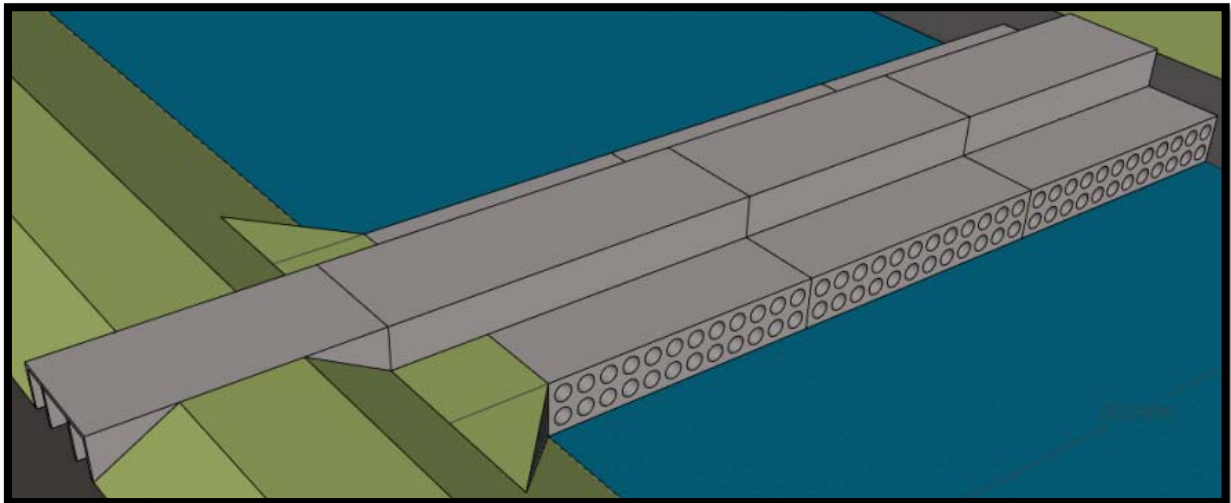


Master of Science Thesis

EEN AANPASBAAR AFVOERCOMPLEX IN DE NIEUWE WATERWEG



Colofon

Student

Naam : K. (Klaas) van Reenen
Studie : Civil Engineering
Master : Structural Engineering
Afstudeerrichting : Hydraulic Structures

Afstudeercommissie

Voorzitter

Naam : Prof. dr. ir. S.N. Jonkman
Faculteit : Civil Engineering and Geosciences
Sectie : Hydraulic Engineering

Dagelijks begeleider

Naam : Ir. W.F. Molenaar
Faculteit : Civil Engineering and Geosciences
Sectie : Hydraulic Structures

Lid

Naam : Dr. ir. drs. C.R. Braam
Faculteit : Civil Engineering and Geosciences
Sectie : Concrete Structures

Universiteit

Naam : Delft University of Technology
Faculteit : Civil Engineering and Geosciences
Adres : Stevinweg 1, 2628 CN Delft

Voorwoord

Met deze masterthesis sluit ik mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit te Delft af. In dit rapport is een ontwerp gemaakt van een afvoercomplex in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg. De afsluiting van de Nieuwe Waterweg is een onderdeel van het Plan Sluizen, dat ontwikkeld is door een zestal ingenieurs onder leiding van ir. Spaargaren. Flexibiliteit is een belangrijk aspect van het afvoercomplex. Dit betekent dat het afvoercomplex aanpasbaar zal zijn voor de gevolgen van de verwachte (klimaat)veranderingen.

Graag wil ik de leden van mijn afstudeercommissie, prof. dr. ir. S.N. Jonkman, ir. W.F. Molenaar en dr. ir. drs. C.R. Braam, bedanken voor hun begeleiding en adviezen tijdens de afstudeerperiode. Dit geldt ook voor oud-lid van mijn afstudeercommissie, ir. A. van der Toorn. Ook wil ik mijn gezin en familie bedanken voor hun ondersteuning en geduld in de achterliggende tijd.

Ouderkerk aan den IJssel, 21 juni 2018

Samenvatting

De Watersnoodramp van 1 februari 1953 was een van de grootste overstromingen in de recente geschiedenis van Nederland. Twintig dagen na de watersnoodramp was er een Deltacommissie geïnstalleerd die adviezen zou geven over de uitvoering van een Deltaplan dat de veiligheid in het Deltagebied zou verhogen. Hoe veilig het gebied ook moest worden, de Nieuwe Waterweg moest open blijven vanwege het economische belang van de havens van Rotterdam.

Voor de veiligheid is het noodzakelijk om de waterkeringen voortdurend te onderhouden en regelmatig te versterken. Die noodzaak wordt alleen maar groter door het feit dat de zeespiegel in de toekomst steeds sneller zal stijgen. Op basis van de adviezen van de tweede Deltacommissie (2007) is het Deltaprogramma opgezet met als doel de waterveiligheid in Nederland in de toekomst te waarborgen en waar nodig te verbeteren. De open verbinding van de Nieuwe Waterweg is daarbij een punt van discussie. Binnen het Deltaprogramma, dat jaarlijks verschijnt, wil men nog niet van een afsluiting van de Nieuwe Waterweg weten. Een groep van zes gerenommeerde ingenieurs anticipeert wel op de sluiting van de Nieuwe Waterweg en heeft hiervoor een plan opgesteld, genaamd: Plan Sluizen (of Plan Spaargaren). In de afsluiting moeten ook scheepvaartsluizen en een afvoercomplex komen.

De scheepvaartsluizen moeten de haven van Rotterdam open houden. Dit deel van de afsluiting is diepgaand onderzocht in andere thesis [Dorrepaal, 2016], maar zal ook enigszins in dit rapport meegenomen worden. De focus van het onderliggende rapport zal echter liggen op de ontwikkeling en controle van de technische haalbaarheid van het ontwerp voor een flexibel afvoermiddel in de sluiting van de Nieuwe Waterweg.

In de huidige situatie wordt een deel van het water van de Rijn via de Nieuwe Waterweg afgevoerd naar de Noordzee. Aangezien het water niet via een andere weg afgevoerd kan worden, moet er in de afsluiting een afvoermiddel komen. Dit afvoermiddel moet ervoor zorgen dat de rivierwaterstand achter het complex, in het achterland, zich op een acceptabel niveau bevindt.

Allereerst is de Nieuwe Waterweg, als onderdeel van de Rijn-Maas delta, geanalyseerd en zijn de gevolgen van de klimaatverandering in dit gebied in kaart gebracht. Vervolgens zoomt het rapport in op de afsluiting, sluis- en afvoercomplex dat in de toekomst moet worden aangelegd. De twee belangrijkste eisen aan de afsluiting en het afvoercomplex zijn:

- de afsluiting moet bestand zijn tegen de maatgevende waterstand op zee, inclusief verwachte zeespiegelstijging;
- het afvoercomplex moet op elk willekeurig moment 20% van de maatgevende Rijnafvoer kunnen afvoeren.

Onderzoek naar de locatie van de sluiting en afvoercomplex werd gecombineerd met de beslissing om een groot complex te bouwen waarbij alle onderdelen op een locatie zijn, of om de onderdelen over twee locaties te verdelen. Een locatie voor met alle onderdelen zou worden geplaatst in de Nieuwe Waterweg, ergens stroomafwaarts van de splitsing met de Oude Maas maar stroomopwaarts van de Maeslantkering. Als de onderdelen verdeeld worden over twee locaties, liggen dezen ergens in respectievelijk de Oude Maas, tussen het Hartelkanaal en het Scheur en in de Nieuwe Maas, dichtbij de Beneluxtunnel. Door de vaste diepte van de tunnel kan deze gezien worden als een soort drempel voor de scheepvaart. Hoe verder stroomopwaarts de afsluiting, hoe lager de initiële, operationele en onderhoudskosten van het sluiscomplex zullen zijn, aangezien het maatgevend schip dan kleiner is. Deze kosten zijn bepalend voor de keuze voor de variant bestaande uit twee locaties, hoewel dit de kosten voor het afvoercomplex verhoogt.

Verschillende alternatieven voor het afvoeren van overtollig water uit de Rijn zijn onderzocht en met elkaar vergeleken. Ten slotte is gekozen voor een afvoermiddel waarbij gebruik wordt gemaakt van het venturi-effect. Venturikokers zijn gunstig omdat ze kunnen worden gebruikt in stroming onder natuurlijk verval, en ze verbeteren ook de efficiëntie van pompen die in de venturikoker komen. Door zeespiegelstijging wordt het natuurlijk verval in de toekomst te klein om de vereiste hoeveelheid water af te voeren. Het afvoercomplex zal dan moeten veranderen in een gemaal.

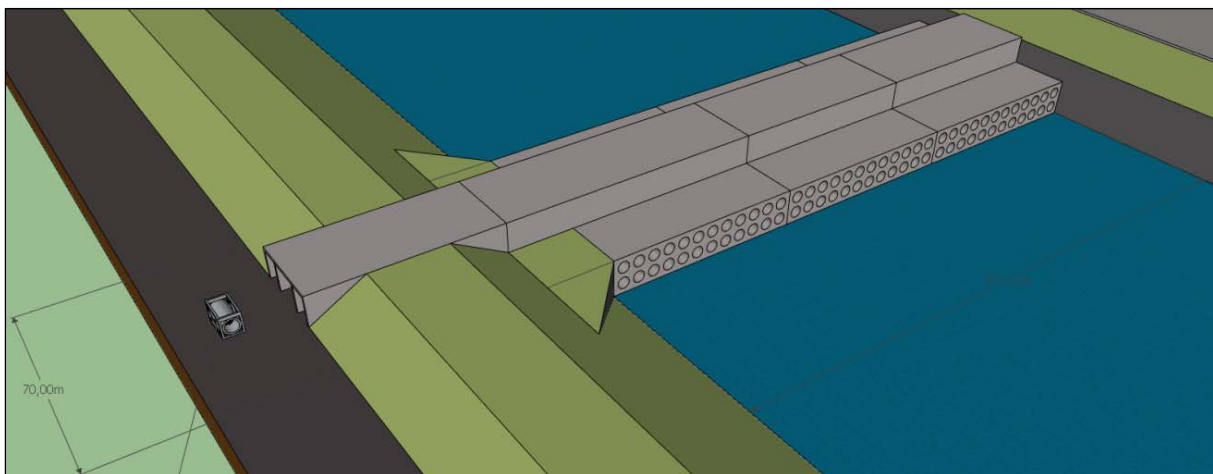
De venturikoker uitgerust met een pomp bepaald het ontwerp van de koker. Het blijkt dat 72 pompen met een capaciteit van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig zijn voor maatgevende rivierafvoer in 2100 (dus in totaal $3600 \text{ m}^3/\text{s}$). Voor de maatgevende afvoer in 2018 zijn geen pompen nodig, omdat de binnenwaterstand onder de maximale waarde blijft. In de situatie dat een gemiddelde rivierafvoer samenvalt met een stormvloed, is afvoeren onder natuurlijk verval mogelijk tot 2100. Echter, in de periode voor 2100 kan het toch nodig zijn enkele pompen in te zetten. Bij een stormvloed en een gemiddelde rivierafvoer zijn in 2018 en 2100 na 14 uur 9 pompen nodig.

