden door de koker nauwkeurig vastgesteld. Hiermee zijn de software en het model geïjkt. Het digitale model Waterdunen is zeggezegd een digitale kopie van het systeem Westerschelde-getijdenduiker-Waterdunen, voor wat betreft waterstanden, debieten en positie van de regel- en sluitschuiven.

Betrouwbaarheidsanalyse

Het digitale model Waterdunen geeft inzicht in hoe vaak de positie van de regelschuiven moet worden aangepast, om zo de gewenste in- en uitstroom en waterstanden te realiseren. Deze frequentie heeft invloed op de betrouwbaarheid van de sluitmiddelen. Hoe vaker de regelschuiven worden aangesproken, hoe groter de kans dat ze in een jaar weigeren. De betrouwbaarheid van de sluiting van de regelschuiven is afhankelijk van de samenstelling van de technische installaties en de kwaliteit van de gebruikte componenten, waaronder de schuiven, de cilinders, de hydrauliek en het besturingssysteem. Uit de betrouwbaarheidsanalyse bleek dat de geleverde installatie afwijkt van het ontwerp van de aannemer en niet voldoet aan de vastgestelde specificaties, de eisen ten aanzien van waterveiligheid conform de nieuwe waterwet (WBI 2017) en de ecologische belangen.

De kans dat een schuif niet wil sluiten (wanneer dat van de schuif gevraagd wordt) is te groot om aan de eisen van 'betrouwbaarheid sluiten' te voldoen. Welke technische aanpassingen nodig zijn om aan alle eisen en belangen te voldoen, is in dit rapport uitgewerkt. Om ecologische schade te beperken dient onderhoud aan de getijdenduiker buiten het broedseizoen te worden gepland en op zodanige wijze te worden georganiseerd zodat er altijd één koker open blijft. Met de aanpassingen aan de technische installatie, zoals beschreven in hoofdstuk 7, is dat mogelijk.

Waterveiligheid

Met de in dit rapport beschreven aanpassing aan de technische installatie en aanpassing van de software van de getijdenduiker, wordt voorkomen dat vaker dan eens per 7.500 jaar de waterstand in Waterdunen het niveau van NAP+1,02m overschrijdt. De hoeveelheid water die dan over de rand van Waterdunen loopt is zo beperkt dat voldaan wordt aan de thans geldende wettelijke eisen van de Waterwet. Indien rekening wordt gehouden met de zeespiegelstijging conform de klimaatscenario's van het KNMI, blijft de getijdenduiker voldoen aan de wettelijke eisen tot in ieder geval zichtjaar 2073 (+50 cm zeespiegelstijging).

In samenwerking met het waterschap Scheldestromen is een SOBEK-model ingezet om de invloed van water uit Waterdunen in het achterliggende watersysteem te bepalen. De SOBEK-simulatie laat zien dat de kans en de gevolgen (hoeveelheid water) voldoen aan de gestelde norm. Hierbij moet worden opgemerkt dat grond- en oppervlaktewater langs de kust brak is, hierdoor is de invloed van een eventuele beperkte hoeveelheid zout water in het watersysteem verwaarloosbaar.

Verplichting tot instandhouding omliggende kade

Momenteel (peildatum december 2020) heeft de omliggende kade van Waterdunen nog geen verplichtingen tot instandhouding. Wij bevelen aan om de omliggende kade een verplichtingen tot instandhouding te geven. Deze maatregel heeft weliswaar geen directe invloed op de waterveiligheid, maar is wel nodig om te voldoen aan de waterveiligheid tot tenminste 2073. Tevens bevelen wij aan om de set eisen (o.a. hoogte-, ligging en kade opbouw en eventuele andere bepalingen voor het gebruik) behorend bij deze niet-constructieve maatregel en de bijbehorende afspraken tussen de provincie Zeeland, het waterschap Scheldestromen en de gebruikers notarieel vast te leggen. De precieze invulling van deze afspraken zal in een later stadium volgen, maar de omliggende kade zal aan de volgende eisen dienen te voldoen:

- de kade dient een hoogte-eis te krijgen van NAP+1,1m;
- de kade dient een bekledingseis te krijgen overeenkomstig met de specifieke situatie (hetgeen wat er nu ligt);
- de erosiebestendigheid dient te worden gegarandeerd overeenkomstig met grasbekleding met tenminste een open zode. Deze kwaliteit dient gegarandeerd te worden tot tenminste 1 meter van de kaderand (aan de binnenkant van Waterdunen).

Maatregelen

Alle verworven kennis en inzichten hebben geleid tot de identificatie van verschillende maatregelen, zowel constructief (technisch) als niet-constructief. Om aan de eisen van waterveiligheid en ARBO te voldoen en de belangen vanuit ecologie en partners te bedienen, zijn de volgende maatregelen nodig:

- Aanpassen van de hydraulische installatie;
- Verzwaren van de verbinding tussen schuif en cilinder;
- Verbeteren van het leidingwerk;
- Installeren grotere elektromotor;
- Opstellen onderhoudsplan rekening houdend met de eisen aan de ecologie;
- Aanleggen reserveonderdelen.
- De rand rond Waterdunen krijgt een status om de instandhouding te borgen;
- Opstellen stormprotocol dat aansluit op alarmfase 1;
- Aanpassen aansturing/software van de getijdenduiker;
- Implementeren richtlijn ecologische functionaliteit Waterdunen.

Rekening houdend met klimaatverandering voldoet het systeem Waterdunen en de betrouwbaarheid sluiting van de getijdenduiker tot 2073 aan alle eisen met betrekking tot waterveiligheid, wateroverlast en de ecologische belangen.

1 Introductie

1.1 Waterdunen

Waterdunen is een uniek natuur- en recreatiegebied in aanbouw. Een bijzonder gebied op de grens van land en zee in de provincie Zeeland. Waterdunen combineert natuur, recreatie en getijdenwerking in een innovatieve kustversterking met veiligheid als randvoorwaarde. Waterdunen is een samenwerking van de provincie Zeeland, het waterschap Scheldestromen, stichting Het Zeeuwse Landschap, Molecaten en de gemeente Sluis. Deze samenwerking is hét bewijs dat Zeeland anders omgaat met water. Een forse investering in het gebied, die leidt tot structurele economische baten voor een regio die dat hard nodig heeft.

Waterdunen herbergt een uniek stukje getijdennatuur dat in verbinding staat met het Westerschelde- estuarium en een wezenlijke bijdrage levert aan de natuurwaarde van het ecosysteem. De Westerschelde is een estuarium dat zich kenmerkt door geulen, ondiep sublitoraal habitat, litorale slikken, schorren en een grote verscheidenheid aan organismen. Het estuarium is een belangrijk leefgebied voor vogels, die er foerageren en broeden en vormt een belangrijke migratieroute voor vogels en vissen. Ter hoogte van Waterdunen worden jaarlijks bijzonder hoge aantallen migrerende vogels geteld. Het estuarium heeft tevens een belangrijke kraamkamerfunctie voor juveniele vis en vormt een belangrijk leefgebied voor vogels.



Figuur 1-1: Locatie Waterdunen

1.2 Probleembeschrijving

Waterdunen is een gebied waarin een Deltawerk is verwerkt die een waterkerende, ecologische en recreatieve functie heeft/vervult. De getijdenduiker die Waterdunen met de Westerschelde verbindt is een waterkerend kunstwerk, die vanwege de ligging in de primaire waterkering moet voldoen aan de wettelijke eisen die de waterveiligheid binnen de regio garandeert. Het dagelijks gebruik van de getijdenduiker voldoet niet aan de huidige waterveiligheidseisen. Dit heeft zijn weerslag op het waterkerend vermogen van de duiker en in het bijzonder op de betrouwbaarheid van de afsluitmiddelen.

De meeste waterkerende constructies worden sporadisch gesloten, tijdens stormomstandigheden. Zo niet de getijdenduiker. De lage ligging van de duiker ten opzichte van het buitenwater in de Westerschelde, de grote doorstroomcapaciteit van de duiker en de ligging van het maaiveld rondom Waterdunen, eist dat de getijdenduiker elke getijdencyclus haar schuiven op een kier zet of sporadisch volledig sluit. De kans dat dit een keer niet lukt is weliswaar klein, maar op dit moment (peildatum: 10 december 2020) groter dan wettelijk toelaatbaar is in het kader van de wet waterveiligheid.

1.3 Probleemdefinitie

Waterdunen voldoet niet aan de vigerende veiligheidseisen. Een optimale instelling voor waterveiligheid leidt tot een beperkt functioneren van Waterdunen en andersom. Voor de provincie Zeeland, het waterschap Scheldestromen en de stakeholders ligt de opgave om met de betrokken partijen de optimale instelling voor de getijdenduiker te vinden, waarbij waterveiligheid geborgd is en er wordt voldaan aan de ecologische randvoorwaarden.

1.4 Doelstelling van dit rapport

Het doel van dit rapport is inzicht te geven in de maatregelen die genomen moeten worden om Waterdunen te laten voldoen aan waterveiligheid, met behoud van de ecologische doelstellingen van Waterdunen, zonder wateroverlast. Het uiteindelijke doel van de getijdenduiker is om de getijdenduiker voor beide functies binnen de wettelijke toelaatbare normen te laten functioneren, met daarbij de papieren om dit aan te tonen. Deze rapportage is tevens bedoeld als technische basis/technische onderbouwing die gebruikt kan worden voor een Toets op Maat in het kader van de wettelijke beoordeling op waterveiligheid WBI2017.

1.5 Aanpak/strategie

Om de getijdenduiker nu en in de toekomst aan de vigerende wettelijke eisen van waterveiligheid, wateroverlast én aan de functionele en ecologische eisen van Waterdunen te laten voldoen, is er een integrale analyse van het systeem uitgevoerd. In eerste instantie was het de insteek om met behulp van een Multi Criteria Analyse (MCA) te komen tot een afweging welke bouwblokken het meest effectief bijdragen om aan de waterveiligheidseisen te voldoen.

Tijdens het MCA-proces werden tegenstrijdige belangen/wensen en verschillende publieke en private partners gespecificeerd. Tevens was er onduidelijkheid over de werking van het systeem, alsmede over de eisen aan het systeem. Zo is gebleken dat het systeem Waterdunen (de getijdenduiker en het achterliggende gebied) destijds niet als één systeem is beschouwd. Met dit voortschrijdend inzicht werd duidelijk dat een MCA niet meer voldoende paste om overeenstemming te bereiken. Onze opdracht is daarom aangepast naar het opstellen van een grondige, integrale systeemanalyse.

1.6 Scope van de opdracht

Binnen Waterdunen vervult de getijdenduiker een cruciale rol; de in- en uitstroom van water uit de Westerschelde door de kokers maakt de ontwikkeling van het natuurgebied mogelijk. Binnen de getijdenduiker vervullen de regel- en afsluitmiddelen een cruciale rol; ze voorkomen ongewenste en ongecontroleerde in- en uitstroom van water. De betrouwbaarheid van de regel- en afsluitmiddelen staat centraal in deze studie naar het optimaliseren van Waterdunen en vormt de scope wat betreft de beoordeling op waterveiligheid. Het beoordelingsspoor 'betrouwbaarheid sluiting' (BSKW), is een belangrijk onderdeel in het WBI 2017, maar niet het enige. De veiligheidsbeoordeling van de hoogte van de primaire waterkering (HTKW), de stabiliteit en sterkte van de constructie en de afsluitmiddelen (STKWp), en de bescherming tegen piping/onder- en achterloopsheid (PKW) vallen buiten de scope van dit rapport.

De polder naast het getijdengebied (Groesepolder) is in voorliggende rapportage niet volledig beschouwd, maar om de rapportage volledig te maken is kort een beschouwing gegeven van het naastgelegen gemaal¹. Het gemaal voor de waterregulering van de polder voert het te verpompen oppervlaktewater af via een vierde koker van de getijdenduiker, die los staat van het getijdengebied. In deze koker is een terugslagklep en een noodschuif opgenomen. De noodschuif wordt bediend met hydraulische installatie die ook gebruikt wordt voor de schuiven van het getijdengebied. De noodschuif verbonden met het gemaal sluit bij een waterstand op de Westerschelde van NAP+4,5m. Op het moment dat deze noodschuif wordt gesloten zijn, in verband met de waterveiligheid in Waterdunen, de schuiven van en naar het getijdengebied al gesloten. Deze schuiven sluiten bij een lagere waterstand op de Westerschelde. Door deze volgorde is er met het oog op de waterveiligheid geen afhankelijkheid van de sluiting van de kering van het getijdengebied met de polder. Andersom is deze afhankelijkheid van Waterdunen voor het gemaal er wel.

¹ Hoewel de waterveiligheid van de polder buiten de werkzaamheden van deze opdracht valt, is een korte beschouwing gegeven wat de bijdrage is van het gemaal aan de faalkans van de getijdenduiker. Wij adviseren dit nader te onderzoeken. Bevindingen van de getijdenduiker die betrekking hebben op de waterveiligheid van het getijdengebied, kunnen ook betrekking hebben op de waterveiligheid van de polder.

2 Randvoorwaarden & uitgangspunten

Dit hoofdstuk omschrijft de randvoorwaarden en uitgangspunten waar Waterdunen aan onderhevig is. Dit zijn vooral hydraulische randvoorwaarden, maar ook de huidige aanwezige constructie.

2.1 Hydraulische randvoorwaarden

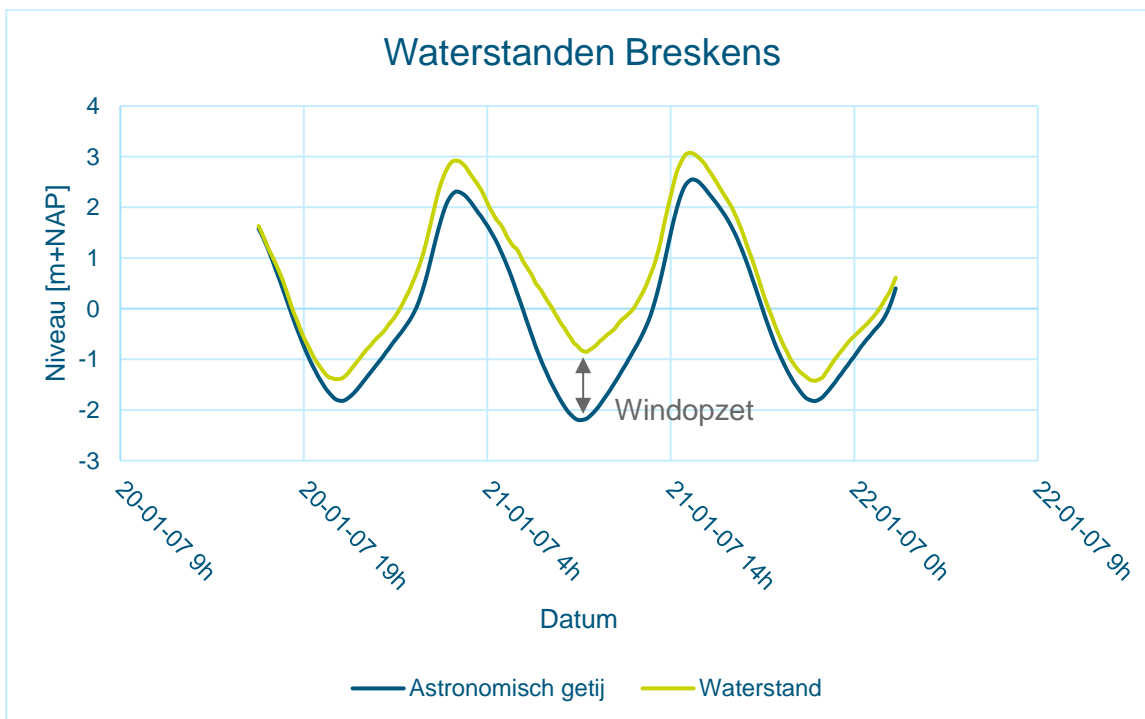
Waterdunen ligt langs de Westerschelde. 't Killetje (zie Figuur 1-1) is hier dan ook direct mee verbonden en is onderhevig aan veranderende waterstanden. Deze waterstanden zijn op te splitsen in twee componenten:

- een astronomisch getij;
- een windopzet(/-afwaaiing).

Er zijn dagelijkse waterstanden en er zijn extreme omstandigheden. Voor dagelijkse omstandigheden geldt dat metingen gebruikt kunnen worden, voor extreme (nog niet eerder voorgekomen) waterstanden geldt dat er andere modellen beschikbaar zijn. Hierop zijn tevens klimaatscenario's toe te passen.

2.1.1 Dagelijkse omstandigheden

Voor wat betreft dagelijkse omstandigheden is er een meetreeks van waterstanden in Breskens aangeleverd, met waterstanden elke 10 minuten die beginnen in 1994 en eindigen in 2014. Bij Rijkswaterstaat is tevens een reeks met elke 10 minuten het astronomisch getij in Breskens opgehaald. Deze is beschikbaar vanaf 2007. Zodoende is er een overlap van deze gegevens tussen 2007 en 2014: 7 jaar en 40 dagen. Het verschil tussen de gemeten waterstand en het astronomisch getij wordt veroorzaakt door de windopzet. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in de navolgende Figuur 2-1.



Figuur 2-1: Voorbeeld van astronomisch getij, waterstanden en windopzet in Breskens

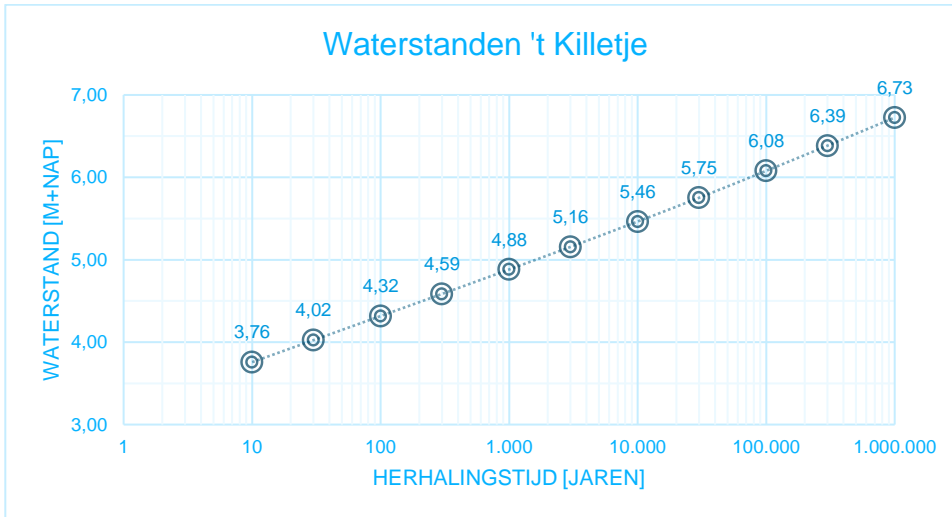
Met deze gegevens kan worden afgeleid hoe frequent bijvoorbeeld bepaalde waterstanden worden overschreden per jaar (op basis van een exponentiële trendlijn). Deze zijn weergegeven in de navolgende Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Overschrijdingsfrequenties frequente(re) waterstanden

Waterstand	Frequentie per jaar
2.30	290
2.40	165
2.50	94.1
2.60	53.6
2.70	30.5
2.80	17.4
2.90	9.90
3.00	5.64
3.10	3.21
3.20	1.83
3.30	1.04
3.40	0.593
3.50	0.338
3.60	0.192
3.70	0.110

2.1.2 Extreme omstandigheden

De windopzet kan ook een stuk extremer worden. Waterdunen is dan onderhevig aan extreme omstandigheden: omstandigheden die minder frequent voorkomen dan eens per 10 jaar. In het geval van Waterdunen zijn het stormen, die het water opstuwen de Westerschelde in. Zo worden de waterstanden in 't Killetje bij Waterdunen verhoogd. Het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) schrijft voor hoe deze extreme omstandigheden berekend kunnen worden. Dit gaat door middel van het programma Hydra-NL. De resultaten voor extreme waterstanden zijn weergegeven in de navolgende Figuur 2-2.



Figuur 2-2: Extreme waterstanden in 't Killetje bij Waterdunen

2.1.3 Zeespiegelstijging

Door o.a. het broeikas effect stijgt de zeespiegel versneld. Het KNMI heeft enkele klimaatscenario's afgegeven. Het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) schrijft voor dat het W+ scenario van het KNMI wordt gehanteerd voor waterveiligheidsbeoordelingen. Dit betekent 1 cm per jaar zeespiegelstijging vanaf 2023. Bijbehorende getallen zijn afgeleid in de navolgende Tabel 2-2.

Tabel 2-2: Verwachte zeespiegelstijging

Zichtjaar	Toename waterstand
2023	0 cm
2035	+ 12cm
2050	+ 27cm
2073	+ 50cm
2100	+ 77cm

2.2 Resultaten vanuit de monitoring

De getijdenduiker is gemonitord en hiervan is een rapport uitgebracht (Svasek, 2020). Hierin staat omschreven hoe de getijdenduiker reageert in de praktijk ten opzichte van het theoretisch ontwerp. Vertrekpunt in deze studie is de situatie die vanuit de monitoring is omschreven. Daarom zal hier een selectie worden weergegeven uit conclusies van het rapport van Svasek, die voor dit rapport over de waterveiligheid van Waterdunen relevant zijn.

“Aan beide zijden van de duiker is de stroming meer geconcentreerd over een kleinere breedte dan aangenomen tijdens het ontwerp. Als gevolg hiervan zijn de stroomsnelheden lokaal hoger dan verwacht en wordt de maximaal toelaatbare stroming (i.v.m. de langdurige belasting van de bodembescherming) al bij een lager debiet bereikt. Dit vereist een strengere begrenzing van de maximaal toelaatbare debieten in de software voor beide zijden. Het effect op de waterstanden in Waterdunen van de geconcentreerdere stroming op de maximale stroomsnelheden is groter aan de Killetje zijde dan aan de Waterdunen zijde.”

Voornoemde consequentie en constatering zijn in het model aangepast en geijkt in de tijd waardoor een goed geijkt model is opgesteld dat zich in de periode na 19 september 2020 zich heeft bewezen correct te zijn. Dit is de pijler van het model dat in dit rapport wordt gehanteerd en daarmee ook de uitkomsten in dit rapport.

2.3 Conclusie hoofdstuk 2

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- De waterstanden in Waterdunen worden bepaald door de standen van de schuiven, aangroei en onderhoud in de duiker en de waterstanden op de Westerschelde;
- Het dagelijks astronomisch getij op de Westerschelde varieert tussen de NAP+2,1m en de NAP-2,1m;
- De hoogwaterstand van NAP+3,00m wordt ongeveer 6 keer per jaar overschreden;
- Monitoring van optredende waterstanden en debieten laten een afwijking zien met de in het ontwerp aangenomen waarden:
 - het debiet is lager dan in het ontwerp aangenomen. Dit komt doordat de hydraulische weerstand in de praktijk hoger is dan in het ontwerp aangenomen;
 - de bodembescherming wordt sneller overbelast door hoge stroomsnelheden dan in het ontwerp aangenomen. Dit resulteert in een beperkte opening van de schuiven tijdens grote waterstandsvervalen over de duiker.

3 Eisen & belangen

Waterdunen is onderhevig aan eisen en wensen. Deze hebben met name betrekking op de waterveiligheid, wateroverlast, constructie, ecologie en belangen van partners.

3.1 Eisen waterveiligheid en wateroverlast

Er zijn wettelijke eisen gesteld voor wat betreft waterbezwaar door de getijdenduiker heen. Deze dient te voldoen aan de eisen voor waterveiligheid vanuit de waterwet, en aan de eisen voor wateroverlast vanuit de Provincie. Deze zijn als volgt samengevat.

De eisen vanuit waterveiligheid zijn als volgt:

- Voor waterbezwaar door de getijdenduiker heen is vanuit het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) het beoordelingsspoor “Betrouwbaarheid Sluiten Kunstwerken” (BSKW) relevant;
- De bijbehorende faalkanseis voor de getijdenduiker is 1/7.500 per jaar:
 - er is sprake van falen en een waterveiligheidsprobleem indien het volgende gebeurt:
 - de schuiven van de getijdenkoker blijven hangen (falen sluitproces);
 - het daarna niet alsnog lukt de schuiven dicht te zetten (falen herstel achteraf);
 - als gevolg van het ongecontroleerd inlopen van water het kombergend vermogen wordt overschreden en er ergens gemiddeld > 20 cm inundatie ontstaat in een wijk of buurt met gelijke 4-cijferige postcode.

De eisen vanuit wateroverlast zijn als volgt:

- Falen van de getijdenduiker leidt tot enige inundatie (0cm) op het achterland, met een kans van 1/100 per jaar in stedelijk gebied, 1/25 per jaar in landelijk gebied en 1/50 per jaar in gebieden met glastuinbouw.

3.1.1 Waterwet

Het ontwerp van de getijdenduiker voor Waterdunen is gemaakt in de periode 2012-2013 op basis van de op dat moment geldende wettelijke eisen voor waterveiligheid. Nu Waterdunen als integraal systeem (de getijdenduiker en het achter liggende gebied) wordt beoordeeld (peildatum 10 december 2020), wordt er getoetst op basis van de meeste recente wettelijke eisen. De focus hierbij ligt op het beoordelingsspoor “Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk” (BSKW) vanuit de Waterwet, aangezien de getijdenduiker hier niet aan voldoet. Overigens voldoet de getijdenduiker zoals gebouwd ook niet aan de destijds geldende wettelijke eisen voor waterveiligheid met betrekking tot betrouwbaarheid sluiten. Hierop wordt verder ingegaan in § 5.4.

Met ingang van 1 januari 2017 wordt de veiligheid van primaire keringen op basis van de overstromingskansbenadering beoordeeld. Per normtraject zijn twee normgetallen vastgesteld in de Waterwet (Waterwet, 2017), dit zijn de signaleringswaarde en de maximaal toelaatbare overstromingskans, ook wel ondergrens genoemd. Aan deze ondergrenswaarde dient een kering te allen tijde te voldoen. De signaleringswaarde kan worden onderschreden en dient als waarschuwing aan de beheerder dat de waterkering na enige tijd niet meer aan de maximaal toelaatbare kans zal voldoen. Het geeft het interventieniveau aan, waarna het traject kan worden aangemeld bij het hoogwater beschermingsprogramma (HWBP).

Waterdunen maakt onderdeel uit van dijktraject 32-1. Hiervoor gelden de volgende waarden:

- Signaleringskans: 1/1.000^e per jaar;
- Ondergrens: 1/300^e per jaar.

Voor Waterdunen geldt dat, indien de getijdenduiker faalt, er mogelijk een waterveiligheidsprobleem is. Vanuit de waterwet valt dit onder het beoordelingsspoor “Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk” (BSKW). De getijdenduiker dient aan de bijbehorende eisen te voldoen.

De faalkansbegroting verdeelt de totale faalkans over de verschillende faalmechanismen/ beoordelingssporen voor primaire keringen. Hiertoe is in de Ministeriële regeling uitgegaan van een verdeling middels de faalkansruimtefactor ω . De faalkanseis voor het doorsnede-niveau $P_{eis,dsn}$ wordt vervolgens berekend door de norm van het traject P_{eis} te vermenigvuldigen met de faalkansruimtefactor ω , en deze te delen door de lengte-effect factor N_{dsn} :

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega \cdot P_{eis}}{N_{dsn}}$$

Voor het beoordelingsspoor “Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk” (BSKW) is de faalkansruimtefactor ω vastgesteld op 4%. Voor het lengte-effect geldt de navolgende formule:

$$N_{dsn} = \max(1, c \cdot n_{2a})$$

Waarbij $c = 0.5$ is de reductiefactor om tot uitdrukking te brengen dat de faalkansen van kunstwerken niet allemaal precies even groot zijn en n_{2a} is het aantal kunstwerken in het dijktraject waarvan de faalkans niet verwaarloosbaar klein is.

Voor Waterdunen betekent dit het volgende:

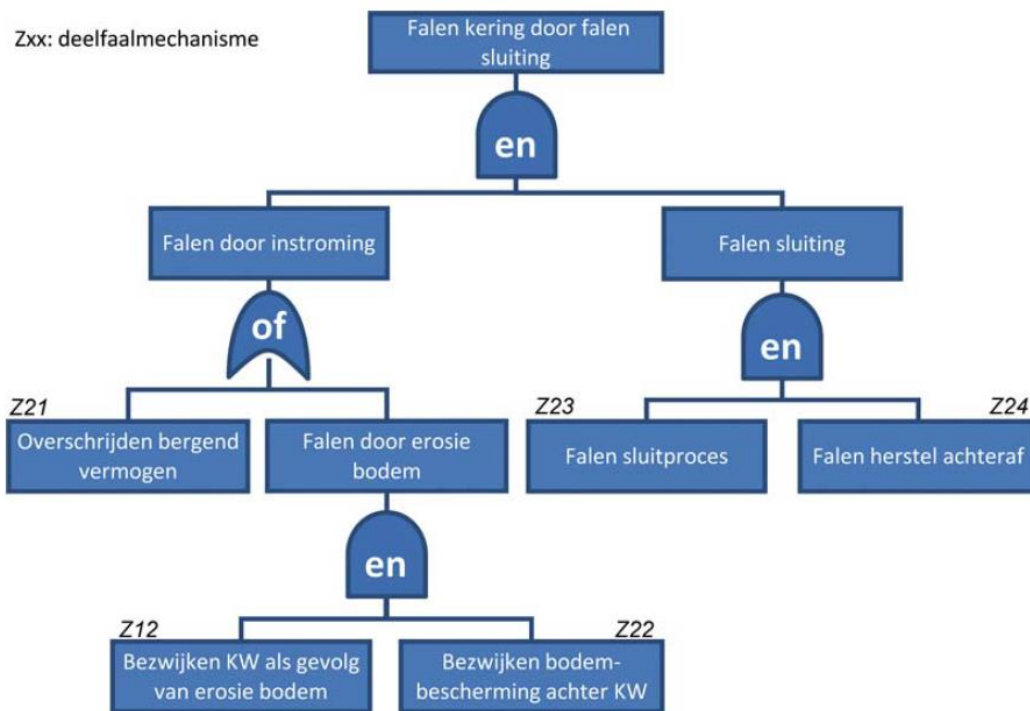
- Er bevindt zich nog één ander kunstwerk in dijktraject 32-1. Dit is de sluis bij Cadzand-Bad. Er zijn in het gebied dus twee kunstwerken aanwezig.
- Het kunstwerk Waterdunen bevat weliswaar een gemaal, maar dit mag gezien worden als één geheel kunstwerk. Dit komt doordat de energievoorziening, de afvoer van het gemaal door de getijdenduiker heen (middels een vierde koker) en de hydrauliek (in deze koker) van beide systeem aan elkaar gekoppeld zijn.
- Daarmee geldt voor het lengte-effect $N_{dsn} = 1$.
- De faalkansruimtefactor ω is vastgesteld op 4%.
- De ondergrens van de faalkanseis op doorsnedeniveau bedraagt daarmee 1/7.500^e per jaar.

Dit betekent dat tot een jaarlijkse kans van 1/7.500 het falen van de sluiting de getijdenduiker (inclusief gemaal) niet mag leiden tot een overstroming. De invulling en interpretatie van dit wettelijke criterium wordt verder uitgewerkt in de volgende paragraaf.

3.1.2 Interpretatie WBI2017

Vanuit de Waterwet mag de kans op falen sluiting van de getijdenduiker niet hoger zijn dan 1/7.500 per jaar. In voorliggende paragraaf is uitgewerkt wat dit concreet betekent en hoe de interpretatie voor de getijdenduiker is.

Vanuit de Waterwet is voorgeschreven wanneer er sprake is van overschrijding van deze norm. Figuur 3-1: toont de foutenboom die daarbij van toepassing is. Er is pas sprake van falen indien de gecombineerde kans van deze foutenboom 1/7.500 per jaar overschrijdt.



Figuur 3-1: Foutenboom beoordelingsspoor BSKW vanuit de Waterwet

In overleg met de provincie Zeeland en het waterschap Scheldestromen is bekeken of “falen door erosie bodem” kan voorkomen. Indien de getijdenduiker faalt met sluiten, zal er over gedurende uren tijdens vloed zeer veel water in Waterdunen stromen. Dit belast de inlaatkreek achter de getijdenduiker (binnendijkse zijde). Na één of enkele getijdencycli zal het kunstwerk handmatig worden gesloten, zodat de belasting op de bodembescherming verdwijnt. Met de aanwezige bodembescherming is de belasting te kort om te verwachten dat erosie hiervan leidt tot instabiliteit van de constructie en daarmee het falen van de getijdenduiker. De eerste 100 meter is gepenetreerd breuksteen (dit kan niet falen met de stroomsnelheden die kunnen optreden) en falen van de bodembescherming daarbuiten zal niet leiden tot instabiliteit van de primaire kering. De faalkans voor “falen door erosie bodem” is dan ook verwaarloosbaar. Onder dagelijkse omstandigheden dient de bodembescherming echter niet beschadigd te worden, omdat langdurige (dagelijkse) belasting hiervan dan wel tot erosie zal leiden (Svasek, 2020).

Concluderend kan gesteld worden dat het falen van de getijdenkoker concreet alleen gebeurt indien aan alle volgende voorwaarden wordt voldaan, namelijk:

- De schuiven van de getijdenkoker blijven hangen (falen sluitproces);
- Het daarna niet alsnog lukt de schuiven dicht te zetten (falen herstel achteraf);
- Als gevolg van het ongecontroleerd inlopen van water het kombegend vermogen wordt overschreden op een dermate manier dat er een waterveiligheidsprobleem is (zie § 3.1.4).

3.1.3 Wateroverlast

Vanuit de provincie Zeeland geldt er een norm voor wateroverlast. Deze norm is omschreven (Kenniscentrum InfoMil, 2020) en samengevat op de website van de provincie Zeeland (Zeeland, 2018):

“De Provincie heeft de Waterwet en het Waterbeleid 21e Eeuw uitgewerkt in de Omgevingsverordening Zeeland 2018. Hierin staan normen voor de regionale watersystemen (het slotenstelsel). Ze moeten bij hevige neerslag voldoende water kunnen bergen en afvoeren. Voor stedelijk gebied geldt als norm dat er eens in de 100 jaar ernstige wateroverlast mag optreden. Voor landelijk gebied is de norm eens in de 25 jaar. Waar glastuinbouw is, geldt een norm van eens in de 50 jaar.”

Als het rombergend vermogen wordt overschreden, is er niet direct sprake van een waterveiligheidsprobleem, aldus de “Grondslagen voor Hoogwaterbescherming” van het Expertise Netwerk Waterveiligheid. Er is namelijk pas sprake van een waterveiligheidsprobleem “indien er sprake is van slachtoffers of substantiële economische schade” (ENW, 2017). Dit is in het volgende geval:

Wanneer er sprake is van substantiële economische schade is niet omschreven, omdat dit zal afhangen van de lokale situatie. In de praktijk is het volgende criterium te hanteren:

“Als de gemiddelde waterdiepte in minimaal één gebied of buurt met gelijke viercijferige postcode (op basis van de wijk- en buurtkaart van het CBS) groter is dan 0,2 meter, is er sprake van een overstroming.”

Dit criterium is gebaseerd op de ervaring dat slachtoffers en grootschalige schade pas optreden als de lokale waterdieptes groter zijn dan circa 0,2 meter. Van dit algemene principe kan in specifieke situaties, onderbouwd, worden afgeweken.

Met andere woorden: het falen van de getijdenduiker mag niet leiden tot meer dan gemiddeld 20 cm inundatie in één gebied of buurt met gelijke viercijferige postcode. Figuur 3-2 weergeeft de wijk- en buurtkaart van het CBS rondom Waterdunen. Het water mag zich dus verspreiden over het achterland, want er is pas sprake van een waterveiligheidsprobleem als de gemiddelde inundatie 20 cm bereikt binnen één van de gebieden of buurten.



Figuur 3-2: Buurtenkaart (bron: CBS)

Daarbovenop komt echter nog een norm voor wateroverlast uit § 3.1.3. Deze stelt dat er “ernstige wateroverlast” ten gevolge van extreme neerslag mag optreden met een jaarlijkse kans van 1/100 voor stedelijk gebied, 1/25 voor landelijk gebied en 1/50 voor de glastuinbouw. Inundatie ten gevolge van het falen van de getijdenduiker is niet hetzelfde als inundatie ten gevolge van extreme neerslag. Dit betekent dat er geen inundatie (> 0cm) mag ontstaan met dezelfde herhalingstijden ten gevolge van het falen van de getijdenduiker.

Er is sprake van een waterveiligheidsprobleem bij Waterdunen indien:

- Falen van de getijdenduiker leidt tot tenminste gemiddeld 20cm inundatie in een wijk of buurt met gelijke 4-cijferige postcode, met een kans van 1/7.500 per jaar.

Er is sprake van een wateroverlastprobleem bij Waterdunen indien:

- Falen van de getijdenduiker leidt tot inundatie (>0cm) op het achterland met een kans van 1/100 per jaar in stedelijk gebied, 1/25 per jaar in landelijk gebied en 1/50 per jaar in gebieden met glastuinbouw.

Als met de huidige aanwezige rand het kombergend vermogen wordt overschreden en het water het achterland inloopt, maar aan bovenstaande eisen wordt voldaan, dan hoeft er geen kadeverhoging of verbetering plaats te vinden. Indien dat niet het geval is, dient de kade verhoogd of verbeterd te worden op een dusdanige wijze dat aan de voornoemde eisen wordt voldaan.

Dit betekent echter ook, dat het niveau van de kade en de staat daarvan dient te worden gegarandeerd. Dit betekent dat de kade rondom Waterdunen een status dient te krijgen. Hier wordt in § 7.2.1 meer over uitgeweid.

3.2 Eisen installatie

Onverwijld het contract dient ieder ontwerp minstens te voldoen aan de wettelijke eisen. De belangrijkste wettelijke eisen voor de getijdenduiker zijn vastgelegd in het bouwbesluit als uitwerking van de woningwet. Hierin is o.a. een verwijzing opgenomen naar verschillende delen van de Eurocode.

Daarnaast is volgens het contract de ROK 1.2 van toepassing. Hierin staan geen specifieke normen voor de installaties die nodig zijn voor het bedienen van de getijdenduiker, er staan wel normen in die een handreiking kunnen geven voor het ontwerp daarvan. De belangrijkste te gebruiken normen en richtlijnen zijn:

- NEN 6786:2001: Voorschriften voor het Ontwerp van Beweegbare Bruggen, (NEN6786:2001, 2001);
- NBD 06000:2005: Eisen voor hydraulische bewegingswerken; Rijkswaterstaat, (Rijkswaterstaat, NEN 06000:2005: Eisen voor hydraulische bewegingswerken, 2005).

De normen zijn niet volledig in het bepalen van de belastingen op keermiddelen in de getijdenduiker. Daartoe kan verder gebruik worden gemaakt van de volgende literatuur:

- Krachten op puntdeuren en draaideuren (onderdeel deurschuiven); Waterloopkundig Laboratorium, mei 1994, (Waterloopkundig Laboratorium, 1994);
- Design of hydraulic gates; Paulo C.F. Erbisti; 2004, (Erbisti, 2004).

3.3 Belangen ecologie

Het belang van een goede ecologische kwaliteit van Waterdunen

De beoogde natuurontwikkeling van Waterdunen staat centraal bij de realisatie en het beheer van Waterdunen. De natuurwaarden zijn de basis voor het specifieke karakter en ontwikkeling van de geplande toeristische ontwikkeling en zodoende de economische impuls van Waterdunen. Bij de realisatie van Waterdunen zijn vanuit het Natuur Pakket Westerschelde specifieke randvoorwaarden en eisen gesteld. Binnen het project Waterdunen moet minimaal 173 hectare estuariene natuur worden gerealiseerd met een primaire natuurfunctie.

In het ontwerp en realisatie van Waterdunen zijn drie natuurwaarden leidinggevend, namelijk (1) rust en foerageergebied voor vogels, (2) broedplaatsen specifiek voor kust broedende vogels, (3) slikken, pionierszone en lage schorren. Zowel het gecontroleerde getijderegime als de bathymetrie zijn specifiek ontworpen en randvoorwaardelijk voor deze natuurwaarden. Specifiek voor Waterdunen en de functie voor vogels zijn de foerageergelegenheid (een goed bodemleven van slikken en schorren voor voldoende voedsel), rustplaatsen en de speciaal aangelegde vogelbroedeilanden voor kustbroeders.

In het gebied zijn eilanden ingericht als vogelbroedplaats t.b.v. kustvogels die onbegroeide bodem prefereren bij broed activiteiten. Deze broedeilanden zijn voorzien van een schelpenbed voor optimale substraateigenschappen. De eilanden zijn aangelegd op een specifieke hoogte zodat bij hoge waterstanden (> NAP+0,65m) en met name bij springtij (NAP +0,75m in Waterdunen) deze eilanden geïnundeerd worden, behalve in het broedseizoen. Buiten het broedseizoen is de maximale springtij-waterstand hoger (NAP+0,75m), waardoor de broedeilanden vrij blijven van vegetatie en ongeschikt zijn als permanent leefgebied van rovende zoogdieren zoals ratten. De getijslag is gedurende het broedseizoen zo afgesteld dat de maximale springtij waterstanden iets lager blijven (nader te bepalen tussen NAP+0,60m en NAP+0,70m), waardoor de nesten niet onderlopen. Het is wel van belang de maximale springtij waterstanden in het broedseizoen niet te laag te maken (< NAP+0,60m) i.v.m. de verschuiving die dat tot gevolg kan hebben voor de slikken en schorren, inclusief pionierszone (en dus foerageer mogelijkheden voor de vogels).

Het oppervlak aan slikken en lage schorren is gemaximaliseerd door relatief steile hellingen te realiseren langs de geulen en relatief vlakke gebieden te realiseren binnen de getijdzone.

Slikken bevinden zich in het litoraal en worden gekenmerkt door hun rijkdom aan bodemdieren. Het litoraal valt elke getijdencyclus droog en deze gebieden overstromen ook elke getijdencyclus.

Schorren bevinden zich boven de litorale zones en worden gekenmerkt door zilte vegetatie. Het boven het litoraal gelegen gebied overstroomt niet elke getijdencyclus, maar wel minimaal tweemaal per maand (bij springtij). De gerealiseerde hoogteligging en getijdewerking in Waterdunen zijn bepalend voor de lokale getijdennatuur. Op basis van de droogvalduur en de overstromingsfrequentie kan verder onderscheid gemaakt worden in de habitattypen (ook wel ecotopen) van de slikken en de schorren (Tabel 3-1), met elk een kenmerkende soortensamenstellingen.

Tabel 3-1: Begrenzing en oppervlaktes van ecotopen bij ideale sinus. De estuariene ecotopen zijn berekend op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de grenswaarde (m+NAP) bij de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdewerking (ideale sinus met springtij van NAP+0,75m) van Waterdunen. Het gemiddeld hoogwaterpijl bij doortij (GHWD), wat doorgaans gebruikt wordt als bovengrens van het hoog litoraal, ligt in Waterdunen iets onder de bovengrens voor midden litoraal (75 % droogvalduur), waardoor de ecotoop hoog litoraal (zoals gedefinieerd in ZES.1) afwezig is in het gebied.

Ecotoop	Bovengrens	Ideale sinus	
		Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]
Sublitoraal	GLWS	-0,75	45,1
Laag litoraal	25% droog	-0,32	19,2
Midden litoraal	75% droog	0,33	27,4
Hoog litoraal	GHWD	0,33	0,0
Pionierszone	300x/jaar	0,56	26,7
Lage schor	150x/jaar	0,66	19,5
Midden schor	50x/jaar	0,73	8,1
Hoge schor	5x/jaar	0,75	2,8

Uit het gewenste getijverloop in Waterdunen (ideale sinus) volgt een verdeling van estuariene ecotopen, zoals globaal weergegeven in Figuur 3-3. De verwachting is dat de ruimtelijke verdeling van habitattypen er in praktijk iets anders uit zal zien. Gedurende het broedseizoen ligt het maximale springtijniveau lager dan buiten het broedseizoen (om het broedsucces te vergroten), waardoor de amplitude van de getijslag iets afneemt en dus eveneens het areaal met hoge of midden schor. Ook al lijkt de getijdennatuur hierdoor artificieel beperkt te worden, toch zal dit niet ver van een natuurlijke situatie af staan omdat de maximale waterstanden onder natuurlijke omstandigheden doorgaans ook gehaald worden buiten het broedseizoen (bij stormopzet).



Figuur 3-3: Verdeling van ecotopen bij ideale sinus. De estuariene ecotopen zijn verdeeld op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdewerking (ideale sinus met springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen. Het gemiddeld hoogwaterpijl bij doortij (GHWD), wat doorgaans gebruikt wordt als bovengrens van het hoog litoraal, ligt in Waterdunen iets onder de bovengrens voor midden litoraal (75 % droogvalduur), waardoor de ecofoon hoog litoraal (zoals gedefinieerd in ZES.1) afwezig is in het gebied.

Om te voldoen aan de ecologische randvoorwaarden en de beoogde natuurwaarde van Waterdunen, is het van belang:

- De vastgestelde getijslag te behouden (gemiddeld minimaal 1,1 m getijslag rond NAP, bij doortij 0,6 m en bij springtij 1,5 m);
- Een natuurgetrouw verloop van de getijdecurve te behouden (dus sinusvormig, geen blokprofiel), ten behoeve van de droogvalduur;
- Een natuurgetrouw verloop van de doortij-springtij cyclus te behouden, ten behoeve van de overstromingsfrequentie;
- Een nagenoeg continue wateruitwisseling te behouden;
- De maximale waterstanden te hanteren en onderscheid te maken tussen het broedseizoen (NAP+0,75 m) en het niet-broedseizoen (nader te bepalen tussen NAP+0,60 m en NAP+0,70 m). Dit betekent dat de broedeilanden buiten het broedseizoen elke doortij-springtij cyclus overstromen. Hiervoor moet minimaal 12 keer per jaar een waterstand van NAP+0,70 m worden gehaald.

Voornoemde habitattypen en de ruimtelijke verdeling daarvan (Figuur 3-3) is de ecologische randvoorwaarde c.q. uitgangssituatie en dient behouden te blijven bij structurele aanpassingen van het regelsysteem en bij tijdelijke situaties zoals bijvoorbeeld onderhoudswerken.

3.4 Belangen partners

De partners in het project (Stichting Zeeuws Landschap tezamen met ondernemers voor “zilte teelt” en Molecaten) gaan investeren in het gebied van Waterdunen. Stichting Zeeuws Landschap heeft al aanzienlijke investeringen gedaan in de aanleg van infrastructuur en in de bouw, o.a. uitkijkpunten in het gebied en ondernemers die actief zijn in het Kustlaboratorium. Molecaten heeft al ver uitgewerkte plannen wat betreft de bouw van vakantiewoningen in het gebied. Deze investeringen en plannen zijn gebaseerd op de uitgangspunten van een maximale waterstand van NAP+0,75m en een minimale waterstand van NAP-0,75m. Als blijkt in het gebruik van de getijdenduiker dat de genoemde waterstanden niet gehaald worden (dit kan zijn een overschrijding van het maximumpeil of het niet halen van het minimumpeil), kan dit nadelige gevolgen hebben voor de partners. Het is daarom van belang voor de partners in het project om duidelijkheid te krijgen over de werkelijke optredende waterpeilen met mogelijke over- en onderschrijdingen op basis van de hydraulische berekeningen en hoe groot de kans is dat dit voor gaat komen.

3.5 Conclusie hoofdstuk 3

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- Eis waterveiligheid:
 - kans op gemiddeld 20 cm inundatie of meer in 4-cijferig postcodegebied lager dan 1/7.500 per jaar.
- Eis wateroverlast:
 - kans op inundatie lager dan 1/100 per jaar.
- Eisen ecologie:
 - 173 ha estuariene natuur met een primaire natuurfunctie;
 - te allen tijde moeten drie natuurwaarden behouden blijven: (1) rust en foerageergebied voor vogels, (2) broedplaatsen specifiek voor kust broedende vogels (broedeilanden), (3) slikken, pionierszone en lage schorren.
- Eisen installatie en dagelijks beheer en onderhoud:
 - ARBO.

4 Gebruikte modellen

Om de waterveiligheids- en wateroverlastsituatie te bepalen, zijn twee modellen gebruikt:

- Digitaal model Waterdunen: een model voor het berekenen van de hoeveelheid water dat door de getijdenduiker heen stroomt en eventueel het achterland in;
- SOBEK-model: model wat berekent wat er in het achterland gebeurt op het moment dat er waterbezwaar in het achterland heeft plaatsgevonden.

4.1 Digitaal model Waterdunen

Deze paragraaf omschrijft het gehanteerde model voor het berekenen van waterstanden en waterstandsstatistiek in Waterdunen. Als basis is hiervoor het model van SVASEK gehanteerd, aangeleverd aan Royal HaskoningDHV na monitoringsrapport (Svasek, 2020). Hier is een schil omheen gebouwd met als doel: het waterbezwaar na falen te berekenen, inclusief de bijbehorende statistiek. Dit werkt samengevat als volgt:

- In de basis staat het model van SVASEK, dat berekent wat het debiet door de kokers is als functie van waterstand binnen en buiten en de schuifstand.
- Hiermee is een schil omheen gebouwd, die de getijdenduiker simuleert, gegeven de aansturing van de getijdenduiker. In feite realiseert dit digitaal wat er in de werkelijkheid zal gebeuren.
- De getijdenduiker kan op ieder moment falen met een bepaalde kans (betrouwbaarheid van de schuiven, zie bijvoorbeeld 5.2.1).
- Er wordt berekend wat de gevolgen zijn als één, twee of drie kokers falen: wat worden daarna de waterstanden in Waterdunen?
- Door de juiste kans toe te wijzen aan deze gevolgen (de betrouwbaarheid van de schuiven), en deze op te tellen voor de gevolgen groter dan een bepaalde drempelwaarde (bijvoorbeeld het kadeniveau van NAP+1,1m), kan berekend worden wat de jaarlijkse kans is dat deze drempelwaarde wordt overschreden.
- Dit leidt uiteindelijk tot een grafiek van waterstanden (de drempelwaardes) en herhalingstijden, die ingezet kan worden om de beoordeling te doen op waterveiligheid door hieruit de juiste waardes af te lezen (de waterstand met een kans van 1/7.500 per jaar).
- In dit model zitten twee opties geïmplementeerd:
 - een oneindig hoge kade (zodat berekend kan worden welk kadeniveau nodig zou zijn);
 - wat er zou gebeuren als water over de kade van NAP+1,1m heen stroomt in het achterland.

4.1.1 Basis: model SVASEK

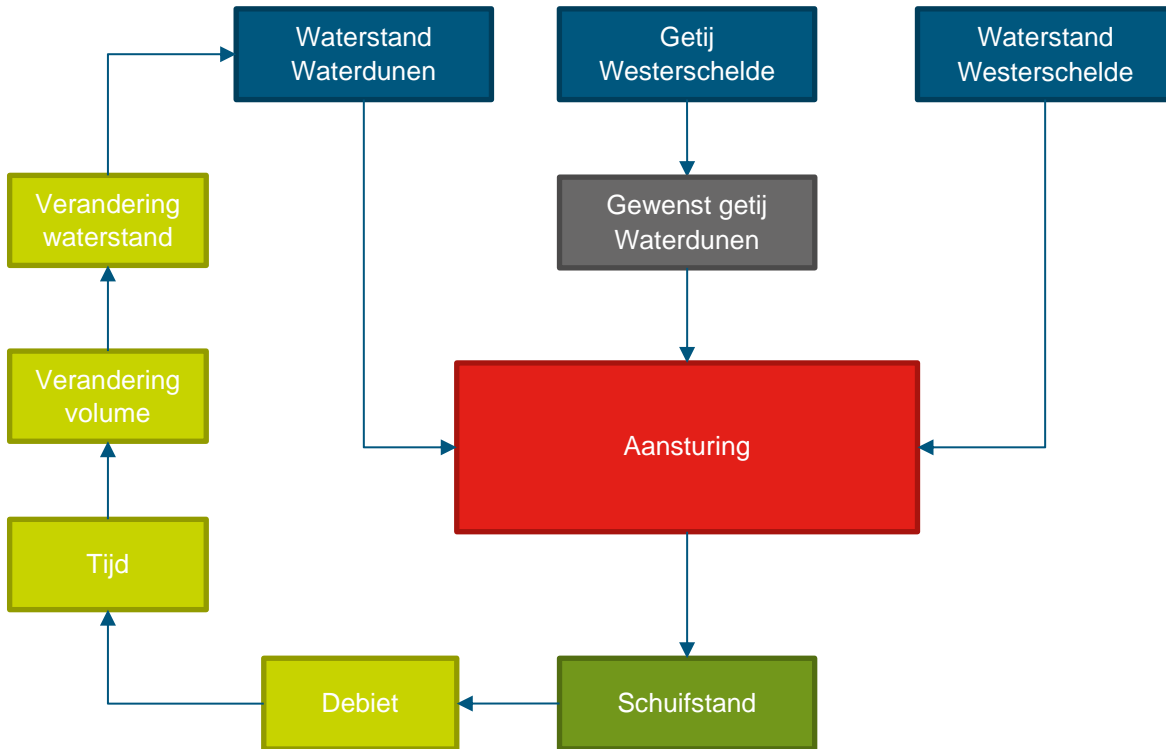
Gedurende de ontwikkeling van de getijdenduiker is er door SVASEK een hydraulisch model in MATLAB ontwikkeld. In dit model zit een functie waarbij het debiet door de getijdenduiker kan worden berekend als functie van de waterstand op de Westerschelde (WS), de waterstand in Waterdunen (WD) en de schuifstand in de getijdenduiker. Met andere woorden:

$$Q_{\text{getijdenduiker}} = \text{func}(h_{\text{WS}}, h_{\text{WD}}, h_{\text{schuif}})$$

In deze functie is meegegeven dat er limieten zijn voor wat betreft stroomsnelheden in verband met de langdurige belasting op de bodembescherming. Op het moment dat het debiet te hoog wordt, wordt de schuif op dusdanige wijze dichter gezet dat het maximale debiet, waarbij de stroomsnelheden beperkt blijven, niet wordt overschreden. Dit model is in de meest actuele versie (inclusief verwerkte meetgegevens van het monitoringsprogramma) die SVASEK aan Royal HaskoningDHV beschikbaar heeft gesteld. Voor meer informatie over dit model wordt verwezen naar § 0.

4.1.2 Simuleren van getijdenduiker

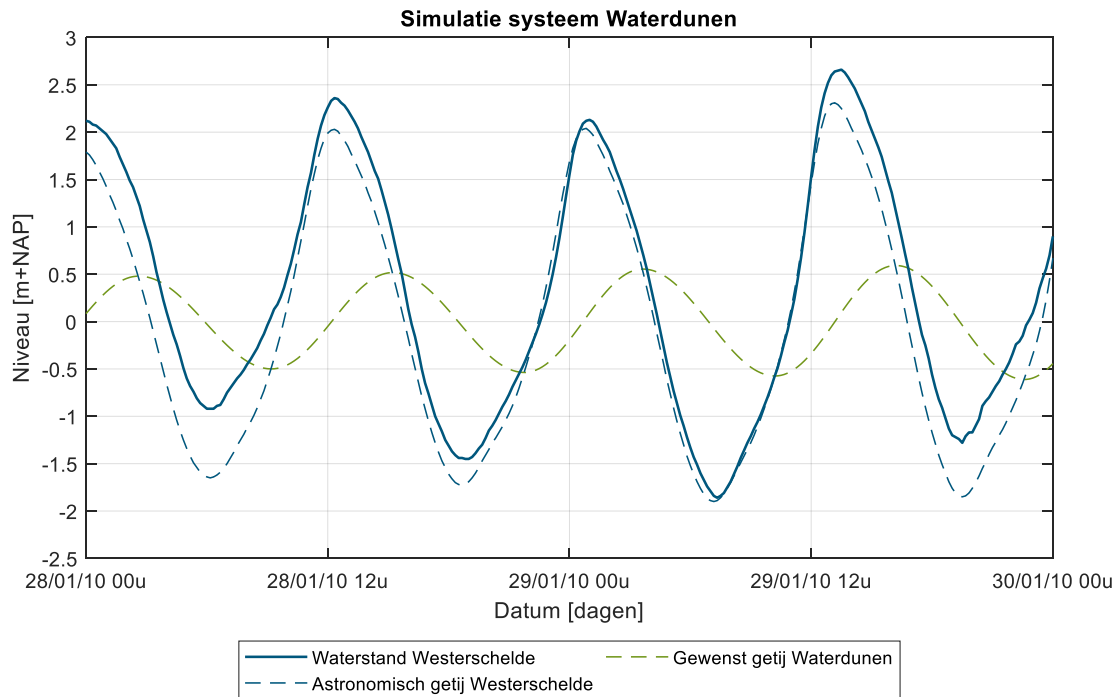
Op basis van het door SVASEK aangeleverde model, heeft Royal HaskoningDHV een integraal digitaal model van Waterdunen ontwikkeld. Dit model is in staat om de gehele Waterdunen over een langere periode te simuleren. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 4-1.



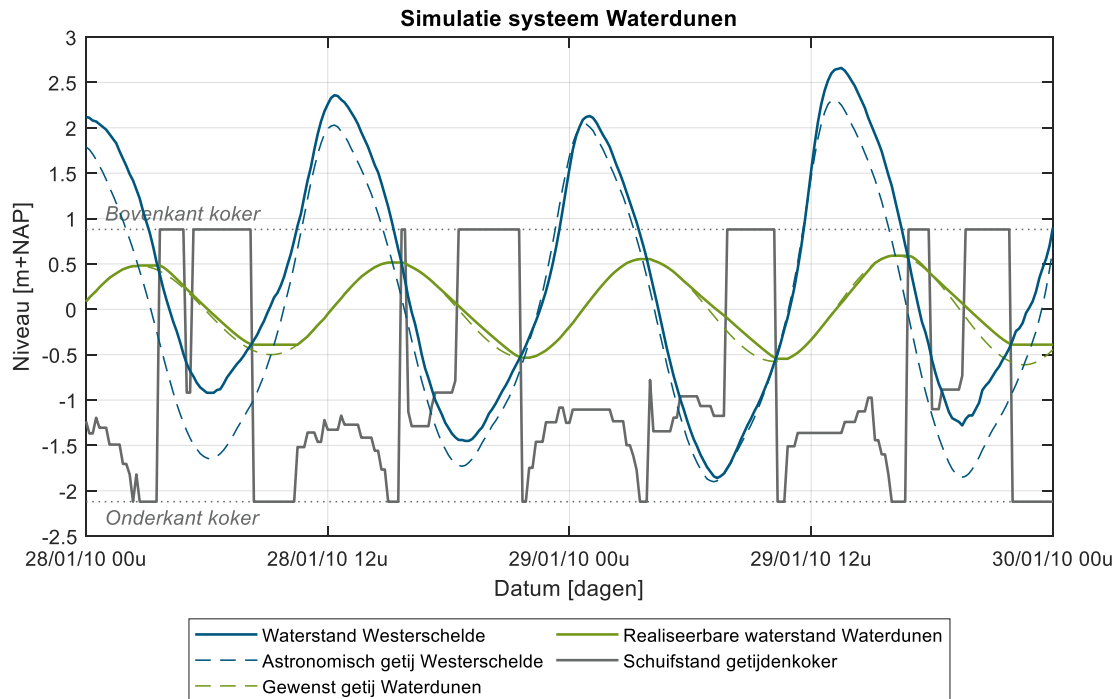
Figuur 4-1: Schematische weergave simuleren van de getijdenduiker

Op basis van waterstandsmetingen en het astronomische getij op de Westerschelde, kan worden gesimuleerd hoe de getijdenduiker zou reageren als deze er toen zou hebben gestaan. Zoals in § 2.1.1 is weergegeven is voor gedurende 7 jaar en 40 dagen voor elke 10 minuten aan metingen en astronomisch getij beschikbaar. Dit is ruim voldoende om statistisch door te kunnen rekenen wat de getijdenduiker onder dagelijkse omstandigheden zal doen. In de dataset komen ook stormen voor, zoals de Sinterklaasstorm van 2013.

In Figuur 4-2 is een voorbeeld gegeven van een simulatie met de huidige aansturing (zie § 0). In het figuur zijn de waterstandsdata weergegeven: de meetreeks aan waterstanden, het astronomisch getij van Rijkswaterstaat en op basis daarvan het gewenste getijdenverloop in Waterdunen. Het digitale model Waterdunen is vervolgens ingezet om te berekenen wat het werkelijke waterstandsverloop zal zijn binnen Waterdunen. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 4-3. Hierin zijn het gesimuleerde waterstandsverloop, de schuifstand van de getijdenduiker weergegeven.



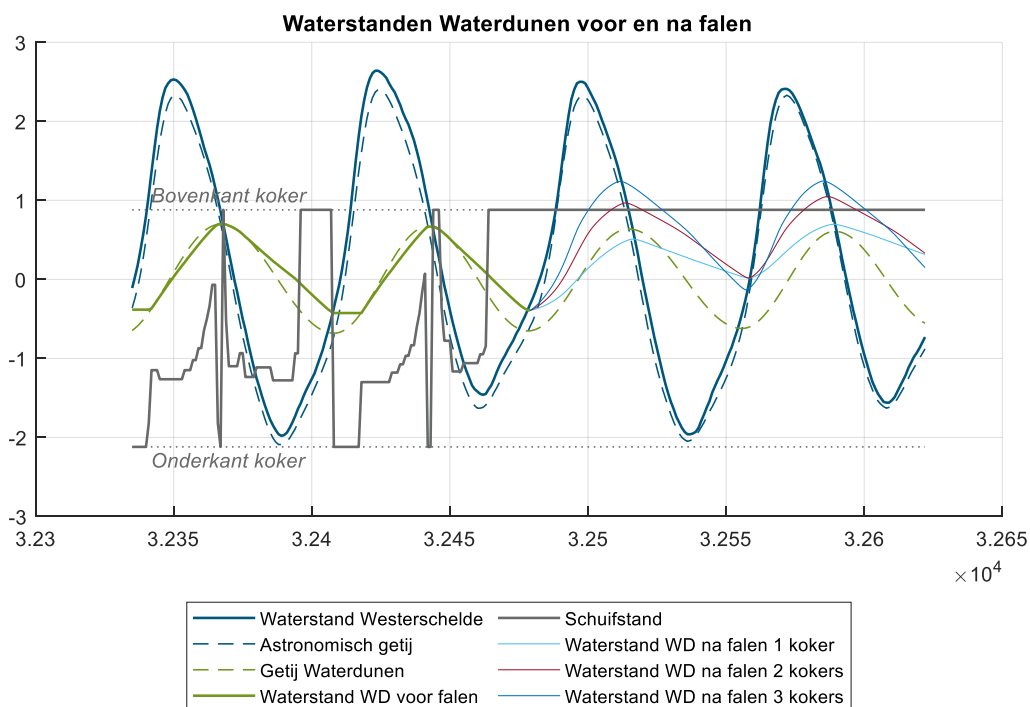
Figuur 4-2: Waterstandsdata voor de getijdenduiker



Figuur 4-3: Gesimuleerd waterstandsverloop in Waterdunen

4.1.3 Waterstanden na falen

Het waterbezwaar model kan ook worden gebruikt om te berekenen wat er na het falen van de getijdenduiker gebeurt met betrekking tot de waterstanden die dan ontstaan. Het is mogelijk om voor iedere keer dat de getijdenduiker wordt ingezet te berekenen wat de waterstanden in bijvoorbeeld de eerste 24 uur na falen zijn. Dit kan het systeem berekenen met drie falende kokers, maar ook met één of twee falende kokers (waarbij de andere kokers worden dichtgezet). In Figuur 4-4 is hiervan een voorbeeld meegenomen. In dit voorbeeld is weergegeven wat er met de waterstanden in Waterdunen gebeurt op het moment dat rondom laagwaterkering 1, 2 en 3 schuiven in volledig open positie blijven staan. In dit voorbeeld is aangenomen dat er een oneindig hoge rand aanwezig is in Waterdunen.



Figuur 4-4: Waterstanden in Waterdunen voor en na falen met een voorbeeld wanneer één, twee of drie kokers volledig open blijven staan

Uit deze grafiek kan vervolgens worden uitgelezen wat de waterstanden zijn die bijvoorbeeld 12 uur na falen maximaal optreden. De getallen voor dit voorgaande voorbeeld zijn weergegeven in de navolgende Tabel 4-1. Op deze maximale waterstanden kan vervolgens statistiek worden toegepast zie § 4.1.5.

Tabel 4-1: Waterstanden na falen met een voorbeeld wanneer één, twee of drie kokers volledig open blijven staan

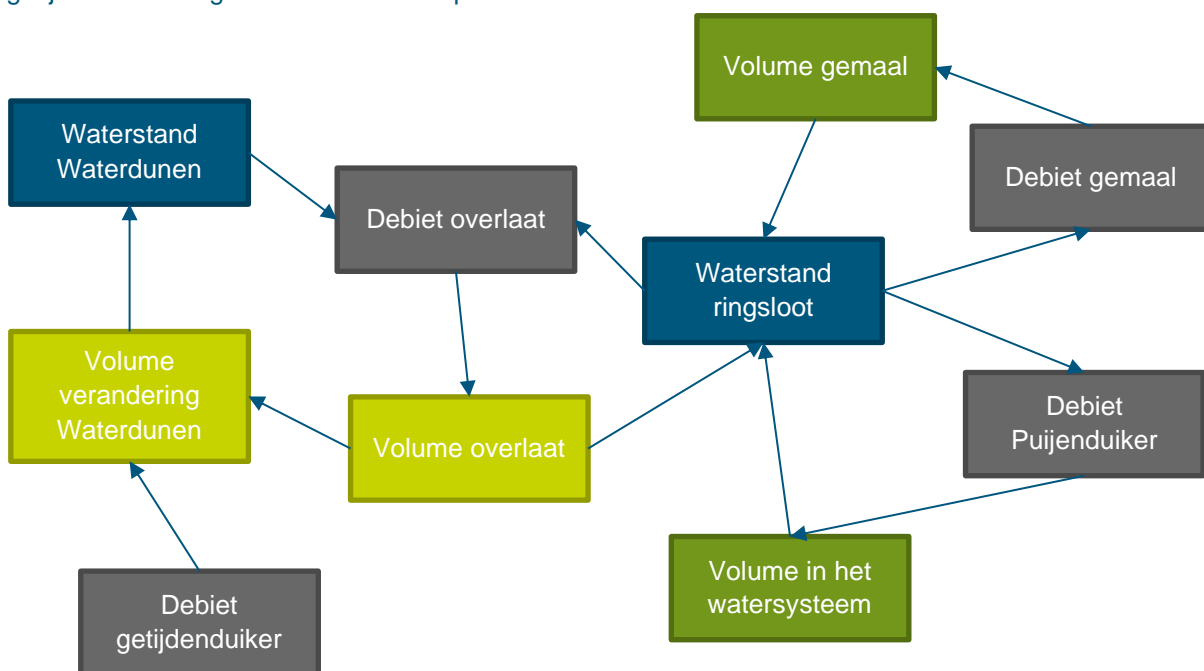
Scenario	Maximale waterstand binnen 12 uur na falen
Eén koker faalt	NAP+0,51m
Twee kokers falen	NAP+0,93m
Drie kokers falen	NAP+1,22m

4.1.4 Waterbezwaar in de ringsloot en het achterland

Er is echter geen oneindig hoge rand langs Waterdunen. Er is een rand aanwezig van minimaal NAP+1,1m. Dit betekent dus ook dat er water over de rand heen kan lopen. Hier is ook rekening mee gehouden in het model waterbezwaar: dit is optioneel aan te zetten.

In dat geval zal de rand gaan fungeren als overlaat. Deze vult de ringsloot en zorgt ervoor dat de waterstand in Waterdunen minder hoog oploopt. Het water zal gelijktijdig de ringsloot uitlopen via het gemaal (mits dit functioneert) en via de Puijenduiker het zwarte gat in, waarmee het water het achterliggende watersysteem in loopt en zich zal verspreiden door het regionale watersysteem. Om te berekenen wat er met dit water gebeurt, is een SOBEK-model ingezet, zie § 4.2.

Modelmatig kan dit worden samengevat in de navolgende diagram in Figuur 4-5. Dit is een relatief ingewikkeld model, omdat er veel terugkoppeling in het systeem bestaat. Zo wordt het debiet dat over de overlaat heen loopt bepaald door de waterstand in Waterdunen, maar ook de waterstand in de ringsloot: als de ringsloot gevuld is, loopt er alleen nog maar dezelfde hoeveelheid water de ringsloot in als dat er via het gemaal en de duiker ontsnapt het achterland in. Het volume wat uiteindelijk over de ringsloot loopt, heeft ook weer invloed op de waterstand in Waterdunen: er loopt immers water uit, terwijl er vanuit de getijdenduiker nog steeds water in loopt.



Figuur 4-5: Schematische weergave overlaat in het model

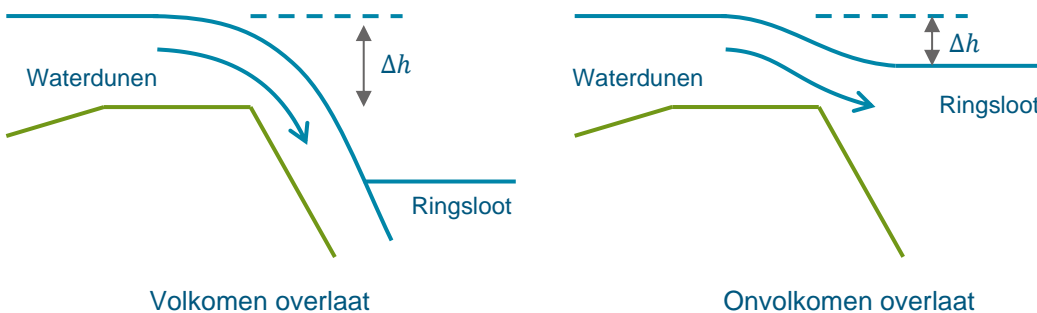
Op basis van de lengte van de ringsloot is bepaald dat deze overlaat 6000 meter lang is en ligt op NAP+1,1m. Dit is een uiterst conservatief uitgangspunt: in werkelijkheid ligt de kade overal op minimaal NAP+1,1m en is er (afhankelijk van de situatie) sprake van een opwaaiing (orde enkele centimeters). Dit zal betekenen dat het water bij NAP+1,1m eerst geconcentreerd op enkele plekken zal overlopen en pas bij hogere waterstanden over de gehele 6.000 meter breedte. Dit betekent dat er in werkelijkheid minder water overheen zal lopen dan theoretisch wordt berekend, alleen is het lastig te kwantificeren hoeveel dat is. Daarom wordt het conservatieve uitgangspunt van een 6.000 meter brede overlaat op NAP+1,1m gehanteerd.

De kade heeft een overslaand debiet dat kan worden berekend met de volgende formule, die is afgeleid uit de vergelijking van Bernoulli:

$$Q = L \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot g\right)} \cdot C_d \cdot (\Delta h)^{\frac{3}{2}}$$

$$\Delta h = h_{WD} - \max(z_{kade}, h_{ringsloot})$$

Waarin Q het debiet is in m³/s, L de lengte van de overlaat, g de gravitatieconstante (9,81 m/s²) en C_d stelt een constante voor de vorm van de overlaat. Deze kan conservatief worden ingeschat op 1,0. De term Δh stelt het verschil tussen een volkomen overlaat en een onvolkomen overlaat voor en is grafisch weergegeven in de navolgende Figuur 4-6.



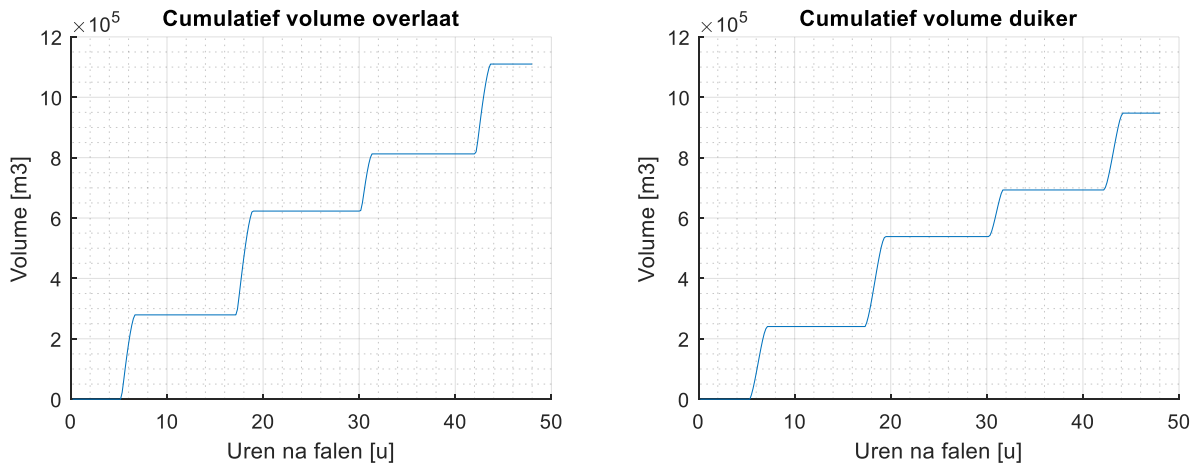
Figuur 4-6: Verschil tussen een volkomen en een onvolkomen overlaat

Voor de bepaling van het kombergend oppervlak van de ringsloot is bekeken wat het totale oppervlakte is van de ringsloot, door voor verschillende secties de lengte en de breedte te meten. Het totale oppervlakte van de ringsloot blijkt ongeveer 57.000 m² te zijn.

Het water kan op twee manieren de ringsloot weer uitstromen (zie figuur Figuur 1-1): door middel van de duiker naar het Zwarte Gat aan de Puijendijk (noordwestelijke hoek) en door middel van het gemaal Nieuwe Sluis dat naast Waterdunen staat. Het gemaal Nieuwe Sluis bevat twee pompen met een gecombineerd maximaal debiet van 498 m³/s (Dieleman, 2020). De duiker reageert op een vergelijkbare manier op verschillen in waterstand tussen de ene kant van de duiker en de andere kant van de duiker, als de getijdenduiker zelf. Daarom kan ook hiervoor het model van Svasek worden ingezet, maar dan met aangepaste maten. Namelijk: het zijn twee kokers, ieder 3,25m breed, met een onderkant op NAP-2,5m en een bovenkant op NAP+0,0m (Groen, 2013). Deze duiker is weliswaar afsluitbaar, maar ten tijde van falen van de getijdenduiker nemen we aan dat de duiker in de Puijendijk open blijft staan om zo het worst-case scenario te kunnen beschouwen. Er wordt van uitgegaan dat na het falen van de getijdenduiker de focus op de getijdenduiker ligt om deze dicht te krijgen en dat er daardoor geen aandacht gaat naar het dicht zetten van de stuw. De resultaten zijn hierdoor conservatief.

Ook is de beginwaterstand in de ringsloot en buiten de ringsloot (Zwarte Gat) relevant. Deze is ofwel winterpeil (NAP-0,9m) dan wel het zomerpeil (NAP-0,6m). Zomerpeil blijkt hierin maatgevend te zijn (minder berging) en daarom is deze aangehouden.

Hiermee kan worden berekend hoeveel water over de kade gaat lopen en als gevolg daarvan via de ringsloot het achterland in. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in de navolgende Figuur 4-7. In dit voorbeeld wordt weergegeven wat er gebeurt in de eerste 48 uur na falen zonder herstel.



Figuur 4-7: Voorbeeld van waterbezwaar over de overlaat en door de duiker in de Puijendijk heen

4.1.5 Statistische uitvoer

Het is mogelijk om op basis van de modelresultaten statistische berekeningen te maken. Alle gebeurtenissen hebben een zekere kans van optreden. Door de juiste kans toe te kennen aan iedere gebeurtenis (falen van de getijdenduiker) en deze bij elkaar op te tellen, kan berekend worden wat er statistisch kan gebeuren. Dit kan voor iedere overschrijding van een bepaalde waterstand gedaan worden. Zo kan voor iedere waterstand berekend worden wat de jaarlijkse kans hierop is.

Fictief rekenvoorbeeld:

Over een periode van 1 jaar aan meetdata, zijn er bijvoorbeeld 10.000 schuifverplaatsingen in het systeem, met 10.000 keer de kans dat een schuif weigert. Er kunnen één of meerdere schuiven weigeren en stil blijven staan. De kans dat gebeurt is bijvoorbeeld onafhankelijk en als volgt gedefinieerd:

- De kans dat 1 koker weigert is 1 op 5.000/vraag → 2 keer per jaar weigert 1 schuif.
- De kans dat 2 kokers weigeren is 1 op 10.000/vraag → 1 keer per jaar weigeren 2 schuiven.
- De kans dat 3 kokers weigeren is 1 op 20.000/vraag → 0.5 keer per jaar weigeren 3 schuiven.

Ieder moment kan de getijdenduiker falen, ongeacht de omstandigheden. Er zijn dan dus ook 10.000 mogelijke faalmomenten per jaar dat een schuif weigert, omdat er 10.000 schuifverplaatsingen zijn. Echter, niet ieder mogelijk faalmoment van de koker leidt tot het halen van een bepaalde waterstand waarbij het kombergend vermogen wordt overschreden (lees: de waterstand is hoger dan de rand van Waterdunen). Dit gebeurt alleen als bijvoorbeeld de schuif voldoende open staat en er voldoende getij is op de Westerschelde, zodat er voldoende volume water door de koker heen kan lopen om het kombergend vermogen te overschrijden. Dit kan bijvoorbeeld zijn:

- Bij weigering van 1 schuif zullen 0 van de 10.000 mogelijke faalmomenten leiden tot het overschrijden van het kombergend vermogen (0% kans);
- Bij weigering van 2 schuiven zullen 1000 van de 10.000 mogelijke faalmomenten leiden tot het overschrijden van het kombergend vermogen (10% kans);
- Bij weigering van 3 schuiven zullen 4000 van de 10.000 mogelijke faalmomenten leiden tot het overschrijden van het kombergend vermogen (40% kans).

Deze kansen zijn van elkaar onafhankelijk: ieder moment kunnen 1, 2 of 3 kokers weigeren. Er zit hier geen correlatie tussen. Om onafhankelijke kansen te combineren en tot een totale faalkans te komen, geldt in algemene zin de onderstaande formule:

$$P_{f,tot} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{f,i})$$

Specifiek toegepast in dit voorbeeld betekent dit het onderstaande:

$$P_{f,tot} = 1 - \left(1 - \frac{1}{5000}\right)^0 \cdot \left(1 - \frac{1}{10000}\right)^{1000} \cdot \left(1 - \frac{1}{20000}\right)^{4000} = 26\%$$

Kans weigeren één schuif Kans weigeren twee schuiven Kans weigeren drie schuiven

Aantal keren dat het leidt tot overschrijding kombergend vermogen

Er is in dit fictieve voorbeeld dus jaarlijks een kans van 26% dat het kombergend vermogen wordt overschreden. Dit is een relatief hoog getal, maar het betreft hier een rekenvoorbeeld.

Onderscheid in verschillende manieren van falen

Het systeem maakt ten slotte nog onderscheid in verschillende manieren waarop het systeem faalt. Zo kan bijvoorbeeld na het nemen van maatregelen op zwaartekracht gesloten worden. Dit is alleen mogelijk, mits na falen het verschil in waterstand tussen Waterdunen en de Westerschelde kleiner is dan 70 cm. In dat geval kan alsnog op zwaartekracht worden gesloten. Dit zorgt ervoor dat de faalkans van die situatie kleiner is. Het systeem houdt er rekening mee dat de juiste kans wordt toegekend aan de juiste situatie.

4.2 SOBEK-model

Waterbezwaar treedt op als de waterstand in Waterdunen zo hoog wordt dat deze over de rand van Waterdunen het regionale watersysteem inloopt, en de waterstanden in het regionale systeem daardoor zo hoog worden dat deze voor overstromingen in het achterliggende land zorgen. Pas als het waterbezwaar groter wordt dan gemiddeld 20cm per postcodegebied, is er juridisch gezien sprake van overstroming. Deze paragraaf omschrijft het gehanteerde model voor het berekenen van de contouren van de waterlijn in het regionale systeem op basis van het waterbezwaar uit Waterdunen.