De afmetingen van de afvoerconstructie zijn bepaald, rekening houdend met het feit dat de uitwateringssluis in de toekomst in een gemaal moet worden veranderd. De constructie kan worden aangepast door verschillende modules in het midden van de venturikokers te plaatsen. In feite zal de module of het middenstuk in eerste instantie alleen een koker zijn waar later een pomp in geplaatst kan worden. Met behulp van een portaalkraan kunnen alle modules in en uit gehesen en verplaatst worden naar een opslagruimte naast het afvoercomplex. Op deze manier kan het afvoercomplex dus van een spuicomples verandert worden in een gemaal en omgekeerd.

Nadat de totale afmetingen van het afvoercomplex vanuit een hydraulisch oogpunt bepaald zijn, is de stabiliteit van de constructie gecontroleerd. De belastingen die op de constructie werken, werden bepaald voor de verschillende waterstanden in 2018 en 2100. De voorgestelde dimensies voldoen vanuit het oogpunt van stabiliteit.

Er zijn betonberekeningen gemaakt om de afmetingen van de hoofdonderdelen van de afvoerconstructie in beton te controleren. Omdat het grondvlak van de constructie bijna vierkant is, zijn zowel de lengterichting (y-richting, evenwijdig aan de rivieras) als de breedterichting (x-richting, loodrecht op de rivieras) gecontroleerd, ook op torsie-effecten. Dit resulteerde in aannemelijke wapeningspercentages en tekeningen waar de wapening in de constructie geplaatst moet worden.

Het uiteindelijk gepresenteerde ontwerp (Figuur 1) van het afvoercomplex heeft een flexibel karakter en voldoet aan de gestelde eisen.



Figuur 1 - Eindontwerp van het afvoercomplex in de afsluiting

Summary

In recent history of the Netherlands, the flood of February 1st, 1953 was one of the largest floods. A Delta Committee was installed twenty days after the flood, tasked to give advice on the implementation of a Deltaplan that had to increase flood safety in the whole delta area of the Netherlands. The Nieuwe Waterweg had to remain open because of the economic importance of the Port of Rotterdam.

To uphold safety levels, it is necessary to maintain and regularly reinforce the flood defences. This will become more urgent due to future sea level. Based on the advices of the second Delta Committee (2007) the Dutch Delta Approach (NL: Delta Programma) has been set up with the aim of ensuring water safety in the Netherlands in the future and improve it where necessary. The open connection of the Nieuwe Waterweg has become the subject of debate. So far, the annual schemes of the Dutch Delta Approach do not take closure of the Nieuwe Waterweg into account. A group of six renown engineers do anticipate on the closure of the Nieuwe Waterweg and have prepared a scheme for that purpose, called: Plan Sluizen (or Plan Spaargaren). The closure scheme includes provision of navigation locks and a discharge complex.

The navigation locks have to keep the Port of Rotterdam open. This part of the closure complex has been researched in depth in other thesis work [Dorrepaal, 2016], but has to be taken into consideration to some extent in this thesis work as well. However, focus of the underlying report will be on the development of and checking the technical feasibility of the design for a flexible discharge facility in the closure of the Nieuwe Waterweg.

At present a part of the river Rhine water is discharged through the Nieuwe Waterweg to the North Sea. Since the water cannot be rerouted, a discharge facility must be included in the closure complex. The closure-discharge complex in the Nieuwe Waterweg has to maintain the river water level behind the complex, in the hinterland, at an acceptable level.

First, the Nieuwe Waterweg, as a part of the Rhine-Meuse delta has been analysed and the effects of climate change in this area have been mapped out. Subsequently the report zooms in into the closure, lock and discharge complex that has to be constructed in the future. The two most important requirements for the closure and the discharge complex are:

- the closure must be able to withstand the normative water level at sea, including expected sea level rise;
- the discharge complex must be able to discharge a 20% of the normative Rhine discharge at every random moment.

Looking into the location of the closure and discharge complex went hand in hand with deciding whether to construct one large complex accommodating all components at one location, or to divide the components over two locations. A location for all the components together would be positioned in the Nieuwe Waterweg somewhere downstream of the bifurcation with the Oude Maas but upstream of the Maeslant barrier. When dividing the components of the closure complex, the two locations to be considered are somewhere in respectively the Oude Maas, between the Hartel canal and het Scheur, and the Nieuwe Maas, close to the Beneluxtunnel, which has a fixed depth and can be seen as a kind of threshold for shipping. The further upstream the closure the lower the initial, operational and maintenance costs of the lock complex will be since upriver the governing ship to be taken into account is smaller. These costs are decisive for the selecting the two locations alternative, even though this increases the cost for the discharge complex.

Several alternatives for the discharging excess water of the Rhine have been looked into and compared to each other. Finally, a discharge method using Venturi was chosen. Venturi tubes are favourable because they can be used in natural flow conditions, driven by a water head, and also improve the efficiency of pumps constructed into the Venturi tube. In future there will be a time when the natural water head has become too small, due to sea level rise, to discharge the required amount of water. What was a discharge sluice will be changed into a pumping station.

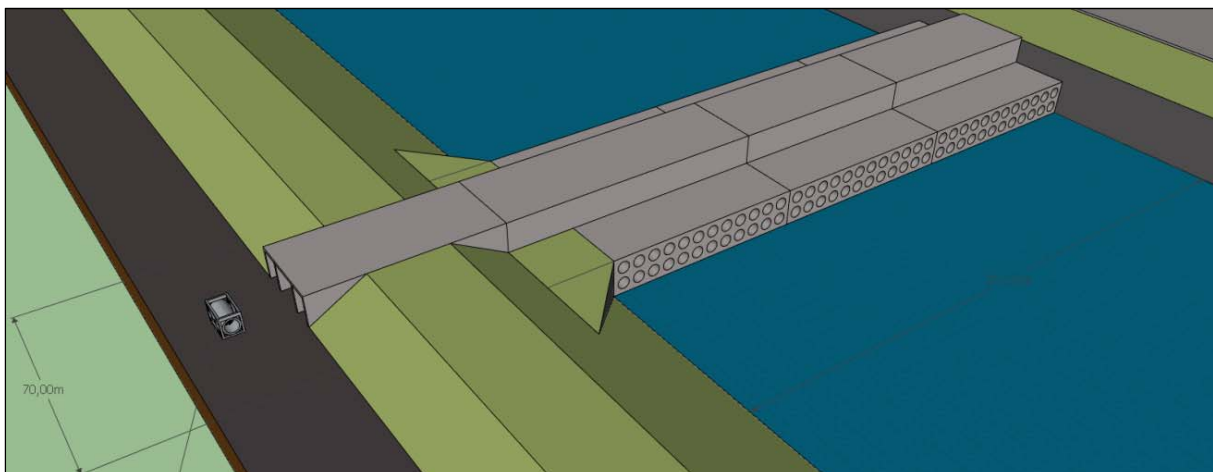
The Venturi tube equipped with a pump dictates the design of the tube. It turns out that 72 pumps are needed with a capacity of 50 m³/s for normative river discharge conditions in 2100 (so in total 3600 m³/s). For the normative discharge in 2018 no pumps are needed, because the inland water level remains below the maximum value. For average river discharge, coinciding with storm surges, discharge using the natural water head is possible up to 2100, however, in the period before 2100 it may be necessary to convert some natural head tubes into pumped tubes. At storm surge and average river discharge, 9 pumps will be needed in 2018 and 2100 after 14 hours.

The dimensions of the discharge structure were determined taking into account the discharge sluice has to be changed into a pump station in the future. The structure will be adaptable by using different modules in the heart of the structure, the centre piece of the Venturi tubes. In fact, the module or centre piece will be a tube piece only in first instance but later a pump will be constructed into it. By means of a gantry crane, all modules can be lifted in and out and moved to a storage place next to the discharge complex. In this way the discharge complex can be changed from a dewatering complex into a pumping station and vice versa.

After determination of the overall dimensions of the discharge complex from a hydraulic point of view, the stability of the structure has been checked. The loads acting on the structure were determined for the 2018 through 2100 situations, regarding different water levels. The proposed dimensions suffice from a stability or foundation point of view.

Concrete calculations have been made to check the concrete dimensions of the main parts of the discharge structure. Given the overall dimensions of the rather square footprinted structure, both for the longitudinal direction (y direction), in the axis of the river, and the width direction (x direction), perpendicular to the river axis, had to be checked, including torsional effects. This resulted in acceptable reinforcement percentages and drawings where the reinforcement is placed in the structure.

The resulting conceptual design (Figuur 2) of the discharge complex has a flexible character and meets the requirements.



Figuur 2 - Final design of the discharge complex in the closure

Inhoud

COLOFON	II
VOORWOORD	III
SAMENVATTING	IV
SUMMARY	VI
1 INLEIDING	1
1.1 ACHTERGROND	1
1.2 PROBLEEMBESCHRIJVING.....	5
1.3 DOELSTELLING	6
1.4 ONDERZOEKSVRAAG.....	6
1.5 STRUCTUUR RAPPORT.....	7
2 RIJN-MAASDELTA	9
2.1 HUIDIG WATERSYSTEEM.....	9
2.2 VERANDEREND WATERSYSTEEM.....	12
3 NIEUWE WATERWEG - NIEUWE MAAS	16
3.1 WATERSYSTEEM.....	16
3.2 WATERBESCHERMING.....	22
3.3 ACTIVITEITEN	25
4 AFSLUITING NIEUWE WATERWEG	28
4.1 DEFINITIES	28
4.2 EISEN	29
4.3 LOCATIE.....	32
5 AFVOERMIDDEL IN AFSLUITING	36
5.1 ALGEMEEN.....	36
5.2 FLEXIBILITEIT.....	42
5.3 VARIANTEN	43
5.4 SPUIEN EN POMPEN	48
6 ONTWERP AFVOERCOMPLEX	56
6.1 RUIMTELIJKE INPASSING	56
6.2 VORM	59
6.3 CONSTRUCTIEF ONTWERP.....	64
6.4 OVERIG	71
7 BETONCONSTRUCTIE AFVOERCOMPLEX	73
7.1 ALGEMEEN.....	73
7.2 LENGTERICHTING	74
7.3 BREEDTERICHTING	82
7.4 RESULTAAT.....	85
8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	87
8.1 CONCLUSIES	87
8.2 AANBEVELINGEN	89

LITERATUURLIJST.....	92
BIJLAGE A – STROMINGSBEREKENINGEN	95
BIJLAGE B – STABILITEITSBEREKENINGEN	106
BIJLAGE C – SCHETSEN LOCATIE	121
BIJLAGE D – BETONBEREKENINGEN.....	125

1 Inleiding

In dit inleidende hoofdstuk komt allereerst de achtergrond van dit onderzoek aan de orde. Vervolgens volgt daaruit de probleembeschrijving, gevolgd door de doelstelling en daarna de onderzoeksvraag met verschillende deelvragen. Als laatste zal de structuur van dit rapport duidelijk gemaakt worden.