Als basis voor deze berekening is het SOBEK-model van waterschap Scheldestromen gebruikt, dat wordt kort beschreven in § 4.2.1. In § 4.2.2 worden de modelaanpassingen voor Waterdunen en het bijbehorende waterbezwaar beschreven. In § 4.2.3 wordt beschreven of de zomer of wintersituatie maatgevend is voor eventuele overstromingen op basis van het waterbezwaar uit Waterdunen.

4.2.1 Basis: SOBEK-model Scheldestromen

Het door het waterschap aangeleverde model beslaat de westelijke helft van Zeeuws-Vlaanderen, grofweg alles ten westen van de Braakmankreek. Het model is begrensd op de grens tussen Nederland en België. Op een drietal locaties kan uitwisseling met België plaatsvinden middels een stuw. Verder wordt het model gevoed door lateralen met een constant debiet welke representatief zijn voor een zomer of winter afvoer (NMA of HMA²). Het gebied staat middels watergangen, duikers en stuwen in verbinding met een drietal pompen welke het overtollige water de Westerschelde in pompen. Een afbeelding van het model is opgenomen in Figuur 4-8



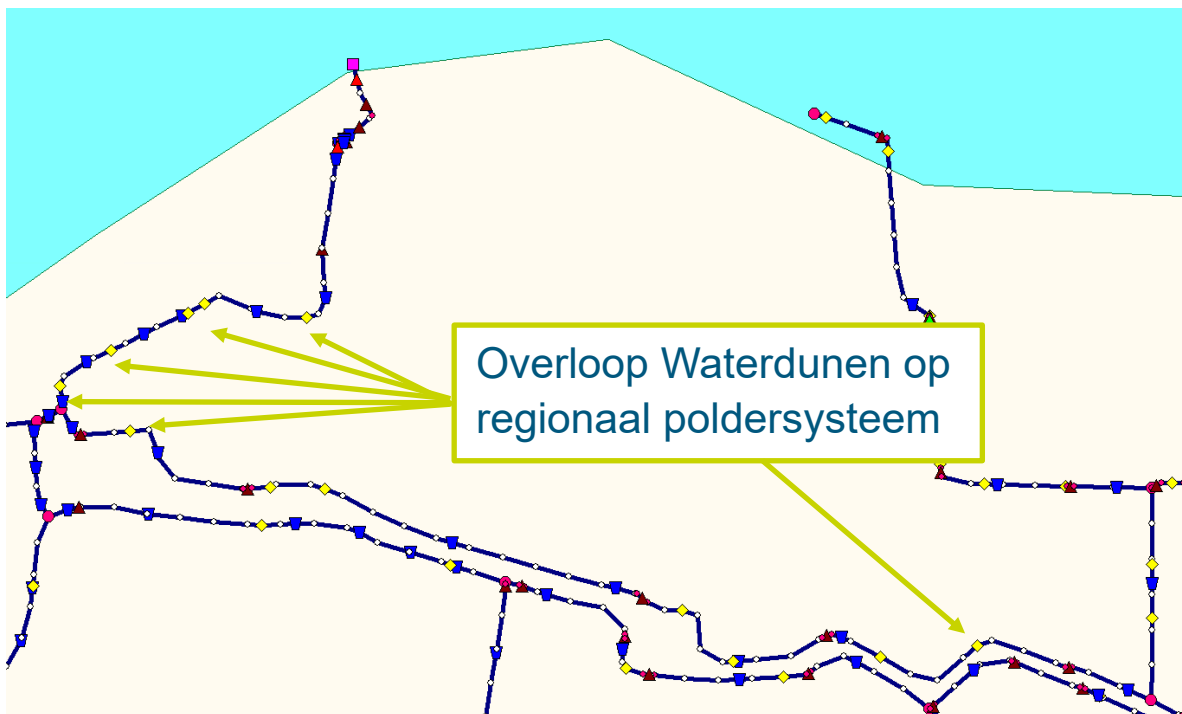
Figuur 4-8: Oorspronkelijke SOBEK-model Scheldestromen

² NMA: Normaal maatgevende afvoer
HMA: Hoge maatgevende afvoer

4.2.2 Modelaanpassingen

Binnen deze studie is gekeken naar wat er gebeurt als het mechanisme in de getijdenduiker faalt en er tijdens hoogwater op de Noordzee een grote hoeveelheid water Waterdunen instroomt vanuit de Westerschelde. In een dergelijke situatie kan er vanuit Waterdunen zeewater over een rand het regionale watersysteem instromen.

Om dit proces te modelleren wordt het berekende volume uit model SVASEK, verdeeld over 6 locaties, op het watersysteem gezet in de vorm van een laterale afvoer (Figuur 4-9). Er is gekozen om het volume over 6 locaties te verdelen, omdat dit zorgt voor gelijke en realistische waterstanden in het omringende watersysteem. Als de sloot volledig gevuld is, dan kan immers worden verwacht dat de waterstand in de sloot gelijk is aan de waterstand in Waterdunen.



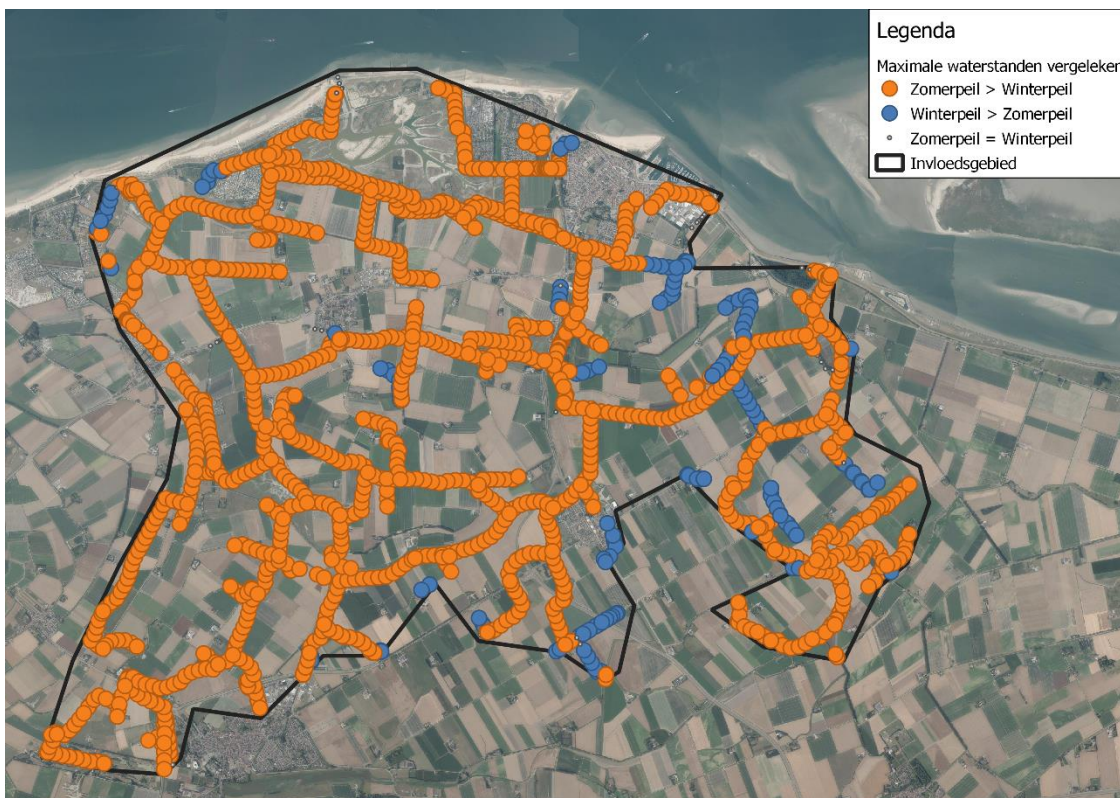
Figuur 4-9: Model aanpassingen Waterdunen

4.2.3 Zomerpeil of winterpeil

Het beheer van het watersysteem is afhankelijk van het jaargetij. Waterschap Scheldestromen hanteert twee beheerregimes, één voor in de winter en één voor in de zomer. Ten opzichte van het winterregime is tijdens het zomerregime de afvoer uit het gebied lager en zijn de stuwstanden vaak hoger. Dit wordt gedaan om zo meer waardevol water in het gebied vast te houden.

Voordat verschillende scenario's zijn doorgerekend, is uitgezocht tijdens welk beheerregime de hoogste waterstanden voorkomen. Voor het invloedsgebied is in Figuur 4-10 te zien dat in bijna het gehele invloedsgebied de zomerwaterstanden hoger zijn dan de waterstanden in de winter. Opgemerkt moet worden dat voor deze vergelijking het zomerregime is doorgerekend met een NMA, terwijl voor het winterregime de HMA is gebruikt. Zelfs met een kleinere belasting uit het achterliggende gebied levert het zomerregime dus hogere waterstanden op.

Op basis van deze vergelijking zijn de scenario's in SOBEK doorgerekend met een zomersituatie.



Figuur 4-10: Maatgevende periode

4.3 Theorie/model ecologie

Om de ecologische effecten van verschillende waterbeheer scenario's inzichtelijk te maken en kwantitatief te kunnen vergelijken, is gekozen voor een ecotopen-benadering. Ecotopen zijn ruimtelijk te begrenzen ecologische eenheden, waarvan de samenstelling en ontwikkeling worden bepaald door abiotische, biotische en antropogene condities ter plaatse. Een ecotoop is een herkenbare, min of meer homogene landschappelijke eenheid. Bij deze studie is gebruikt gemaakt van het ecotopen stelsel zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1, zie Bouma *et al.* 2005), waarin estuariene ecotopen op basis van de droogvalduur (slikken) en overstromingsfrequentie (schorren) zijn ingedeeld en begrensd. Middels het hydrodynamisch model (onderdeel van digitale model Waterdunen, Hoofdstuk 4.1) konden droogvalduur en overstromingsfrequentie worden berekend voor verschillende hoogteliggingen in Waterdunen. De ecotopenverdeling in Waterdunen is gebaseerd op de gemodelleerde ecotopen begrenzing en de bathymetriekaart, zoals weergegeven in de ontwerptekeningen van Waterdunen (Groen, 2013). Naast een ruimtelijke weergave van de ecotopenverdeling bij verschillende hydrodynamische modelscenario's, kan op basis van deze kaarten ook het oppervlak per ecotoop worden uitgerekend en vergeleken, zoals gebruikelijk bij een ecotopenkaartanalyse.

Bij het interpreteren van de ecotopenkaartanalyse moet wel rekening worden gehouden met enkele onzekerheden. Ten eerste zijn de ecotopen gebaseerd op de modelresultaten en niet op veldmetingen. Een model is altijd een versimpelde weergave van de werkelijkheid waarin niet alle aspecten zijn meegewogen en dus kan het resultaat in praktijk anders zijn. Wel is het model constant vernieuwd met de laatste monitoringgegevens en is voor de simulaties van de waterstanden een meetreeks van enkele jaren gebruikt. Ten tweede zijn de ecotopenkaarten gebaseerd op de ontwerptekeningen van Waterdunen en die kunnen afwijken van de daadwerkelijk opgeleverde inrichting. De modelresultaten laten soms een verschuiving van een ecotopengrens zien van 1 of 2 cm (bijv. van NAP+0,75 m naar NAP+0,74 m), met mogelijk grote gevolgen voor het oppervlak van de betreffende ecotoop. Het is echter best aannemelijk dat de hoogteligging niet overal op de cm nauwkeurig is opgeleverd (dat is machinaal haast onmogelijk) en dus moet men rekening houden met enige mate van onzekerheid bij het interpreteren van de ecotopen oppervlaktes. Ten derde zijn de ecotopengrenzen hard gedefinieerd, maar zijn de habitats van kenmerkende soorten in praktijk niet zo hard begrenst en bovendien afhankelijk van meerdere variabelen (naast de droogvalduur en overstromingsfrequentie). Er zal dus altijd een gradiënt zijn waarover de soortensamenstelling veranderd, en de resultaten van de ecotopenkaartanalyse kunnen niet 1 op 1 vertaald worden naar het voorkomen van kenmerkende soorten.

4.4 Conclusie hoofdstuk 4

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- Het bezwaarmodel berekent de verwachte waterstanden in Waterdunen en de benodigde positie van de regelschuiven;
- Het SOBEK-model simuleert waterstanden in het watersysteem van Zeeuws-Vlaanderen bij het eventueel overlopen van Waterdunen;
- Voor het vergelijken van ecologische effecten wordt het ecotopen-model gebruikt.

5 Beschrijving en beoordeling huidige situatie

In zowel dit onderzoek als in het uitgebrachte advies voor het waterschap Scheldestromen, is de huidige situatie beoordeeld van de technische installaties (niet zijnde de civiele constructie, de kokers) aan de hand van de ter beschikking gestelde as-builtgegevens en aanvullende informatie zoals verzameld in de periode van maart 2020 tot september 2020 (het meet- en monitoringsprogramma en diverse tests).

5.1 Beschrijving huidige installatie

De huidige installatie is beoordeeld op basis van de uitgangspunten van Waterdunen, de contracteisen en de geldende normen en regelgeving ten tijde van de bouw van de getijdenduiker in de periode 2014 tot 2015. Voor de beschrijving van de huidige installatie is gebruik gemaakt van de rapportage van Royal HaskoningDHV d.d. 4 maart 2020 (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel; Oplossingen voor waterveiligheid en waterbezwaar, 2020) en de notitie van Royal HaskoningDHV met opmerkingen op de huidige installatie (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020).

De getijdenduiker beschikt over drie kokers met schuiven; de koker voor het gemaal niet meegerekend. In elke koker zit een sluit- en een regelschuif. De sluitschuiven worden gesloten bij hoogwater op de Westerschelde, met de regelschuiven wordt de capaciteit door de duikers en het waterniveau in het getijdengebied van Waterdunen geregeld zodat de maximale waterstanden niet worden overschreden

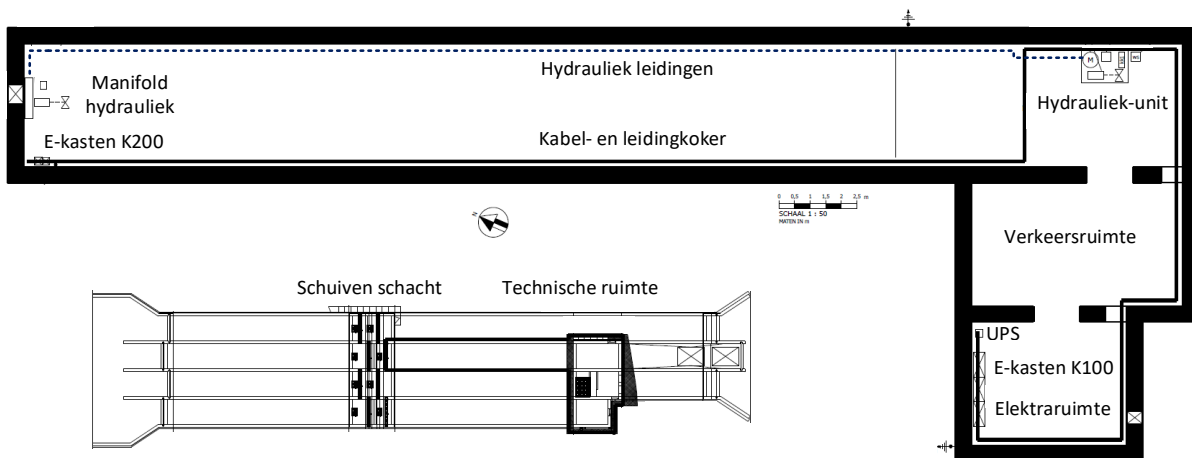
Schuiven

De schuiven zijn vervaardigd van staal. Elke schuif is voorzien van een hydraulische cilinder om de stand van de schuif te kunnen stellen. Voor de geleiding van de schuif zijn kunststof geleidestrips op de schuif gemonteerd en de sponning is voorzien van een roestvast profiel als tegenmateriaal. De schuif is verder voorzien van afdichtingsrubbers om het lekverlies te minimaliseren.

Hydraulische installatie

De cilinders om de schuiven te bewegen zijn centrisc op de schuif gemonteerd met de stang naar beneden gericht. Op de mantel van de cilinder zijn astappen opgenomen voor de scharnierende bevestiging van de cilinder aan de civiele constructie. Met een stangoog voorzien van een lager is de cilinder bevestigd aan de schuif. In de cilinders is een wegmeetsysteem opgenomen, waardoor altijd de actuele stand van de schuif te herleiden valt. Voorts zijn voor de volledige open- en dichtstand van de schuif eindschakelaars voorzien die zijn opgenomen op de mantel van de cilinders.

Voor de olieverzorging naar de schuiven is een hydrauliek-unit voorzien, die bestaat uit een gezamenlijk reservoir met een dubbele pompset: één pompset voor de bediening van de sluitschuiven en één voor de regelschuiven. De pompen zetten hierbij het leidingwerk onder druk. De eigenlijke bediening van de schuiven gebeurt met stuurschuiven die zijn opgenomen op een manifold in de kelder nabij de cilinder. De hydrauliek-unit staat op 30 m van de schuiven.



Figuur 5-1: Overzicht kokers met schuiven en installatieruimtes

Energievoorziening

De getijdenduiker dient te worden voorzien van elektrische energie. Naast de energieaansluiting met het energienet is de getijdenduiker voorzien van een noodstroomaggregaat en een UPS-installatie voor het geval van stroomuitval. Bij stroomuitval houdt de UPS-installatie de besturing in de lucht, waarna het noodstroomaggregaat wordt gestart.

Besturing

De besturingsinstallatie voor de aansturing van de schuiven in de duikers is opgenomen in de elektrische ruimte van de getijdenduiker (K100). Ten behoeve van de aansturing van de stuurschuiven op de manifolds en het uitlezen van de instrumentatie bij de schuiven is een tweede besturingskastenset (K200) voorzien nabij de schuiven.

De PLC-besturing is opgenomen in kastenset K100. In kastenset K200 is een remote I/O installatie opgenomen ten behoeve van de aansturing van de stuurschuiven en uitlezing van de instrumentatie. Communicatie tussen de PLC-besturing en Remote I/O gebeurt met behulp van een Profibus netwerk.

Er is een gescheiden systeem voor de sluit- en regelschuiven. Elk systeem heeft zijn eigen PLC-besturing. De scheiding is doorgetrokken tussen de kastensets en communicatie tussen de kasten. Elke kast heeft zijn eigen 24VDC-omvormer voor de elektrische voeding van de besturingselementen.

Voor communicatie met de hoofdpst van het Waterschap (CAW) is een glasvezelverbinding opgenomen tussen de getijdenduiker en het poldergemaal op een afstand van circa 100 m. In het poldergemaal is een modem opgenomen die voor de verdere communicatie zorgt.

Bediening

In de huidige situatie worden de schuiven lokaal bediend met behulp van de bedienknoppen op de besturingskasten of door afzonderlijke bediening van de schuiven m.b.v. het touchscreen op de besturingskast. Op de kast zijn bedienknoppen opgenomen voor het afsluiten van de kokers. Er is ook een knop 'noodsluiting' waarbij alle schuiven worden gesloten. Vanuit de hoofdpst kan in hoofdzaak alleen gemonitord worden; de schuiven kunnen niet op afstand beperkt worden bediend. Wel kan op afstand vanaf de hoofdpst via CAW de Getijdenduiker waterkerend worden gestuurd. De waterkerende status kan vanaf deze plaats niet worden opgeheven.

Toekomstig zal de bediening van de schuiven automatisch gebeuren. Er wordt een regeling in de besturing opgenomen voor de gewenste waterpeilen in het getijdengebied van Waterdunen. Beveiligingen in de besturing zorgen ervoor dat het waterpeil in het getijdengebied niet te ver zal oplopen. Zo worden de kokers automatisch gesloten bij een te hoge waterstand in Waterdunen.

Instrumentatie

Voor de aansturing van de schuiven van de getijdenduiker is er instrumentatie nodig. Aan de zijde van de Westerschelde en aan de zijde van het getijdengebied zijn er niveaumeters opgenomen. Aan de zijde van het getijdengebied zijn er twee en aan de Westerschelde zijde drie.

Voor de stand van de schuiven is er in de cilinders een geïntegreerd wegmeetsysteem opgenomen. Het wegmeetsysteem meet de uitgeschoven lengte van de cilinder, waarmee de openstand van de schuif kan worden afgeleid. Op de cilinder zijn ook eindschakelaars opgenomen die de volledige open en dichtstand van de schuif detecteren.

Naast de benodigde instrumentatie voor de regeling van de schuiven is er instrumentatie voorzien voor de correcte werking van de installaties, zoals:

- Veiligheidsschakelaars waarmee wordt gedetecteerd of de olietoevoer naar de schuiven niet is afgesloten;
- Monitoring van de olietemperatuur in het aggregaat (hoge temperatuur melding, te hoog uitschakeling);
- Monitoring van het olieniveau in het oliereservoir (laag niveau melding, te laag uitschakeling);
- Etc.

5.2 Beoordeling huidige installatie

In voorliggende paragraaf komt de beoordeling van de huidige installatie aan bod. Voor de informatie van deze paragraaf is gebruik gemaakt van een tweetal referenties, namelijk een notitie met opmerkingen over de bewegingswerken schuiven (RHDHV, Getijdenduiker Waterdunen; Opmerkingen bewegingswerken schuiven, 2020) en de notitie met opmerkingen op de huidige installatie (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020).

5.2.1 Beoordeling huidige installatie

De huidige installatie heeft een aantal technische gebreken, waarmee niet aan de eisen van de waterveiligheid en de ecologie kan worden voldaan (voor de ecologische beoordeling zie hoofdstuk 5.5). Op gebied van de waterveiligheid voldoet de duiker op twee van de drie voorwaarden van de Waterwet niet:

- De betrouwbaarheid van de sluiting van de kering is onvoldoende;
- De constructieve sterkte van de schuiven en aandrijving is onvoldoende, o.a. de aanhechting van de cilinders aan de schuiven.

Betrouwbaarheid

Uit een eerdere studie naar de waterveiligheid en waterbezwaar van Waterdunen (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2, 2020) is naar voren gekomen dat met de huidige installatie de betrouwbaarheid voor het sluiten van de kering onvoldoende is. Dit heeft o.a. te maken met het gegeven dat:

- Er geen (volledig) redundante installatie is geleverd voor het bedienen van de regel- en de sluitschuiven;
- De handbediening van de schuiven niet werkbaar is;
- Het aantal bijstellingen per uur van de schuiven erg hoog is.

Met de huidige installatie worden de faalkansen gevonden als gepresenteerd in Tabel 5-1. Voor meer informatie over de faalkansanalyse wordt verwezen naar voorgaande rapportage (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2, 2020).

Tabel 5-1: Gevonden faalkansen van de huidige installatie

	Huidig faalkans (1/vr)	succes (vr)
Regelen		
1 van de 3 schuiven faalt te regelen	1,38E-03	727
2 van de 3 schuiven falen te regelen	7,09E-04	1411
3 van de 3 schuiven falen te regelen	7,06E-04	1416
Keren		
1 van de 3 kokers faalt te sluiten	2,96E-04	3380
2 van de 3 kokers falen te sluiten	2,93E-04	3416
3 van de 3 kokers falen te sluiten	2,93E-04	3416

Constructieve veiligheid

Tijdens de functionele test van 5 september 2019 bleek dat de schuiven niet gesloten konden worden bij waterstanden die lager waren dan volgens de contractverplichtingen (moeten) kunnen optreden zonder functieverlies. Uit nadere beschouwingen volgt (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020):

- Dat de weerstand van de schuiven bij het bewegen hoger is dan verwacht en het bewegingswerk niet voldoende kracht kan leveren om de schuiven te bewegen onder maatgevende waterstanden;
- Onderdelen van de schuiven en cilinders niet voldoende sterk zijn en moeten worden aangepast.

Beschikbaarheid

In verband met de ecologie is een hoge beschikbaarheid nodig met korte functiehersteltijden; wanneer de getijdenduiker langer dan 24 uur buiten bedrijf is, loopt de ecologie ernstige schade op. Niet-beschikbaarheid kan ongepland zijn door storingen of externe gebeurtenissen, of gepland door onderhoudswerkzaamheden. Met het huidig voorgestelde onderhoudsschema moet bij groot onderhoud de getijdenduiker voor een week uit bedrijf, wat vernietigend is voor de ecologie. Bij ongeplande niet-beschikbaarheid moet de functie van de installatie binnen 24 uur hersteld zijn. Dit houdt in dat voldoende onderdelen met een lange levertijd op reserve moeten liggen.

5.2.2 Tekortkomingen op contracteisen

Er zijn verschillende onderzoeken en overleggen geweest, ook met de aannemer, om tot voldoende herstel van de getijdenduiker te komen. De eerst uitgevoerd stap is de controle van de ontwerpdocumenten van de aannemer en het door de aannemer ingediende verbetervoorstel geweest. Een van de belangrijkste punten was hierbij dat de aannemer bij het ontwerp niet de juiste uitgangspunten (waterstanden) had gehanteerd, verschillende belastings-aandelen was vergeten, geen vermoeiingsberekeningen van de schuifconstructie had gemaakt en de berekening van de bewegingswerken niet volgens de normen had uitgevoerd (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020). De belastingen zijn vervolgens opnieuw bepaald en er zijn nieuwe ontwerpdocumenten ingediend.

Hierbij is voor de wrijvingscoëfficiënt in de geleiding van de schuif uitgegaan van de waarde van 0,2 volgens de norm (materiaal UHMWPE)³; in de oorspronkelijke berekeningen was uitgegaan van een waarde van 0,3.

Uit de nieuw uitgevoerde berekeningen bleken verschillende onderdelen van de schuifconstructie onvoldoende sterk te zijn en deze moeten worden aangepast. Van het bewegingswerk waren nieuwe berekeningen gemaakt, maar daar waren verschillende versies van dezelfde norm door elkaar heen gebruikt, wat niet akkoord is bevonden. De hydrauliek leverancier wilde geen nieuwe berekeningen maken voordat er meer zekerheid was over de optredende krachten tijdens de beweging, waardoor door de aannemer is voorgesteld om metingen uit te voeren om de optredende kracht te meten.

De metingen, uitgevoerd op 17 juli en 18 augustus 2020 gaven een onverwacht resultaat, waarbij de gemeten krachten veel hoger waren dan verwacht zou worden uit de berekeningen. Uit metingen bleek dat eerder een wrijvingscoëfficiënt van 0,3 moet worden aangehouden dan 0,2 (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020). Met een wrijvingscoëfficiënt van 0,3 is het niet mogelijk om met de huidig geïnstalleerde cilinders aan de contracteisen te voldoen. Nieuwe cilinders met een grotere zuigerdiameter hebben tot gevolg dat ook de rest van de hydraulische installatie moet worden vervangen.

Bij de door de aannemer uitgevoerde metingen, is wel de kanttekening dat de waterstanden waarbij gemeten werd aanzienlijk lager waren dan die van de contracteisen en dat er slechts bij een enkele schuif gemeten is. De meting hoeft dus niet representatief te zijn voor alle schuiven.

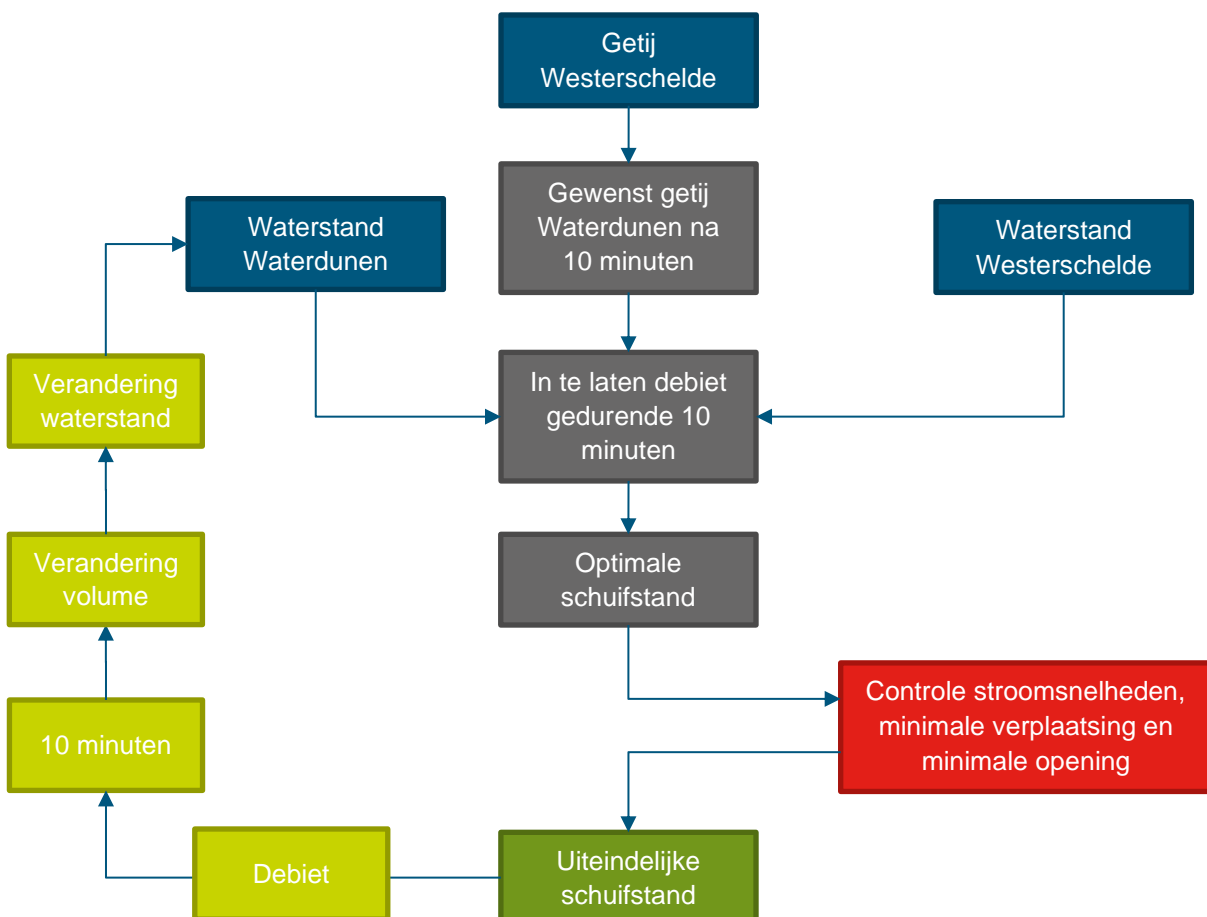
³ *Uit controle van de tekeningen volgt dat er op de schuiven ander geleidemateriaal is toegepast dan UHMWPE. Het toegepaste geleidemateriaal heeft een hogere wrijvingscoëfficiënt.*

5.3 Beschrijving huidige aansturing

Het regelsysteem is door het waterschap Scheldestromen beschreven (Istimewa, 2019) en is als volgt samen te vatten en grafisch weergegeven in Figuur 5-2.

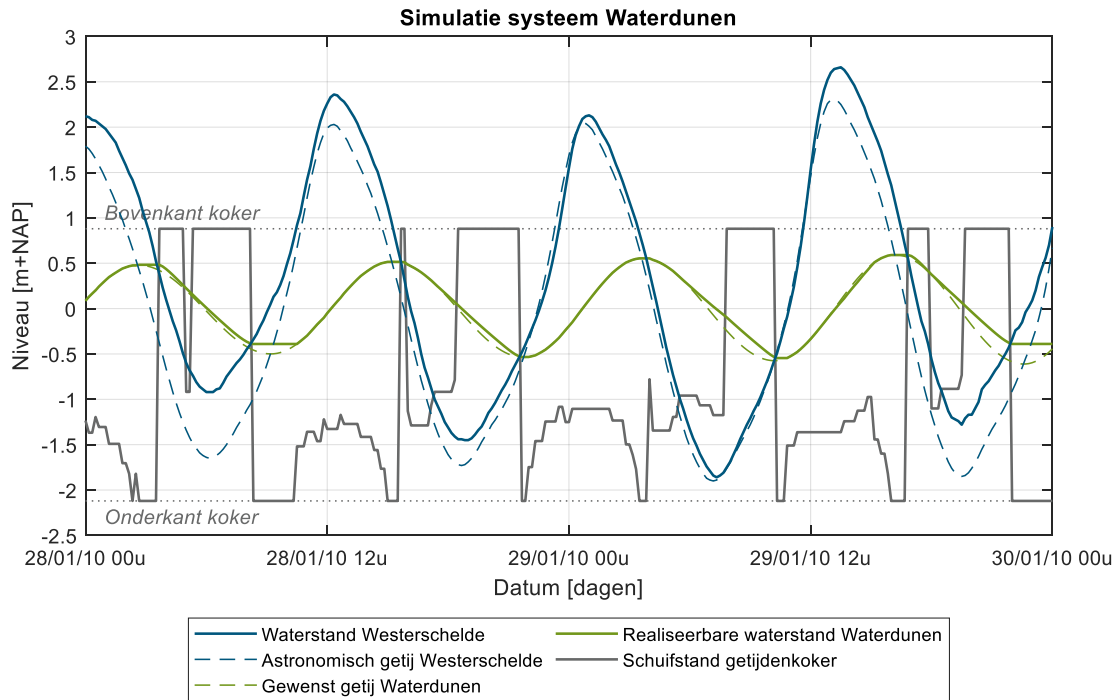
Regelsysteem nulsituatie:

- Elke 10 minuten wordt er bekeken wat de schuifstand van de kokers moet zijn.
- De schuifstand wordt berekend aan de hand van het in/uit te laten debiet.
- Het debiet wordt bepaald aan de hand van de huidige waterstand in Waterdunen, de gewenste waterstand over 10 minuten in Waterdunen en de huidige waterstand in de Westerschelde. Het debiet is dan ook dusdanig dat na 10 minuten de gewenste waterstand bereikt wordt.
- De schuif wordt alleen van stand veranderd als de verandering minimaal 9 cm is en de schuif mag geen stand hebben lager dan de snijgrens (30 cm boven de onderkant koker).
- Indien de gekozen schuifstand leidt tot te hoge stroomsnelheden, zal deze lager worden ingesteld zodat de stroomsnelheden afnemen totdat ze niet meer te hoog zijn. Over het algemeen gebeurt dit gemiddeld genomen als er ongeveer 20 m³/s door een koker loopt. Voor meer informatie zie § 0.

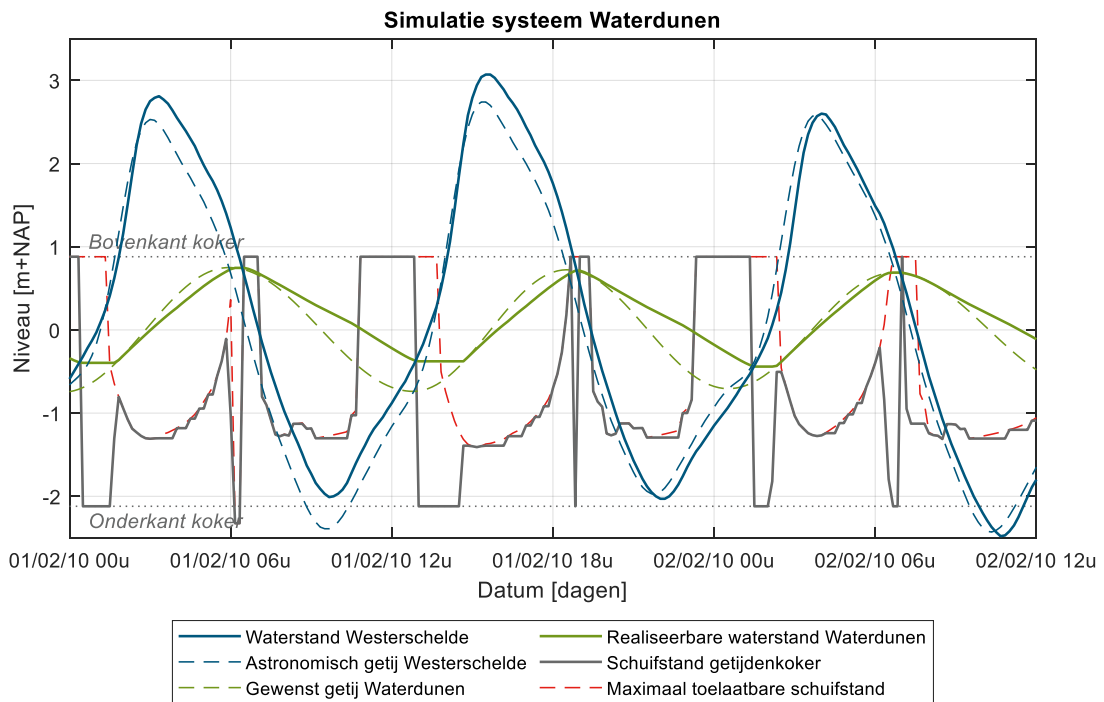


Figuur 5-2: Huidige aansturing getijdenduiker

Voorgaande leidt tot het waterstandsverloop, zoals weergegeven in Figuur 5-3 (gelijk aan Figuur 4-3). In Figuur 5-4 is een simulatie van het systeem rondom springtij toegevoegd. Aan dit figuur is toegevoegd wat de maximaal toelaatbare schuifstand is. Dit is de schuifstand die leidt tot de maximaal toelaatbare debieten in verband met de langdurige belasting van de bodembescherming.



Figuur 5-3: Gesimuleerd waterstandsverloop in Waterdunen met huidig regelsysteem



Figuur 5-4: Gesimuleerd waterstandsverloop in Waterdunen met huidig regelsysteem rondom springtij

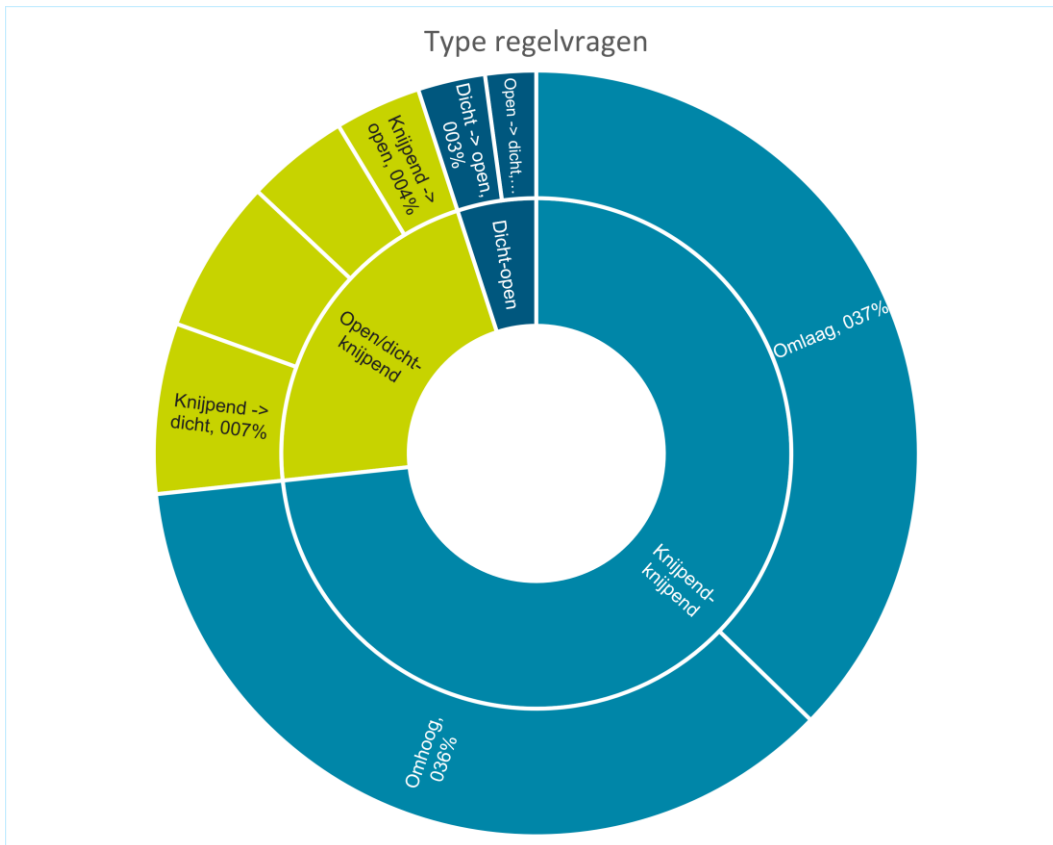
Er is een aantal onderwerpen die opvallend genoemd mogen worden in deze aansturing:

- Tijdens het inlaten kan de perfecte sinus zeer nauwkeurig worden gevolgd voor doottij en gemiddeld getij;
- Aan de hand van de monitoring (zie § 0), kunnen de volgende constatering worden gedaan rondom springtij:
 - zowel met inlaten als uitlaten wordt het debiet beperkt door de toelaatbare stroomsnelheden in verband met de langdurige belasting van de bodem;
 - het maximaal beoogde water zal *nét* niet altijd zal worden gehaald;
 - het uitlaten eerder lineair verloop dan sinusoïde;
 - de gewenste laagwaterstanden zullen niet gehaald worden.
- Er zijn veel bijsturingen nodig, waardoor de schuiven in de koker regelmatig op en neer gaan met kleine verplaatsingen. Dit belast de hydrauliek zo vaak dat niet meer voldaan wordt aan de eisen ten aanzien van betrouwbaarheid sluiting.

Tevens is er statistiek toe te passen op het aantal regelvragen in het systeem:

- 24,5 regelvragen per getijdencyclus;
- 47,5 regelvragen per dag;
- 17.300 regelvragen per jaar;
- Ongeveer 24 storingen per jaar waarbij de regelschuif van één koker weigert en de noodschuif wel sluit, maar waarbij de andere twee kokers nog kunnen blijven functioneren;
- Ongeveer 12 storingen per jaar waarbij de regelschuiven weigeren en de noodschuiven sluiten;
- Ongeveer 5 storingen per jaar waarbij de regelschuiven weigeren én de noodschuiven weigeren. Alleen wanneer het waterbezwaar voldoende groot is, leidt dit tot een waterveiligheids-/wateroverlastprobleem. Zie beoordeling op waterveiligheid.

De regelvragen zijn te onderscheiden in verschillende type regelvragen. Deze zijn weergegeven in Figuur 5-5. Te zien is dat het overgrote deel van de regelvragen (73%), vragen zijn waarbij van de ene knijpende positie naar de andere knijpende positie wordt gegaan, met name om het gewenste getijdeverloop zo nauwkeurig mogelijk te volgen.



Figuur 5-5: Aandeel type regelvragen

5.4 Beoordeling getijdenduiker op waterveiligheid en -overlast

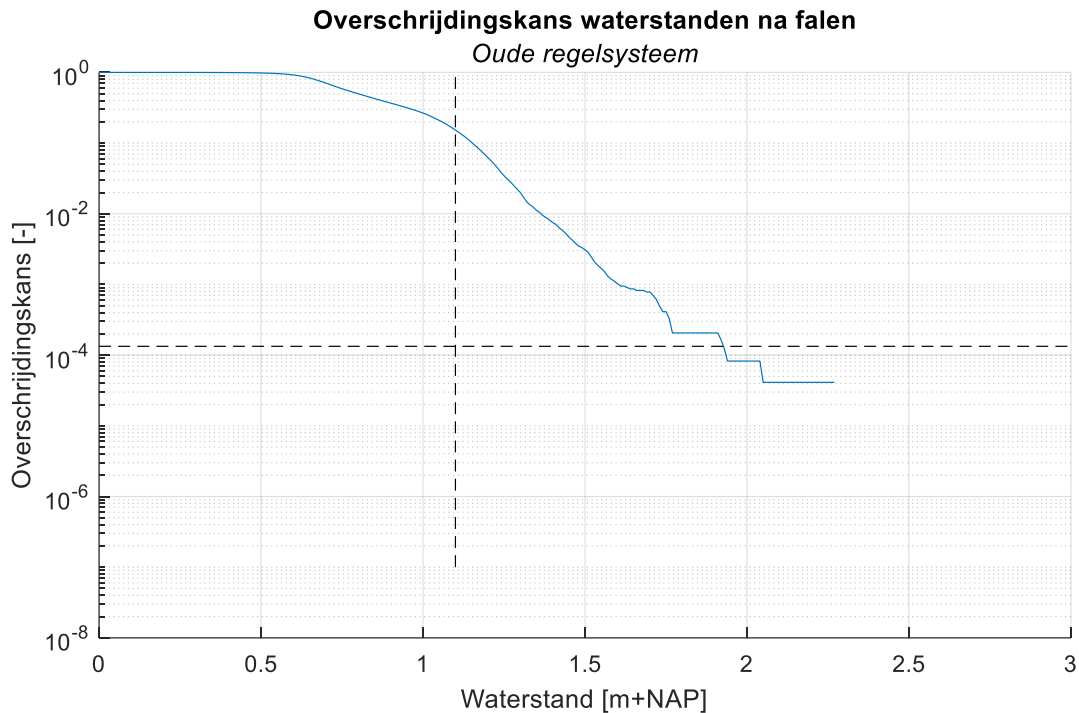
De getijdenduiker voldoet niet aan de waterveiligheids- en wateroverlastnormen uit § 3.1. Falen is te frequent en heeft te grote gevolgen. Dat wordt in deze paragraaf verder uitgelegd.

5.4.1 Getijdenduiker

Op basis van het regelsysteem zoals dat is beschreven in de voorgaande paragraaf, is bekeken wat dit betekent voor de waterveiligheidsnormen en de wateroverlastnormen. Met een inzet van gemiddeld 17.300 aanspraken per jaar en een faalkans van 1/3.000 per aanspraak, kan verwacht worden dat de getijdenduiker gemiddeld zo'n 5x per jaar weigert.

Niet elke weigering van het systeem leidt tot een probleem. Daarom is berekend wat de gevolgen zijn voor wat betreft de waterstanden in Waterdunen na het falen van de getijdenduiker. Het zal mogelijk zijn om binnen 12 uur na falen de getijdenduiker volledig te sluiten door menselijk ingrijpen. Dit betekent dat de hoogste waterstand die binnen 12 uur na falen van 1, 2 of 3 kokers relevant is. Daar is vervolgens een kans van voorkomen aan toegekend. Deze kansen volgen uit Tabel 5-1. Dit levert een grafiek op voor de maximale waterstanden na falen en de bijbehorende jaarlijkse overschrijdingskansen, zie Figuur 5-6. In deze figuur weergeeft de blauwe lijn wat de overschrijdingskans is van een bepaalde waterstand per jaar.

Zo is bijvoorbeeld af te lezen dat de kans dat het kadeniveau van NAP+1,1m wordt overschreden per jaar 15% is. Met andere woorden: eens per 6,5 jaar. Dit is de verticale zwarte stippellijn. Hieruit kan ook worden afgelezen dat bij normcondities (1/7.500 per jaar, de horizontale stippellijn) de waterstand in Waterdunen, gegeven oneindig hoge kade, op zal lopen tot NAP+1,93. Dit is genoteerd in Tabel 5-2.



Figuur 5-6: Overschrijdingskansen waterstanden oude situatie

Tabel 5-2: Gevolgen nulsituatie voor de waterveiligheid

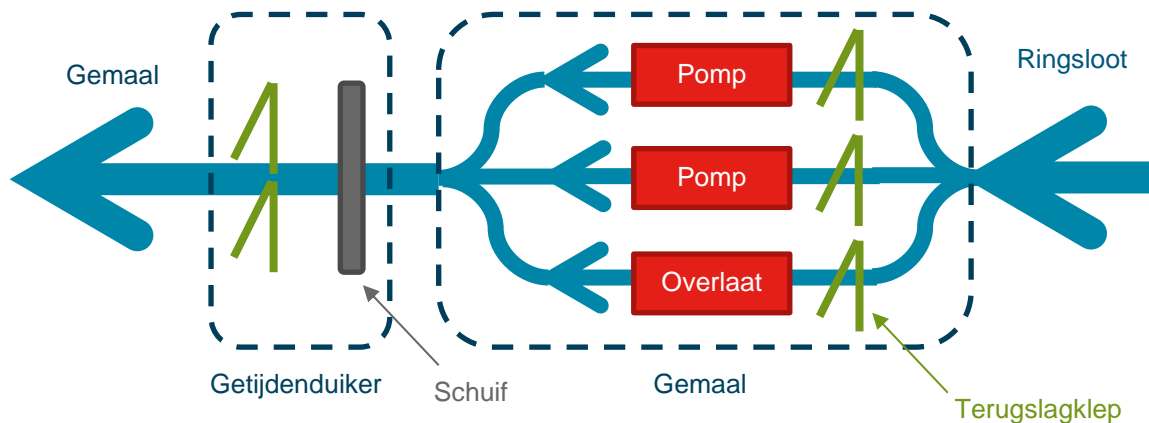
Combinatie	WBI (1 op 7.500 jaar)	Kade (NAP+1,1m)
Situatie voor maatregelen	NAP+1,93m	1 per 6,5 jaar

De kade is echter niet oneindig hoog. Eens per 6,5 jaar wordt het niveau van NAP+1,1m overschreden en zal de kade als overlaat gaan fungeren. Dit is erg frequent en zal daarom vaker tot wateroverlast leiden dan volgens de norm is toegestaan (0cm inundatie met een jaarlijkse kans 1/100 in stedelijk gebied zie 3.1.2). Hiermee voldoet het systeem niet aan de wateroverlast norm.

Met het model is berekend dat er ongeveer 2,000,000 m³ overheen zal lopen met een jaarlijkse kans van 1/7.500. Dit is een onacceptabele hoeveelheid water en zal geheid voor problemen zorgen, niet alleen vanwege de hoeveelheid water die het achterland in loopt, ook omdat de kade de bijbehorende stroomsnelheden niet aan zal kunnen (ruim 500 l/s/m). Dit betekent falen van de kade, waardoor nog meer water in het achterland zal lopen. Zonder te berekenen wat er precies gebeurt met het water in het achterland door middel van het SOBEK-model, kan met enige zekerheid worden gezegd dat de getijdenduiker ook niet zal voldoen aan de waterveiligheidsnormen.

5.4.2 Bijdrage gemaal

Zoals benoemd in § 3.1.2 dient de bijdrage aan waterveiligheid van het gemaal op het beoordelingsspoor “betrouwbaarheid sluiten kunstwerk” meegenomen te worden. Het gemaal is weliswaar een losstaand object, maar voert door een vierde koker in de getijdenduiker water af vanaf de ringsloot de Westerschelde in. In deze vierde koker zit een hoogwaterschuif die wordt bediend door de hydrauliek van de getijdenduiker en gaat in principe bij een waterstand van NAP+4,50m dicht (wat overeen komt met een waterstand van 1/250 jaar). Het gemaal is weliswaar een los object, maar is wel aangesloten op dezelfde energievoorziening. Het gemaal is als volgt te schematiseren:



Figuur 5-7: Schematisering gemaal

Falen van het gemaal gebeurt als alle volgende situaties zich tegelijk voordoen:

- Eén van de twee terugslagkleppen in de vierde koker van de getijdenduiker faalt (terugslagklep is berekend op een waterstand op de Westerschelde van NAP+9,46m);
- De schuif in de vierde koker van de getijdenduiker weigert te sluiten;
- Eén van de drie terugslagkleppen in het gemaal weigert (dit gebeurt als er meer dan 5 meter waterdruk tegen deze terugslagkleppen staat).

Er is sprake van falen op betrouwbaarheid sluiten als ten gevolge daarvan het kombergend vermogen wordt overschreden in het achterland. Het is zo dat er op het moment van beschouwing van de gegevens van het gemaal voor de terugslagkleppen in de getijdenduiker geen vermoeiingsberekeningen beschikbaar waren. Dit betekent dat niet kan worden gezegd of deze kleppen voldoen aan de vigerende normen.

Indien deze kleppen wel aan de normen blijken te voldoen, kan voor het falen van het gemaal op betrouwbaarheid sluiten een kans worden ingeschat.

- De kans dat de terugslagkleppen weigeren is als volgt:
 - de faalkans van een terugslagklep is $2,75 \times 10^{-6}$ per vraag (Rijkswaterstaat, Standaard faalkansen voor frequent sluitende keermiddelen, 2019);
 - de terugslagkleppen sluiten elke vloed. Er zijn 705 getijdengolven per jaar. Met twee terugslagkleppen sluiten de kleppen zich dus 1410 keer per jaar;
 - de faalkans van de terugslagkleppen in de getijdenduiker is daarmee $1/258$ per jaar.
- De kans dat de schuif én de terugslagkleppen weigeren is drieledig:
 - de schuif weigert doordat de hydrauliek of energievoorziening weigert, nadat de terugslagkleppen in de duiker hebben geweigerd:
 - de kans dat de hydrauliek weigert is $1/3.380$ per vraag;
 - de faalkans van de terugslagkleppen van $1/258$ per jaar;
 - de gecombineerde faalkans is daarmee $1/872.000$ per jaar.
 - de schuif weigert doordat de waterstand in de Westerschelde hoger is dan de hydrauliek aan kan, nadat de terugslagkleppen in de duiker hebben geweigerd:
 - ongeveer 1 keer per jaar komt een waterstand voor die de hydrauliek niet aan kan;
 - de kans dat precies dan de beide terugslagkleppen falen is op dat moment $2 \times 2,75 \times 10^{-6}$;
 - de gecombineerde faalkans is daarmee $1/182.000$ per jaar.
 - de schuif weigert te sluiten precies als de NAP+4,50m wordt gehaald én de terugslagkleppen weigeren precies dan ook:
 - de sluitfrequentie is eens per 250 jaar;
 - de kans dat precies dan de beide terugslagkleppen falen is op dat moment $2 \times 2,75 \times 10^{-6}$;
 - de kans dat de schuif precies dan niet functioneert is 1, omdat de terugslagkleppen gefaald zijn en de waterstand op de Westerschelde hoger is dan de hydrauliek aan kan;
 - de gecombineerde faalkans hierop is $1/45.000.000$ per jaar.

De kans dat één van deze scenario's zich voordoet is $1/150.000$ per jaar (som van de bovengenoemde faalkansen). Dit is ruim boven de faalkanseis van $1/7.500$, terwijl wat er in het gemaal zelf kan gebeuren nog niet eens hierin is meegenomen. Eén van de terugslagkleppen dient daar ook nog te weigeren, voordat water ongecontroleerd in het achterland zal komen. Dit zal ervoor zorgen dat de kans van $1/150.000$ per jaar nog significant verder zal afnemen.

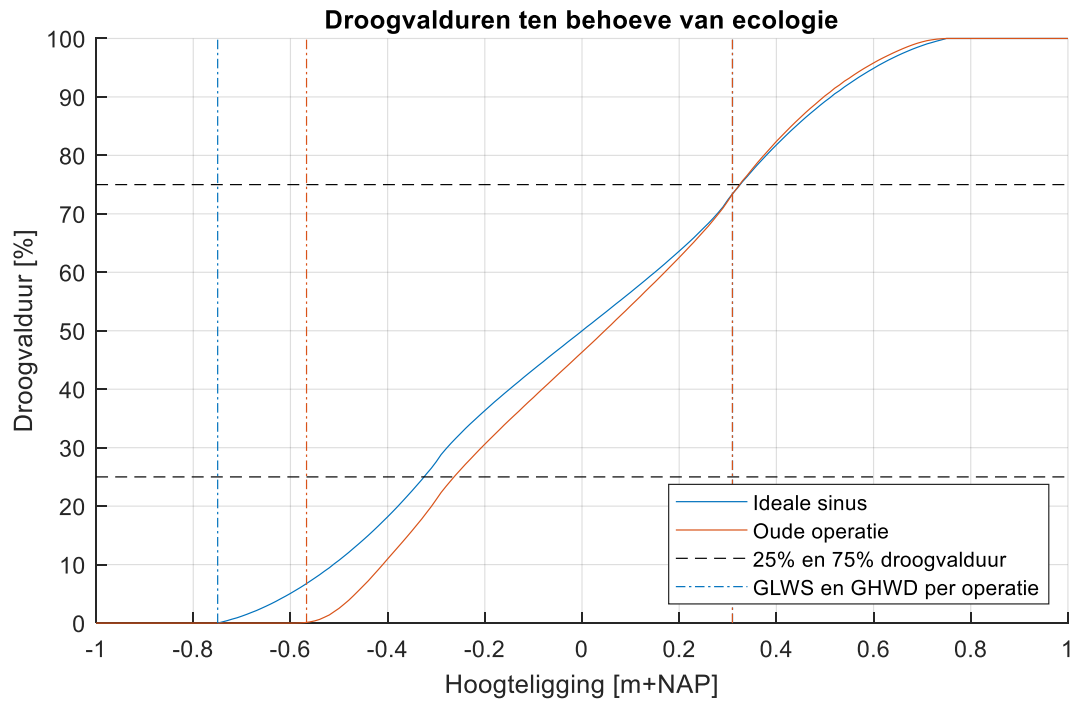
De bijdrage aan de faalkans voor betrouwbaarheid sluiten kunstwerk van het gemaal is kleiner dan $1/150.000$ per jaar, mits de terugslagkleppen voldoen aan de vermoeiingsberekeningen. Dit is dus minstens een factor 20 hoger dan de faalkanseis van $1/7.500$. Als de terugslagkleppen met de vermoeiingsberekeningen voldoen aan de vigerende normen, kan de conclusie getrokken worden dat de bijdrage van het gemaal aan de waterveiligheid op het beoordelingsspoor "betrouwbaarheid sluiten kunstwerk" als verwaarloosbaar kan worden geacht.

Op dit moment zijn de vermoeiingsberekeningen dus niet bekend of uitgevoerd. Dit betekent voor de beoordeling van dijktraject 32-1 als geheel, dat deze berekeningen dienen te worden uitgevoerd of aangetoond, voordat de beoordeling van dijktraject 32-1 kan worden aangeboden aan ITL.

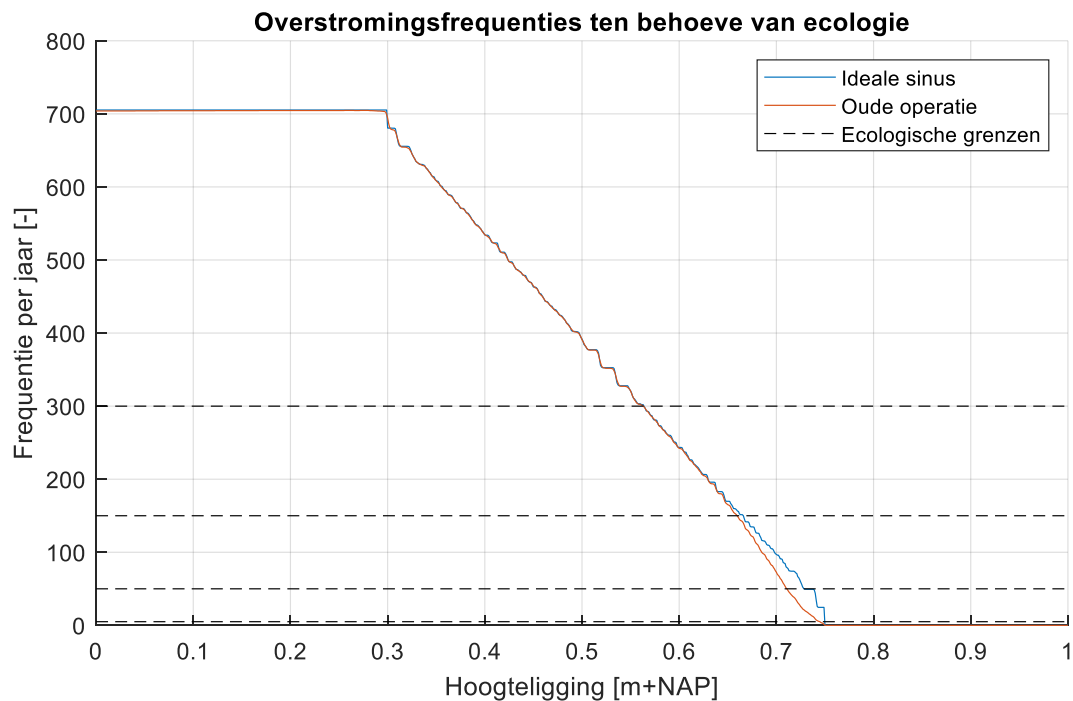
5.5 Beoordeling systeem Waterdunen op ecologische belangen

Om te voldoen aan de natuurdoelen van Waterdunen is het cruciaal om een continue wateruitwisseling te behouden, waarmee het natuurlijke getijdeverloop in de Westerschelde wordt gespiegeld in Waterdunen. In theorie benadert het huidige reguleringssysteem van de waterstanden in Waterdunen de gewenste getijdewerking. De getijdecurve in Waterdunen volgt die van de Westerschelde in een sinuscurve, zoals gewenst. Daardoor is de droogvalduurduur vergelijkbaar met die van de ideale sinus (Figuur 5-8), de overstromingsfrequentie eveneens (Figuur 5-9) en daarmee is de verdeling van ecotopen ook vergelijkbaar met de gewenste situatie (Tabel 5-3, Figuur 5-10 en Figuur 5-11). Wel blijkt uit de gesimuleerde waterstanden dat de gewenste laagwaterstand (GLWS is NAP-0,75m) niet altijd gehaald wordt (GLWS is NAP-0,57m) omdat het systeem onvoldoende leegloopt (Figuur 5-8). Hierdoor schuiven de begrenzingen van de litorale ecotopen enkele centimeters naar boven op en is het totaal oppervlak aan litoraal habitat kleiner dan in de ideale situatie, namelijk 39,4 ha i.p.v. 46,6 ha (Tabel 5-3).

In praktijk zullen zich echter meer situaties voordoen waarbij de kokers (te lang) dichtgaan en er ernstige negatieve ecologische effecten kunnen optreden waardoor de natuurdoelen niet gehaald worden. In de huidige situatie kunnen zich verscheidene situaties voordoen waarbij de getijdenduikers van Waterdunen zich voor langere tijd sluiten. Denk hierbij aan de relatief grote faalkans in de aansturing van de schuiven en de sluiting van alle drie de kokers bij stormcondities en bij onderhoudswerkzaamheden. Daarbij zorgt het handmatig openen van de schuiven en het herstarten van het automatische reguleringssysteem voor een langdurende procedure die een snelle heropening in de weg staat. Hierdoor kan Waterdunen meermaals per jaar voor enkele dagen afgesloten zijn van de Westerschelde, wat zeer schadelijk kan zijn voor de natuurwaarden in Waterdunen. In de huidige situatie wordt eveneens geen rekening gehouden met seizoensafhankelijke effecten op de natuurwaarden en evenmin met het waterpeil bij sluiting van de kokers, terwijl het systeem bijv. tijdens het vogelbroedseizoen veel gevoeliger is voor stilstaand water en ook het waterpeil bepalend is voor bijv. het risico op uitdroging en verdrinking van organismen. De negatieve ecologische effecten en risico's van het huidige waterbeheer zijn in navolgende paragrafen uitgewerkt.



Figuur 5-8: Modelresultaat droogvalduur (%) van slikken en schorren bij ideale sinus (ontwerp getijdewerking) en oude operatie (huidige situatie). Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.



Figuur 5-9: Modelresultaat overstromingsfrequentie (x/jaar) van schorren bij ideale sinus (ontwerp getijdewerking) en oude operatie (huidige situatie). Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.

Tabel 5-3: Begrenzing en oppervlaktes van ecotopen bij ideale sinus en oude operatie (huidige situatie). De estuariene ecotopen zijn berekend op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de grenswaarde (m+NAP) bij de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdewerking (ideale sinus met springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen. De getijdewerking bij oude operatie (huidige situatie) is verkregen uit modelsimulaties.

Term	Bovengrens	Ideale sinus		Oude operatie	
		Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]
Sublitoraal	GLWS	-0,75	45,1	-0,57	51,9
Laag litoraal	25% droog	-0,32	19,2	-0,26	14,6
Midden litoraal	75% droog	0,33	27,4	0,32	24,8
Hoog litoraal	GHWD	0,33	0,0	0,32	0,0
Pionierszone	300x/jaar	0,56	26,7	0,56	27,1
Lage schor	150x/jaar	0,66	19,5	0,66	19,0
Midden schor	50x/jaar	0,73	8,1	0,71	6,4
Hoge schor	5x/jaar	0,75	2,8	0,75	4,3



Figuur 5-10: Verdeling van ecotopen bij ideale sinus. De estuariene ecotopen zijn verdeeld op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdewerking (ideale sinus met springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen.



Figuur 5-11: Verdeling van ecotopen bij oude operatie (huidige situatie). De estuariene ecotopen zijn verdeeld op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en gesimuleerde getijdewerking bij oude operatie (springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen.

Effect afwijking sinuscurve getijde

Kleine afwijkingen in het verloop van de getijdecurve (cyclus eb/vloed en doortij/springtij) zijn acceptabel; onder natuurlijke omstandigheden is de curve vaak asymmetrisch en veranderlijk. Als water tijdelijk minder uit Waterdunen kan worden afgevoerd, bijvoorbeeld door opwaaiing op de Westerschelde, zal het laagwater in Waterdunen niet zo laag zijn als gepland. Mits het niet halen van de lage getijdestand niet structureel is, heeft dit geen negatieve effecten op de estuariene natuur. Een dergelijke situatie is vergelijkbaar met de natuurlijke situatie, waarbij de opzet van een storm ervoor zorgt dat de waterstanden in het estuarium voor langere tijd hoger blijven ondanks het astronomisch getij. Het af en toe niet halen van de laagste waterstanden (NAP-0,75 m) is daarmee acceptabel. Het regelmatig halen van de springtij vloed (NAP+0,75 m) is wel essentieel m.n. voor het tijdelijk inunderen van de vogelbroedeilanden buiten het broedseizoen.

Effect stilstaand water door volledige afsluiting getijdenduiker

Periodes van stilstaand water, wanneer alle duikers gesloten worden, zijn een risico voor de ecologie van Waterdunen. Waterdunen heeft een relatief klein waterbekken, dit zorgt ervoor dat bij stilstaand water het zuurstofgehalte, de temperatuur en de voedselbeschikbaarheid relatief snel kunnen veranderen. Bovendien ligt Waterdunen vrij beschermd, waardoor er moeilijk watercirculatie op gang komt door wind en dus zal het mixen van de waterkolom door golfslag beperkt zijn. Aan het wateroppervlak (tot circa 1 m eronder) zal voldoende zuurstof overblijven, maar in de diepere delen (d.w.z. dieper dan 1 m onder het staande wateroppervlak) kunnen bij stilstaand water zuurstofarme condities ontstaan. Dit kan dodelijke gevolgen hebben voor het onderwaterleven, met name voor bodemdieren en vissen. Vooral de bodemdieren zijn een zeer belangrijke voedselbron voor de vogels.

Het risico op negatieve effecten en de potentiële impact zijn sterk afhankelijk van het seizoen en de weerscondities. Vooral bij rustige weerscondities en hoge temperaturen vormt stilstaand water een bedreiging, enerzijds voor de onderwaternatuur vanwege zuurstofarme condities en anderzijds voor de getijdennatuur vanwege hittestress en uitdroging van droogvallende slikken en schorren.

Bij stormcondities met hoge waterstanden zullen deze effecten kleiner zijn en bovendien vergelijkbaar met natuurlijke stormcondities. Voor een nadere beschrijving van de ecologische situatie bij stormcondities en de gevolgen van veiligheidsmaatregelen zie de Notitie Stormprotocol (RHDHV, 2020).

In Waterdunen is het dus van levensbelang om periodes van stilstaand water zo kort mogelijk te houden, waarbij onderscheid gemaakt kan worden in herfst-winter (minder impact en minder risico) en voorjaar-zomer (meer impact en meer risico).

Effect tijdsduur gesloten getijdenduikers

Tot 12 uur termijn:

Geen significante effecten ongeacht waterstand. Bij herhaaldelijke afsluiten van de getijdenduikers kunnen echter wel cumulatieve effecten optreden. Zoals aangegeven in Tabel 1 is de verdeling van habitattypen/ecotopen grotendeels afhankelijk van de droogvalduur en overstromingsfrequentie. Deze parameters zullen bij frequente sluiting van de duikers veranderen en daarmee ook de ruimtelijke verdeling van habitattypen. Daarnaast kan, door een lange cumulatieve periode van afsluiting, de natuurlijke rijkdom en productiviteit van het systeem in Waterdunen afnemen als gevolg van een verminderde uitwisseling met het buitenwater en de beperkte voedselaanvoer voor sessiele organismen die afhankelijk zijn van stroming (bijv. mosselen en oesters). Het lijkt aannemelijk dat significante effecten uitblijven wanneer minder dan 5% van de getijdebewegingen wordt beïnvloed, wat neer komt op een maximale frequentie van 6 keer per maand, waarbij een cumulatief maximum van 36 uur per maand moet worden gehanteerd (5% van de tijd).

Van 12 tot 24 uur termijn:

Wanneer er meer dan 12 uur stilstaand (hoog) water is in Waterdunen vergroot het risico op:

- **Zuurstofdepletie.** Zuurstofdepletie ontstaat door gebrek aan waterverversing en geen menging met de bovenste waterlaag. Dit kan ernstige gevolgen hebben voor de bodemdieren en vissen in de diepere delen (naar schatting 1m onder het wateroppervlak bij rustige weersomstandigheden). Bij zeer lage zuurstofgehalten kan massale sterfte optreden. De hersteltijd van het bodemleven bedraagt minimaal een jaar, het volledig herstel van de bodemdiergemeenschap kan 1 tot 3 jaar duren. Bij stormcondities zal de zuurstof in het water veel beter gemengd worden door de waterkolom (door golfslag) waardoor het risico op zuurstofdepletie kleiner is. Waterdunen blijft gezien de omvang en ligging gevoelig voor stilstaand water. Het is dus raadzaam om een nagenoeg continue wateruitwisseling na te streven.
- **Hittestress.** Een droogvalduur tussen de 12 en 24 uur in het lage en midden litoraal (NAP+0.3 m tot NAP-0,60 m) kan ook dodelijk zijn voor bodemdieren vanwege hittestress. Dit gebeurt alleen op hete zomerse dagen. De hersteltijd bedraagt wederom minimaal een jaar.
- **Voedseltekort voor volwassen vogels.** Het merendeel van de wadvogels foerageert in het litoraal (NAP+0.3 m tot NAP-0,60 m). Wanneer de waterstand laag blijft en hun prooidieren door hittestress massaal doodgaan, valt de foerageer mogelijkheid gedurende langere tijd weg. Bij een hoge waterstand kunnen de vogels alleen tijdelijk niet foerageren vanwege het hoge water, dat is vergelijkbaar met een stormopzet en heeft geen grote gevolgen buiten het broedseizoen.
- **Afname broedsucces.** Tijdens het broedseizoen is er een grote behoefte aan veel en makkelijk bereikbaar voedsel. Vooral de jonge kuikens hebben behoefte aan een nagenoeg continue aanvoer van voedsel. Dit voedsel komt beschikbaar door het proces van droogvallende gronden bij afgaand tij, vooral in het bereik van NAP+0,30m tot NAP-0,60m. Het stilstaan van het water kan tijdens het broedseizoen de overlevingskansen van kuikens verkleinen.

- Uitdroging of verdrinking van de vegetatie. Op een termijn van circa 12 uur zijn de effecten op de vegetatie beperkt en mogelijk positief. Het voorkomen van het type schorrenvegetatie (de zonerings) wordt in grote mate bepaald door de zout-tolerantie van de plantensoort in combinatie met de overstromingsfrequentie. Een aanhoudende periode van hoogwater zal dus effect hebben op de vegetatie. Het effect is echter vergelijkbaar met een natuurlijke stormopzet en zorgt ervoor dat de zouttolerante schorrenvegetatie behouden blijft. Naar gelang de periode van stilstaand water voortduurt neemt het risico op uitdroging (bij een lage waterstand) of verdrinking (bij een hoge waterstand) van de vegetatie toe. Tot 24 uur lijkt dit risico beperkt.

Meer dan 24 uur termijn:

Tot 24 uur stilstaand water is risicovol, zeker in het voorjaar en de zomer gezien argumentatie in voorgaande teksten. Langer dan 24 uur stilstaand water is zeer onwenselijk en dient voorkomen te worden. Indien dit niet te voorkomen is en gepland kan worden, dient dit alleen in de herfst en winter uitgevoerd te worden om alle risico en de impact van mogelijke gevolgen te minimaliseren voor zowel de korte als lange termijn. Het hanteren van een waterstand in Waterdunen van NAP+0,30m lijkt tijdens een volledige sluiting de minst schadelijk optie.

In voorgaande categorieën, meer dan 12 uur, zijn de korte-termijn effecten omschreven. Deze effecten zijn met enige zekerheid te voorspellen, maar de termijn waarop die effecten optreden is onzeker. Hoe langer het duurt, hoe groter de kans dat deze effecten optreden, maar ook de fysische en biologische omstandigheden zijn van grote invloed. In voorgaande is een algemene beschouwing weergegeven die gehanteerd kan worden bij een zo adequaat mogelijk beheer en onderhoud in relatie tot de ecologie en daarmee de grotere scope van Waterdunen.

5.6 Conclusie hoofdstuk 5

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- De getijdenduiker voldoet niet aan de waterveiligheidseis. De grootste bijdrage aan de onacceptabel hoge faalkans zijn:
 - de schuiven moeten te vaak van positie wisselen (17.300 regelvragen per jaar);
 - de faalkans van de hydrauliek is te hoog (1/3.400 per vraag);
- De kade rondom Waterdunen ligt op NAP+1,1m. De kans dat deze overloopt is 1/6,5 per jaar;
- Als de terugslagkleppen van het gemaal aan de vermoeiingseisen voldoen, levert het gemaal geen bijdrage aan het overstromingsrisico;
- De huidige situatie voldoet niet aan de ecologisch eisen:
 - de gewenste laagwaterstand niet altijd gehaald;
 - de natuurdoelen worden niet gehaald bij langdurig stilstaand water. Dit kan voorkomen wanneer de kokers dicht moeten bij bijvoorbeeld (gepland) onderhoud of stormcondities;
 - tot 12 uur stilstaand water zullen de effecten beperkt zijn. Tot 24 uur stilstaand water is risicovol en kan significant negatieve effecten hebben op de ecologie van Waterdunen. Langer dan 24 uur stilstaand water is zeer onwenselijk en dient voorkomen te worden;
 - de huidige aansturing van de schuiven zorgt voor relatief veel storingen, die schadelijk kunnen zijn voor de ecologie als deze niet binnen 12 of 24 uur verholpen worden;
 - het handmatig openen van de schuiven en herstarten van het automatische reguleringssysteem zorgt voor een langdurende procedure die een snelle heropening in de weg staat;
 - er wordt bij sluiting van de kokers geen rekening gehouden met seizoen afhankelijke effecten en evenmin met het waterpeil, terwijl beide bepalend zijn voor de ecologische effecten.

6 Maatregelen

In zowel dit onderzoek als in het vorige onderzoek (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2, 2020), is bekeken wat deze maatregelen zijn. Alle beschouwde maatregelen zijn in deze paragraaf samengevat inclusief onderbouwing waarom deze uiteindelijk wel of niet worden gekozen.

6.1 Fysieke maatregelen

6.1.1 Installatie laten voldoen aan contracteisen



Om de installatie aan de contracteisen te laten voldoen, zijn er een aantal constructieve aanpassingen nodig. De benodigde maatregelen zijn weergegeven in de navolgende Tabel 6-1. Dit zijn maatregelen die significante verbeteringen brengen aan de betrouwbaarheid van de installatie, zodat deze aan de eisen voldoet. Deze maatregelen dienen te worden geïmplementeerd.

Tabel 6-1: Constructieve maatregelen nodig om te voldoen aan contracteisen

Component	Reden niet voldoen	Maatregel/oplossing
Oogplaten en bevestigingsas schuif	Sterkte niet voldoende bij vermoeiing	Oogplaten van de schuiven vervangen
Lager en stangoog cilinder	Aanpassingen wegens aanpassing bevestigingsas	As, lager en stangoog van de cilinder vervangen
Afdichtingsrubbers	Afdichtingsrubbers toegepast die mogelijk veel weerstand geven bij het bewegen van de schuif	Afdichtingsrubbers verwijderen wanneer een gering lek acceptabel is
Cilinders	Zuigerdiameter cilinder te klein voor optredende belastingen	Cilinders vervangen door cilinders met een grotere zuigerdiameter
Leidingwerk hydrauliek	Diameter van het leidingwerk te krap genomen	Leidingwerk met een grotere diameter monteren en het aggregaat dichter bij de cilinders plaatsen
Motorvermogen hydrauliek	Motoren worden, wanneer de drukken worden verhoogd om de krachten te kunnen leveren, te ver overbelast	Motoren met een hoger vermogen toepassen
Redundante hydrauliek unit	De installatie is niet redundant uitgevoerd wat moet om aan de waterveiligheid te voldoen	Een tweede unit aggregaat plaatsen en aansluiten en de units alloceren aan de regel- en de sluitschuiven
Handbediening	Handbediening van de schuiven onwerkbaar (te veel kracht en te langzaam)	Noodpomp die kan worden aangedreven met een accuboer
Fasering	Functie behoud duiker tijdens uitvoering	Zorgdragen dat altijd 2 kokers in bedrijf blijven
Reserve delen	Lange levertijd onderdelen bij storing/falen	Zorgen dat er voldoende kritische onderdelen met een lange levertijd op reserve liggen

6.1.2 Installatie laten voldoen aan waterveiligheids- en onderhoudseisen



Om de installatie aan de waterveiligheids- en onderhoudseisen te laten voldoen, zijn er een aantal aanvullende constructieve aanpassingen nodig. De benodigde maatregelen zijn weergegeven in de navolgende Tabel 6-2. Dit zijn maatregelen die verdere verbeteringen brengen aan de waterveiligheid en de eisen vanuit onderhoud. Deze maatregelen dienen te worden geïmplementeerd.

Tabel 6-2: Constructieve maatregelen nodig om te voldoen aan waterveiligheids- en onderhoudseisen

Component	Reden niet voldoen	Maatregel/oplossing
Geleidestrips	Geleidemateriaal toegepast met te hoge wrijvingscoëfficiënt	Geleidestrips van de schuiven vervangen met een gegarandeerde wrijvingscoëfficiënt van minder dan 0,2, of zwaardere cilinders toepassen
Cilinders	Kunnen functioneren tot buitenpeil +3,3 (aansluiting stormprotocol op alarmfase 1 waterschap)	Zwaardere cilinder
Leidingwerkhydrauliek	Optimalisatie naar aansturing per koker t.b.v. onderhoud	
Zakken op zwaartekracht (mogelijk tot een waterstandsverschil van 70cm tussen binnen en buiten)	Bijdrage aan betrouwbaarheid sluiten	Softwarematig

6.1.3 Installatie extra redundantie geven



Het is mogelijk om de installatie nog verdere redundantie te geven door de maatregelen toe te passen in Tabel 6-3. Deze maatregelen blijken geen verdere toegevoegde waarde te hebben. Daarom worden deze verder niet meer geïmplementeerd.

Tabel 6-3: Constructieve maatregelen voor extra redundantie

Component	Reden niet voldoen	Maatregel/oplossing
Redundante hydrauliek 3e unit	Optimalisatie naar aansturing per koker	

6.1.4 Verhogen omliggende kade



Water kan ook binnen Waterdunen gehouden worden door de ringkade van Waterdunen op te hogen. De hoogte hangt af van hoe hoog het water kan komen onder condities met een jaarlijkse kans van 1/7.500, plus een waakhoogte. In combinatie met de aanbevolen maatregelen (groen duimpje), blijkt dat deze maatregel uiteindelijk niet nodig is. Zonder kadeverhoging voldoet Waterdunen dan aan de waterveiligheids- en wateroverlastnorm.

Water zal niet uit Waterdunen lopen onder condities die voorkomen tot een jaarlijkse kans van 1/7.500. Daarom wordt deze maatregel in het vervolg niet beschouwd.

6.2 Niet-fysieke maatregelen

6.2.1 Inzetten calamiteitenteam of 24/7-bemensing



Een mogelijkheid is de inzet van 24 uren bemanning of de inzet van een calamiteitenteam, wat altijd paraat staat om in te grijpen. Uit vorig onderzoek is namelijk gebleken dat de inzet van de opgeschaalde calamiteitendienst niet frequent genoeg is (verwachting minder dan eens per 10 jaar), terwijl de winst in waterveiligheid relatief klein is (orde 2-3cm). Daarom wordt deze maatregel in het vervolg niet beschouwd.