1.1 Achtergrond

De achtergrond van het onderwerp van deze scriptie ligt in drie zaken die hieronder behandeld worden. Allereerst is er het verschijnsel van klimaatverandering met alle gevolgen van dien. Daarnaast het jaarlijks (vanaf 2011) verschijnen van het Deltaprogramma waarin de strategie uiteen wordt gezet hoe in Nederland om te gaan met de gevolgen van de klimaatverandering. Tot slot gaat het over het Plan Sluizen, een alternatieve oplossing voor de voorgestelde maatregelen binnen het Deltaprogramma. De kern van het Plan Sluizen is het afsluiten van de Nieuwe Waterweg door een dam. Door Siebe Dorrepaal is in een scriptie onderzoek gedaan naar de scheepvaartsluizen die in de afsluiting moeten komen.

1.1.1 Klimaatverandering

Klimaatverandering is de verandering van het gemiddelde weertype of klimaat over een bepaalde periode. De verandering is het duidelijkst te zien aan een stijging of daling van de gemiddelde temperatuur en van de gemiddelde hoeveelheid neerslag. Het klimaat speelt in Nederland als deltaland¹ een belangrijke rol, en dus heeft klimaatverandering ook een grote invloed op Nederland.

KNMI'14 klimaatscenario's

In 2014 heeft het KNMI klimaatscenario's voor Nederland gemaakt, de KNMI'14 klimaatscenario's. Deze zijn gebaseerd op dezelfde bronnen als van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). De scenario's geven aan welke klimaatveranderingen in Nederland in de toekomst mogelijk zijn. Ze laten een beeld zien van hogere temperaturen, een sneller stijgende zeespiegel, nattere winters, heviger buien en kans op drogere zomers.

In de KNMI'14 klimaatscenario's zijn de toekomstige klimaatverandering in Nederland rond 2050 en 2085 berekend. Ze geven een samenhangend beeld van de veranderingen in twaalf klimaatvariabelen, waaronder temperatuur, neerslag en zeespiegel. Ieder scenario heeft andere uitgangspunten die afhangen van bijvoorbeeld de hoeveelheid CO₂-uitstoot. De vier klimaatscenario's verschillen wat



Figuur 3 - Klimaatverandering en gevolgen Nederland [Klein Tank, A., et al., 2015]

¹ Een delta of rivierdelta is een stelsel van aftakkingen van een rivier, voordat deze in zee of in een groot meer uitmondt. Vanuit de lucht heeft het min of meer de vorm van een driehoek, wat de naam delta (naar de driehoekige Griekse hoofdletter) verklaart

betreft mate van wereldwijde opwarming of mogelijke veranderingen in luchtstromingspatronen. De scenario's geven als het ware de kaders aan waarbinnen het Nederlandse klimaat in de toekomst waarschijnlijk zal veranderen. Wat deze klimaatscenario's kwalitatief voor Nederland betekent, staat weergegeven in Figuur 3.

1.1.2 Deltaprogramma

In het Deltaprogramma wordt gewerkt aan een integrale strategie om Nederland voor te bereiden op (de gevolgen van) de klimaatveranderingen. Dan gaat het over hogere en lagere rivierafvoer, veranderingen in de extreme neerslag, zeespiegelstijging, bodemdaling en verzilting. Tegelijkertijd moet er ook rekening gehouden worden met de sociaaleconomische en ruimtelijke ontwikkelingen in de toekomst.

In 2008 bracht de Deltacommissie advies uit en in 2009 werd dit advies beleidsmatig verankerd in het Nationaal Waterplan. In 2010 is het Deltaprogramma gestart. Het Deltaprogramma wordt gekenmerkt door een nationale samenhangende aanpak van (toekomstige) wateropgaven. De afgelopen jaren zijn deltabeslissingen en gebiedsgerichte voorkeursstrategieën voorbereid. Het Deltaprogramma 2015 bevat definitieve voorstellen hiervoor, inclusief een plan voor de uitvoering. De latere Deltaprogramma's, van 2016 tot en met 2018, gaan over de uitwerking en uitvoering van de plannen.



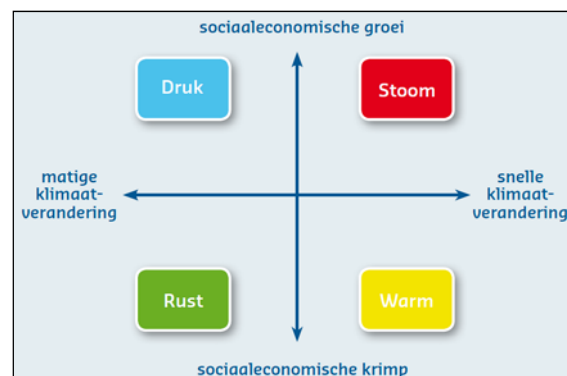
Figuur 4 - Deltaprogramma 2015

Deltascenario's

Omdat de toekomst onzeker is, zijn de bovenstaande veranderingen voor een lange termijn moeilijk te voorspellen. Daardoor moet er dus met verschillende toekomstbeelden rekening gehouden worden. Om die reden werkt het Deltaprogramma met vier scenario's, de zogenaamde Deltascenario's. Hiermee zijn de kaders geschetst waarbinnen de ontwikkelingen zich waarschijnlijk zullen voltrekken. De scenario's zijn bepaald door een combinatie van factoren die zeer onzeker zijn, maar wel een grote invloed hebben op de wateropgaven. Deze factoren zijn de klimaatverandering en de sociaaleconomische ontwikkelingen. De twee assen van deze factoren voor de Deltascenario's leveren vier mogelijke toekomstbeelden op (zie Figuur 5):

- Druk: matige klimaatverandering en sterke groei van economie en bevolking
- Stoom: snelle klimaatverandering en sterke groei van economie en bevolking
- Rust: matige klimaatverandering en lage groei van economie en bevolking
- Warm: snelle klimaatverandering en lage groei van economie en bevolking

De toekomstbeelden geven niet alleen een aanwijzing van de mogelijke veranderingen in de fysische en sociaaleconomische omgevingsfactoren, maar ze tonen ook de mogelijke verschuivingen in het gebruik van ruimte, land en water vanwege de verwachte schaarste aan grondstoffen. Deze scenario's beschrijven de ontwikkelingen met een bandbreedte die, volgens de huidige kennis, aannemelijk en relevant is voor het toekomstige waterbeheer. Binnen het Deltaprogramma zijn de Deltascenario's gebruikt voor de analyse van toekomstige kansen en



Figuur 5 - Schematische weergave van de Deltascenario's [Bruggeman, W., et al., 2013]

knelpunten. Door de vier verschillende scenario's toe te passen, is een brede blik verkregen op mogelijke oplossingsrichtingen. Ook hebben de scenario's inspiratie opgeleverd voor het ontwerpen van strategieën en innovaties. De nieuwere versie van de Deltascenario's is in de periode 2013-2015 gebruikt om te toetsen of de tot nog toe voorgestelde strategieën en maatregelpakketten voldoende robuust en effectief zijn in verschillende toekomstvarianten. De Deltascenario's laten mogelijke toekomstbeelden zien, zonder invloed van wijzigingen in het waterbeleid. Ze zijn ontwikkeld om eind 2014 beter onderbouwde beslissingen te nemen over het toekomstig waterbeheer van Nederland.

Voorkeursstrategie

In het Deltaprogramma 2015 is een voorkeursstrategie voor Rijnmond-Drechtsteden opgenomen. Deze is in september 2014 door de Deltacommissaris aan de Minister van Infrastructuur en Milieu aangeboden. De Minister heeft deze voorkeursstrategie overgenomen en vastgelegd in het kabinetsvoorstel voor een herziening van het Nationaal Waterplan. Dit voorstel is op 3 december 2014 aangeboden aan de 2e Kamer. De voorkeursstrategie voor de Rijn-Maasmonding is goedgekeurd door de Stuurgroep Rijnmond-Drechtsteden. Die bestond uit vertegenwoordigers van regionale overheden en het rijk.

Op hoofdlijnen houdt de voorkeursstrategie van het Deltaprogramma het volgende in [Waveren, H. van, et al., 2015:

1. Preventie door dijken (op basis van overstromingskansnormen), stormvloedkeringen en rivierverruiming blijft de basis voor het veilig houden van dit gebied. Concreet betekent dit:
 - Aan de zeezijde blijven de Europoortkering (Maeslantkering en Hartelkering) en de Haringvlietdam bescherming bieden;
 - Een vervanging van de Maeslantkering in 2070 met een kleinere faalkans
 - Sterke dijken in de stadsregio Rotterdam, het eiland IJsselmonde en langs de Drechtsteden richting Gorinchem;
 - Sterke zeedijken en compartimenteren op Voorne-Putten, Hoekse Waard en Eiland van Dordrecht;
 - Toekomstbestendige rivierdijken langs de Lek en de Hollandsche IJssel.
 - Vervanging van de kering in de Hollandsche IJssel in 2050 met een kleinere faalkans;
 - In de riviergedomineerde delen van de Merwedede zijn rivierverruimende maatregelen te overwegen.
 - Op langere termijn kunnen ruimtelijke maatregelen en rampenbestrijding in aanvulling op preventie de veiligheid vergroten.
2. Zoetwater: zoetwatervoorziening via Kleinschalige Wateraanvoer+ (KWA+) en op termijn indien nodig de Permanente Oostelijke Aanvoer (POA).