6.2.2 Instandhouding omliggende kade



Op dit moment (peildatum december 2020) bevat de omliggende kade van Waterdunen geen verplichting tot instandhouding. Een niet-constructieve maatregel is om deze omliggende kade een verplichting tot instandhouding te geven. Deze maatregel heeft weliswaar geen directe invloed op de waterveiligheid, maar is wel nodig om te voldoen aan de waterveiligheid en is uitgangspunt in dit rapport. Deze maatregel zal daarom in het vervolgtraject worden beschouwd. Zie tevens de aanbeveling opgenomen onder § 8.2.5.

6.2.3 Aanpassen regelsysteem



Eerder is bekeken dat het aantal aanspraken op het regelsysteem gelijk is aan ongeveer 47,5 per dag. Dit volgt uit het volgen van het perfecte sinusverloop, waarbij elke 10 minuten wordt bekeken of dit nog gebeurt. De vraag is echter of het nodig is om het sinusverloop zo nauwkeurig mogelijk te willen laten verlopen. Zolang aan de ecologische voorwaarden kan worden voldaan, is afwijking van de perfecte sinusvorm mogelijk. Deze maatregel blijkt effectief en is daarom in het vervolg beschouwd.

6.2.4 Vermindering gevolgen van falen



Een mogelijkheid om de waterveiligheid te verbeteren is een manier te zoeken om de gevolgen van het weigeren van de schuiven te verminderen. Dit kan door de schuiven bijvoorbeeld niet te ver open te zetten, zodat er met hoge waterstanden op de Westerschelde minder water instroomt. Als de schuif dan weigert, zal er ook daadwerkelijk minder water inlopen na weigering. Het blijkt mogelijk te zijn om de schuiven in een dusdanige stand te zetten, dat ze nauwelijks invloed hebben op de dagelijkse regelgeving, maar wel invloed hebben op de hoeveelheid water die er na falen doorheen zou kunnen stromen. Deze maatregel blijkt effectief en is daarom in het vervolg beschouwd.

6.2.5 Aanpassen gebiedsinrichting(splan)



Een mogelijkheid is ook het uitbreiden van het gebied, door middel van het afgraven van omliggende akkers. Zo zou het gebied in Figuur 6-1 (rood omcirkeld) erbij betrokken kunnen worden en afgegraven kunnen worden tot NAP+0.76m, zodat het alleen onder water loopt indien er een calamiteit is met de getijdenduiker. Dit blijkt echter geen wenselijke oplossing. De grond is niet in het bezit van de provincie Zeeland en/of het waterschap Scheldestromen, waardoor zij de grond moeten acquireren. Daarbij blijkt de bijdrage aan waterveiligheid nihil is. Daarom wordt deze maatregel in het vervolg niet beschouwd.



Figuur 6-1: Mogelijke uitbreiding gebied

6.2.6 Accepteren wateroverlast



Het is ook mogelijk om de wateroverlast normen te laten varen voor Waterdunen. Dit betekent dat geaccepteerd moet worden dat er zout water over de akkers gaat lopen, zolang dit maar niet leidt tot een waterveiligheidsprobleem (meer dan gemiddeld 20 cm inundatie in een wijk/ buurt met gelijke 4-cijferige postcode). De norm is nu dat er eens per 100 jaar (stedelijk gebied) geen zoutwater inundatie mag voorkomen, maar wel “ernstige wateroverlast” ten gevolge van zoet regenwater. Op basis van de resultaten van de SOBEK-berekeningen blijkt dat er **geen** wateroverlast optreedt op korte en middellange termijn. Bij een calamiteit met de getijdenduiker kan het water binnen de huidige kade geborgen worden. Bij de vooruitblik naar 2073 met een aanname van een zeespiegelstijging van 50 cm is er zeer beperkte inundatie (tot circa 20 cm enkele meters van de rand van de camping grenzend aan het Zwarte Gat), dit valt echter buiten de wateroverlastnorm. Daarom is deze maatregel in het vervolg niet beschouwd.

6.2.7 Verder beschouwde aanpassingen



Tot slot zijn er behalve de voorgaande aanpassingen, nog andere aanpassingen aan met name het regelsysteem getest. Deze zijn navolgend opgesomd, maar bleken geen verdere toegevoegde waarde te hebben op de waterveiligheid:

- Wat als we het aantal aanspraken nog verder reduceren?
- Wat als we met één of twee kokers inlaten en met drie kokers uitlaten?
- Wat als we het getij omkeren?
- Wat als we rondom stormen vroegtijdig sluiten?
- Wat als we een combinatie van het bovenstaande proberen?

6.3 Conclusie hoofdstuk 6

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- Om aan de eisen van waterveiligheid, wateroverlast en ecologie te voldoen, is een set aan fysieke en niet-fysieke maatregelen nodig:
 - de installatie moet worden aangepast, zodat deze voldoet aan het contract en de waterveiligheidseisen;
 - de rand rondom Waterdunen moet een verplichting tot instandhouding krijgen;
 - de hoogte, ligging en afwerking van de kering moet nog worden afgestemd tussen partijen, waaronder waterschap en provincie, en ook een formeel notarieel vastgelegde grondtransitie;
 - het regelsysteem van de getijdenduiker moet worden aangepast.

7 Gekozen maatregelen & investering

In het navolgende hoofdstuk zijn de gekozen maatregelen en de bijbehorende investering beschreven. De informatie voor dit hoofdstuk is geput uit een tweetal referenties, namelijk uit de rapportage van Royal HaskoningDHV met opmerkingen op de huidige installatie en de rapportage met oplossingen voor waterveiligheid en waterbezwaar (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020), tevens opgesteld door Royal HaskoningDHV (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2, 2020).

7.1 Constructieve maatregelen

7.1.1 Installatie laten voldoen aan contracteisen

Vanuit het contract zijn de volgende belangrijkste uitgangspunten gesteld:

- | | | |
|----------------------------------|---|----------|
| ■ Waterstand Westerschelde | : | NAP+3,0m |
| ■ Waterstand getijdengebied | : | NAP-0,8m |
| ■ Wrijvingscoëfficiënt geleiding | : | 0,3 |

Om aan de contracteisen te moeten voldoen, is een verzwaring van de hydraulische installatie nodig. Daarnaast zijn er ook constructieve aanpassingen nodig om ontwerpfouten in de constructie te herstellen. Zo is de bevestiging van de cilinder aan de schuif te licht uitgevoerd en voldoet de hydraulische installatie niet aan de normen en richtlijnen, o.a. het leidingwerk van de hydrauliek door een te hoog drukverlies en onder-gedimensioneerde elektromotoren. Door het te hoge drukverlies kan er te veel olie overstorten bij hoge waterstanden op de Westerschelde, waardoor de bewegingssnelheid van de schuiven omlaag gaat en te lang kan gaan duren. Doordat de looptijd van de schuiven langer duurt dan 10 minuten, mag niet worden uitgegaan van het kortstondig overbelasten van de elektromotoren, wat in de huidige situatie mogelijk is. De motor wordt dan oververhit en valt in storing.

Voor de herstelmaatregelen aan de schuif wordt ervan uitgegaan dat de schuiven uit de kokers worden genomen, worden getransporteerd naar de fabriek en aldaar worden aangepast en de coating wordt hersteld. Dit is anders dan dat de aannemer heeft voorgesteld die de herstelwerkzaamheden in de koker wilde uitvoeren. Werkzaamheden aan de schuif en de cilinder dienen op een veilige en gedegen manier te geschieden wat in de koker niet mogelijk is. Onderdelen van de schuif die moeten worden aangepast zijn de oogplaten en de bevestigingspin voor de cilinder die nu zijn onder-gedimensioneerd. Aanpassingen hiervan hebben tot gevolg dat ook de stangkop van de cilinder en de daarin aanwezige lager vervangen moeten worden.

Vervangen van de cilinders

Uit de metingen van de aannemer volgt dat voor de geleidingen van de schuif eerder een wrijvingscoëfficiënt van 0,3 van toepassing is dan van 0,2 uit de norm. De waarde 0,3 was ook de initiële waarde die de aannemer heeft toegepast bij het ontwerp van de duiker.

Uitgaande van een wrijvingscoëfficiënt van 0,3 worden de bewegingswerkkrachten zo groot dat met de huidige cilinderdimensies de drukken in het systeem de toelaatbare waarden in de voorgeschreven normen en richtlijnen worden overschreden. Gebruikmakend van gegevens uit de berekeningen van de aannemer wordt met deze wrijvingscoëfficiënt een systeemdruk gevonden van 224 bar bij het sluiten van de schuif en 272 bar bij het openen, terwijl de voorgeschreven maximaal druk 200 bar is. Daarbij nog niet in acht genomen dat de schuiven eigenlijk worden voorgespannen bij het sluiten door het niet juist functioneren van de eindschakelaars op de cilinder, waardoor eigenlijk van een nog hogere systeemdruk moet worden uitgegaan. Het voorspannen van de schuif bij het sluiten zit niet in het oorspronkelijke ontwerp van de aannemer.

De huidige cilinders hebben de volgende hoofdafmetingen:

- | | | |
|---------------------------|---|--------|
| ■ Zuigerdiameter (boring) | : | 140 mm |
| ■ Stangdiameter | : | 80 mm |

Om onder een systeemdruk van 200 bar te blijven moeten cilinders worden toegepast met de volgende hoofdafmetingen:

- | | | |
|---------------------------|---|--------|
| ■ Zuigerdiameter (boring) | : | 160 mm |
| ■ Stangdiameter | : | 100 mm |

Bij het openen van de schuif wordt de systeemdruk 189 bar en bij het sluiten 172 bar. Dit onder de voorwaarde dat de rest van de installatie voldoet aan de richtlijn. De differentiaalstand van de cilinders zoals in de huidige situatie kan in principe worden gehandhaafd wanneer het leidingwerk van de hydraulische installatie wordt aangepast en het drukverlies over de leidingen onder de normwaarde blijft. Door de grotere cilinders zal de unit verder moeten worden voorzien van pompen met een grotere pompcapaciteit en een reservoir met een grotere olievoorraad.

Overige aanpassingen hydrauliek

Wanneer de geleidestips worden vervangen door strips met een gegarandeerde wrijvingscoëfficiënt van 0,2 en de hydraulische installatie wordt aangepast zodat het drukverlies over het systeem niet te hoog is, kan met de huidige cilinders nog net onder de grenswaarde van de toelaatbare druk volgens de norm (NBD 06000) worden gebleven (dit is zeer risicovol) en zou er aan gedacht kunnen worden dat de cilinders behouden kunnen blijven.

Los daarvan blijft het een gegeven dat de cilinders niet zijn uitgevoerd volgens de normen en richtlijnen (o.a. NBD 06000) en daardoor op sterkte en op knik extra kwetsbaar zijn. Dit heeft consequenties voor de betrouwbaarheid van de sluiting van de kering en daarmee de waterveiligheid. Ons advies is om de cilinders te vervangen door cilinders die wel aan de normen en richtlijnen voldoen.

De installatie zal verder op de volgende punten moeten worden aangepast aan de waterveiligheid te voldoen:

- Er moet een tweede hydrauliek-unit worden geplaatst om de benodigde redundantie te krijgen. Om te voldoen aan de waterveiligheid moeten de sluitschuiven en de regelschuiven een 'eigen' compleet gescheiden hydrauliek-unit hebben, zodat er geen afhankelijk is tussen de sluit- en regelschuiven.
- Om voldoende druk te kunnen leveren bij de cilinder en om de motoren niet over te belasten moet het leidingwerk worden vervangen door leidingen met een grotere diameter.
- Om te voldoen aan de waterveiligheid moet in geval van een calamiteit de schuiven met handbediening gesloten kunnen worden. De huidige handbediening is niet werkbaar omdat er te langdurig een te grote kracht moet worden geleverd. Om dit te herstellen zal een 'handpomp' kunnen worden voorzien van een koppeling waarop een externe aandrijving kan worden geplaatst (bv. een accuboer).

Conclusie

De eerste stap is het plaatsen van nieuwe cilinders die daarbij ook worden uitgevoerd volgens het contract. De bestaande hydrauliek-unit kan behouden blijven en er moet een tweede identieke hydrauliek-unit worden bijgeplaatst voor de benodigde redundantie. Het leidingwerk dient te worden vernieuwd om het drukverlies binnen de grenzen van de norm te houden en de handpomp dient vervangen te worden door een pomp met een koppeling voor een accuboer. Bediening met alleen de hand kan nimmer werkzaam worden gemaakt binnen de gestelde eisen uit het contract.

7.1.2 Installatie laten voldoen aan waterveiligheids- en onderhoudseisen

Om vervolgens aan de waterveiligheidseisen te voldoen, is het nodig om aanvullende maatregelen in de betrouwbaarheid te doen en het systeem uit te breiden zodat het kan blijven opereren tot condities die aansluiten op alarmfase 1 van waterschap Scheldestromen (NAP+3,3m op de Westerschelde). Concreet betekent dit dat de installatie moet kunnen blijven functioneren totdat een waterstand op de Westerschelde van NAP+3,3 m wordt gemeten. Na detectie kan deze waterstand nog 0,3m doorstijgen tot NAP+3,6m voordat de schuiven in de juiste stand zijn gezet vanuit het stormprotocol (in verband met de snelheid waarmee de schuiven zich verplaatsen; zie voor het stormprotocol § 7.2.2). De waterstand in Waterdunen is hiermee NAP-0,1m. De te hanteren uitgangspunten zijn daarmee:

■ Waterstand Westerschelde	:	+3,6	mNAP
■ Waterstand getijdengebied	:	-0,1	mNAP
■ Wrijvingscoëfficiënt geleiding	:	0,3	

Bij dit spoor zijn weer twee stappen nodig:

- Het reduceren van de wrijvingsweerstand;
- Het verzwaren van de hydraulische installatie.

Bij de huidige constructie is geconstateerd dat de geleidstrippen van de schuif van een ander materiaal zijn uitgevoerd dan waarmee de weerstand bij het bewegen berekend is, en dat er rubberafdichtingen zijn toegepast die niet zijn meegenomen in de berekeningen (RHDHV, Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie, 2020). Wanneer wordt uitgegaan van het materiaal uit de berekeningen en de rubbers worden verwijderd, is het nog mogelijk om cilinders toe te passen met de huidige dimensies voor de zuiger. Wanneer de schuif in de fabriek is, is het op een eenvoudige wijze en met relatief lage kosten mogelijk om de geleidstrippen van de schuif te vervangen door strippen van het juiste materiaal of met een lagere wrijvingscoëfficiënt, en de rubberen afdichtingen te verwijderen wanneer technisch toegestaan. Dit biedt geen garantie dat de wrijving dan lager is dan waar in de norm (NEN 6786) vanuit wordt gegaan, omdat de betreffende norm niet specifiek voor schuifconstructies bedoeld is. Dus onder de veronderstelling dat de wrijvingscoëfficiënt kan worden aangepast naar een waarde lager dan de norm aangeeft, zou de huidige diameter van de cilinder voldoen. Dat neemt niet weg dat de cilinder zelf niet voldoet aan de contracteisen. De cilinder voldoet qua uitvoering niet aan de NBD 06000 richtlijn die volgens de ROK (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken van Rijkswaterstaat) in het contract is voorgeschreven. O.a. door onvoldoende restlengte aan de kop van de cilinder. Formeel zouden de cilinders daardoor al moeten worden vervangen.

Tot slot, wanneer de schuiven worden voorgespannen als oplossing voor het ongewenste afvallen van de eindschakelaars (t.o.v. het oorspronkelijke ontwerp wat ervan uit gaat dat de eindschakelaars goed werken), betekent dit dat de cilinders moeten worden vergroot. Daartoe is een boring van 180 mm en een stangdiameter van 110 mm nodig.

Onderdeel om aan de waterveiligheidseisen te voldoen is ook de mogelijkheid te implementeren om de schuiven onder eigen gewicht op zwaartekracht te laten zakken en sluiten. Dit kan gebeuren door de druk van de olie af te nemen door de stroom hiervan af te nemen, zodat de schuiven uit zichzelf zakken. Bij spanningsuitval waardoor de schuiven niet meer in beweging kunnen worden gebracht door de hydrauliek, zal dit gebeuren. Het is nodig dit ook toe te passen bij een storing, omdat anders de schuiven in vaste positie blijven staan. De kans dat de schuiven hierdoor vast komen te zitten, neemt hierdoor significant af. Uit praktijkproeven blijkt dat zakken onder eigen gewicht mogelijk is tot in ieder geval een waterstandsverschil van 70 cm tussen Waterdunen en de Westerschelde. Met een groter waterstandsverschil, is zakken onder eigen gewicht niet meer mogelijk.

7.1.3 Resultaat maatregelen op de betrouwbaarheid

Wanneer de maatregelen worden doorgevoerd om aan de contracteisen te voldoen, heeft dit grote voordelige consequenties op de betrouwbaarheid van de sluiting van de kering en het ecologisch functioneren. In navolgende tabel (Tabel 7-1) staan de gevonden faalkansen wanneer de maatregelen worden doorgevoerd. Voor meer informatie wordt verwezen naar voorgaande rapportage (RHDHV, Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2, 2020).

Tabel 7-1: Faalkansen bij doorvoeren maatregelen

OGT		Optie 1		Optie 2		Optie 3	
		Aanp. hydrauliek faalkans (1/vr)	succes (vr)	Aanp. hydr. en noodhand faalkans (1/vr)	succes (vr)	Zakken op eigengewicht faalkans (1/vr)	succes (vr)
	Keren						
OGT1	1 van de 3 kokers faalt te sluiten	2,80E-05	35740	1,23E-05	81037	2,65E-06	377929
OGT2	2 van de 3 kokers falen te sluiten	2,46E-05	40634	8,97E-06	111520	1,80E-06	555556
OGT3	3 van de 3 kokers falen te sluiten	2,46E-05	40634	8,97E-06	111520	1,80E-06	555556
	Regelen						
OGT4	1 van de 3 schuiven faalt te regelen	1,45E-03	691	7,15E-04	1399	x	x
OGT5	2 van de 3 schuiven falen te regelen	7,48E-04	1337	1,56E-05	64309	x	x
OGT6	3 van de 3 schuiven falen te regelen	7,48E-04	1337	1,54E-05	65020	x	x

Naschrift: op een later moment dan de faalkansanalyse is uitgevoerd, zijn extra niveaumeters in het getijdengebied geplaatst. Hierdoor wordt de meting van het waterniveau betrouwbaarder. De hogere betrouwbaarheid verandert de eerdere conclusie niet, omdat de hydrauliek zwaar dominant is bij het falen van het systeem. De getoonde uitkomst is, met name bij optie 3, enigszins conservatief (iets lagere faalkans).

7.2 Niet-constructieve maatregelen

Behalve enkele constructieve maatregelen, zullen de onderstaande niet-constructieve maatregelen leiden tot een verbetering van de waterveiligheid, zonder in te leveren op ecologie:

- De omliggende ringkade een verplichting tot instandhouding geven;
- Een stormprotocol dat aansluit op alarmfase 1;
- Een andere aansturing van de getijdenduiker (softwarematig, wanneer de schuif van stand dient te veranderen).

7.2.1 Instandhouding omliggende kade

De primaire kering ligt langs de Westerschelde en scheidt de Westerschelde van het achterland. Dit betekent per definitie dat Waterdunen binnendijks is, terwijl in deze zone gecontroleerd water naar binnen en buiten gelaten wordt. Daarom dient er een formele bescherming te worden aangewezen aan de omliggende kade. Het belangrijkste doel hiervan is dat deze kade de juiste kwaliteit houdt, zodat de waterveiligheid gegarandeerd is. Het betreft het deel parse lijn in Figuur 7-1 dat direct aansluit op de omliggende ringsloot.



Figuur 7-1: Geadviseerde scheidende kering

Voor de invulling van de formele bescherming van de omliggende ringkade dienen afspraken te worden gemaakt met het waterschap Scheldestromen. De precieze invulling van deze afspraken zal in een later stadium volgen, maar de omliggende kade zal aan de volgende eisen dienen te voldoen:

- De kade dient een hoogte-eis te krijgen van NAP+1,1m;
- De kade dient een bekledingseis te krijgen overeenkomstig met de specifieke situatie (hetgeen wat er nu ligt);
- De erosiebestendigheid dient te worden gegarandeerd overeenkomstig met grasbekleding met tenminste een open zode. Deze kwaliteit dient gegarandeerd te worden tot tenminste 1 meter van de kaderand (aan de binnenkant van Waterdunen).

Met deze eisen zal de kade tot tenminste 2073 voldoende stabiliteit en erosiebestendigheid garanderen. Onderbouwing hiervan is aangegeven in de navolgende beschouwing.

Beschouwing stabiliteit en erosiebestendigheid kade

De kade dient iedere situatie aan te kunnen. Dit geldt op zowel het gebied van geotechniek (macrostabiliteit, microstabiliteit en piping) als erosiebestendigheid van het eventueel overlopen van de kade.

Stabiliteit

Op het gebied van geotechniek is een notitie geschreven, deze is toegevoegd als bijlage A4. Hierin wordt aangetoond dat de kade voldoet aan macrostabiliteit, microstabiliteit en piping.

Erosiebestendigheid

De kade moet de stroomsnelheden van eventueel overlopend water aankunnen. Hier wordt met name bedoeld op de situatie in 2073 die dan voorkomt met een jaarlijkse kans van 1/7.500. Zie daarvoor § 7.5.2.

Omdat de kade van wisselende hoogte is, dient ook conservatief bekeken te worden wat de meest extreme overloopdebieten zijn. In het meest extreme geval loopt de waterstand op tot NAP+1,23m (situatie zonder overlaat, zie Tabel 7-5) op de plek waar de kade NAP+1,1m is. Invullen van de vergelijking voor een overlaat (zie § 4.1.3) levert in dat geval een overloopdebiet op van 80 l/s/m. Dit is grotendeels laminaire stroming, die weinig turbulent is: er zal een klein beetje golfinvloed zijn. In het verleden is vanuit Deltares onderzoek gedaan naar welke overslagdebieten een grasbekleding op een talud aankan, wat gebruik maakt van het cumulatieve schademodel van Van der Meer (Rozing, 2017). Hieruit komt duidelijk naar voren dat hoe kleiner de golven, hoe hoger het toelaatbare overslagdebiet kan zijn (in verband met verminderde turbulentie). In deze publicatie is dit gekwantificeerd met als ondergrens een golfhoogte van 0,5m. Voor Waterdunen is het nog minder (orde 10-20cm, zie § 7.3), hetgeen betekent dat de bekleding nog hogere debieten aan kan dan deze publicatie voorschrijft. Er is sprake van een talud dat vrij is van overgangen (het talud loopt direct de sloot in) en een substraat van klei (het merendeel van de toplaag van Waterdunen bestaat uit zeer zware klei, er is zelfs klei gewonnen van C1 kwaliteit t.b.v. de buitenzijde dijkbekleding).

Voor een golfhoogte van 0,5m is afgeleid dat de toelaatbare debieten op een talud een lognormale kansverdeling zal hebben met een verwachtingswaarde van $1,1 \times 10^5$ l/s/m en een standaarddeviatie van $4,3 \times 10^5$ l/s/m, voor een gesloten graszode en een verwachtingswaarde van $1,8 \times 10^3$ l/s/m en een standaarddeviatie van $3,2 \times 10^3$ l/s/m voor een open graszode. Hiermee kan worden afgeleid dat de kans op doorbraak gelijk is aan 0,017% voor een gesloten graszode en 2,2% voor een open graszode. Deze kansen zijn voldoende klein (en zelfs nog conservatief omdat de golven alsmede het overlopende debiet in de praktijk kleiner zijn) om met zekerheid te beredeneren dat de huidig aanwezige kade stabiel zal blijven gedurende het overlopen van de kade.

7.2.2 Stormprotocol

Het stormprotocol wordt aangesloten op alarmfase 1 van het waterschap Scheldestromen. Alarmfase 1 treedt in werking indien een waterstand van NAP+3,3m wordt verwacht dan wel gedetecteerd. Dit gebeurt gemiddeld 1 keer per jaar (zie Tabel 2-1). Voor een uitgebreide omschrijving van het stormprotocol, wordt verwezen naar 'Notitie Stormprotocol' (RHDHV, 2020). In deze paragraaf is een samenvatting hiervan gegeven.

Het stormprotocol is tweeledig:

1. Overschrijding van een waterstand van NAP+3,3m (SAFE-modus)

Dit is alles overstijgend, omdat het zit geprogrammeerd in de SAFE-modus van de software en een aansluiting biedt met alarmfase 1 van waterschap Scheldestromen. Op het moment dat de gemeten waterstand op de Westerschelde het niveau van NAP+3,3m overschrijdt, zal de getijdenduiker in veilige modus gaan. Dit betekent concreet:

- Twee kokers sluiten volledig (regelschuiven en noodschuiven);
- Van één koker zullen zowel de regelschuiven als de noodschuiven een opening krijgen van 30cm;
- Naderhand is het alleen mogelijk om handmatig de normale operatie van Waterdunen te herstellen. Dit wordt opgenomen in het protocol omtrent alarmfase 1.

Het in werking treden van het stormprotocol op een niveau van NAP+3,3m zal betekenen dat het water kan doorstijgen op de Westerschelde, totdat de schuiven in de juiste stand staan. De verwachting is dat gedurende het bewegen van de schuiven de waterstanden niet verder zullen doorstijgen dan NAP+3,6m.

Het openen van 1 koker met een opening van 30cm (de minimaal mogelijke opening, ofwel de snijgrens), zal ertoe leiden dat er altijd wateruitwisseling is tussen de Westerschelde en Waterdunen. Dit helpt met het voorkomen van ecologische schade. Deze opening is echter dusdanig gekozen, dat dit nooit zal leiden tot een overschrijding van de maximale waterstand. De waterstand die ontstaat kan relatief lang aanhouden, maar zal nooit leiden tot instabiliteit van de omliggende kade (zie bijlage A4).

2. Indien naar geredelijke kans een waterstand van NAP+3,3m verwacht kan worden

Het is wenselijk om rondom de laagwaterkentering al te anticiperen op verwachte waterstanden van NAP+3,3m. Dit zorgt ervoor dat tijdens een storm de waterstanden lager zijn in Waterdunen. Dit draagt bij aan zowel ecologie als langdurig hogere waterstanden die mogelijk leiden tot microstabiliteit van de omringende sloot. Enerzijds is dit wenselijk handmatig te doen, anderzijds kan dit automatisch indien naar geredelijke kans verwacht kan worden als een waterstand van NAP+3,3m wordt gehaald. De programmatuur heeft geen toegang tot verwachte waterstanden, maar wel tot de huidige waterstand en het verwachte getij. Hiermee kan een inschatting worden gemaakt wanneer NAP+3,3m verwacht kan worden. Dit zijn de volgende condities:

- De waterstand op de Westerschelde neemt toe (opkomend tij);
- De windopzet (het verschil in gemeten waterstand op de Westerschelde en het astronomisch getij) bedraagt tenminste 1m;
- Het hoogwater van het aankomend getij uit de getijdentabel bedraagt tenminste NAP+2,0m.

In dat geval zal vroegtijdig een vergelijkbaar protocol in werking treden, wat geen onderdeel uitmaakt van het SAFE-deel van de programmatuur, maar in het normale deel van het systeem is geprogrammeerd:

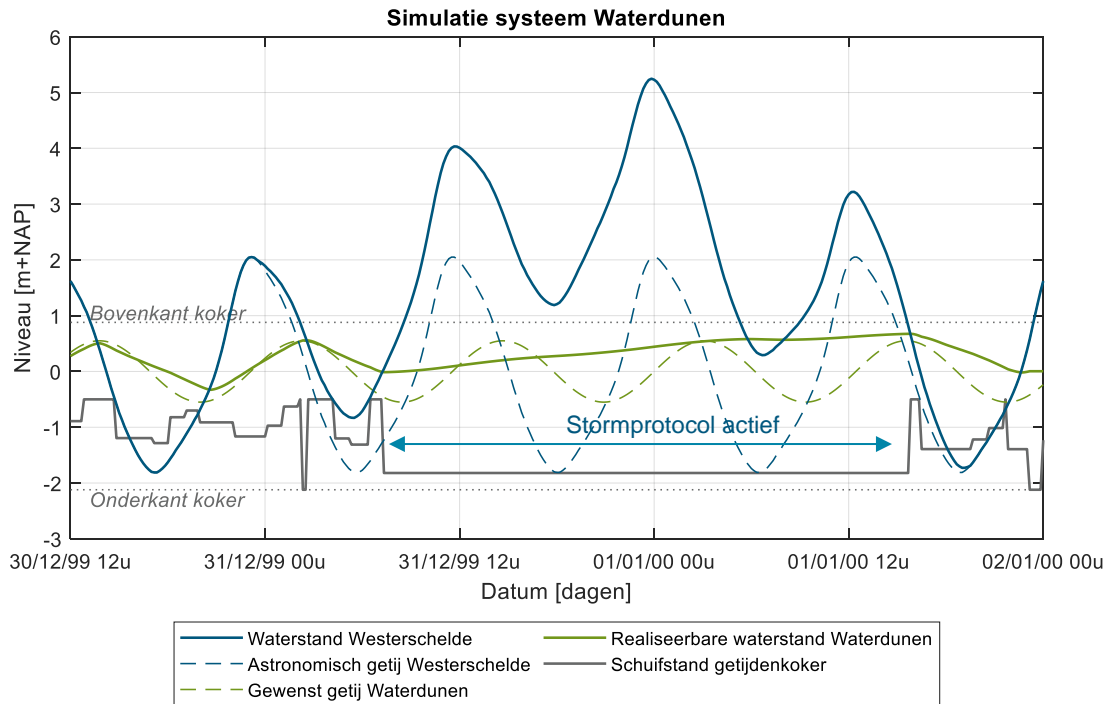
- Twee kokers sluiten volledig (regelschuiven en noodschuiven);
- Van één koker zullen de regelschuiven een opening krijgen van 30cm.

Indien de NAP+3,3m wordt gehaald neemt het SAFE-modus van de programmatuur het over. Het systeem is dan al in de juiste stand gegaan, terwijl de waterstanden in Waterdunen lager zijn. Indien het niveau van NAP+3,3m niet wordt gehaald, zal normale operatie weer in gang worden gezet als naar geredelijke kans de storm weer voorbij is. Dit is onder de volgende condities:

- De waterstand op de Westerschelde neemt af (afgaand getij) en is lager dan de waterstand in Waterdunen;
- De windopzet is kleiner dan 1m.

Stormprotocol in de praktijk

Toepassing van het bovenstaande stormprotocol zal nooit leiden tot waterstanden hoger dan NAP+0,67m in Waterdunen en daarmee dus ook niet tot een waterveiligheidsprobleem. Dit zijn de condities die onder maatgevende storm kan voorkomen. Dit is de storm die eens per 7.500 jaar voorkomt. Het verwachte waterstandsverloop is weergegeven in Figuur 7-2.



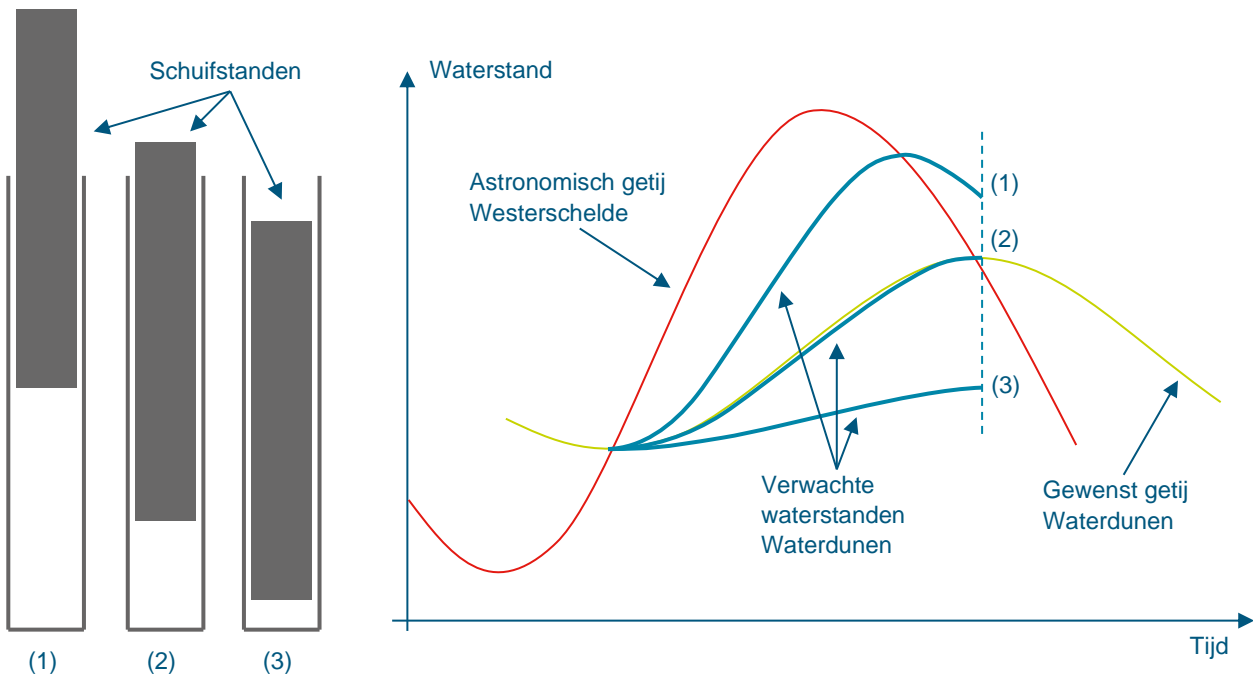
Figuur 7-2: De 1 per 7500 WBI storm gesimuleerd in Waterdunen (het stormprotocol is actief wanneer deze waarde gelijk is aan 1)

7.2.3 Verandering in de aansturing

Er zal niet meer elke 10 minuten worden bekeken wat de juiste schuifstand is, waarna deze zo nodig wordt aangepast. In plaats daarvan, zal op basis van de huidige waterstand en het verwachte astronomisch getij worden bekeken hoe met zo min mogelijk veranderingen in schuifstanden, zo nauwkeurig mogelijk het gewenste waterstandsverloop in Waterdunen kan worden gerealiseerd. In bijlage A2 staat een functiediagram. In deze paragraaf volgt een functieomschrijving hoe de nieuwe aansturing werkt.

Basis: voorspelling van de optimale schuifstand

Aan de basis van de nieuwe aansturing staat een berekening van het verwachte waterstandsverloop in Waterdunen tot aan de volgende kentering in Waterdunen. Het systeem in Waterdunen weet de huidige waterstand, het astronomisch getij op de Westerschelde en het gewenste getij in Waterdunen. Het is mogelijk om voor iedere schuifstand met het astronomisch getij en de huidige waterstand in de Westerschelde een berekening te maken met het verwachte waterstandsverloop in Waterdunen. Dit is visueel weergegeven in Figuur 7-3 voor drie verschillende schuifstanden. Schuifstand 2 leidt tot een waterstandsverloop in Waterdunen dat het beste overeen komt met het gewenste getij. De schuif dient dan ook in die stand te worden ingesteld wanneer dat gevraagd wordt. Selecteren van de juiste schuifstand gaat op basis van de kleinste kwadraten methode: de schuifstand die gesommeerd de kleinste gekwadrateerde afwijkingen leidt.



Figuur 7-3: Visualisatie berekening optimale schuifstand (no 2)

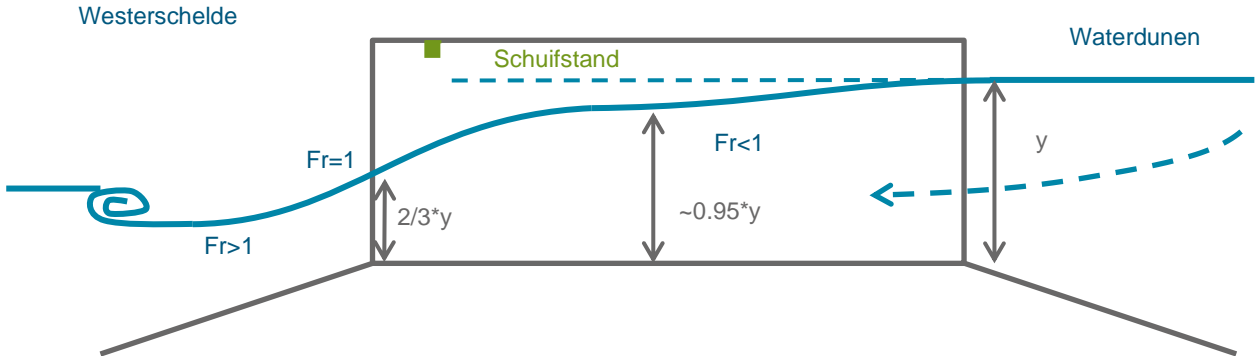
Schuifstand nooit boven de NAP-0,5m

De schuifstand wordt nooit boven het niveau van NAP-0,5m ingesteld. Uit het monitoringsrapport (Svasek, 2020) en het model van Svasek blijkt dat er tijdens het uitlaten nauwelijks verschil in het debiet zal zijn tussen wanneer de schuiven volledig open staan en wanneer de schuiven op een niveau zijn ingesteld van NAP-0,5m. Echter, met inlaten is dat wel zo, omdat de waterstand in de Westerschelde veel hoger kan worden dan in Waterdunen. In dat geval beperken de schuiven de instroom enorm. Mocht het systeem weigeren tijdens uitlaten, dan zal dit ervoor zorgen dat er naderhand minder water het systeem instroomt. Dit betekent dan ook een significante verbetering in de waterveiligheid.

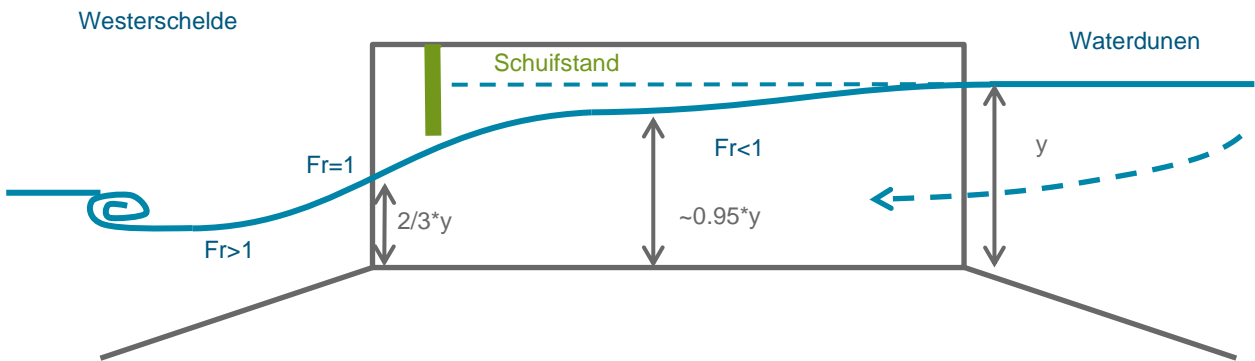
Een verklaring hiervoor zit hem in de fysica en stromingsregimes die ontstaan op het moment dat tijdens het uitlaten het grootste debiet gevraagd wordt. Dit is als de waterstand in de Westerschelde laag is (richting eb) en in Waterdunen nog relatief hoog. Een hoge schuifstand (Figuur 7-4) zorgt in dat geval voor vrij verval van het water in de koker en het energieverlies vindt plaats in de watersprong in 't Killetje. Dit betekent dat bij uitstroom van de koker de waterstand gelijk zal zijn aan $2/3^e$ van de waterstand aan het begin van de koker. Het Froude-getal is daar gelijk aan 1, in de koker is de stroming subkritisch en buiten de koker is de stroming superkritisch. In deze situatie kan de schuifstand dan ook verlaagd worden tot aan de waterstand, zonder dat er ook maar enige invloed is op het debiet (Figuur 7-5). Als de schuif nog verder wordt verlaagd (of als de waterstanden in Waterdunen nog iets hoger zijn), steekt de schuif een klein beetje in het water (Figuur 7-6). In dat geval wordt het debiet minimaal geremd. Dit is dermate weinig, dat het nauwelijks van invloed is. Een schuifstand niet hoger dan NAP-0,5m blijkt hierin optimaal te werken. In dat geval wordt uitstroom niet of nauwelijks gehinderd.

Met inlaten daarentegen zorgt een schuifstand van NAP-0,5m ervoor dat de het debiet wel significant wordt geremd. De waterstand op de Westerschelde is tijdens inlaten veel hoger dan deze in Waterdunen kan worden tijdens uitlaten. Dit zorgt ervoor dat er bij zowel een hogere schuifstand (Figuur 7-7) als een lagere schuifstand (Figuur 7-8) sprake is van een onderspuier.