1.1.3 Plan Sluizen

Een zestal ingenieurs onder leiding van ir. Spaargaren, allen betrokken bij de bouw van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering, vinden dat de optie om de Nieuwe Waterweg af te sluiten, onvoldoende onderzocht is. Zij hebben een alternatief opgesteld, het Plan Sluizen (of Plan Spaargaren). Een overzicht van dit plan, dat zich in de loop van de tijd heeft ontwikkeld, staat weergegeven in Figuur 6. Het bevat de volgende elementen:

- Het eerste plan (februari 2014) omvatte het afsluiten van de Nieuwe Maas en Oude Maas met elk een dam, voorzien van schutsluizen; ook ging het plan uit van berging in de Grevelingen en/of in de Oosterschelde.
- In het voorjaar van 2014 is een spuisluis (spuien onder vrij verval) van 2000 m³/s in de dam van de Nieuwe Maas toegevoegd.
- Om de berging in de Oosterschelde goed te laten werken, is in het najaar van 2014 het dichten van het lek in de kering toegevoegd, evenals het optimaliseren van het sluitregime.

- Later zijn nog gemalen bij de dammen in de Oude Maas en Nieuwe Maas toegevoegd, in totaal 3000 m³/s.

Het plan beoogt om in 2100 een waterstandsvaling te creëren die de stijging van de maatgevende hoogwaterstanden (MHW's)² door klimaatverandering compenseert.

In het Plan Sluizen is de Maeslantkering overbodig. Ook is in eerste instantie de kering in de Hollandse IJssel weggelaten. Omdat de analyses in dit onderzoek laten zien dat de MHW's op de Hollandse IJssel zonder kering (behoorlijk) toenemen, is voor de raming van de kosten de kering in de Hollandse IJssel toch weer opgenomen. Ook wordt er in het Plan Sluizen van uit gegaan dat er een open verbinding wordt gerealiseerd tussen het Volkerak en het Hollandsch Diep. Het Beerkanaal wordt bij de monding van het Hartelkanaal afgedamd. Om hinder voor de scheepvaart te compenseren wordt een extra kolk aangelegd bij de Rozenburgsesluis. Eventueel resterende opgaven als gevolg van de nieuwe normering, klimaatverandering en/of bodemdaling worden met dijkversterkingen opgelost.

Het Plan Sluizen is verder uitgewerkt in een studie van Rijkswaterstaat [Waveren, H. van, et al., 2015]



Figuur 6 - Overzicht Plan Sluizen [Waveren, H. van, et al., 2015]

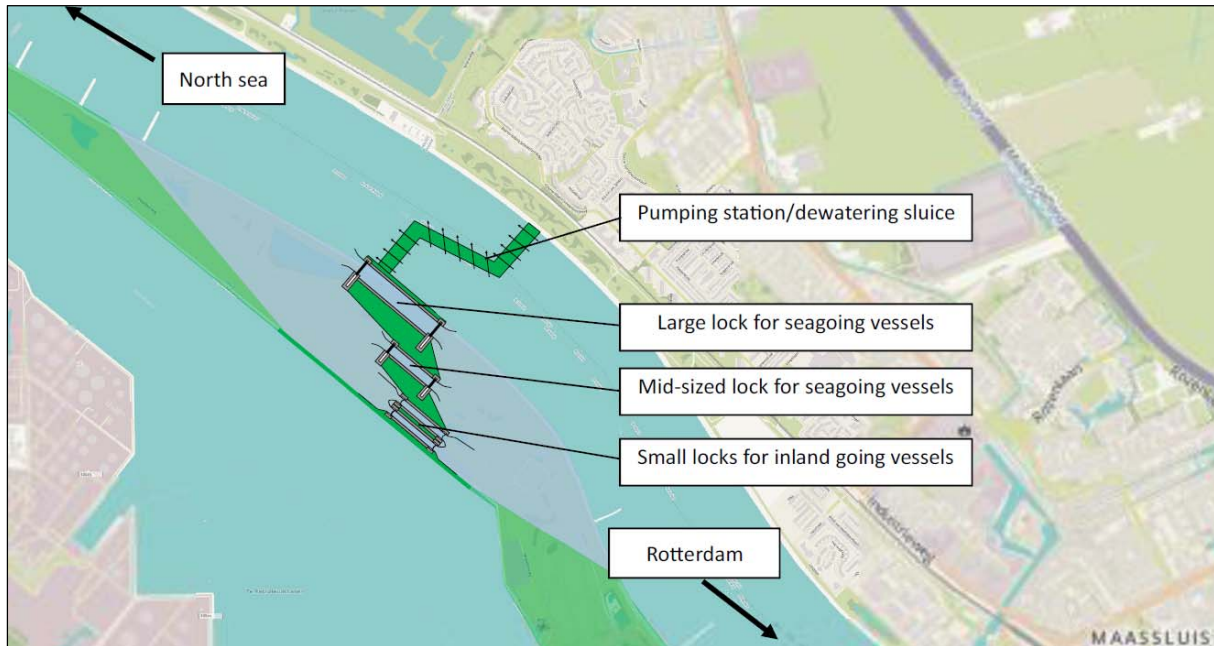
Scriptie Dorrepaal

In zijn scriptie heeft Siebe Dorrepaal een haalbaarheidsstudie gedaan naar scheepvaartsluizen in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg [Dorrepaal, S.G., 2016]. Voor het ontwerp zijn eerst de (toekomstige) randvoorwaarden bekeken behorend bij de eisen die gesteld worden aan de scheepvaart en aan de waterveiligheid. Voor de waterveiligheid resulteerde dit in een hoger waterniveau van ongeveer 1 meter dat gekeerd moet worden, voornamelijk door een grotere

² Voor elk dijkkringgebied geldt een wettelijke beschermingsnorm, bijvoorbeeld 1/4000 per jaar. De maatgevende hoogwaterstand is de waterstand die bij deze beschermingsnorm hoort. In het geval van 1/4000 per jaar is de MHW de waterstand die statistisch gezien eens in de 4000 jaar wordt overschreden. De dijken moeten de maatgevende hoogwaterstand (inclusief golven) kunnen keren.

zeespiegelstijging. Het blijkt dat de randvoorwaarden voor de scheepvaart een grotere impact hebben op de ontwerpkeuzes voor de scheepvaartsluizen dan de randvoorwaarden voor de waterveiligheid.

Deze randvoorwaarden zijn gebruikt om een globale oplossing voor de afsluiting te maken. In het eerste ontwerp zijn vier scheepvaartsluizen (zie Figuur 7) nodig: een grote sluis voor de grote zeeschepen, een middelgrote sluis voor de kleinere zeeschepen en twee kleine sluisen voor de binnenvaartschepen. Na het onderzoeken van de vereisten voor de toekomst blijkt dat er nog een middelgrote sluis moet worden toegevoegd.



Figuur 7 - Globaal ontwerp scheepvaartsluizen in de afsluiting [Dorrepaal, S.G., 2016]

1.2 Probleembeschrijving

In de vorige paragraaf zijn drie zaken beschreven die de achtergrond vormen van de probleembeschrijving. De probleemstelling vloeit als het ware vanzelf voort uit die drie zaken.

Geschiedenis

In de afgelopen eeuwen is er in Nederland altijd al een strijd geweest met het water. Vele overstromingen hebben plaatsgevonden met vele slachtoffers en schade tot gevolg. Vaak lag de oorzaak onder andere in de matige kwaliteit van de waterkeringen. In 1953 werd de Nederlandse bevolking opnieuw gewezen op de kracht van de zee. Op 1 februari van dat jaar vond de Watersnoodramp plaats, een van de grootste overstromingen uit de geschiedenis van Nederland. Twintig dagen na de watersnoodramp was er een Deltacommissie geïnstalleerd. Deze commissie zou adviezen geven over de uitvoering van een Deltaplan dat de veiligheid in het Deltagebied duurzaam zou verhogen. Hoe veilig het gebied ook moest worden, de Nieuwe Waterweg en de Westerschelde moesten open blijven vanwege het economische belang van de havens van Rotterdam en Antwerpen. De overige zeearmen werden wel gesloten.

Samenhang

Voor de veiligheid is het noodzakelijk om de waterkeringen voortdurend te onderhouden en regelmatig te versterken. Die noodzaak wordt alleen maar groter door het feit dat de zeespiegel in de toekomst steeds sneller zal stijgen. Het Deltaprogramma is dan ook met het doel opgericht om de waterveiligheid in Nederland in de toekomst te garanderen, en te verbeteren waar nodig. Zoals

eerder genoemd blijft de open verbinding van de Nieuwe Waterweg daarbij een aandachtspunt. Omdat men binnen het Deltaprogramma hiervoor, volgens zes ingenieurs, niet voldoende maatregelen wil treffen, hebben zij een alternatief plan gemaakt: Plan Sluizen. Dit plan voorziet voor de Nieuwe Waterweg in vergaande maatregelen, waaronder het afsluiten van de Nieuwe Waterweg. Of dit daadwerkelijk zal gebeuren, is een politieke beslissing. In dit rapport zal deze mogelijkheid verder uitgewerkt worden.

Probleem

Via de Nieuwe Waterweg wordt een deel van het water van de Rijn afgevoerd naar de Noordzee. Door de Nieuwe Waterweg af te sluiten wordt dit onmogelijk gemaakt. Dit water kan echter niet zomaar via een andere weg naar de Noordzee. Daarom moet er in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg een voorziening komen waardoor het water naar de zee kan. Om de waterveiligheid te waarborgen moet echter voorkomen worden dat, bij een hoge zeewaterstand, veel water terugstroomt. Kort gezegd moet er dus een afvoermiddel dat ook water kan keren in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg komen.

1.3 Doelstelling

Naar de scheepvaartsluizen in afsluiting van de Nieuwe Waterweg is door Siebe Dorrepaal onderzoek gedaan. Naar het afvoercomplex dat ook in de afsluiting moet komen, zal in deze scriptie onderzoek gedaan worden. De focus van het onderzoek van Siebe Dorrepaal lag bij de scheepvaart, in dit onderzoek ligt het bij de waterafvoer. Deze beide onderzoeken zijn gedaan naar elementen van de voorgestelde maatregelen van het Plan Sluizen.

Allereerst zal onderzocht worden of een afvoercomplex in de afsluiting echt nodig is. Als dit zo is zal ook onderzocht worden wat een goede locatie voor de afsluiting is. Tot nu is gesproken over een afvoermiddel. Er zal echter bepaald moeten worden hoe het water afgevoerd zal worden. Daar zijn twee verschillende methoden voor: spuien onder vrij verval en pompen. Gekeken zal worden of deze beide een plaats in het ontwerp kunnen krijgen. Uiteindelijk zal er een ontwerp in beton gemaakt worden van het afvoercomplex.

Onderzoeksaanpak

Bovenstaand zijn de doelen geschetst. Het onderwerp is te groot om alles tot in detail uit te zoeken en te ontwerpen. Het rapport gaat over de afsluiting van de Nieuwe Waterweg met daarin een afvoercomplex. De nadruk ligt op het afvoercomplex. De aanpak van het onderzoek wordt begrensd door de volgende beperkingen:

- Het is mogelijk dat de afsluiting uit meerdere afsluitingen zal bestaan, en eventueel ook uit meerder afvoermiddelen. Hier zal echter naar een van dezen gekeken worden;
- Wat betreft het afvoermiddel ligt de nadruk op de functie van het afvoeren en in mindere mate op het keren van water.
- Als lopende het ontwerpproces het ontwerp aangepast wordt zal dit niet altijd teruggekoppeld worden naar eerdere berekeningen en ontwerpen.

1.4 Onderzoeksvraag

Naar aanleiding van de probleem- en doelstelling is de volgende hoofdvraag opgesteld:

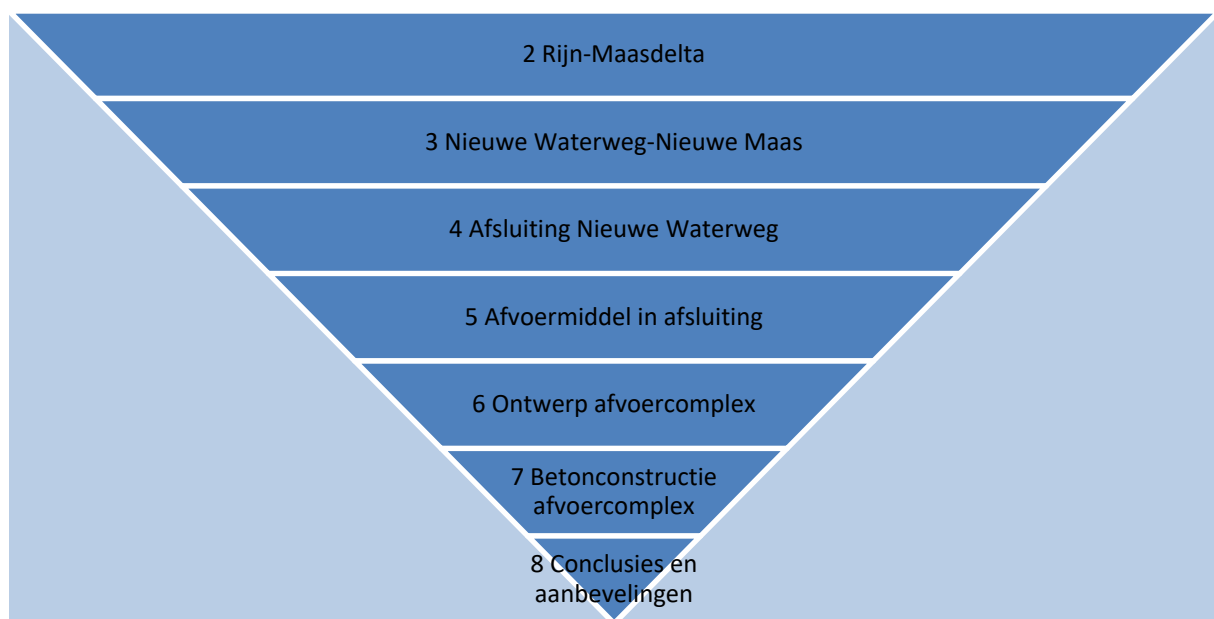
Wat is een goed ontwerp voor een aanpasbaar afvoercomplex in een mogelijke afsluiting van de Nieuwe Waterweg?

De hoofdvraag is verdeeld in de volgende deelvragen:

1. Wat is het nut en de noodzaak van een afsluiting met daarin een afvoercomplex?
2. Wat is een geschikte locatie voor de afsluiting met daarin het afvoercomplex?
3. Wat is de verhouding tussen het spuien onder vrij verval en het pompen in het afvoercomplex?
4. Hoe kan het afvoercomplex worden vormgegeven in beton?

1.5 Structuur rapport

De structuur van dit rapport is kernachtig samen te vatten met de omschrijving 'van grof naar fijn'. In Figuur 8 is dit weergegeven met de verschillende hoofdstukken erbij. In het ontwerpproces wordt ook zo gewerkt, waarbij telkens een lus doorlopen wordt. Met de lus wordt bedoeld het ontwerpen van verschillende onderdelen van de afvoerconstructie. Deze lus wordt door de gemaakte keuzes tijdens het proces steeds kleiner.



Figuur 8 - Rapportstructuur

Hieronder is kort weergegeven wat in de inhoud van verschillende hoofdstukken is.

Hoofdstuk 1 Inleiding op het onderwerp van deze scriptie

Hoofdstuk 2 Beschrijving van huidige watersysteem van de Rijn-Maasdelta en welke veranderingen er in dit gebied verwacht worden.

Hoofdstuk 3 Onderzoek naar het watersysteem van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas binnen de Rijn-Maasdelta. Beschrijving van de bescherming tegen water en onderzoek naar de activiteiten op en rond de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas.

Hoofdstuk 4 Onderzoek naar de afsluiting met daarin een afvoermiddel van de Nieuwe Waterweg. Belangrijke onderwerpen van dit hoofdstuk zijn de eisen die gesteld worden aan de afsluiting en het afvoermiddel en de locatie van de afsluiting.

Hoofdstuk 5 Onderzoek naar het principe van het afvoermiddel in de afsluiting en beschrijving van de referentieprojecten. Beschrijving van de plaats van flexibiliteit of aanpasbaarheid in het ontwerp.

Ontwikkeling van verschillende varianten voor het afvoermiddel en onderzoek naar de verhouding tussen spuien en pompen.

Hoofdstuk 6 Beschrijving van de ruimtelijke inpassing van het ontwerp. Bepaling van de vorm van het afvoercomplex en controle van het constructieve ontwerp.

Hoofdstuk 7 Ontwerp van de betonconstructie en berekening van de wapening.

Hoofdstuk 8 Conclusies en aanbevelingen

2 Rijn-Maasdelta

In dit hoofdstuk wordt het watersysteem in de Rijn-Maasdelta beschreven. In Figuur 9 staat een topografische kaart van de Rijn-Maasdelta. Aan de orde komen het huidige watersysteem, waarbij de focus ligt op de waterveiligheid en de zoetwatervoorziening. Daarna wordt de verwachte verandering door de klimaatverandering van het watersysteem beschreven, waarbij de nadruk ligt op zeespiegelstijging en verandering van rivierafvoer. Als laatste wordt geschetst hoe het gewenste watersysteem er in de Rijn-Maasdelta uit ziet. Dit is een watersysteem waarin in zo goed mogelijk geanticipeerd is op de gevolgen van de klimaatverandering in Nederland op het gebied van waterveiligheid en zoetwatervoorziening.



Figuur 9 - Topografische kaart Rijn-Maasdelta [Kuiper, R., et al., 2013]

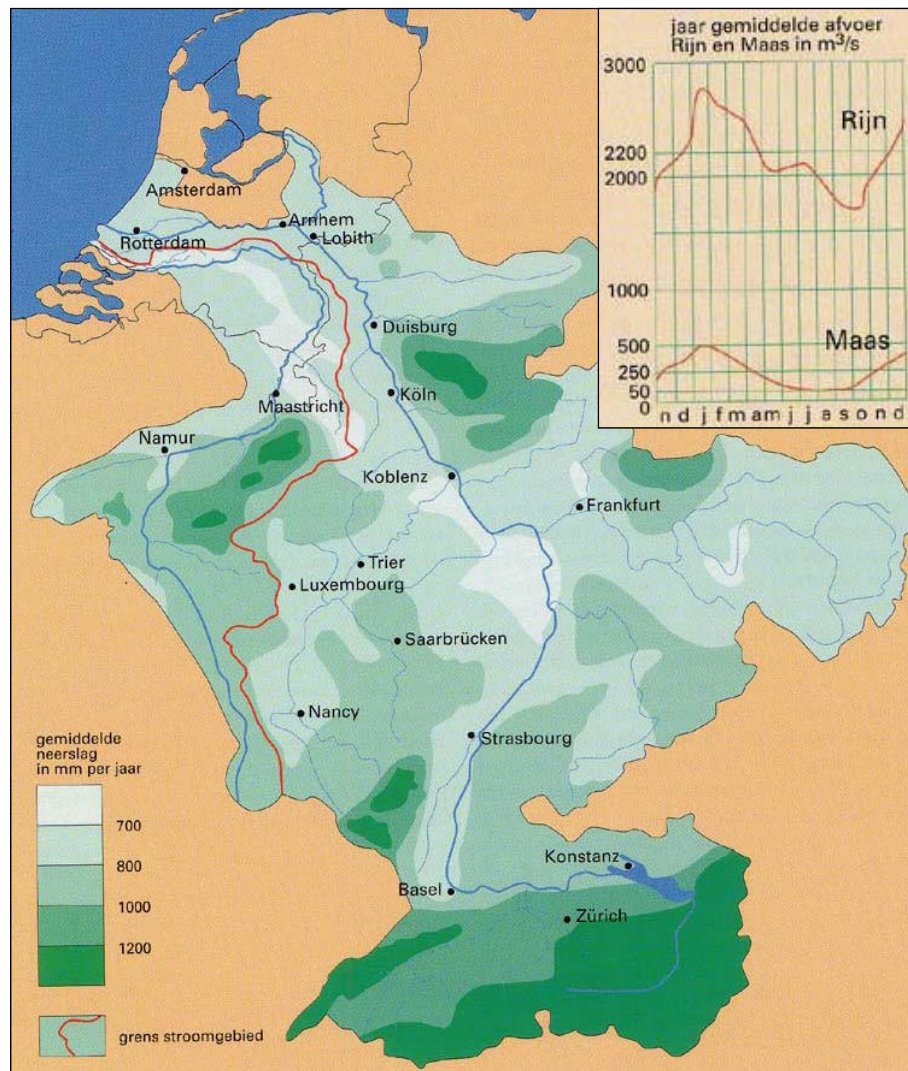
2.1 Huidig watersysteem

De Rijn-Maasdelta, gelegen in het zuidwesten van Nederland, is het gebied van de grote rivieren, de regio Rijnmond-Drechtsteden, de Zuidwestelijke Delta en de bijbehorende kust. Het is het kwetsbare overgangsgebied waar rivier en zee samenkomen. Het is ook een gebied dat van nationaal belang is in economische zin, met als kern de Rotterdamse haven en alle activiteiten die daarmee samenhangen. De Rijn-Maasdelta is dichtbevolkt en bestaat uit laaggelegen polders die snel onder kunnen lopen bij een overstroming. De basis van de waterveiligheid in de Rijn-Maasdelta bestaat uit duinen, dijken en stormvloedkeringen maar ook uit voldoende ruimte voor de rivier. In de toekomst zal er fors geïnvesteerd moeten worden om de bescherming van dit gebied op peil te houden en te verbeteren.