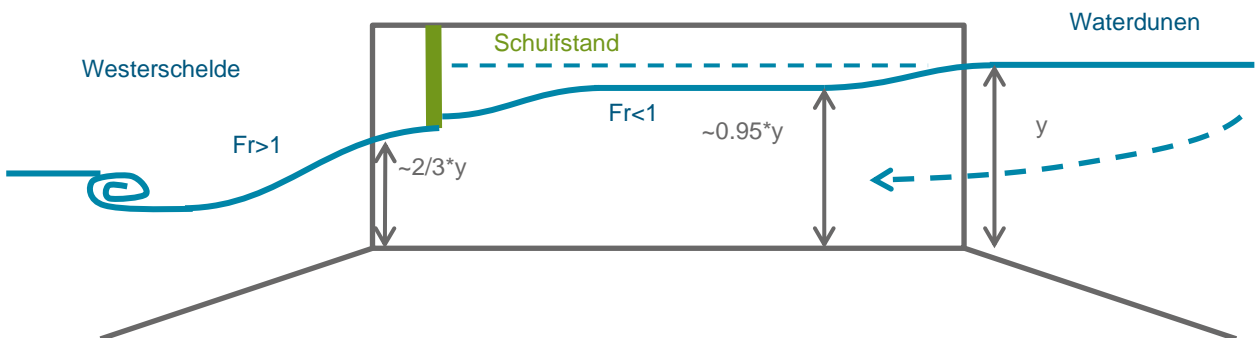
Een lagere schuifstand zorgt in dit geval wel voor minder debiet dat door de koker heen kan lopen. Zodoende kan een lagere schuifstand bij uitlaten het debiet nauwelijks remmen, maar bij instroom wel.



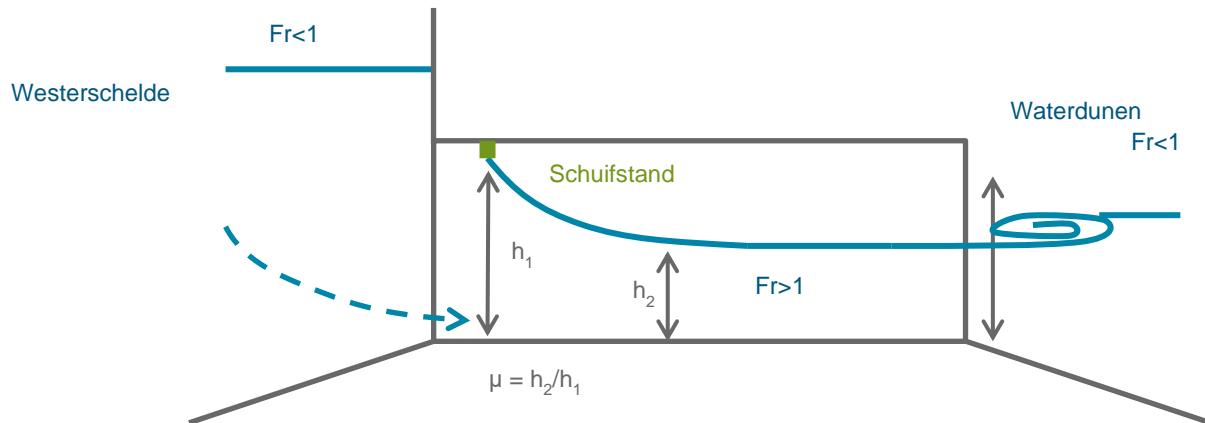
Figuur 7-4: Uitstroom met een hoge schuifstand



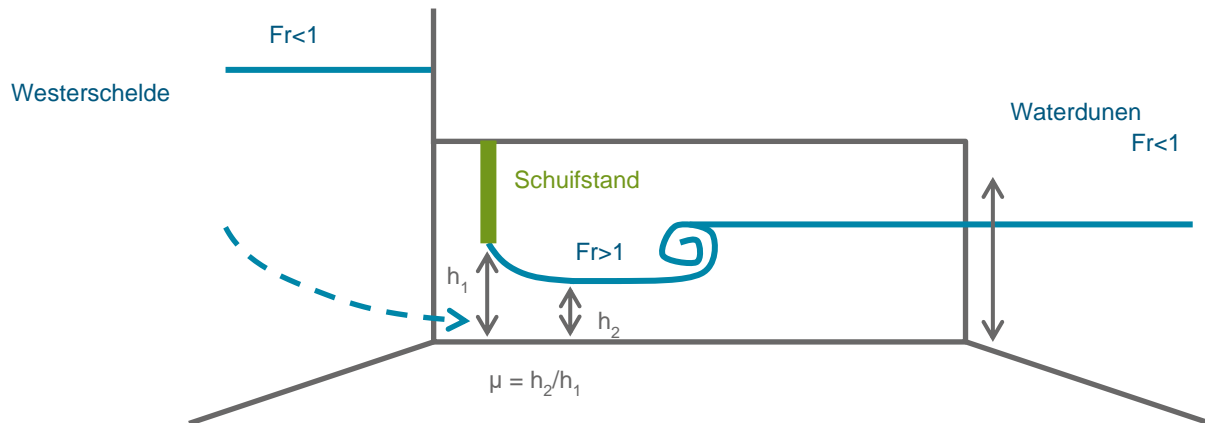
Figuur 7-5: Uitstroom met een lagere schuifstand onder vrij verval (geen remming)



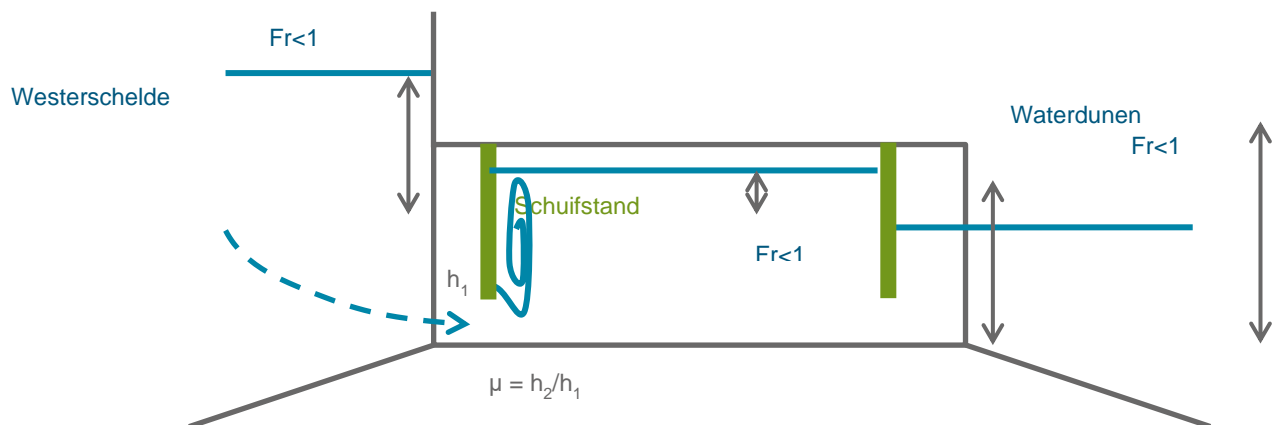
Figuur 7-6: Uitstroom met een lagere schuifstand met de schuif ondiep in het water (minimale remming)



Figuur 7-7: Instroom met een hoge schuifstand (hoog debiet)



Figuur 7-8: Instroom met een lage schuifstand (lager debiet)



Inzet voorspelling en instellen schuifstand

De voorspelling van de optimale schuifstand tot aan de eerstkomende kentering, en dus wanneer deze dient te worden veranderd, vindt plaats onder de volgende condities:

- Na elke kentering;
- Halverwege de kentering;
- Nadat een "uitzondering" heeft plaatsgevonden en normale operatie moet worden hervat.

Hiermee wordt rekening gehouden met de minimale verplaatsing die nodig is (9cm) en de minimale opening van de koker (30cm, de snijgrens). Zonder uitzonderingen zou met maximaal 4 veranderingen van de schuifstand per getijdencyclus kunnen worden voldaan. Er zijn echter een aantal uitzonderingen gedefinieerd die de schuifstanden overschrijden, die enerzijds noodzakelijk zijn en anderzijds leiden tot een optimalisatie in het systeem. Deze uitzonderingen zijn:

- Overschrijding van de waterstand in vergelijking met het hoogtij: in dat geval worden alle schuiven gesloten, totdat de waterstand in de Westerschelde weer onder de waterstand in Waterdunen is. Dit is een optimalisatie in de ecologie voor Waterdunen;
- Nadat het stormprotocol wordt uitgezet en normale operatie dient te worden hervat;
- Nadat beperkingen in stroomsnelheden voorbij zijn.

Omgaan met beperkingen in de stroomsnelheden

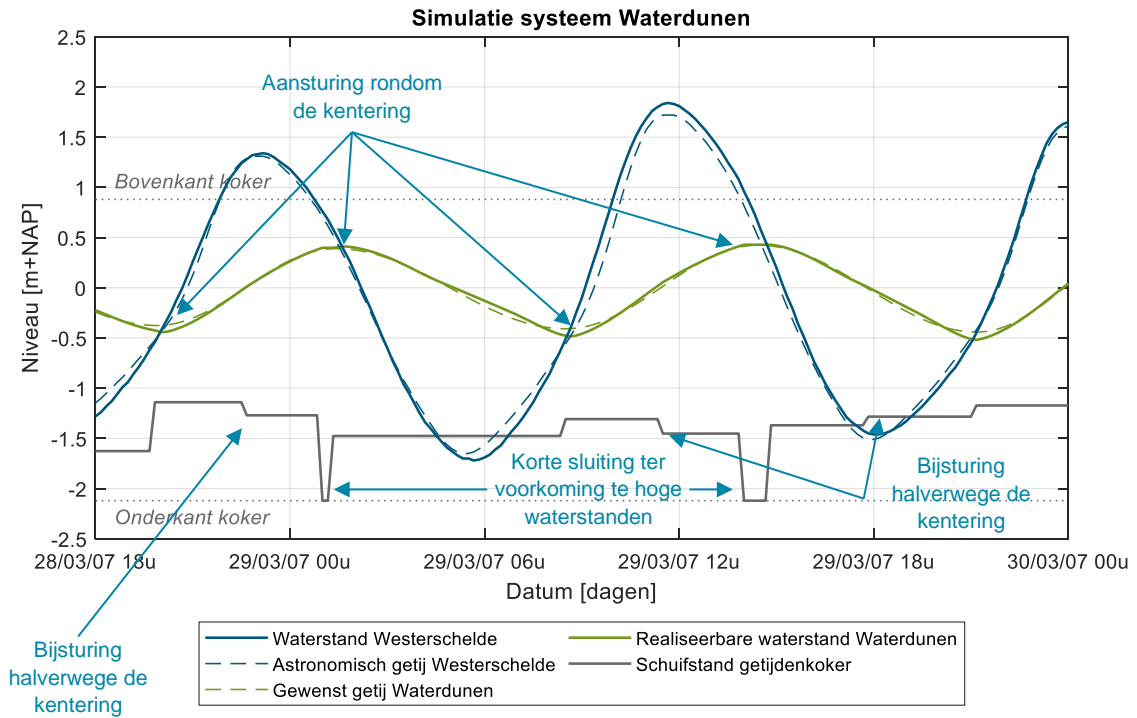
Beperkingen in de toelaatbare stroomsnelheden zal betekenen dat de schuifstand verlaagd dient te worden tot een niveau waarbij stroomsnelheden niet meer beperkend zijn. Er is dan ook een maximale toelaatbare schuifstand aanwezig, die leidt tot de maximaal toelaatbare stroomsnelheid, afhankelijk van de waterstand op de Westerschelde en de waterstand in Waterdunen. Indien de schuifstand zich daarboven bevindt, moet deze worden verlaagd tot tenminste dat niveau. Met toenemend verval kan het zijn dat enkele minuten later de maximale toelaatbare schuifstand verder verlaagd wordt. Om te voorkomen dat elke enkele minuten de schuif hierop moet reageren, is een optimalisatie geweest in hoe er dient te worden omgegaan met beperkingen in stroomsnelheid. Hierin zijn frequentie van het veranderen van de schuifstand afgewogen ten opzichte van winst en verlies in ecologie. Uiteindelijk is daaruit het onderstaande protocol in verschillende stappen afgeleid.

- 1 Indien een beperking in de stroomsnelheid gedetecteerd wordt, wordt een berekening gemaakt met wat de verwachte laagste maximaal toelaatbare schuifstand zal zijn binnen dat moment en een uur daarna. Deze berekening gaat vergelijkbaar met de basisberekening voor de berekening van de optimale schuifstand.
- 2 De schuifstand wordt vervolgens ingesteld op een niveau 5cm onder die laagste maximaal toelaatbare schuifstand (hier wordt wederom rekening gehouden met de minimale verplaatsing en snijgrens).
- 3 Na een uur wordt normale operatie hervat. Als dan nog steeds een beperking in de stroomsnelheden gevonden wordt, dan geldt deze procedure opnieuw.
- 4 Ook als binnen het uur blijkt dat de schuifstand niet laag genoeg is ingesteld (stroomsnelheden dienen nog verder beperkt te worden), dan gaat het systeem terug naar stap 1 en voert de procedure opnieuw uit.

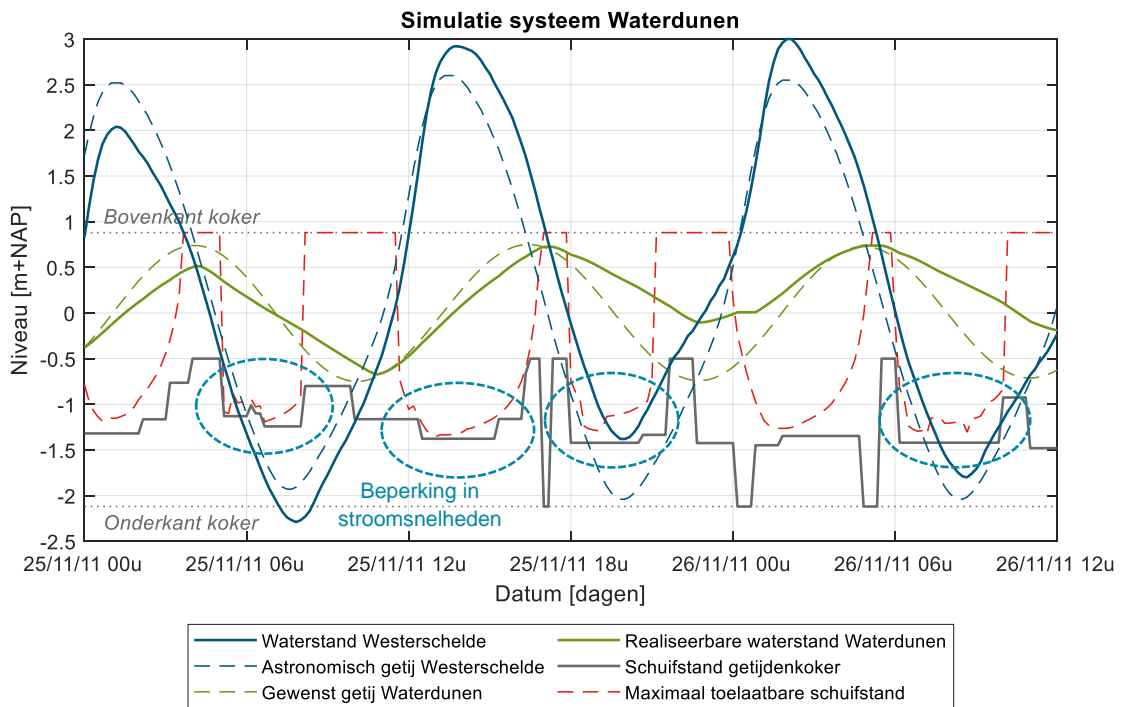
In het onderstaande voorbeeld is de maximaal toelaatbare schuifstand weergegeven (Figuur 7-10). De voornoemde procedure zorgt ervoor dat zo veel mogelijk wateruitwisseling wordt gerealiseerd met zo min mogelijk veranderingen in de schuifstand.

Voorbeeld van operatie

In Figuur 7-9 is een voorbeeld gegeven van de nieuwe aansturing tijdens doottij. In dit geval is er sprake van "pure aansturing": er is geen windopzet en er zijn geen beperkingen in stroomsnelheden. Dit figuur illustreert hoe de nieuwe aansturing in z'n basis werkt: een aansturing van de schuiven alleen tijdens de kenteringen, een bijsturing halverwege de kentering (indien nodig) en een korte sluiting ter voorkoming van te hoge waterstanden. Figuur 7-10 weergeeft een situatie met springtij en windopzet. In dit geval is de aansturing ingewikkelder. De stroomsnelheden dienen te worden beperkt, waardoor het lastiger is om de juiste hoeveelheden water in te laten en uit te laten. De windopzet zorgt ervoor dat het nog lastiger is om Waterdunen tijdens afgaand getij voldoende te legen. In dit voorbeeld worden de lage waterstanden dan ook bij lange na niet gehaald. De hoge waterstanden worden bijna allemaal gehaald.



Figuur 7-9: Voorbeeld nieuwe aansturing met tijdens doottij



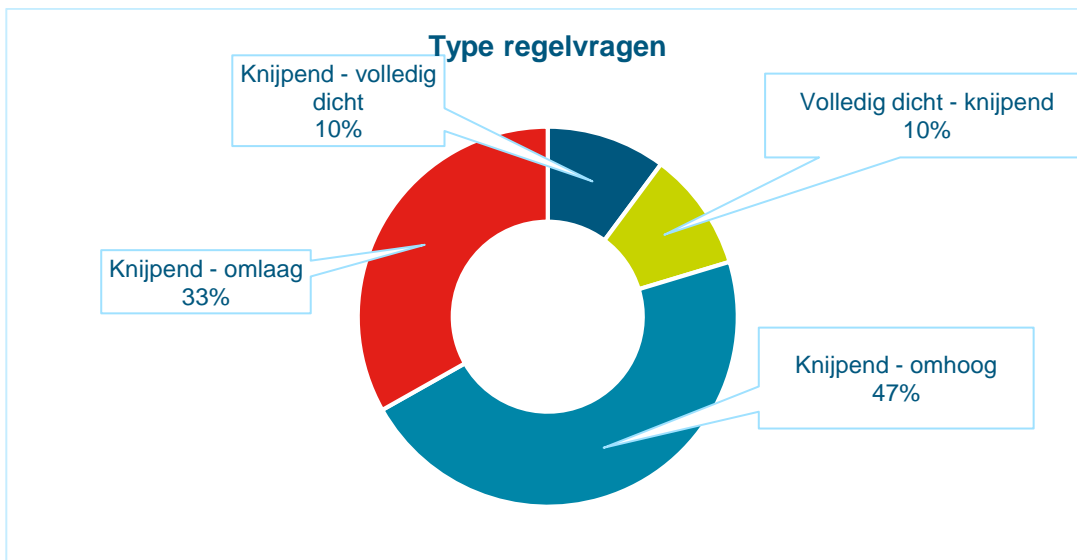
Figuur 7-10: Voorbeeld van omgaan met beperkingen in stroomsnelheid tijdens springtij en windopzet

Enkele kenmerken - nieuw versus oud

Dit leidt tot de volgende statistiek op het aantal regelvragen in het systeem:

- 5,9 regelvragen per getijdencyclus;
- 11,4 regelvragen per dag;
- 4200 regelvragen per jaar;
- Ongeveer 3 storingen per jaar waarbij de regelschuif van één koker weigert en de noodschuif wel sluit, maar waarbij de andere twee kokers nog kunnen blijven functioneren;
- Ongeveer eens per 15 jaar een storing waarbij de regelschuiven van 2 of meer kokers weigeren en de noodschuiven sluiten;
- Ongeveer eens per 26 jaar een storing waarbij de regelschuiven weigeren én de noodschuiven weigeren. Dit betekent niet dat er direct een waterveiligheids-/wateroverlastprobleem is. Dat is alleen als het waterbezwaar daarvoor voldoende groot is. Dat blijkt in de nieuwe situatie niet meer te gebeuren, dit is beoordeeld in § 7.3.

De regelvragen zijn te onderscheiden in type regelvragen. Deze zijn weergegeven in Figuur 5-5.



Figuur 7-11: Aandeel type regelvragen

Er is een aantal onderwerpen die opvallend genoemd mogen worden in deze nieuwe aansturing en opzichte van de oude aansturing:

- Er zijn significant minder regelvragen in het systeem nodig: ongeveer een factor 4 minder. Dit betekent een enorme winst in de waterveiligheid, omdat de kans dat het systeem weigert per tijdseenheid hierdoor ook 4 keer zo klein zal zijn;
- Het overgrote deel van de vragen aan het systeem blijft knijp-tot-knijp vragen (80%). Er zijn echter geen regelvragen meer die gerelateerd zijn aan een volledig open schuif. Dit komt doordat de schuifstand niet hoger dan NAP-0,5m mag staan. Ongeveer 20% van de vragen aan het systeem hebben te maken met een tijdelijke sluiting van Waterdunen.

7.2.4 Richtlijn waterbeheer ten behoeve van ecologie

Het functioneren van de getijdenduiker en het getij is afhankelijk van vele factoren, regulier functioneren, storingsen en regulier onderhoud. Zoals beschreven in hoofdstuk 5.5 kan stilstaand water funest zijn voor Waterdunen, waarbij, m.b.t. risico en impact er duidelijk onderscheid gemaakt kan worden in de perioden herfst-winter (kleiner risico en impact) en voorjaar-zomer (groter risico en impact). Om het ecologisch functioneren van de getijdennatuur in Waterdunen te waarborgen, kan de volgende richtlijn worden gehanteerd, tenzij overmacht tot iets anders dwingt. Hierbij wordt uitgegaan van een bediening van de getijdenduiker binnen technische harde randvoorwaarden, zoals maximale optredende stroomsnelheden.

- Stilstaand water (gesloten getijdenduiker) dient voorkomen te worden.
- Indien mogelijk altijd getijdeninvloed behouden, ook tijdens onderhoud en stormcondities. Bij onderhoud dient slechts 1 duiker tegelijk dicht te zijn, zodat Waterdunen met 2 kokers kan blijven functioneren. Het is beter tijdelijk een mindere getijdeslag te hebben en een beperkte wateruitwisseling, dan een periode van stilstaand water. Indien de veiligheid het toelaat, ook bij stormcondities 1 duiker gedeeltelijk openlaten om enige wateruitwisseling mogelijk te maken. Waar mogelijk dient de volledige getijslag nagestreefd te worden en anders een zo groot mogelijke wateruitwisseling. Zie voor meer informatie de Notitie Stormprotocol (RHDHV, 2020) en de Notitie Onderhoud (RHDHV, 2020) en zie voor een beschrijving van de effecten van het 1- en 2-kokerbedrijf hoofdstuk 7.4.
- Geplande activiteiten met 1- of 2-kokerbedrijf zo veel mogelijk plannen rond het astronomisch doortij. Gedurende doortij is de wateruitwisseling kleiner en zal een beperking van het aantal operationele duikers minder schadelijk zijn voor de getijdennatuur in Waterdunen.
- Indien gedeeltelijke sluiting noodzakelijk is en dit gepland kan worden, dient dit niet uitgevoerd te worden in de periode voorjaar-zomer (broedseizoen) gezien het groter risico en de maximale impact. Volledige sluiting (gepland en onontkoombaar) alleen in de periode herfst-winter geeft minder risico en impact.
- Indien sluiting noodzakelijk is (bij overmacht), dan de sluitingstijd zo veel mogelijk beperken met een maximum van 24 uur. In de herfst-winter periode is de kans op negatieve effecten als gevolg van een lange sluitingstijd kleiner.
- Bij geplande sluitingen van alle getijdenduikers (uitgezonderd sluiting bij storm), dient aangestuurd te worden op een waterstand van NAP+0,30m. Bij deze waterstand zijn de ecologische gevolgen het kleinst. Indien de veiligheid het toelaat, wordt tijdens (gedeeltelijke) sluiting bij storm aangestuurd op het normale springtijniveau voor dat seizoen (NAP+0,75m buiten het broedseizoen). Wanneer ook bij stormcondities het springtijniveau niet gehaald wordt, bestaat het risico dat de vogeleilanden niet vaak genoeg onderlopen buiten het broedseizoen en dat de typische schorrenvegetatie verdwijnt. Daarnaast is een aanhoudende hoogwaterstand bij storm een natuurlijk fenomeen dat niet (volledig) geschuwd moet worden in Waterdunen. Zie voor een nadere uitwerking en simulatie van de waterstanden de Notitie Stormprotocol (RHDHV, 2020). Een belangrijke aantekening is dat ook de stabiliteit van de ringsloot om Waterdunen een aandachtspunt is bij langdurige hoogwaterstanden en dat het daarom wenselijk is aan te sturen op een lagere waterstand bij geplande sluitingen.

Voorname richtlijn dient geïmplementeerd te worden in het gebruik en onderhoud van Waterdunen, evenals wanneer bij stormcondities, storingsen en reparaties het normaal functioneren van de getijdenduikers wordt beperkt. Het is van groot belang dat ook bij onvoorziene sluitingen van de getijdenduikers de herstart van het normaal functioneren van de duikers zo snel mogelijk wordt geïnitieerd, om de negatieve ecologische gevolgen te beperken. Met name in het weekend en speciaal gedurende het voorjaar-zomer kunnen de gevolgen van een storing groot zijn. Het opstellen en implementeren van een storingsprotocol en geautomatiseerde herstart zijn aanbevelingen die het risico op langdurige sluiting van de getijdenduikers aanzienlijk verkleinen.

7.2.5 Onderhoudsplan en reserveonderdelen

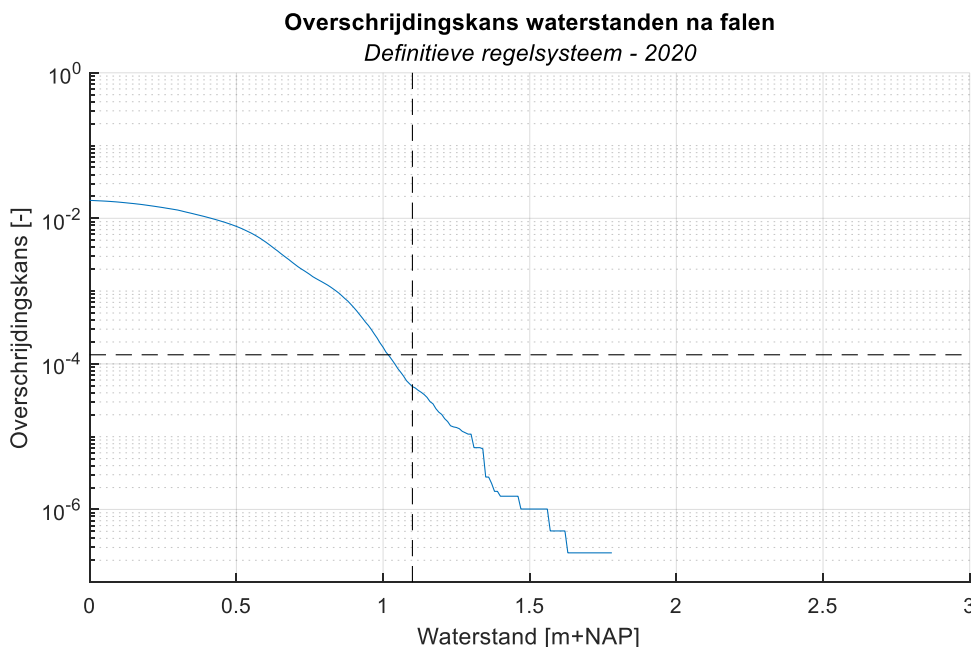
Het huidige onderhoudsconcept houdt onvoldoende rekening met de ecologie in het getijdengebied. Bij preventief onderhoud aan de installatie lijkt de ecologie weinig schade te ondervinden. Bij groot onderhoud wordt volgens het schema de getijdenduiker langdurig uit bedrijf genomen, wat funest is voor de ecologie.

Een ander onderhoudsplan dan het huidige zou ook een betere invulling kunnen geven in de behoefte van de ecologie. Door bij groot onderhoud een parallelle installatie op te bouwen en uitvoerig functioneel te testen, kan binnen een kort tijdsbestek worden omgeschakeld naar de nieuwe installatie. Dit vraagt wel een gedegen planning om binnen het beschikbare tijdsvenster, waarmee de ecologie slechts beperkte schade oploopt, alles gereed te krijgen.

Een ander aspect is de levertijd en de kosten van onderdelen. Bekend zijn o.a. problemen met PLC's die door vervanging van nieuwe series niet meer beschikbaar zijn. Een goede inventarisatie met kritische onderdelen en het op reserve leggen van deze onderdelen of een vervangende alternatieve oplossing hiervoor, zou uitkomst kunnen bieden om langdurig uitval van de getijdenduiker te voorkomen.

7.3 Gevolgen maatregelen op waterveiligheid

De implementatie van de voorgestelde maatregelen leidt tot een significante verbetering van de waterveiligheid, zoals is aangegeven in Figuur 7-12 en Tabel 7-2. De verwachte waterstanden onder maatgevende condities nemen af tot het niveau onder de kade. Dit betekent dat het water binnen Waterdunen zal blijven en zodoende de waterveiligheid gewaarborgd blijft.



Figuur 7-12: Overschrijdingskansen waterstanden situatie na implementatie maatregelen

Tabel 7-2: Gevolgen voor de waterveiligheid situatie na implementatie maatregelen

Combinatie	WBI (1 op 7.500 jaar)	Kade (NAP+1,1m)
Situatie voor maatregelen	NAP+1,93m	1 per 6,5 jaar
Situatie met maatregelen	NAP+1,02m	1 per 20.500 jaar

Beschouwing stabiliteit kade

De waterstand staat vlak tegen de rand van de kade aan, die overal minimaal NAP+1,1m hoog is. Noemenswaardig is dan ook dat er in het stormprotocol gekozen is voor een lagere richtwaterstand in verband met de (micro)stabiliteit van de omliggende kade (NAP+0,67m, zie § 7.2.2), terwijl de waterstand voor de kade nu relatief hoog ligt. Dit zal niet tot microstabiliteit leiden, omdat dit een kortstondige waterstand is. De waterstand in het stormprotocol kan enkele dagen aanhouden, terwijl deze NAP+1,02m een piekwaterstand is die maximaal één uur aanwezig is.

Tevens zal er door scheefstand (orde enkele centimeters) en kleine aanwezige golven (orde 10-20cm) mogelijk lokaal overslag zijn. Deze overslag is echter zeer minimaal in vergelijking met extremere omstandigheden na zeespiegelstijging (zie § 7.5) en zal dan ook niet leiden tot erosie van de aanwezige kade.

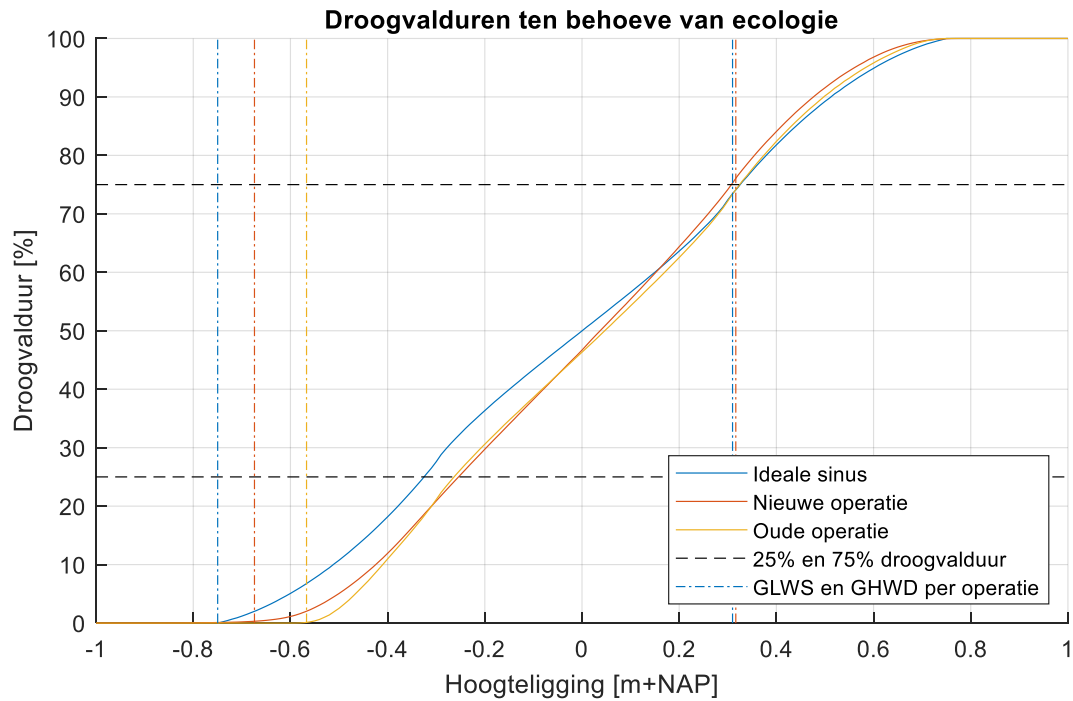
7.4 Gevolgen maatregelen op ecologie

Gevolgen waterveiligheidsmaatregelen op de getijdennatuur in Waterdunen

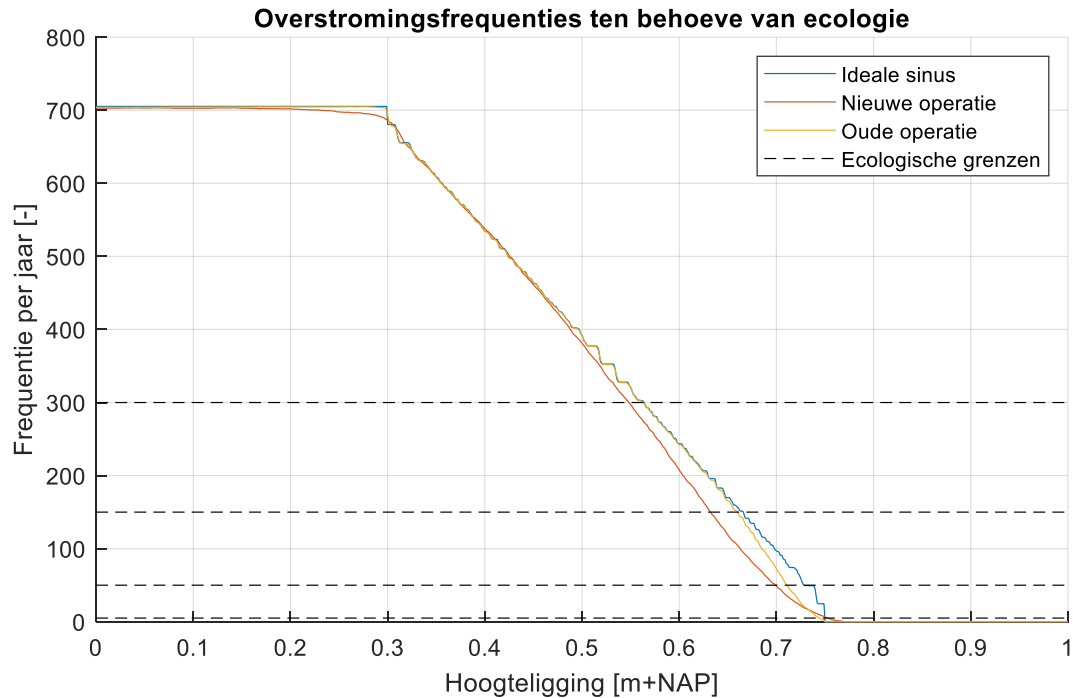
De gevolgen van de voorgestelde maatregelen (zoals vermeld in hoofdstuk 7.1 en 7.2) zijn beperkt tot het verschuiven van de ecotopenverdeling en staan de natuurdoelen van Waterdunen niet in de weg. Door de nieuwe aansturing van de schuiven is het risico op storing enorm afgenomen en daarmee ook de negatieve effecten op de ecologie die gepaard gaan met frequente storingen en stilstaand water. Dit is een grote winst voor de ecologie van Waterdunen ten opzichte van de oude situatie.

Uit de modelsimulaties blijkt dat ook met de voorgestelde maatregelen de getijdencurve in Waterdunen die van de Westerschelde volgt in een sinuscurve, zoals gewenst. De droogvalduur is vergelijkbaar met die van de ideale sinus (Figuur 7-13), de overstromingsfrequentie eveneens (Figuur 7-14) en daarmee is de verdeling van ecotopen ook vergelijkbaar met de gewenste situatie (Tabel 7-3 en Figuur 7-15). Uit de gesimuleerde waterstanden blijkt dat maximale waterstand van NAP+0,75 m gehaald wordt en dat NAP+0,70m 50 keer per jaar gehaald wordt (door het beperken van de maximale waterstanden tijdens het broedseizoen zal deze frequentie naar verwachting halveren naar 25 keer per jaar), zie Tabel 7-3. Dit betekent dat de vogelbroedeilanden regelmatig overspoelen buiten het broedseizoen en daardoor geschikt blijven voor broedvogels.

Wel blijkt uit de gesimuleerde waterstanden dat de gewenste laagwaterstand (GLWS is NAP-0,75m) niet altijd gehaald wordt (GLWS is NAP-0,67m), omdat het systeem soms onvoldoende leegloopt (Figuur 7-13). Alhoewel de frequentie waarmee de laagwaterstand (NAP-0,75m) gehaald wordt lager ligt dan in de ideale situatie, wordt het niveau wel degelijk bereikt. Het verschil met de ideale sinus is kleiner geworden ten opzichte van de huidige situatie (oude operatie, GLWS is NAP-0,57m). De begrenzingen van de litorale ecotopen schuiven enkele centimeters naar boven op en het totaal oppervlak litoraal habitat (42,8 ha) is iets kleiner dan in de ideale situatie (46,6 ha), maar wel groter dan bij de huidige situatie (39,4 ha), zie Tabel 7-3. Op het niveau van individuele ecotopen is wel een relatief grote afname te zien in Laag Schor, maar dat wordt gecompenseerd door een grote toename in Midden Schor en Hoog Schor. Deze relatief grote verschuivingen worden veroorzaakt doordat de oevers van Waterdunen rond de begrenzingen van deze ecotopen erg vlak zijn, waardoor een verschuiving van NAP+1cm resulteert in enkele hectares. In praktijk zijn de tussengrenzen van het habitat voor schorrenvegetatie echter nooit zo scherp en zal een dergelijk kleine verschuiving in de overstromingsfrequentie enkel de soortensamenstelling licht beïnvloeden. Het totaal oppervlak aan slikken en schorren is vergelijkbaar met de ideale sinus en is verbeterd ten opzichte van de huidige situatie. Daarmee voldoet Waterdunen aan de wensen en eisen voor de ontwikkeling van getijdennatuur.



Figuur 7-13: Modelresultaat droogvalduur (%) van slikken en schorren bij ideale sinus (ontwerp getijdenwerking), oude operatie (huidige situatie) en nieuwe operatie (incl. maatregelen). Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.



Figuur 7-14: Modelresultaat overstromingsfrequentie (x/jaar) van schorren bij ideale sinus (ontwerp getijdenwerking), oude operatie (huidige situatie) en nieuwe operatie (incl. maatregelen). Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.

Tabel 7-3: Begrenzing en oppervlaktes van ecotopen bij ideale sinus, oude operatie (huidige situatie) en nieuwe operatie. De estuariene ecotopen zijn berekend op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de grenswaarde (m+NAP) bij de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdenwerking (ideale sinus met springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen. De getijdenwerking bij oude operatie (huidige situatie) en nieuwe operatie (incl. voorgestelde maatregelen) is verkregen uit modelsimulaties.

Term	Bovengrens	Ideale sinus		Oude operatie		Nieuwe operatie	
		Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]
Sublitoraal	GLWS	-0,75	45,1	-0,57	51,9	-0,67	48,1
Laag litoraal	25% droog	-0,32	19,2	-0,26	14,6	-0,25	18,7
Midden litoraal	75% droog	0,33	27,4	0,32	24,8	0,31	24,1
Hoog litoraal	GHWD	0,33	0,0	0,32	0,0	0,31	0,0
Pionierszone	300x/jaar	0,56	26,7	0,56	27,1	0,55	25,0
Lage schor	150x/jaar	0,66	19,5	0,66	19,0	0,63	12,9
Midden schor	50x/jaar	0,73	8,1	0,71	6,4	0,70	13,4
Hoge schor	5x/jaar	0,75	2,8	0,75	4,3	0,75	7,1



Figuur 7-15: Verdeling van ecotopen bij nieuwe operatie. De estuariene ecotopen zijn verdeeld op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en gesimuleerde getijdenwerking bij nieuwe operatie (incl. maatregelen, springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen.