2.1.1 Transport van water

Het water van de Rijn en de Maas stroomt via de Rijn-Maasdelta naar de Noordzee. Het stroomgebied van de Rijn en van de Maas is weergegeven in Figuur 10. In een grafiek in deze figuur staan ook de gemiddelde afvoeren in een jaar van deze rivieren.

In Tabel 1 zijn de gegevens van het stroomgebied van de Rijn gegeven. Omdat er geen water van de Maas naar de Nieuwe Waterweg stroomt, wordt de Maas verder buiten beschouwing gelaten.



Figuur 10 - Stroomgebied Rijn en Maas met jaar gemiddelde afvoeren [Overbeek, P., 2011]

Eigenschappen	Rijn	
Oorsprong rivierwater	Sneeuwmelt en regen	
Lengte rivier	[km]	1320
Oppervlakte stroomgebied	[km ²]	185.000
Huidige gemiddelde afvoer	[m ³ /s]	2200
Huidige maatgevende afvoer	[m ³ /s]	16.000

Tabel 1 - Gegevens Rijn [Helpdesk Water, 2017] en [Deltacommissaris, 2017]

Het water van de Rijn verdeelt zich in Nederland over verschillende takken, zoals de Waal, de Nederrijn en de IJssel, en is enigszins afhankelijk van de stuwen in de Lek. De afvoerverdeling bij gemiddelde afvoer (Figuur 11) en bij maatgevende afvoer staat vermeld in Tabel 2.

Rijntakken	Afvoerverdeling gemiddelde Rijnafvoer (2200 m ³ /s)	Gemiddelde afvoer [m ³ /s]	Afvoerverdeling bij maatgevende Rijnafvoer (16.000 m ³ /s) [%]	Maatgevende afvoer [m ³ /s]
Waal	2/3	1467	65	10400
Nederrijn/Lek	2/9	489	20	3200
IJssel	1/9	244	15	2400

Tabel 2 - Huidige afvoerverdeling Rijn [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009] en [Ruimte voor de Rivier, 2005]



Figuur 11 - Huidige afvoerdeling Rijn bij gemiddelde afvoer [Wikipedia, 2016]

2.1.2 Berging van water

De huidige situatie in de Rijn-Maasdelta is vooral gericht op het afvoeren van het water van de Rijn en de Maas. Door de zeespiegelstijging en de vaker voorkomende extreme afvoeren van de rivieren, komt er (meer) behoefte aan het tijdelijk bergen van water. Dat is nodig in het geval dat een hoge zeewaterstand tegelijk plaatsvindt met een hoge rivierafvoer. Deze kans is niet zo groot, naar schatting 1/1400. Maar voor het geval het wel gebeurt, is recent het Volkerak-Zoommeer (zie Figuur 9) ingericht tot de grootste waterberging van Nederland. Het Volkerak-Zoommeer wordt bij een extreem hoge waterstand op zee wanneer de waterkeringen gesloten zijn, en bij een grote afvoer van de grote rivieren, ingezet om tijdelijk water te bergen. Hierdoor wordt het waterpeil op het Hollandsch Diep verlaagd. De totale waterberging op het Volkerak-Zoommeer bedraagt 200 miljoen kubieke meter. Waterberging op het Volkerak-Zoommeer is een van de maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier van Rijkswaterstaat. Binnen dat programma geeft Rijkswaterstaat in het kader van waterveiligheid op 34 plekken ruimte aan de rivier. Dit wordt gedaan door bijvoorbeeld dijken verder landinwaarts te leggen, door watergeulen aan te leggen die bij hoogwater vollopen en door het verlagen van uiterwaarden. Zo krijgt de rivier tijdelijk meer ruimte en is de druk op dijken bij hoogwater minder.

2.1.3 Zoetwater

Ook in West-Nederland is zoet water nodig als drinkwater en voor gebruik in de industrie, landbouw en glastuinbouw, zoals het Westland, en het beheer van natuurgebieden. De grootste hoeveelheid is nodig om de waterkwaliteit en de waterpeilen in de polders te handhaven. De zoetwatervoorziening is geregeld via waterakkoorden en andere afspraken tussen waterbeheerders en afnemers. Voor zoet water gelden geen normen maar streefwaarden. Het diepe grondwater in West-Nederland is deels zout, zoals te zien is in Figuur 12. Het zoute water stroomt langzaam omhoog (zoute kwel), waardoor het ondiepe grondwater en het water in de sloten verzilt. Door bodemdaling zal de zoute kwel in de toekomst toenemen.



Figuur 12 - Verziltig in West-Nederland [Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden, 2012]

De zoetwatervoorziening van West-Nederland is sterk afhankelijk van de waterinlaat uit de rivieren. Twee innamepunten zijn met name van belang: Boezemgemaal Gouda voor inname vanuit de Hollandse IJssel (voor West-Nederland) en inlaat Bernisse aan het Spui (voor Delfland en het Rotterdamse havengebied). In Figuur 13 staan deze twee inlaatpunten in de kaart van een deel van het watersysteem in de Rijn-Maasdelta. In droge jaren verzilt de Hollandse IJssel waardoor inname door Boezemgemaal Gouda uit deze rivier dan vaak geruime tijd niet mogelijk is. Op dat moment treedt een calamiteitenmaatregel in werking, die voorziet in aanvoer van zoet water uit het Amsterdam-Rijnkanaal en zelfs het IJsselmeer. Inlaat Bernisse sluit enkele keren per jaar, door verziltig via de Nieuwe Waterweg. Dankzij de buffercapaciteit van het Brielse Meer leidt dit nog niet tot problemen, ook niet in een droog jaar.



Figuur 13 - De twee belangrijke inlaatpunten voor zoetwater [Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden, 2011]

2.2 Veranderend watersysteem

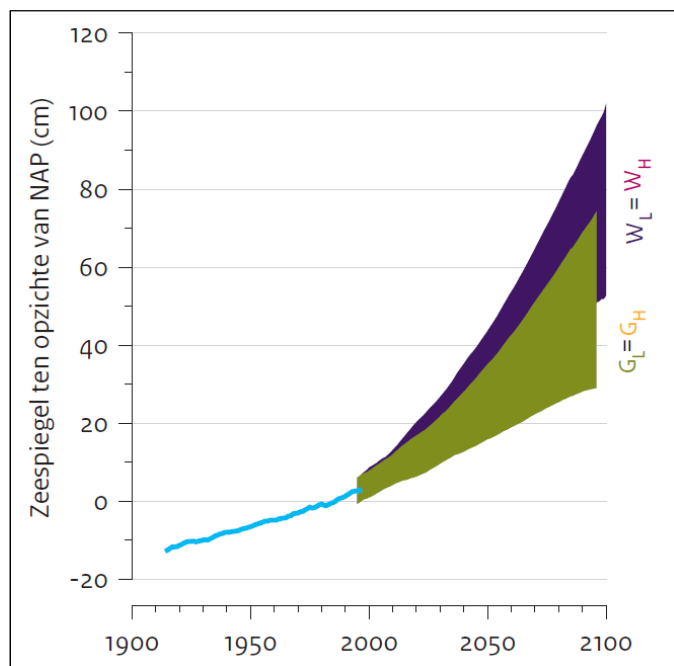
Door klimaatverandering zijn op de middellange en de lange termijn forse veranderingen in de waterhuishouding te verwachten. De zeespiegel stijgt en het water in de rivieren zal vaker extreem hoog en extreem laag staan. In de Rijn-Maasdelta, en met name de regio Rijnmond-Drechtsteden zullen de gevolgen duidelijk merkbaar zijn, omdat dit het grensgebied van de zee en de rivieren is. De

kans op een overstroming wordt groter; de zoetwatervoorziening wordt minder betrouwbaar. Dat is ongewenst voor de bestaande functies en de ruimtelijke ontwikkeling in de regio.

2.2.1 Zeespiegelstijging

Uit waarnemingen blijkt dat de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust sinds 1900 toeneemt met gemiddeld 1,8 mm per jaar. Voor de Noordzee is geen duidelijke toename zichtbaar in de snelheid van stijging die uitstijgt boven de natuurlijke variaties, aangezien deze nogal groot zijn. De oorzaak van (de versnelde) zeespiegelstijging is enerzijds de opwarming van de en anderzijds afsmeltend landijs [KNMI, 2016].

Bodemdaling door bijvoorbeeld het inklinken van veen is niet in de klimaatscenario's verwerkt. Deze varieert langs de Nederlandse kust sterk en nauwkeurige schattingen voor de toekomst zijn niet voorhanden. Voor de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust geeft elk scenario zowel een onder- als een bovenwaarde. In elk scenario ligt de snelheid van zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust in de toekomst hoger dan de waargenomen snelheid sinds 1900. De zeespiegelstijging voor de verschillende klimaatscenario's van het KNMI is weergegeven in Figuur 14. De zeespiegelstijging die bepaald is in de verschillende Deltascenario's is weergegeven in Tabel 3.



Figuur 14 - Verwachte zeespiegelstijging Nederlandse kust [Klein Tank, A., et al., 2015]

Jaar	Deltascenario	Zeespiegel [m]
2050	Druk en Rust	+0,15
	Stoom en Warm	+0,35
2100	Druk en Rust	+0,35
	Stoom en Warm	+0,85

Tabel 3 - Zeespiegelstijging Noordzee t.o.v. 2000 [Bruggeman, W., et al., 2013]

2.2.2 Afvoerverandering

In alle klimaatscenario's van het KNMI wordt het gemiddeld veel natter, met name in de winter. In de zomer wordt het in de meeste scenario's iets droger. In alle scenario's wordt het afvoerregime van de Rijn en de Maas door het jaar heen grilliger. De winterafvoeren nemen toe, de zomerafvoeren nemen af. In de Rijn is dat laatste beperkt het geval, doordat het Rijnstroomgebied heel groot is en de grote meren voor demping zorgen [Klijn, F., et al., 2015].

Alle scenario's wijzen op sterk toenemende hoeveelheden neerslag in de stroomgebieden, waardoor in de komende decennia grotere rivierafvoeren voorkomen. Als wordt verondersteld dat de dijken in Duitsland oneindig hoog zijn, kan de Rijnafvoer bij Lobith met een kans van 1:1250 per jaar toenemen van circa 17.000 m³/s nu tot 19.000 à 20.000 m³/s in 2050. Voor 2085 lopen de scenario's verder uiteen, tot ruim 22.000 m³/s voor 1:1250 per jaar. Dit is de hoeveelheid afvoer die het gevolg is van extreme neerslag, het is niet de werkelijke afvoer die Nederland tussen de dijken kan bereiken.

Voor de Rijn geldt dat grootschalige overstromingen tussen Bonn en de Nederlandse grens leiden tot aftopping van extreme afvoeren. Als hiermee rekening wordt gehouden blijkt dat al in de huidige situatie de rivierafvoer effectief wordt afgetopt vanaf circa 14.000 m³/s, en dat afvoeren boven de 16.000 m³/s in het huidige klimaat uiterst onwaarschijnlijk zijn. In de toekomst (in 2050 en nog duidelijker in 2085) nemen de extreme afvoeren bij Lobith echter wel fors toe, omdat de bergingscapaciteit in Duitsland dan geheel is gebruikt. Bij extremere omstandigheden stijgen de maximale afvoeren bij Lobith dan ook weer, tot ongeveer 17.500 m³/s. Nog hogere afvoeren leiden tot het overlopen van de dijken op de laatste 20 kilometer voor de Nederlandse grens, met grensoverschrijdende overstromingen tot gevolg. De scenario's voor de toekomstige maximaal te verwachten Rijnafvoer te Lobith lopen daardoor niet zo ver uiteen als die voor de Maasafvoer te Borgharen. Bij de Maas is het effect van grootschalige overstromingen bovenstrooms van de Nederlandse grens zeer gering.

Hoewel de verwachtingen voor toekomstige maximale afvoer voor de Rijn niet zo ver uiteenlopen, is dat wel zeer sterk het geval wat de kans van voorkomen betreft. Frequenter hoogwater betekent ook een toename van de overstromingsrisico's, doordat de kans op het doorbreken van dijken toeneemt als deze vaker zwaar belast worden. In alle scenario's komt een afvoer van ruim 12.000 m³/s niet langer gemiddeld eens per 100 jaar voor, maar eens per 30 jaar in 2050 en in 2085 in sommige scenario's vaker dan eens per 10 jaar. De tot nu toe maatgevende afvoer van 16.000 m³/s gaat van een kans van kleiner dan 1:30.000 per jaar nu, naar circa 1:2000 in 2050, en in sommige scenario's naar ongeveer 1:500 in 2085.

In Tabel 4 staan de verschillende kengetallen voor de afvoer van de Rijn en de Maas voor de vier Deltascenario's, zoals omschreven in Paragraaf 1.1.2.

Kengetallen per scenario		Druk en Rust			Stoom en Warm	
		2000	2050	2100	2050	2100
Zichtjaar						
Gemiddelde Rijnafvoer in februari	[m ³ /s]	2.900	3.100	3.200	3.400	4.000
Gemiddelde Rijnafvoer in september	[m ³ /s]	1.800	2.000	2.100	1.300	900
Gemiddelde Maasafvoer in februari	[m ³ /s]	480	500	520	530	590
Gemiddelde Maasafvoer in september	[m ³ /s]	89	92	94	48	30
Extreem hoge Rijnafvoer 1/100 jaar	[m ³ /s]	12.500	13.000	14.000	14.000	15.000
Extreem hoge Maasafvoer 1/100 jaar	[m ³ /s]	2.900	3.000	3.200	3.200	3.600
Herhalingstijd Rijnafvoer >15.000 m ³ /s	[jaar]	1.250	1.000	400	400	100
Herhalingstijd Maasafvoer >3.600 m ³ /s	[jaar]	1.250	1.000	400	400	100
Extreem lage Rijnafvoer 1/10 jaar	[m ³ /s]	630	650	670	520	420
Extreem lage Maasafvoer 1/10 jaar	[m ³ /s]	18	18	18	10	6
Herhalingstijd droge perioden Rijn (afvoer 100 dag lang lager dan 1000 m ³ /s)	[jaar]	90	120	150	20	4
Herhalingstijd droge perioden Maas (afvoer 50 dagen lang lager dan 25 m ³ /s)	[jaar]	300	300	300	20	4

Tabel 4 - Kenmerken afvoer per Deltascenario [Bruggeman, W., et al., 2013]

2.2.3 Gevolgen

Door klimaatverandering zijn op middellange en lange termijn forse veranderingen in de waterhuishouding te verwachten. De zeespiegel stijgt en de waterstand in de rivieren zal vaker extreem hoog en extreem laag zijn. In de Rijn-Maasdelta, liggend op het grensvlak van de zee en de rivieren, zullen de gevolgen duidelijk merkbaar zijn. De kans op een overstroming wordt groter; de zoetwatervoorziening wordt minder betrouwbaar.

Waterveiligheid

Bij een zeespiegelstijging van 35 centimeter is 30% van de dijken volgens de huidige normen te laag [Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden, 2011]. Deze situatie treedt in de helft van de deltascenario's al op in 2050. In Warm en Stoom is in 2100 zelfs 40% van de dijken te laag. Rekening houdend met inklinking van de ondergrond, kan dit percentage toenemen tot ruim 50%. Langs sommige riviertrajecten zal de opgave nog groter worden, omdat de rivierbodem uitschuurt. Daardoor is er bij die dijken meer en eerder versterking nodig. Dat een groot deel van de dijken nog wel voldoet, is onder meer te danken aan het feit dat met name de dijken in het westen van de Rijn-Maasmonding op dit moment hoger zijn dan noodzakelijk. Zonder extra maatregelen, zoals dijkversterkingen, wordt de kans op een overstroming in 2050 twee tot vijf keer zo groot in deze regio.

Door zeespiegelstijging en hogere rivierafvoeren neemt ook in de buitendijkse gebieden de kans op hoogwater toe. Bij stijging van de rivierwaterstand overstromen als eerste enkele laaggelegen natuur- en landbouwgebieden (onder meer langs de Oude Maas), daarna bestaand stedelijk gebied (onder meer delen van de historische binnenstad van Dordrecht en in Rotterdam het Noordereiland, de Kop van Feijenoord en het havengebied, zoals de Waalhaven en Botlek). Recent aangelegde haventerreinen, zoals Europoort, jonge havengebieden in Drechtsteden en de Eerste en Tweede Maasvlakte, liggen zo hoog dat ze zelden of nooit overstromen.

De Maeslantkering is in 2070 toe aan aanpassing dan wel vervanging, uitgaande van scenario's Warm en Stoom. Als het sluitcriterium gelijk blijft, zal door zeespiegelstijging de Maeslantkering in de periode tot 2070 vaker moeten sluiten. Dat heeft gevolgen voor de bereikbaarheid van zowel de haven als het achterland.

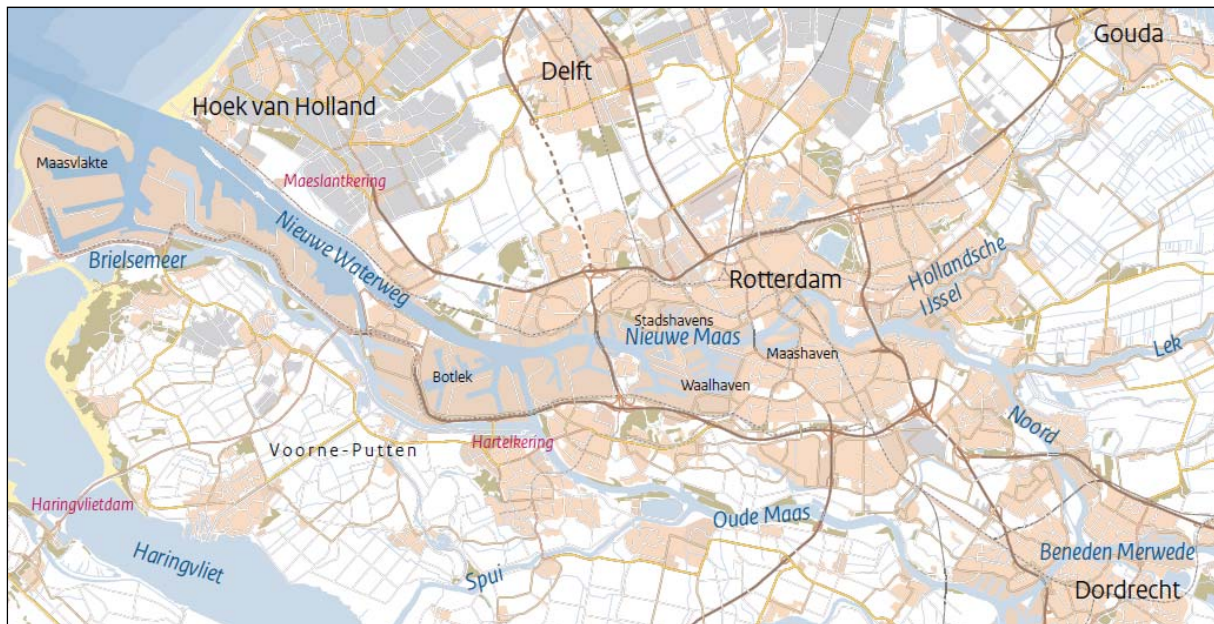
Zoetwater

De twee inlaatpunten (in de Hollandsche IJssel bij Gouda en in het Spui bij de Bernisse) zijn gevoelig voor verzilting. Binnen het regionale watersysteem zorgt zoute kwel (interne verzilting) bovendien voor een watervraag om het gebied door te spoelen. In de huidige situatie worden de grenswaarden voor chloride bij de inlaten al regelmatig overschreden. Bij de Bernisse gebeurt dit veelal kortdurend. Het inlaatpunt bij Gouda verzilt vooral bij een langdurig lage afvoer. Dan treden noodmaatregelen in werking, zoals de Kleinschalige Wateraanvoer (KWA). Dit gebeurt momenteel ongeveer eens per 10 jaar. Bij langzame klimaatverandering blijven de inlaatbeperkingen volgens de modelberekeningen in dezelfde orde van grootte. In de toekomst zal bij snelle klimaatverandering de vraag naar zoetwater echter toenemen en zal de (externe) verzilting van de inlaatpunten voor het noordelijk deel van het gebied sterk toenemen. De huidige capaciteit van de KWA is in een (extreem) droog jaar onvoldoende om aan de watervraag van West Nederland te voldoen. Voor het inlaatpunt Bernisse zullen de inlaatbeperkingen bij snelle klimaatverandering na 2050 met name in het winterhalfjaar toenemen.