Implementatie richtlijn waterbeheer

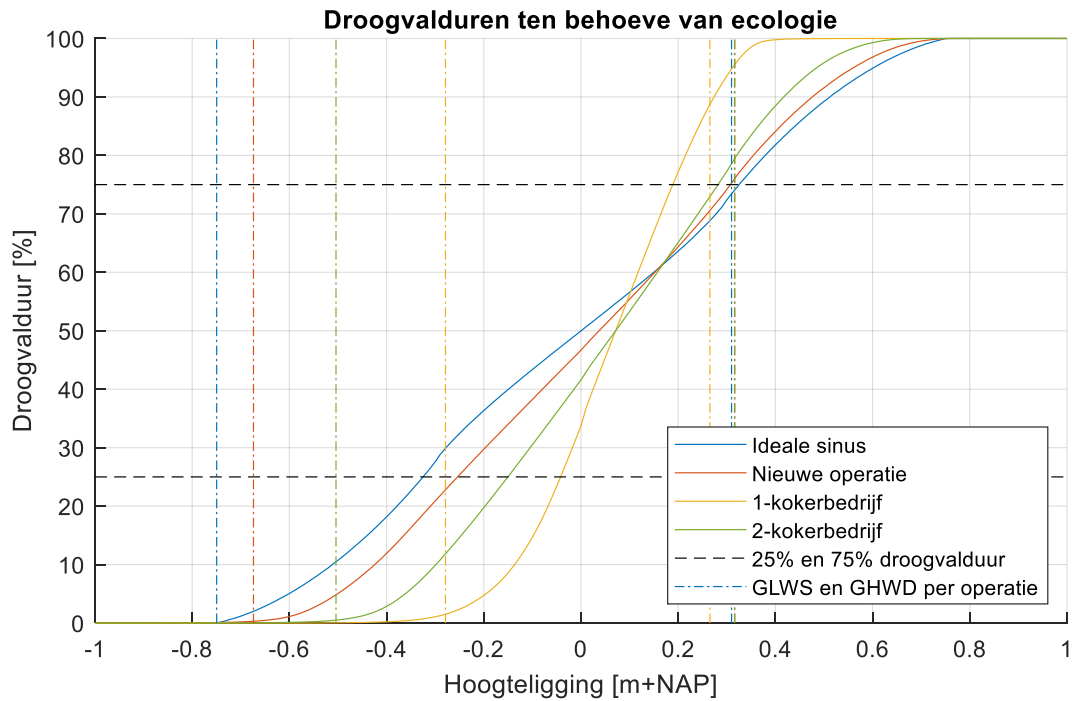
Indien de richtlijn waterbeheer (zoals beschreven in hoofdstuk 7.2.4) wordt geïmplementeerd en in praktijk aan de richtlijn kan worden voldaan, zal dit het ecologisch functioneren van de getijdennatuur in Waterdunen veiligstellen (onvoorziene effecten daargelaten). De risico's op significant negatieve effecten (zoals omschreven in hoofdstuk 5.5) worden met de inachtneming van de richtlijn enorm verkleind. De effecten van het 1-kokerbedrijf en 2-kokerbedrijf worden in navolgende paragraaf beschreven.

Gevolgen 1-kokerbedrijf en 2-kokerbedrijf

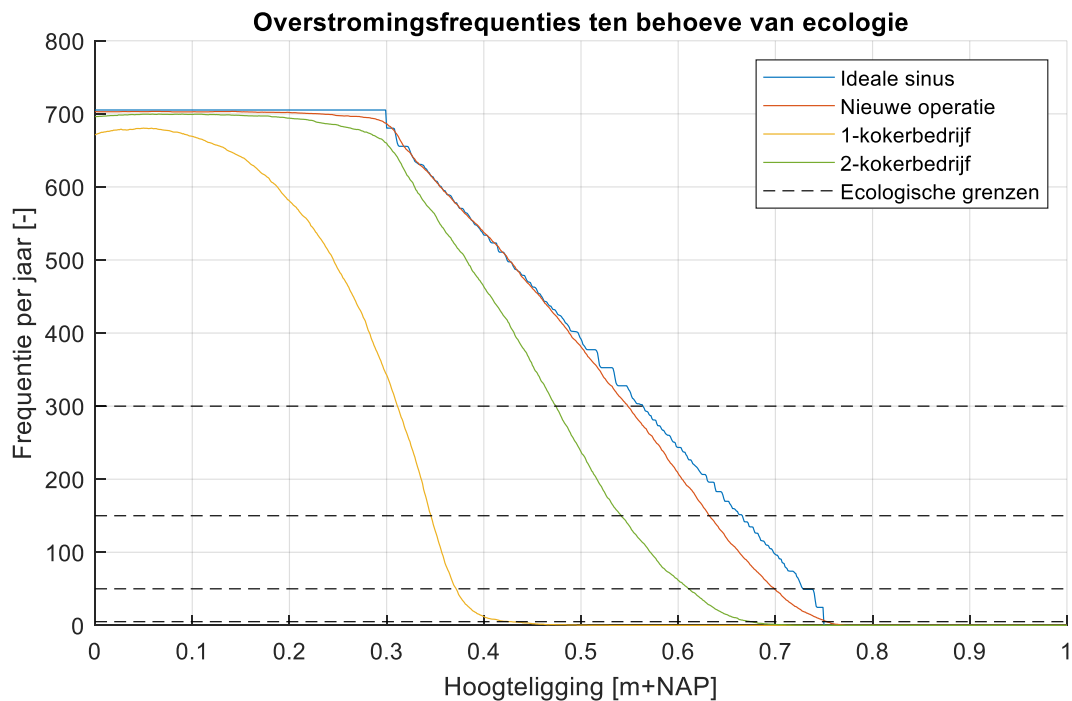
Het behouden van wateruitwisseling tijdens onderhoudswerkzaamheden en stormcondities is cruciaal voor het ecologisch functioneren van de getijdennatuur in Waterdunen. Alhoewel de risico's van een zeer korte periode van stilstaand water in Waterdunen (met een beperkte frequentie) acceptabel zijn (zie voor details hoofdstuk 5.5 en 7.2.4), is het vanuit ecologisch oogpunt altijd beter om niet alle kokers tegelijk te sluiten. Het 1-kokerbedrijf of 2-kokerbedrijf beperkt het risico op negatieve ecologische effecten aanzienlijk en biedt mogelijkheden om toch onderhoudswerk uit te voeren en/of te voldoen aan waterveiligheidseisen tijdens stormcondities. De vraag is in hoeverre een langdurig (>24 uur) ingebruikname van het 1- en 2-kokerbedrijf de getijdennatuur van Waterdunen zal beïnvloeden.

De modelsimulaties laten zien dat ook met 1 of 2 functionerende kokers een mooie getijdencurve kan worden gerealiseerd, al is de getijslag een stuk kleiner door de beperkte wateruitwisseling. De droogvalduur (Figuur 7-16), overstromingsfrequentie (Figuur 7-17) en resulterende ecotopenverdeling (Tabel 7-4) wijken af van de ideale sinus en van de nieuwe operatie met 3 functionerende kokers. Een continu 1- of 2-kokerbedrijf zal op den duur resulteren in een veel kleiner oppervlak aan schorren en slikken omdat de getijdenslag veel kleiner is. Bij een tijdelijk 1- of 2-kokerbedrijf is er nog steeds een aanzienlijke kans dat zich effecten voordoen die een grote negatieve impact hebben op de getijdennatuur in Waterdunen, al zijn de risico's (zoals beschreven in hoofdstuk 5.4) aanzienlijk kleiner. Zo zal een zuurstofdepletie of voedseltekort in het sublitoraal veel minder waarschijnlijk zijn bij een gedeeltelijke wateruitwisseling dan bij stilstaand water. Met name het 2-kokerbedrijf biedt mogelijkheden.

De maximale debieten van het 2-kokerbedrijf zijn onvoldoende om de grote getijslag tijdens springtij te halen (NAP-0,75m tot NAP+0,75m), maar wel groot genoeg om de kleinere getijslag tijdens doortij te halen (NAP-0,30m tot NAP+0,30m) en waarschijnlijk ook bij gemiddeld tij (Figuur 7-18). Tijdens het vogelbroedseizoen ligt het maximale springtijniveau een stuk lager (circa NAP+0,65m) en kan dit vermoedelijk ook gehaald worden met het 2-kokerbedrijf, al zal de maximale laagwaterstand (NAP-0,75m) in geen geval gehaald worden. Voor het behalen van de beoogde ecotopenverdeling en het beperken van de risico's op negatieve ecologische effecten is het dus raadzaam om, indien noodzakelijk vanwege onderhoud, het 2-kokerbedrijf vooral toe te passen tijdens doortij en te vermijden tijdens springtij. Deze aanbeveling is dus van toepassing op geplande onderhoudswerkzaamheden waarbij het 2-kokerbedrijf kan worden gehanteerd. Hiermee kan Waterdunen ook voor een onderhoudsperiode langer dan 24 uur goed functioneren en kan met goed gepland onderhoud (rond astronomisch doortij) zelfs een periode tot 2 weken overbrugd worden zonder significante ecologische effecten.



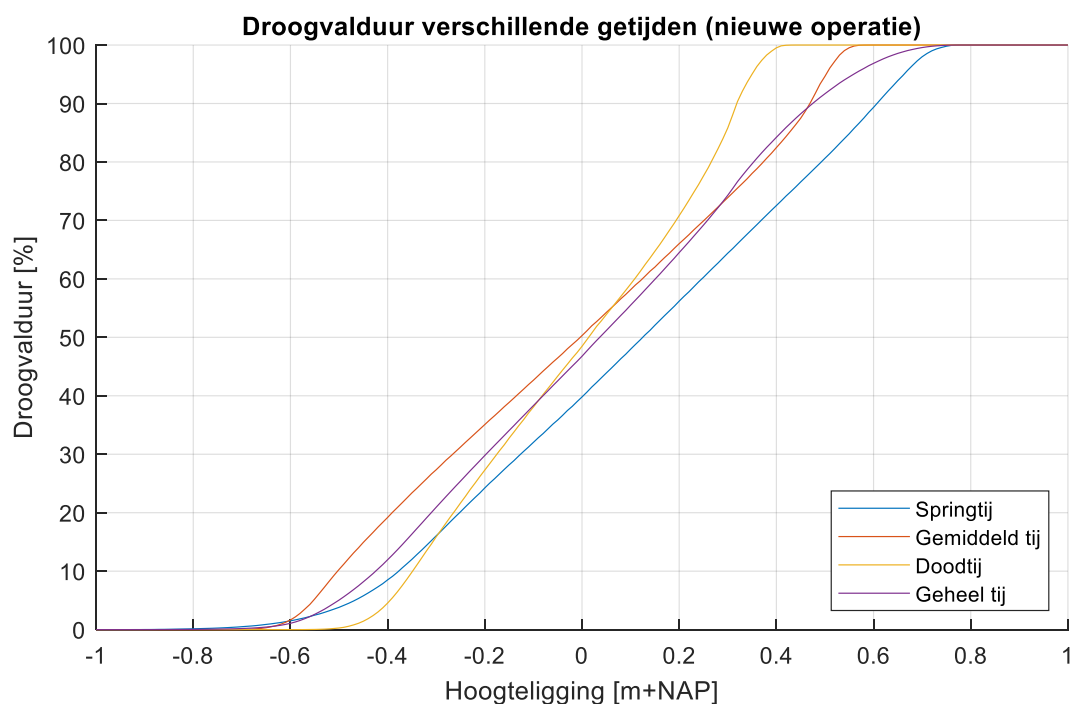
Figuur 7-16: Modelresultaat droogvalduur (%) van slikken en schorren bij 1- en 2-kokerbedrijf. Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.



Figuur 7-17: Modelresultaat overstromingsfrequentie (x/jaar) van schorren bij 1- en 2-kokerbedrijf. Belangrijke ecotopen grenzen zijn aangegeven met stippellijn.

Tabel 7-4: Begrenzing en oppervlaktes van ecotopen bij 1-kokerbedrijf en 2-kokerbedrijf. De estuariene ecotopen zijn berekend op basis van de droogvalduur (%) en overstromingsfrequentie (x/jaar), zoals gedefinieerd in het Zoute wateren Ecotopen Stelsel (ZES.1) en de grenswaarde (m+NAP) bij de huidige hoogteligging (zoals aangegeven in de ontwerptekeningen) en voorgenomen ontwerp getijdenwerking (ideale sinus met springtij van +0,75 NAP) van Waterdunen. De getijdenwerking bij nieuwe operatie (incl. voorgestelde maatregelen), 1-kokerbedrijf en 2-kokerbedrijf is verkregen uit modelsimulaties.

Term	Bovengrens	Ideale sinus		Nieuwe operatie		1-kokerbedrijf		2-kokerbedrijf	
		Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]	Bovengrens [m+NAP]	Oppervlakte [ha]
Sublitoraal	GLWS	-0,75	45,1	-0,67	48,1	-0,28	65,8	-0,5	54,6
Laag litoraal	25% droog	-0,32	19,2	-0,25	18,7	-0,04	8,2	-0,15	15,5
Midden litoraal	75% droog	0,33	27,4	0,31	24,1	0,19	11,8	0,29	19,9
Hoog litoraal	GHWD	0,33	0,0	0,31	0,0	0,26	3,0	0,32	1,2
Pioniers zone	300x/jaar	0,56	26,7	0,55	25,0	0,32	2,5	0,48	7,3
Lage schor	150x/jaar	0,66	19,5	0,63	12,9	0,35	1,2	0,55	17,6
Midden schor	50x/jaar	0,73	8,1	0,70	13,4	0,38	1,2	0,62	11,0
Hoge schor	5x/jaar	0,75	2,8	0,75	7,1	0,43	2,3	0,68	12,8

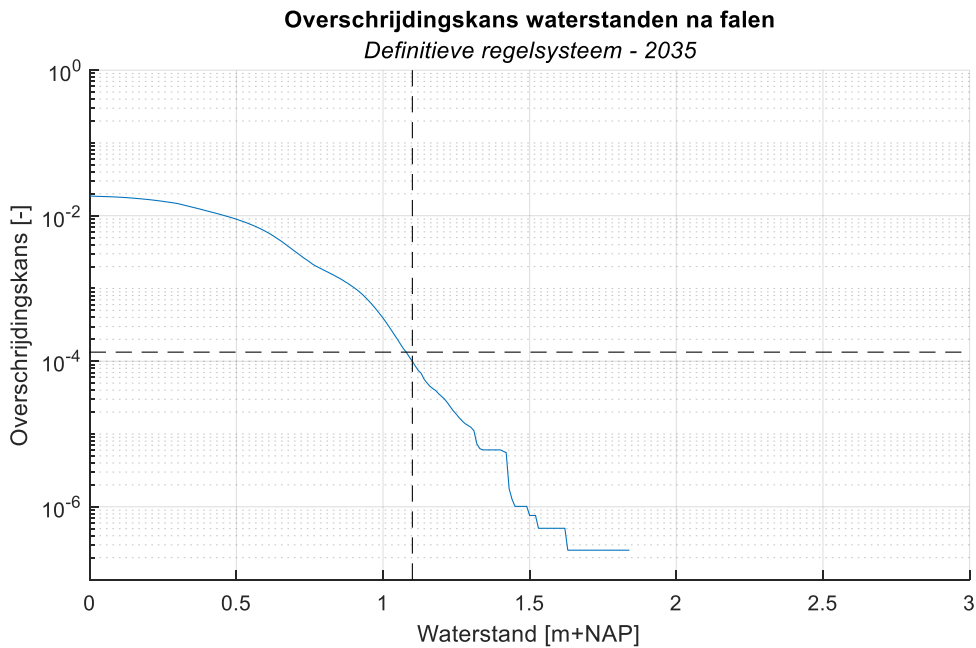


Figuur 7-18: Modelresultaat droogvalduur (%) van slikken en schorren bij nieuwe operatie (incl. maatregelen) tijdens verschillende getijdencondities.

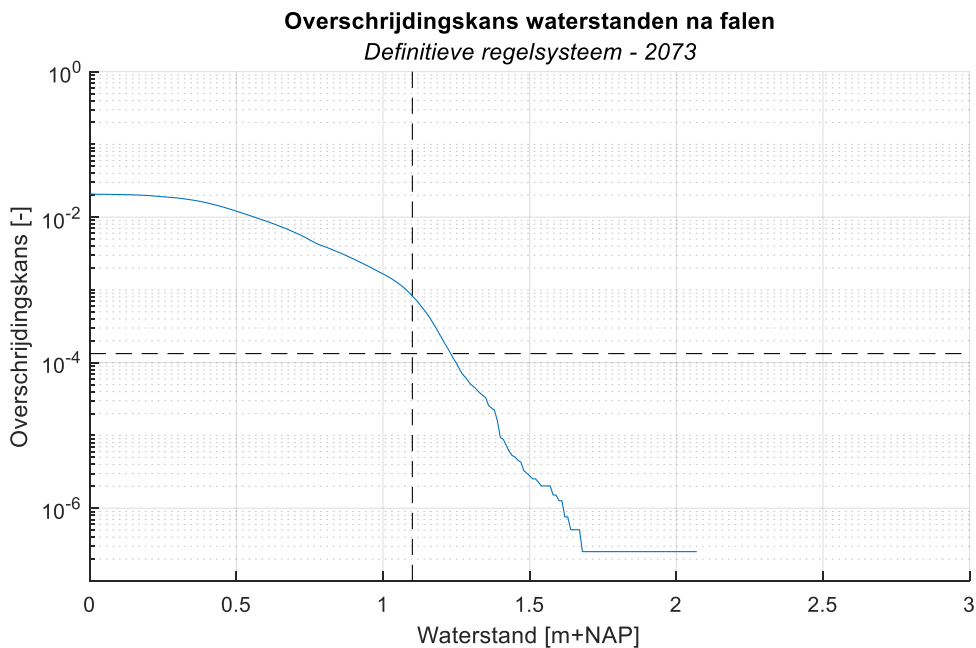
7.5 Doorkijk zeespiegelstijging

7.5.1 Waterstanden 2035 en 2073

Deze paragraaf weergeeft een doorkijk naar de waterveiligheidssituatie inclusief zeespiegelstijging. Na 2023 wordt verwacht dat de zeespiegel ongeveer 1 cm per jaar zal stijgen. De te verwachten zeespiegelstijging in 2035 (einde volgende toetsronde) is dan 12cm en een zeespiegelstijging van 50cm kan worden verwacht in 2073. Voor beide situaties is een inschatting gemaakt wat dit betekent qua waterstanden en herhalingstijden. Deze zijn weergegeven in Figuur 7-19, Figuur 7-20 en Tabel 7-5.



Figuur 7-19: Verwachte overschrijdingskansen waterstanden met 12cm zeespiegelstijging (2035)



Figuur 7-20: Verwachte overschrijdingskansen waterstanden met 50cm zeespiegelstijging (2073)

Tabel 7-5: Gevolgen voor de waterveiligheid situatie na implementatie maatregelen

Combinatie	WBI (1 op 7.500 jaar)	Kade (NAP+1,1m)
Situatie voor maatregelen (2023)	NAP+1,93m	1 per 6,5 jaar
Situatie met maatregelen (2023)	NAP+1,02m	1 per 20.500 jaar
+ 12 cm zeespiegelstijging (2035)	NAP+1,08m	1 per 10.000 jaar
+ 50 cm zeespiegelstijging (2073)	NAP+1,23m	1 per 1200 jaar

Naar verwachting zal aan het einde van de volgende toetsronde (2035) het water nog steeds in Waterdunen blijven, hoewel er met minimale scheefstand verwacht kan worden dat er een kleine maar onbepaalde hoeveelheid water over enkele randen zal lopen.

Met 50cm zeespiegelstijging verandert de situatie echter. Dan is de waterstand onder maatgevende condities hoger dan de rand. Dit betekent dat er water over de rand heen gaat lopen.

7.5.2 Overloopsituatie 2073

Om aan te tonen of overloop in 2073 tot een waterveiligheidsprobleem leidt (meer dan 20cm inundatie gemiddeld in een 4-cijferig postcodegebied), is het SOBEK-model ingezet (zie § 4.2). Hiermee wordt bekeken wat er met het overlopende water gebeurt en waar dit voor eventuele problemen zorgt. Voorwaarde hiervan is wel dat het overlopende water niet mag leiden tot erosie van de rand zelf, maar dat deze fungeert als overlaat. Dit kan alleen als de stroomsnelheden beperkt blijven.

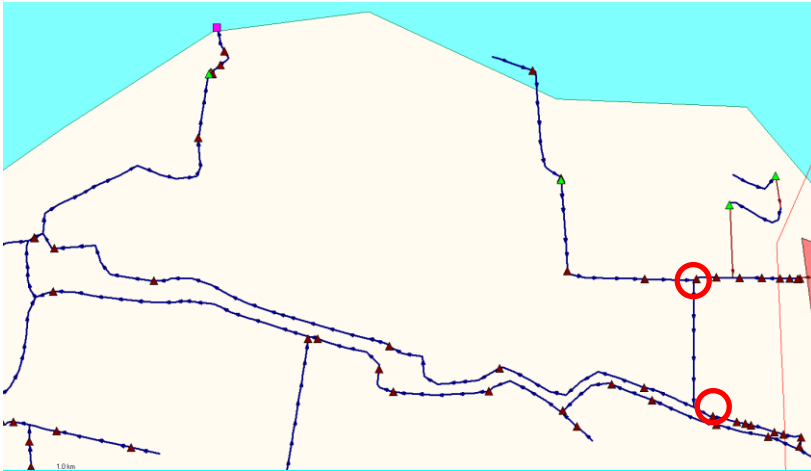
Overgelopen volume

Indien de gehele rand als overlaat wordt geschematiseerd, blijkt vanuit het digitale model Waterdunen dat er (inclusief gevoeligheden en conservatisme, zie § 4.1.4) maximaal 330.000 m³ over de rand zal heenlopen binnen één getijdencyclus. In werkelijkheid zal deze hoeveelheid echter een stuk lager uitvallen, vooral omdat de kade een wisselende hoogte heeft terwijl in de berekening uit is gegaan van de minimale hoogte van NAP+1,1m over de volledige lengte van kade van 6.000m, zie ook § 4.1.4. Er wordt aangenomen dat na falen de getijdenduiker binnen één getijdencyclus gesloten kan worden, zodat er maar één keer een waterbezwaar ontstaat. Deze hoeveelheid water komt ongeveer overeen met wat er zou gebeuren als in 2023 de faalkans van de getijdenduiker tienmaal zo groot zou zijn en vertelt daarom ook iets over de robuustheid van de gekozen oplossing.

SOBEK-sommen

De SOBEK-sommen tonen aan dat het water zich verspreid in het regionale watersysteem. Hierbij zijn vier scenario's doorgerekend en geanalyseerd:

- Geen maatregelen in het regionale watersysteem;
- Terugslagkleppen geplaatst op twee duikers ten oosten van Waterdunen. Door terugslagkleppen te plaatsen op deze duikers kan het overtollige water vanuit Waterdunen niet richting Breskens stromen (Figuur 7-21);
- Geen maatregelen samen met uitval gemaal Nieuwe Sluis;
- Geen maatregelen, maar dan met de aanname dat na falen de getijdenduiker gesloten wordt na twee getijdencycli met waterbezwaar.

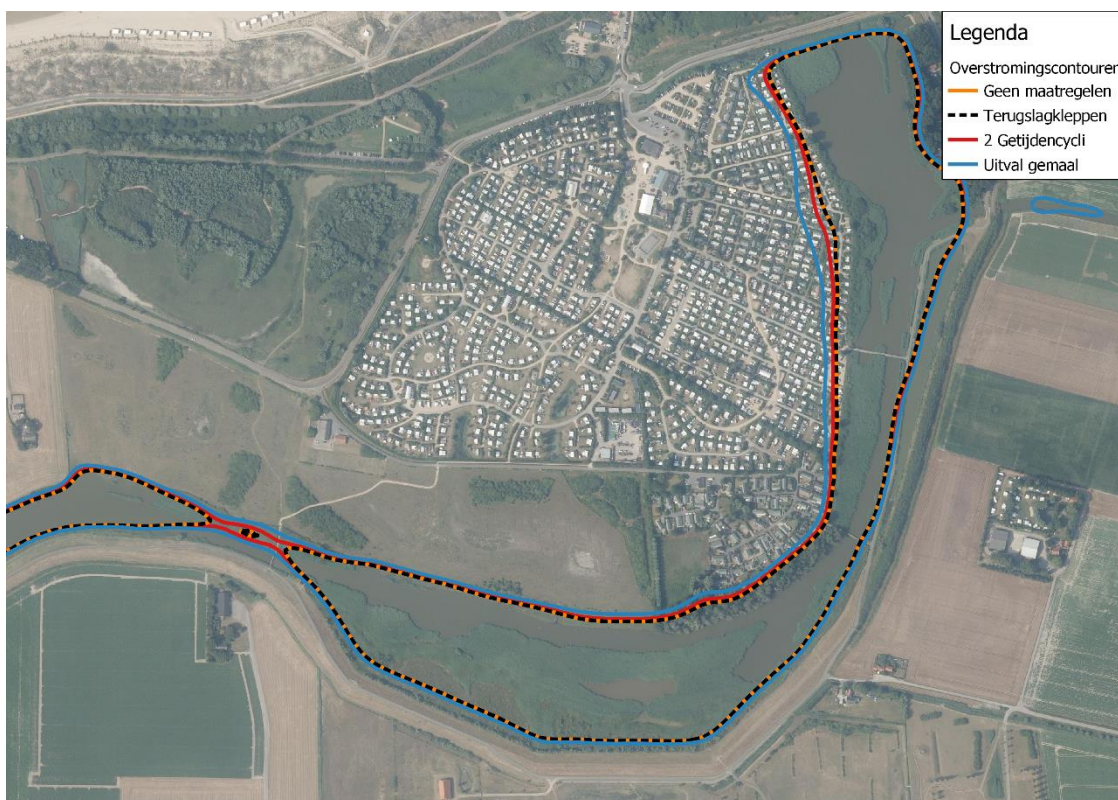


Figuur 7-21: Scenario: terugslagkleppen op twee duikers, deze duikers zijn omcirkelt in deze afbeelding.

Op slechts enkele plekken zorgt dit ervoor dat water in het regionale watersysteem buiten de oevers treedt, maar nergens wordt aan het criterium voldaan “gemiddeld meer dan 20cm inundatie in een wijk of buurt met gelijke 4-cijferige postcode”. Er is dan ook nergens sprake van een waterveiligheidsprobleem. Alleen langs de camping Groede zullen de laatste rijen recreatiewoningen inunderen, zoals is weergegeven in Figuur 7-22. Afhankelijk van het scenario zal dit 20cm (geen maatregelen) tot 40cm zijn (uitval gemaakt). Voor een nadere onderbouwing hiervan, zie bijlage A3. Dit betekent echter niet dat er hiermee sprake is van een wateroverlastsituatie, omdat de beschouwde jaarlijkse kans 1/7.500 jaar is en naar verwachting met een jaarlijkse kans van 1/1.200 de kade zal overlopen. De wateroverlastnorm gaat tot maximaal een jaarlijkse kans van 1/100.

In de bijlage wordt verder ingegaan op de duur van hinder voor drainage. In het invloedsgebied is deze duur ongeveer een paar uur.

Zelfs in 2073 zal er dus geen sprake zijn van een wateroverlast of waterveiligheidsprobleem. Dit betekent dat de gekozen maatregelen toekomstbestendig zijn.



Figuur 7-22: Overstromingscontouren van de verschillende scenario's bij Camping Groede'

7.6 Conclusie hoofdstuk 7

Samengevat gelden de volgende conclusies:

- Om tot ten minste 2073 aan de waterveiligheidseisen te voldoen en direct aan de ecologische belangen, zijn de volgende maatregelen nodig:
 - verbeteren hydrauliek;
 - verbeteren software;
 - verplichting tot instandhouding omliggende kade;
- Voor zichtjaar 2023 en 2035: de waterveiligheid is zo sterk verbeterd dat de kans op overlopen van Waterdunen kleiner is dan 1/7.500 per jaar;
- Voor zichtjaar 2073: de kans dat een geringe hoeveelheid water over de kade loopt is 1/1.200 per jaar. Onder normcondities met een jaarlijkse kans van 1/7500, zal de hoeveelheid water die dan over de kade loopt niet leiden tot inundaties van 20cm of meer in een 4-cijferig postcodegebied leidt. Hiermee is er geen sprake van overschrijding van zowel de norm voor wateroverlast (1/100 per jaar) als de norm voor waterveiligheid (1/7500 per jaar). Wel zullen de laaggelegen delen (enkele tientallen meters langs de rand van het boezemstelsel) van de camping langs het Zwarte Gat met 20 tot 40cm inunderen.
- De maatregelen hebben ook invloed op de ecologie:
 - de ecotopenverdeling zal verschuiven, maar het staat de natuurdoelen van Waterdunen niet in de weg. De vogelbroedeilanden worden regelmatig overspoeld, zoals gewenst. De gewenste laagwaterstand (springtij) zal niet altijd gehaald worden, maar dit zal geen significant negatieve effecten hebben;
 - door de nieuwe aansturing van de schuiven is het risico op storing met een factor 5 afgenomen en daarmee ook de negatieve effecten op de ecologie;
 - om het ecologisch functioneren van de getijdennatuur in Waterdunen te waarborgen, dient de richtlijn waterbeheer geïmplementeerd te worden in het gebruik en onderhoud van Waterdunen, evenals wanneer bij stormcondities, storingen en reparaties het normaal functioneren van de getijdenduikers wordt beperkt (zie § 7.2.4);
 - door het 2-kokerbedrijf toe te passen bij gepland onderhoud nemen de risico's op negatieve ecologische effecten aanzienlijk af (ten opzichte van volledige sluiting). Indien toegepast rond doortijd kan Waterdunen ook voor een onderhoudsperiode langer dan 24 uur goed functioneren.

8 Conclusie & aanbevelingen

In voorliggend hoofdstuk zijn de conclusies naar aanleiding van voorliggende rapportage getrokken. Logischerwijs volgen de aanbevelingen.

8.1 Conclusie

De huidige installatie voldoet niet aan de contracteisen, de waterveiligheidseisen, wateroverlasteisen en ecologische eisen. De maatregelen zijn als volgt samen te vatten:

- Installatie opwaarderen, zodat de installatie voldoet aan alle eisen. Dit is op te splitsen in:
 - hardwarematig: contracteisen;
 - hardwarematig: waterveiligheid en onderhoud;
 - softwarematig: aantal aanspraken aan de installatie reduceren (tevens ten behoeve waterveiligheid);
 - softwarematig: aansluiting stormprotocol waterschap Scheldestromen;
 - richtlijn waterbeheer t.b.v. de ecologie;
 - onderhoudsplan, ARBO.

Het nemen van deze maatregelen zal ertoe leiden dat er een robuuste installatie staat, die op dit moment (peildatum december 2020) zal voldoen aan alle eisen en die met de normale onderhoudscyclus en rekening houdend met zeespiegelstijging de waterveiligheid kan waarborgen tot 2073. Een concessie die wel is genomen, is dat het niet lukt om volledig te voldoen aan de van tevoren gestelde eisen aan de ecologie. Echter, de afwijking hierin zit hem met name rondom springtij eb. Tijdens springtij is het niet altijd mogelijk de NAP-0,75m te halen. Dit blijkt echter nauwelijks van invloed op de ecotopen die zijn aangewezen.

8.2 Aanbevelingen

Tijdens de nadere studie is er een aantal zaken naar voren gekomen die tijdens de gebruiksfase mogelijk nog enige aandacht vereisen. Deze onderwerpen zijn in de navolgende subparagrafen beschreven.

8.2.1 Bewegingswerken

Het huidige onderhoudsplan van de bewegingswerken en de besturing van de getijdenduiker passen niet binnen de randvoorwaarden die nodig zijn voor de ontwikkeling van de getijdennatuur in Waterdunen. Een op maat gemaakt onderhoudsplan waarbij bij groot onderhoud de getijdenduiker niet langdurig uit bedrijf hoeft is goed mogelijk, door parallel opbouw van de nieuwe installatie, van tevoren uitgebreid testen en voor een kort omschakelmoment zorgen. Rekening houdend met het seizoen bij de ombouw zou de ecologie ook ten goede komen.

Om langdurige uitval van de duiker te voorkomen in geval van storingen, dient het de aanbeveling om een inventarisatie te doen van de onderdelen met een kritische levertijd. Zorgen voor voldoende reservedelen of zorgen voor een alternatieve oplossing in geval van storing door uitval van een onderdeel met lange levertijd kan langdurige uitval voorkomen.

8.2.2 Terugslagkleppen gemaal

De diverse componenten van het gemaal zijn aan de hand van de door het waterschap aangeleverde documentatie op hoofdlijnen beschouwd. De resultaten hiervan zijn in § 5.4.2 weergegeven. Uit de beschouwing is naar voren gekomen dat er geen vermoeiingsberekening beschikbaar is van de terugslagklep. Wij adviseren op dit punt nader te onderzoeken. De vermoeiingsberekeningen zijn nodig voor de beoordeling van dijktraject 32-1 als geheel.

8.2.3 Aangroei mosselen, in- en uitstroom van water

De aangroei van mosselen en andere sessiele organismen aan de binnenzij en openingen van de getijdenkokers, kan de in- en uitstroom van water sterk beïnvloeden en daarmee de natuurdoelen van Waterdunen in gevaar brengen. Uit de verschillende modelsimulaties van de waterstand in Waterdunen is gebleken dat de snelheid waarmee het water in en uit Waterdunen kan stromen bepalend is voor de getijdennatuur in Waterdunen en het behalen van de natuurdoelen. De effecten van een beperking van de debieten is het duidelijkst zichtbaar gemaakt in de vergelijking van een 1- en 2-kokerbedrijf met de beoogde situatie en nieuwe situatie (Hoofdstuk 7.4, Figuur 7-16, Figuur 7-17 en Tabel 7-4). Wanneer de capaciteit van de duiker met 33% wordt beperkt (2-kokerbedrijf), is de duiker niet meer in staat om de gewenste waterstanden bij springtij te halen (NAP+0,68m en NAP-0,50m i.p.v. NAP+0,75m en NAP-0,75m). Hierdoor treden er aanzienlijke verschuivingen op binnen de ecotopenverdeling en wordt het areaal met schorren en slikken met enkele tientallen hectaren verkleind. Daarnaast overstromen de vogelbroedeilanden in dit scenario onvoldoende, waardoor zich ratten op de eilanden kunnen huisvesten en de vegetatie zich zal ontwikkelen, wat het broedsucces niet ten goede komt. Een dergelijk scenario met 33% reductie in capaciteit is niet ondenkbaar wanneer zich in de kokers en rond de openingen erg veel mosselen vestigen en ontwikkelen. Niet alleen beperkt de aangroei de diameter van de koker, maar ook de ruwheid van het oppervlak wordt aanzienlijk verhoogd, waardoor het water meer weerstand ondervindt en er dus langzamer water door de koker stroomt.

Gedurende het opstellen van dit rapport is uit eerste observaties gebleken dat zich rond de kokeropening en ook in de koker veel jonge mosselen vestigen. Deze ontwikkeling is buiten de scope van dit rapport gebleven en bij het verkrijgen van de modelresultaten en daaraan verbonden conclusies is derhalve ook geen rekening gehouden met toenemende beperkingen van de wateruitwisseling door de aangroei van mosselen en andere organismen. Bij verdere ontwikkeling van de jonge mosselaangroei en/of andere organismen, kan dit de resultaten en conclusies in negatieve zin veranderen. Wij dringen er daarom op aan deze ontwikkeling nauwlettend in de gaten te houden door middel van monitoring en alvast na te denken over mogelijke manieren om de aangroei te verwijderen en rekolonisatie te voorkomen.

8.2.4 Storingsprotocol en geautomatiseerde herstart

De richtlijn voor ecologisch waterbeheer (zoals vermeld in hoofdstuk 7.2.4) dient geïmplementeerd te worden in het gebruik en onderhoud van Waterdunen, evenals wanneer bij stormcondities, storingen en reparaties het normaal functioneren van de getijdenduikers wordt beperkt. Bij een storing zullen namelijk de schuiven op eigen gewicht zakken, omdat deze anders stil komen te hangen met alle gevolgen voor de waterveiligheid van dien. Het is daarom van groot belang dat bij onvoorziene sluitingen van de getijdenduikers de herstart van het normaal functioneren van de duikers zo snel mogelijk wordt geïnitieerd, om de negatieve ecologische gevolgen te beperken. Met name in het weekend en speciaal gedurende het voorjaar-zomer kunnen de gevolgen van een storing groot zijn. Het opstellen en implementeren van een storingsprotocol en geautomatiseerde herstart zijn aanbevelingen die het risico op langdurige sluiting van de getijdenduikers aanzienlijk verkleinen.

8.2.5 Instandhouding rand Waterdunen

Momenteel (peildatum december 2020) heeft de omliggende kade van Waterdunen nog geen verplichtingen tot instandhouding. Wij bevelen aan om de omliggende kade een verplichtingen tot instandhouding te geven. Deze maatregel heeft weliswaar geen directe invloed op de waterveiligheid, maar is wel nodig om te voldoen aan de waterveiligheid tot tenminste 2073. Tevens bevelen wij aan om de set eisen (o.a. hoogte-, ligging en kade opbouw en eventuele andere bepalingen voor het gebruik) behorend bij deze niet-constructieve maatregel en de bijbehorende afspraken tussen de provincie Zeeland, het waterschap Scheldestromen en de gebruikers notarieel vast te leggen. De precieze invulling van deze afspraken zal in een later stadium volgen, maar de omliggende kade zal aan de volgende eisen dienen te voldoen:

- de kade dient een hoogte-eis te krijgen van NAP+1,1m;
- de kade dient een bekledingseis te krijgen overeenkomstig met de specifieke situatie (hetgeen wat er nu ligt);
- de erosiebestendigheid dient te worden gegarandeerd overeenkomstig met grasbekleding met tenminste een open zode. Deze kwaliteit dient gegarandeerd te worden tot tenminste 1 meter van de kaderand (aan de binnenkant van Waterdunen).

Bijlage

A1. Referenties

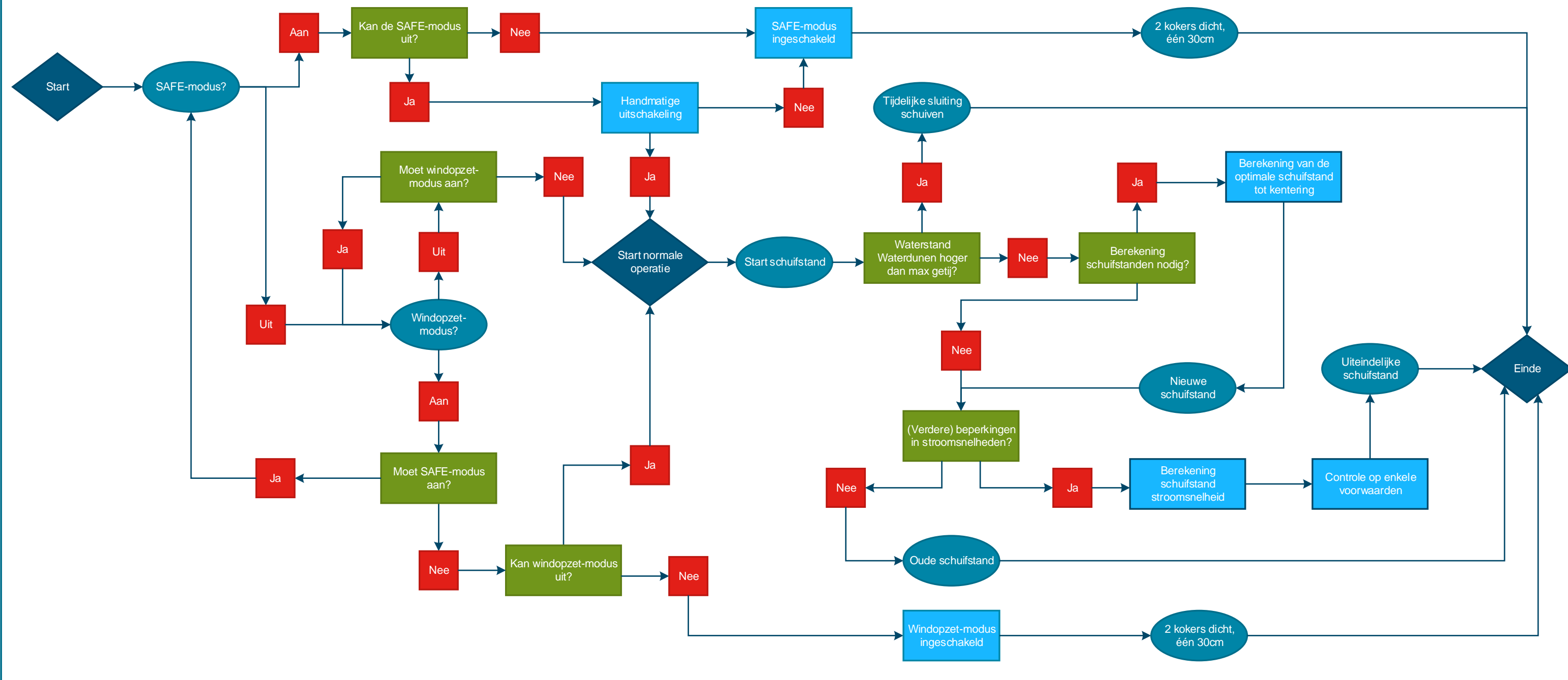
Referenties

- Dieleman, R. (2020, 7 9). Email contact Robin Dieleman. (M. Schoemaker, Interviewer)
- ENW. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*.
- Erbisti, P. C. (2004). *Design of hydraulic gates*. Paulo C.F. Erbisti.
- Groen, B. R. (2013). *Ontwerptekeningen afsluitbare dubbele koker Puijendijk*. Buro Ruimte & Groen.
- Istimewa. (2019). *Gebruikerhandleiding getijdenduiker Waterdunen (17-09-2019; P043271)*. Richard Bloekpoel.
- Kenniscentrum InfoMil. (2020, 12 9). *Normen voor wateroverlast*. Opgehaald van Kenniscentrum InfoMil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/thema-s/wateroverlast-0/normen-wateroverlast/>
- NEN6786:2001. (2001). *NEN 6786:2001: Voorschriften voor het Ontwerp van Beweegbare Bruggen*. Amsterdam: NEN.
- RHDHV. (2020). *Getijdenduiker Waterdunen; Opmerkingen bewegingswerken schuiven*. Goes: HaskoningDHV Nederland B.V.
- RHDHV. (2020). *Notitie stormprotocol Waterdunen (concept definitief)*.
- RHDHV. (2020). *Waterdunen veilig & functioneel, T&PBG8389-101-100/R001F0.2*.
- RHDHV. (2020). *Waterdunen veilig & functioneel; Oplossingen voor waterveiligheid en waterbezwaar*. Goes: HaskoningDHV Nederland B.V.
- RHDHV. (2020). *Waterdunen: opmerkingen op de huidige installatie*. Goes: HaskoningDHV Nederland B.V.
- Rijkswaterstaat. (2005). *NEN 06000:2005: Eisen voor hydraulische bewegingswerken*. Amsterdam: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2019). *Standaard faalkansen voor frequent sluitende keermiddelen*.
- Rozing, A. (2017). *Onderbouwing kansverdeling kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4*. Deltares.
- Svasek. (2020). *Eindrapport monitoring bodembescherming Waterdunen*.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1994). *Krachten op puntdeuren en draaideuren (onderdeel deurschuiven)*. Amsterdam: Waterloopkundig Laboratorium.
- Waterwet. (2017, 1 1). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017*. Opgehaald van Nederlands wetboek: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0039040/>
- Zeeland, P. (2018). *Waterbeleid Zeeland*. Opgehaald van Website provincie Zeeland: <https://www.zeeland.nl/water/waterbeleid>

Bijlage

A2. Functiediagramm aansturing schuiven getijdenduiker

Bijlage A2: Functiediagram aansturing schuiven getijdenuiker



Legenda

- Groene vierkanten:** vraag die gesteld kan worden/voorwaarden waaraan dient te worden voldaan
- Blauw ovaal:** status in het systeem (bijvoorbeeld de schuifstand of dat SAFE-modus aan of uit staat)
- Lichtblauw vierkant:** actie die plaatsvindt n.a.v. een berekening of handmatige invoer

SAFE-modus

<p>Moet de SAFE-modus aan?</p> <p><i>Als aan de volgende conditie wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Waterstand Westerschelde > NAP+3,3m 	<p>Kan de SAFE-modus uit?</p> <p><i>Als aan de volgende conditie wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Waterstand Westerschelde < NAP+3,3m
<p>SAFE-modus ingeschakeld</p> <p><i>De schuiven worden als volgt ingesteld:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Sluiting beide schuiven van twee kokers Opening beide schuiven van één koker op de snijgrens: 30cm 	<p>Handmatige uitschakeling</p> <p>Normale operatie kan alleen hervat worden vanuit SAFE-modus indien normale operatie handmatig wordt ingeschakeld</p>

Windopzet-modus

<p>Moet windopzet-modus aan?</p> <p><i>Als aan alle volgende condities wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Meer dan 1m windopzet gemeten Opkomend getij Westerschelde Voorspeld getij Westerschelde > NAP+2,0m <p><i>Of als aan deze conditie wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Handmatige overschrijding 	<p>Kan de windopzet-modus uit?</p> <p><i>Als aan alle volgende condities wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Afgaand water Westerschelde Minder dan 1m windopzet gemeten Waterstand Westerschelde lager dan Waterdunen 	<p>Windopzet-modus ingeschakeld</p> <p><i>De schuiven worden als volgt ingesteld:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Sluiting beide schuiven van twee kokers Opening beide schuiven van één koker op de snijgrens: 30cm
---	--	--

Normale operatie

<p>Waterstand Waterdunen hoger dan max getij?</p> <p><i>Als aan alle volgende condities wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Waterstand in Waterdunen is hoger dan vloed in het aankomende wenselijke getij Waterstand in de Westerschelde is hoger dan in Waterdunen (uittlaten nog niet mogelijk) 	<p>(Verdere) beperkingen in stroomsnelheden?</p> <p><i>Als aan de volgende conditie wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Het debiet wat ontstaat is hoger dan het toelaatbare debiet ivm de stroomsnelheden 	<p>Controle op enkele voorwaarden</p> <p><i>De nieuwe schuifstand wordt op het volgende gecontroleerd en zonodig aangepast:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Maximale schuifstand van NAP-0,5m Minimale verplaatsing van 9cm (indien minder wordt de schuif niet verplaatst) Snijgrens van 30cm (indien daarbinnen wordt de schuifstand afgerond op de dichtstbijzijnde waarde, dus 0 of 30cm)
<p>Berekening schuifstanden nodig?</p> <p><i>Als aan tenminste één van de volgende condities wordt voldaan:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Na elke kentering Halverwege de kentering Nadat een "uitzondering" heeft plaatsgevonden en normale operatie dus moet worden hervat <p><i>Deze uitzonderingen zijn:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Nadat de waterstanden Waterdunen hoger zijn dan het max getij. Nadat het windopzet-modus of SAFE-modus wordt uitgeschakeld Een uur nadat beperkingen in stroomsnelheden gedetecteerd zijn 	<p>Berekening van de optimale schuifstand tot kentering</p> <p><i>De volgende berekening wordt uitgevoerd:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Berekening voor iedere schuifstand het verwachte waterstandsverloop in Waterdunen tot aan de eerstevolgende kentering, gegeven de huidige waterstand en het verloop in astronomisch getij op de Westerschelde Bepaling nieuwe schuifstand: de schuifstand die leidt tot een waterstandsverloop in Waterdunen met de kleinste afwijking ten opzichte van het gewenste getij (op basis van kleinste kwadraten) 	<p>Berekening schuifstand stroomsnelheid</p> <p><i>De volgende berekening wordt uitgevoerd</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Berekening laagste te verwachten maximaal toelaatbare schuifstand tot één uur verder, op basis van de huidige waterstand in Waterdunen en het astronomisch getij op de Westerschelde De nieuwe schuifstand is vervolgens de laagst toelaatbare maximale schuifstand, minus 5 cm en tenminste de minimale verplaatsing (9cm) onder de voorgaande schuifstand

Bijlage

A3. Nadere onderbouwing SOBEK-model

Nadere onderbouwing SOBEK-model

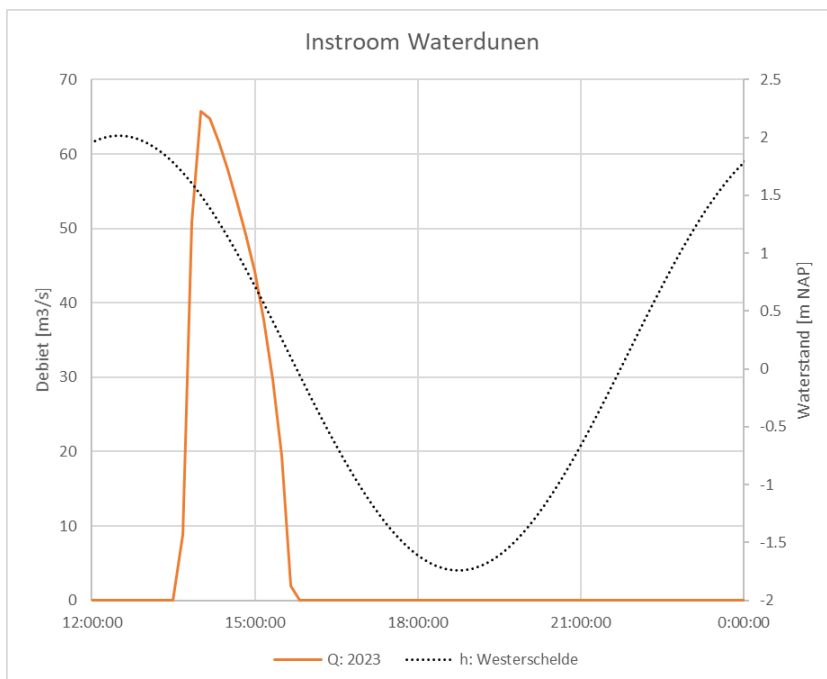
In hoofdstuk 7.5 is al een korte beschrijving gegeven van het waterbezwaar op het achterliggende land. Alleen camping Groede zal wateroverlast ondervinden tijdens het falen van de getijdenduiker. De eerste paar rijen vakantiewoningen kunnen wateroverlast ondervinden met dieptes van 20 tot 40 centimeter, afhankelijk van de situatie. In deze bijlage wordt specifiek ingegaan op de berekeningsresultaten waaruit deze conclusie gevormd is. Tot slot wordt er een overzicht gegeven welke gebieden potentiële knelpunten vormen voor de drainage.

Scenario's

De SOBEK-sommen tonen aan dat het water zich verspreid in het regionale watersysteem. Hierbij vier scenario's doorgerekend en geanalyseerd:

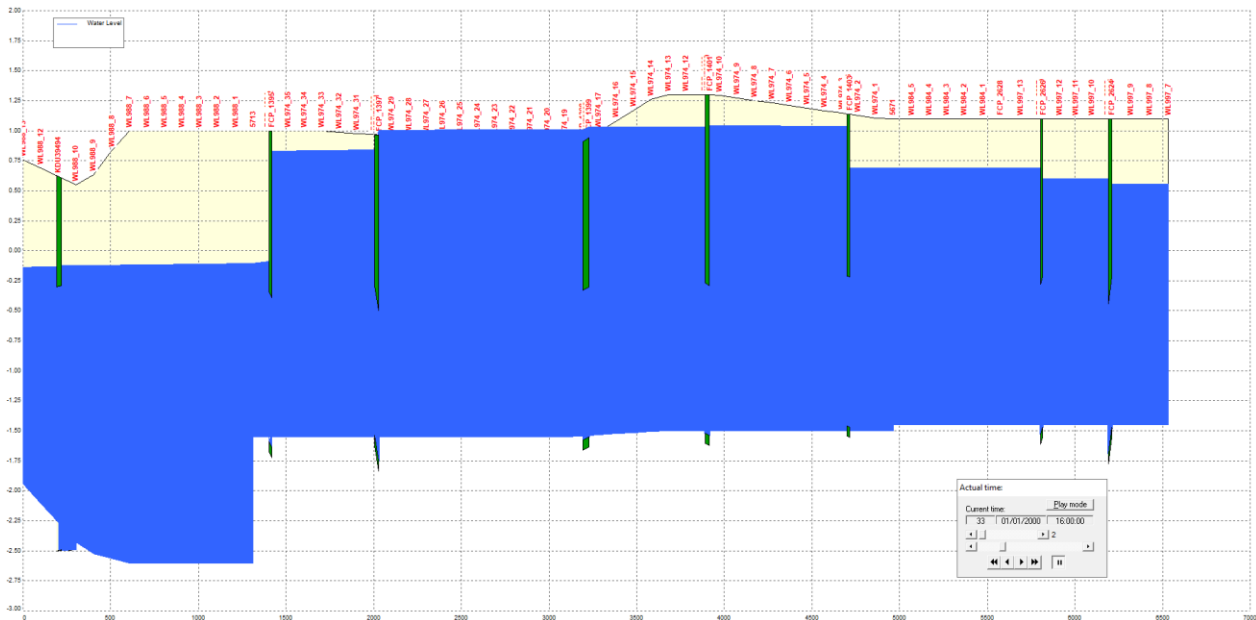
- Geen maatregelen in het regionale watersysteem;
- Terugslagkleppen geplaatst op 2 duikers ten Oosten van Waterdunen. Door terugslagkleppen te plaatsen op deze duikers kan het overtollige water vanuit Waterdunen niet richting Breskens stromen;
- Geen maatregelen samen met uitval gemaal Nieuwe Sluis;
- Geen maatregelen, maar dan met de aanname dat na falen de getijdenduiker gesloten wordt na 2 getijdencycli met waterbezwaar.

Het volume dat via Waterdunen het regionale watersysteem instroomt komt overeen met 330.000 m³, wat representatief is voor de situatie in 2073, of een situatie met een 10x hogere faalkans van de getijdenduiker in 2023. Bij hoogwater op zee stroomt, met een vertraging, Waterdunen vol. De maximale waterstanden in Waterdunen zijn dus iets later dan de maximale waterstanden op de Westerschelde en daarmee ook de instroom naar het regionale watersysteem. In Figuur 8-1. zijn de waterstanden en de instroom in het regionale watersysteem te zien. In het scenario met 2 getijdencycli met waterbezwaar uit Waterdunen wordt tweemaal een identiek volume van 330.000m³ toegepast.



Figuur 8-1. Instroom vanuit Waterdunen ten opzichte van waterstanden in de Westerschelde.

Het waterbezwaar uit Waterdunen is verdeeld over het omringende watersysteem zodat er een min of meer uniforme, realistische waterstand wordt bereikt. Daarbij moet worden opgemerkt dat de waterstanden richting gemaal Nieuwe Sluis natuurlijk lager worden (Figuur 8-2.).



Figuur 8-2. Waterstanden na falen van de getijdenduiker in het watersysteem dat Waterdunen omringt. Links: nabij gemaal Nieuwe Sluis, rechts: nabij Droompark Schoneveld.

Verhoging waterstand

Doordat het waterbezwaar uit Waterdunen verspreid over het regionale systeem nemen de waterstanden toe. In Figuur 8-3. tot en met Figuur 8-6. is te zien hoeveel de waterstanden stijgen en hoe ver de invloed van het waterbezwaar rijkt.

De belangrijkste bevindingen zijn:

- Het invloedsgebied beslaat ongeveer 80km²;
- De waterstanden in het Zwarte Gat stijgen tijdens de volgende scenario's ongeveer:
 - Geen maatregelen: 0.4m;
 - Terugslagkleppen: 0.4m;
 - Uitval gemaal: 0.6m;
 - 2 getijdencycli: 0.5m.
- De stijging in de ringsloot is meer dan 100 cm. Dit is echter te verwachten: de ringsloot vult zich tot hetzelfde niveau als de waterstand in Waterdunen. De dijk aan de buitenzijde van de ringsloot is voldoende hoog, zodat het water daar niet overloopt.

Op basis van deze bevindingen en onderstaande figuren wordt geconcludeerd dat de terugslagkleppen geen nadelige invloed hebben op de rest van het systeem. Wat verder opmerkelijk is, is dat de waterstanden achter de zuidelijke terugslagklep toch stijgt vanuit opstuwing in het systeem zelf. Op basis daarvan kan geconcludeerd worden dat de terugslagkleppen weinig invloed hebben op de waterstanden, maar wel de zoutbelasting richting Breskens stoppen.



Figuur 8-3. Verhoging waterstanden als gevolg van waterbezwaar uit Waterdunen zonder maatregelen.



Figuur 8-4. Verhoging waterstanden als gevolg van waterbezwaar uit Waterdunen met terugslagkleppen op 2 duikers ten oosten van Waterdunen.



Figuur 8-5. Verhoging waterstanden als gevolg van waterbezwaar uit Waterdunen zonder maatregelen en uitval van het gemaal Nieuwe Sluis.



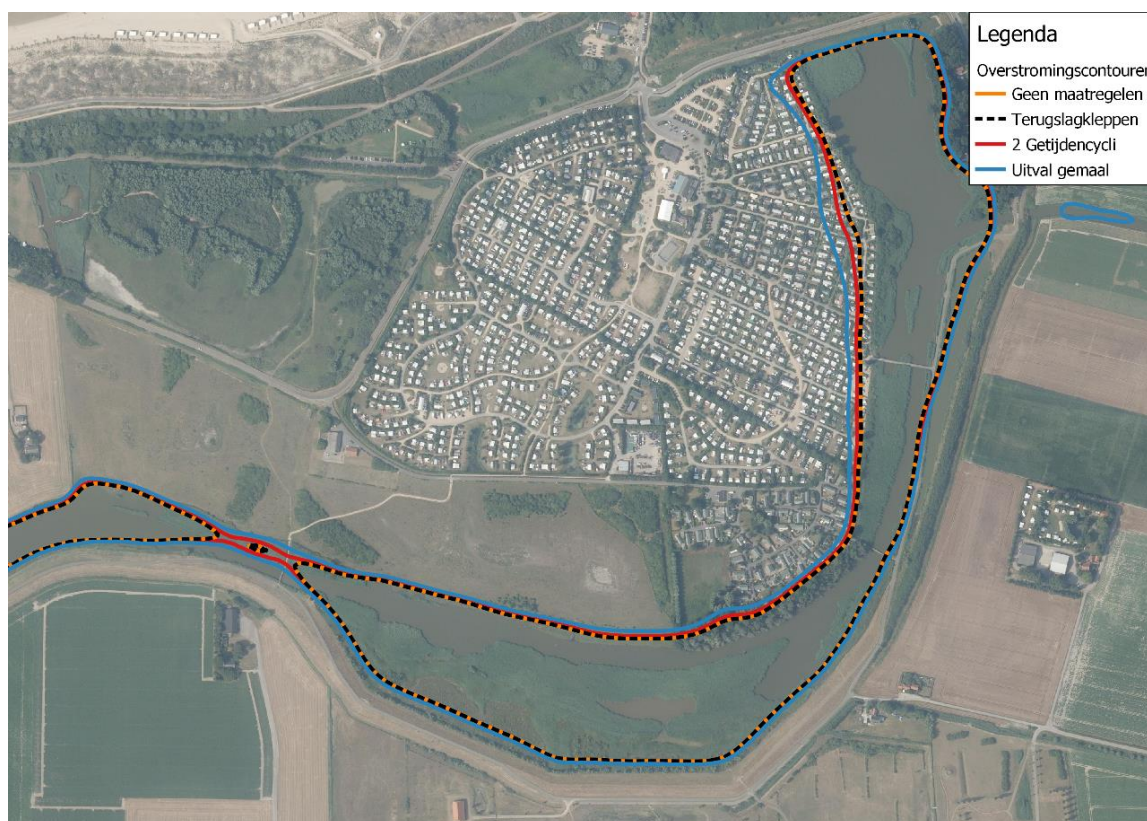
Figuur 8-6. Verhoging waterstanden als gevolg van waterbezwaar uit Waterdunen gedurende 2 getijdencycli zonder maatregelen.

Overstromingscontouren

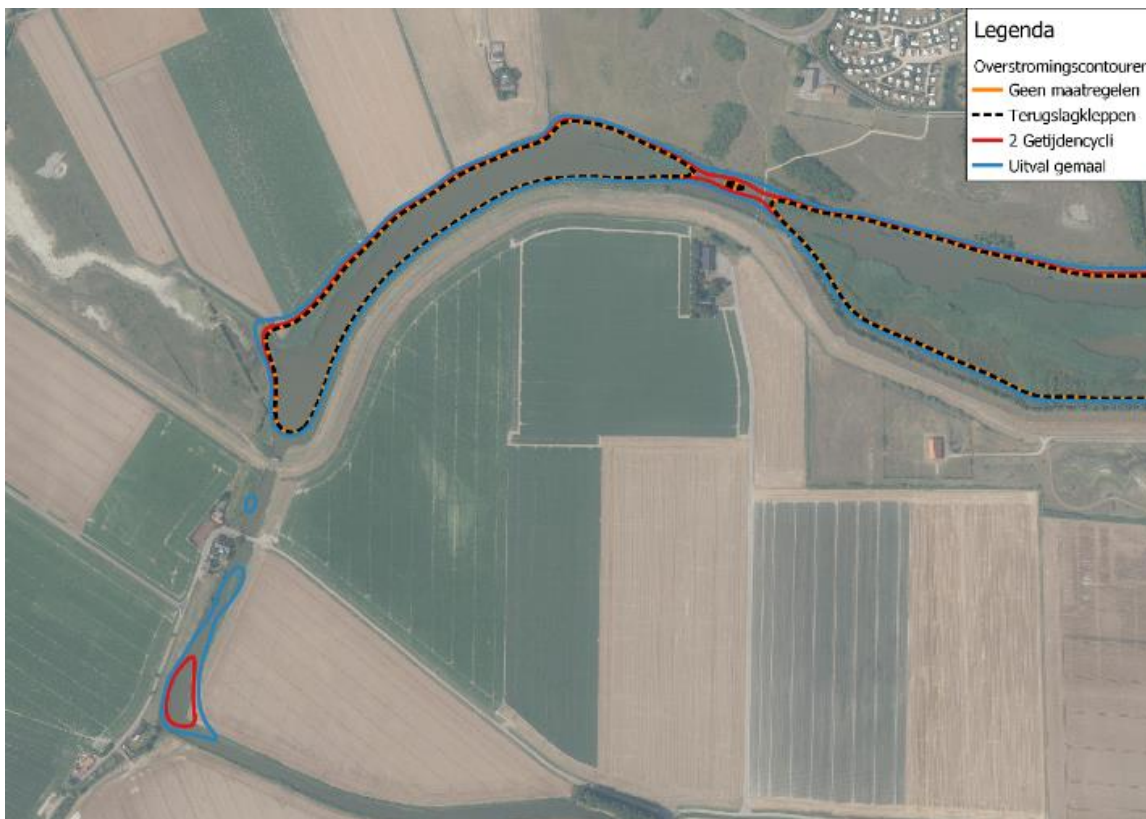
De locaties waar in de berekeningsresultaten de waterstand boven de oevers uitstegen zijn nader onderzocht. Voor elk van deze locaties is gekeken hoe ver het water kan stromen op basis van de maximale waterstand en het hoogtemodel AHN3. In Figuur 8-7 tot en met Figuur 8-11. zijn de overstromingscontouren ter plaatse van deze locaties weergegeven. Er kan geconcludeerd worden dat alleen ter plaatse van camping Groede wateroverlast plaats vindt, zie Figuur 8-7. Ter plaatse van de overige locaties zijn het slechts oevers die onderlopen.

In Figuur 8-12. tot en met Figuur 8-15. zijn de contouren van de waterdieptes weergegeven per scenario. Het interval tussen 2 waterdiepte contouren komt overeen met 10cm. De eerste rijen vakantiewoningen kunnen wateroverlast ondervinden. De maximale waterdieptes per scenario zijn daarbij:

- Geen maatregelen: 0.2m;
- Terugslagkleppen: 0.2m;
- Uitval gemaal: 0.4m;
- 2 Getijdencycli: 0.3m.



Figuur 8-7. Overstromingscontouren van de verschillende scenario's ter plaatse van camping Groede



Figuur 8-8. Overstromingscontouren van de verschillende scenario's ter plaatse van het Zwarte gat



Figuur 8-9. Overstromingscontouren van de verschillende scenario's ter plaatse van de Puijendijk



Figuur 8-10. Overstromingscontouren van de verschillende scenario's ter plaatse van de Baarzandse creek



Figuur 8-11. Overstromingscontouren van de verschillende scenario's ter plaatse van de Henricusdijk



Figuur 8-12. Contouren van de waterdiepten als gevolg van water afkomstig uit Waterdunen voor het scenario: Geen Maatregelen



Figuur 8-13. Contouren van de waterdiepten als gevolg van water afkomstig uit Waterdunen voor het scenario: Terugslagkleppen



Figuur 8-14. Contouren van de waterdiepten als gevolg van water afkomstig uit Waterdunen voor het scenario: Uitval Gemaal



Figuur 8-15. Contouren van de waterdiepten als gevolg van water afkomstig uit Waterdunen voor het scenario: 2 Getijdencycli

Hinder drainage

Om inzicht te krijgen welke drainagesystemen potentieel hinder ondervinden van een verhoogde waterstand als gevolg van de inloop vanuit Waterdunen is onderstaande analyse uitgevoerd.

Op basis van het maaiveld, draandieptes en de SOBEK resultaten zijn de locaties met potentiële hinder voor de drainage bepaald. Daarbij is uitgegaan van de volgende aannames:

- Het maaiveld ligt op 1 m NAP;
- De drains liggen 1.2 m beneden maaiveld;
- De drains liggen dus op -0.2 m NAP.

Om aangemerkt te worden als locatie met potentiële hinder voor drainage moet worden voldaan aan de volgende twee eisen:

- De waterstand stijgt minimaal 0.05 meter als gevolg van inloop uit Waterdunen;
- De waterstand overschrijd -0.2 m NAP.

Voor de locaties die aan bovenstaande eisen voldoen is aangegeven hoe lang de waterstanden boven -0.2 m NAP uitkomen. In Figuur 8-16 tot en met Figuur 8-19 is te zien om welke locaties het gaat. De maximale duur van hinder voor drainage is zo'n 24 uur, maar in de meeste gevallen gaat het om een aantal uren.



Figuur 8-16. Locaties met potentiële hinder voor drainage met tijdsindicatie voor een situatie zonder maatregelen



Figuur 8-17. Locaties met potentiële hinder voor drainage met tijdsindicatie voor een situatie met terugslagkleppen



Figuur 8-18. Locaties met potentiële hinder voor drainage met tijdsindicatie voor een situatie zonder maatregelen en uitval van het gemaal Nieuwe Sluis



Figuur 8-19. Locaties met potentiële hinder voor drainage met tijdsindicatie voor een situatie gedurende 2 getijdencycli zonder maatregelen

Bijlage

A4. Geotechnische notitie

Inleiding

Vanaf 2012 is het natuur- en recreatiegebied Waterdunen aangelegd. De inrichting omvat een getijdenkrekengebied dat gevoed wordt met zoutwater uit de Noordzee. Het zeewater stroomt via een duiker het gebied in- en uit met het dagelijks getij. Doordat de inlaat beperkt is, is er sprake van een gedempte getijdegolf in Waterdunen. Het gebied wordt omgrensd door middel van een verhoging van het maaiveld tot minimaal NAP +1,1 m. Deze “kade” is alleen daar aanwezig waar het oorspronkelijk maaiveld beneden NAP +1,1 m was gelegen, de ophoging bedraagt maximaal 0,3 m. De “kade” heeft in combinatie met de kwelsloot die aan de binnenzijde ligt, een waterkerende functie. Deze waterkerende functie is alleen noodzakelijk indien de getijdenduiker faalt en er waterstanden op gaan treden boven de voorgenomen streefpeilen. In normaal gebruik zijn de maximale springvloed waterstanden NAP +0,75 m, terwijl het oorspronkelijke maaiveld langs de randen altijd hoger ligt. Er is nog geen normering (IPO-klasse) vastgesteld voor deze kade.

Omdat de kade bij falen van de getijdenduiker en waterstanden boven de NAP +0,75 m belast kan worden door ofwel hoogwater in het gebied Waterdunen, ofwel door het overlopen van de kade, is gevraagd of de stabiliteit beoordeeld kan worden. In voorliggend document zijn de resultaten van deze beoordeling opgenomen.

Het doel van deze notitie is het vaststellen van de huidige stabiliteit van de kade onder maatgevende omstandigheden, indien falen van de duiker plaatsvindt.

Uitgangspunten

Voor de beoordeling van de stabiliteit is ervan uitgegaan dat de kade een functie heeft of krijgt als overige waterkering. De beoordeling is uitgevoerd aan de hand van de “Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen (STOWA, 2015). In dit kader zijn uitsluitend de faalmechanismen stabiliteit (macrostabiliteit, piping en microstabiliteit) beoordeeld. De hoogte en erosiebestendigheid van de bekleding zijn elders reeds beoordeeld.

De berekeningen ten behoeve van macrostabiliteit zijn uitgevoerd met behulp van DGeoStability, versie 18.1, model Bishop met gedraineerde parameters.

De bodemopbouw ter plaatse van de kade is afgeleid uit de beschikbaar gestelde boringen. Aan de hand van de boorbeschrijvingen, zijn de sterkteparameters ingeschat op basis van tabel 2b uit NEN-EN9997: 2016. De geschematiseerde bodemopbouw en geotechnische parameters (rekenwaarden) zijn opgenomen in Tabel 6.

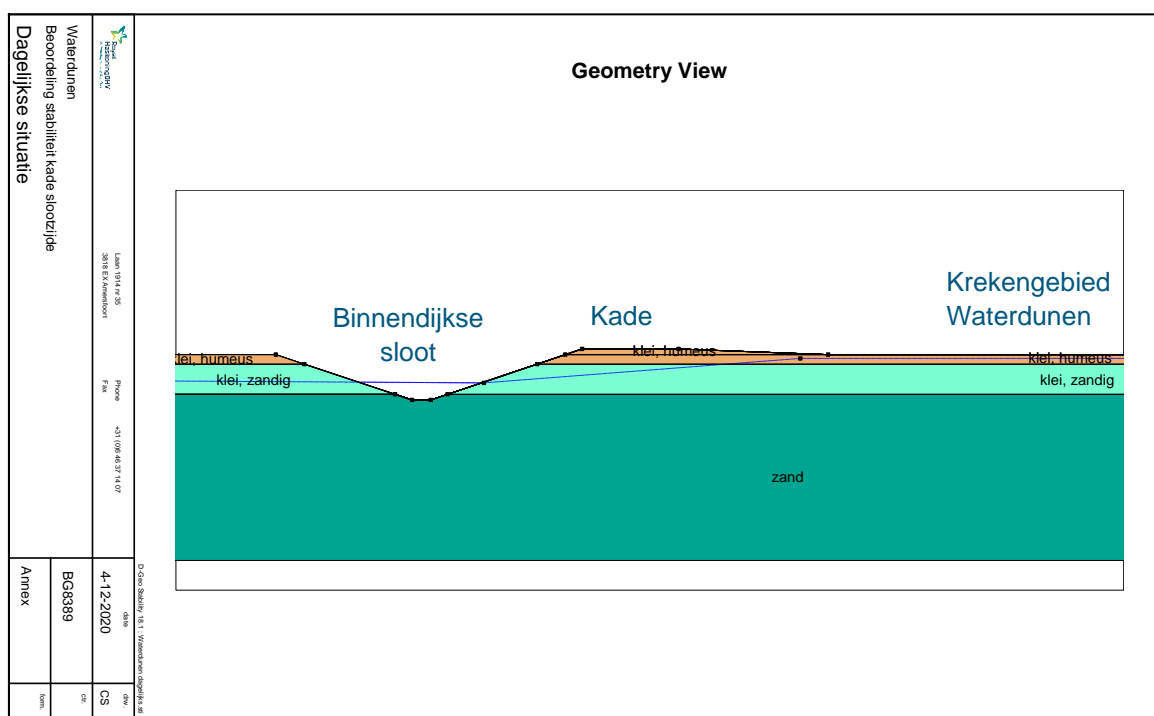
Tabel 6: Rekenwaarden sterkte-eigenschappen

Grondsoort [beschrijving]	Bovenkant laag [m t.o.v. NAP]	$\gamma_{\text{veld}}/\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m ³]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]
Klei, zwak humeus	maaiveld	17/17	6,67	14,72
Klei, zwak siltig, zwak tot matig zandig	+0,5 à +0,3	18/18	3,33	19,04
Zand, zwak siltig en/of kleiig	0 à -0,5	18/20	0	23,45

Met: $\gamma_{\text{veld}}/\gamma_{\text{sat}}$ = volumegewicht, veldvochtig en verzadigd
 c' = cohesie
 ϕ' = hoek van inwendige wrijving

Het geschematiseerde profiel heeft de volgende kenmerken (zie Figuur 20):

- Oorspronkelijk maaiveld ligt op NAP +0,9 à +1,0 m;
- Kade heeft een kruinhoogte van NAP +1,1 à +1,2 m en bestaat uit gebiedseigen klei;
- De kruinbreedte is tenminste 5 m;
- Sloottaluds hebben een taludhelling⁴ van 1:3 (v:h);
- Bodemhoogte van de sloot bedraagt NAP -1,5 m (oost, zuid en west) en NAP -2,6 m (watergangen Walendijk). Opgemerkt wordt dat de sloottaluds ter plaatse van de Walendijk flauwer kunnen zijn (1:5), maar gerekend is vooralsnog met 1:3 (dit is een conservatieve aanname).



Figuur 20: Geschematiseerd profiel kade Waterdunen

De doorgerkende situaties zijn opgenomen in Tabel 7.

Tabel 7: Dagelijkse en maatgevende situaties kade

Situatie [beschrijving]	Peil Waterdunen [m NAP]	Peil sloot [m NAP]	Toelichting
Dagelijks	+0,5	-0,6/-0,9	Rekening is gehouden met vernatting Waterdunen
Hoogwater	+1,2	-0,6/-0,9	Water staat tegen de kade
Overlopen	+1,2	+0,9	De sloot is gevuld en de kade verzadigd
Verzadigd talud	+0,5	-0,6	De kade is volledig verzadigd en de sloot leeg gepompt

⁴ De taludhellingen van 1:3 zijn verstrekt door Provincie Zeeland. Omdat uit de AHN gegevens blijkt dat de sloottaluds lokaal een taludhelling van 1:2 hebben, is een gevoeligheidsberekening op de invloed van de taludhelling op de berekende stabiliteit uitgevoerd.

Opgemerkt wordt dat het optreden van overlopen (waterstand in Waterdunen NAP +1,1 m) pas na het optreden van de zeespiegelstijging tot 2073 voorzien is met een jaarlijkse kans van 1/1.200. In de huidige situatie is er bij falen van de duiker (1/1.200 per jaar) sprake van een maximale waterstand van NAP +1,02 m.

Omdat er aan de buitenzijde (Waterdunen) nauwelijks sprake is van een talud, is de stabiliteit van deze zijde niet beschouwd. Onderstaande berekeningen hebben uitsluitend betrekking op de binnenwaartse stabiliteit van de kade (slootzijde).

Het faalmechanisme piping is beoordeeld aan de hand van het criterium van Bligh. Hierbij is uitgegaan van fijn zand met een creepfactor van $c_w = 18$.

Bij de beoordeling van het faalmechanisme microstabiliteit is rekening gehouden met de beschoeiing die net boven de waterlijn (NAP -0,5 m) aanwezig is. Deze beschoeiing bestaat uit houten palen met een lengte van 2,5 m waartussen een grondlicht doek is aangebracht (bron Provincie Zeeland).

Resultaten stabiliteitsanalyse

De resultaten van de berekeningen voor het faalmechanisme macrostabiliteit zijn opgenomen in Tabel 8. In bijlage 1 zijn de grafische weergaven uit DGeoStability opgenomen. Omdat er geen IPO klasse is vastgesteld, is er geen minimaal benodigde stabiliteitsfactor beschikbaar (deze hangt samen met de overstromingsnorm van een kade). Vooralsnog is daarom uitgegaan van $S.F. \geq 0,9$, behorend bij een overstromingsfrequentie van 1/100 per jaar. (IPO klasse 3). Er is geen rekening gehouden met een schematiseringsfactor, omdat gerekend is met conservatieve scenario's.

Tabel 8: Berekende stabiliteit (S.F.) macrostabiliteit

Situatie [beschrijving]	S.F. [-]	Toelichting
Dagelijks	1,48	
Hoogwater	1,42	
Overlopen	2,07	De stabiliteit is hoger door tegendruk slootwater
Verzadigd talud	1,15	Dit is de meest conservatieve situatie voor de kade
Dagelijks Walendijk	1,42	Hierin is het effect van de diepere slootbodem beoordeeld
Verzadigd talud Walendijk	1,13	Ook voor deze locatie is deze situatie maatgevend
<i>Onderstaand zijn enkele gevoeligheidsberekeningen opgenomen</i>		
Verzadigd talud zand	1,01	Bij een dunnere kleilaag is de stabiliteit lager
Verzadigd talud 1:2	0,93	Dit is een gevoeligheidsanalyse op de taludhelling van de sloot

Voor de beoordeling op het faalmechanisme piping is ervan uitgegaan dat de krekens insnijden in de zandondergrond. De afstand tussen het in- en uittredepunt in relatie tot het verhang over de kade ($\Delta H_{\max} = 1,8$ m bij een tot kruinhoogte gevulde situatie in Waterdunen), is bepalend voor het al dan niet optreden van een pipingrisico. Omdat de afstand tussen de kreek (intredepunt) en de sloot (uittredepunt) niet exact bekend is, is berekend wat de minimale afstand (L_{\min}) is waarbij nog geen risico op piping bestaat. Volgens het criterium van Bligh bedraagt deze afstand $L_{\min} = \Delta H_{\max} * c_w$. Bij een creepfactor van 18 bedraagt deze afstand derhalve minimaal 32,4 m.

Door de provincie aangegeven dat een indicatieve afstand van circa 75 m is aangehouden als afstand, bij deze afstand is er daarom geen sprake van een pipingrisico. Opgemerkt dat zowel de berekening van het maximale verhang als de gehanteerde creepfactor zeer conservatief zijn. Dit is dus een veilige benadering.

Microinstabiliteit kan optreden in het zandige ondertalud van de sloot door uittredend water uit het talud. Omdat in het kader van het beheer en onderhoud ook rekening is gehouden met het voorkomen van afkalven van het talud door golfwerking in de sloot, is boven de waterlijn een beschoeiing geplaatst. Het risico op het optreden van microstabiliteit wordt hiermee verwaarloosbaar geacht.

Conclusies

Op basis van de analyses voor het faalmechanisme macrostabiliteit wordt geconcludeerd dat de stabiliteit van de sloottaluds onder maatgevende condities voldoet aan de minimaal vereiste stabiliteit voor een IPO klasse 3 kade met een overstromingsfrequentie van 1/100 per jaar. Aangezien de verwachte kans van optreden van de geschematiseerde maatgevende omstandigheden, wordt geconcludeerd dat de stabiliteit van de taluds voldoende is.

Op basis van de pipinganalyse wordt geconcludeerd dat bij een minimale afstand tussen kreek en sloot van tenminste 32,4 m, er geen sprake is van een pipingrisico. Hierbij zijn de meest conservatieve uitgangspunten gehanteerd voor het bepalen van het optredend verhang over de kade.

Op basis van de aangeleverde informatie met betrekking tot de beschoeiing in de sloot, wordt geconcludeerd dat het risico op microinstabiliteit zeer gering is. Opgemerkt wordt dat microinstabiliteit veelal uitsluitend tot schade leidt en niet tot falen van de waterkering.

Al met al wordt geconcludeerd dat de kade met betrekking tot stabiliteit tenminste voldoet aan de eisen aan een secundaire waterkering met IPO klasse 3 (overstromingsnorm 1/100 per jaar).

Stabiliteitsberekeningen