In de Deltascenario's Stoom en Warm verzilt het inlaatpunt bij Gouda omstreeks 2050 naar verwachting zo vaak dat het niet meer betrouwbaar is in te zetten. De inlaat bij Bernisse is robuuster, maar voldoet in de Deltascenario's Stoom en Warm ook niet meer rond 2050. Tot 2050 kan de vraag naar zoet water verdubbelen, met name door een toename van de verdamping en zoute kwel. Bij een bevolkingstoename en economische groei zal de watervraag extra toenemen. De belangrijkste bedreiging is het verzilten van de inlaatpunten, als door lage afvoer van de rivieren of een hoge zeewaterstand het zoute water verder landinwaarts komt (externe verzilting).

3 Nieuwe Waterweg - Nieuwe Maas

Nadat in Hoofdstuk 2 het watersysteem van de Rijn-Maasdelta met de bijbehorende problemen beschreven is, wordt hier ingezoomd op de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas en de Oude Maas. In dit gebied, dat is weergegeven in Figuur 15, zal de afsluiting gesitueerd worden. Achtereenvolgens komt het watersysteem, de waterbescherming en het vervoer over water in dit gebied aan de orde. Bij het watersysteem zal de waterafvoer, de waterdiepte, de waterstanden en de waterberging besproken worden. Bij de waterbescherming is er aandacht voor de Maeslantkering, de dijken, en de buitendijkse gebieden in het gebied. Bij vervoer is er aandacht voor de havens en voor de scheepvaart.



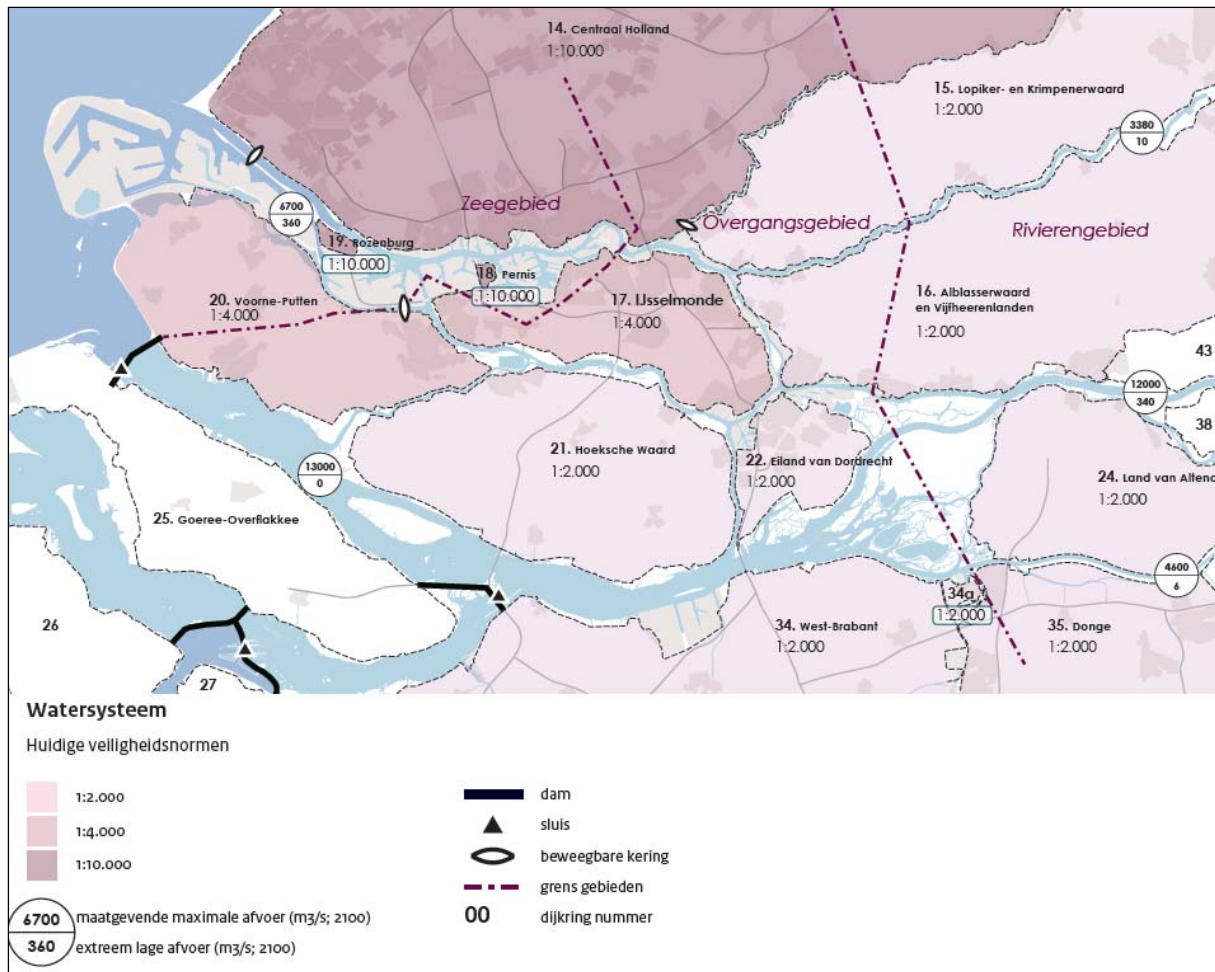
Figuur 15 - Topografische kaart Nieuwe Waterweg - Nieuwe Maas [Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden, 2012]

3.1 Watersysteem

De Nieuwe Waterweg bij Rotterdam is een gegraven verbinding tussen het Scheur en de Noordzee. In dit onderzoek wordt het Scheur gezien als de Nieuwe Waterweg. De Nieuwe Maas stroomt van de Lek bij Krimpen aan de Lek naar de Nieuwe Waterweg (eigenlijk het Scheur). De Oude Maas mondt uit bij Vlaardingen, op het punt waar de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg aan elkaar grenzen. De verschillende waterwegen staan in de kaart in Figuur 15 weergegeven.

Belangrijke eigenschappen van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas als watersysteem staan in Figuur 16. Zo staan in deze afbeelding de veiligheidsnormen van de omliggende dijkkringgebieden³, de maatgevende maximale afvoeren en de extreem lage afvoeren. Deze afbeelding geeft een goed eerste beeld van de zaken die in dit hoofdstuk behandeld worden en die van belang zijn voor de afsluiting.

³ Een dijkkring of dijkkringgebied is een gebied dat beschermd wordt tegen het water door een primaire waterkering of door hoge gronden. Onder primaire waterkeringen vallen: dijken, duinen en waterkerende constructies. Hoge gronden zijn gebieden die van nature ruim boven hoogwater liggen.

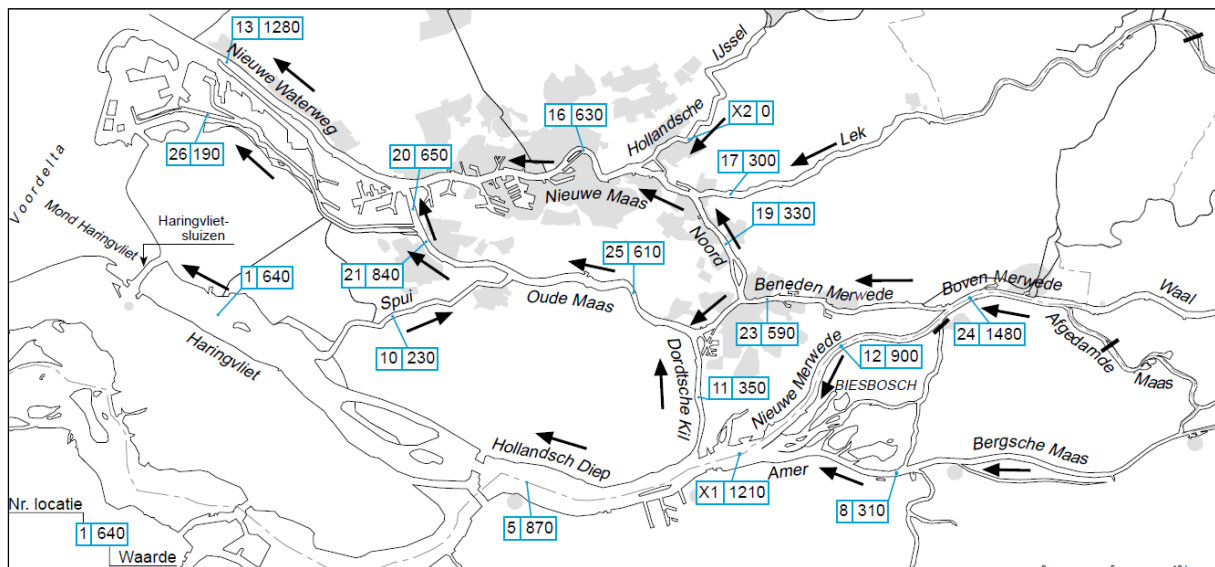


Figuur 16 - Watersysteem met de huidige normen voor de bescherming tegen overstromingen [Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden, 2012]

3.1.1 Waterafvoer

Omdat de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas in het zeegebied liggen (zie Figuur 16) is de grootte en de richting van de waterafvoer, oftewel het debiet, afhankelijk van het getij. De afvoer van de Nieuwe Waterweg is iets groter dan die van de Nieuwe Maas. De oorzaak hiervan is dat de afvoer van de Nieuwe Waterweg bestaat uit de afvoer van de Nieuwe Maas, maar ook die van de Oude Maas (zie Figuur 16). In een groot deel van het gebied treedt er gedurende de getijcyclus een verandering van stroomrichting op. Er is sprake van een ebdebiet en een vloeddebiet, waarbij het ebdebiet meestal gericht is van oost naar west en het vloeddebiet gericht van west naar oost. Per getijcyclus kan het maximum debiet zowel bij eb als bij vloed bepaald worden. Deze maximale debieten zijn niet per definitie aan elkaar gelijk. Het totaal aan uit- en instromend water gedurende een getijcyclus (12 uur en 25 minuten) wordt door het eb- en vloedvolume weergegeven. Het eb- en vloedvolume is de som van de debieten die in een getijcyclus in eb- en vloedrichting stromen. Het restdebiet is het verschil tussen het ebvolume en vloedvolume, gemiddeld over de getijperiode. Met de Haringvlietsluizen wordt invloed uitgeoefend op de afvoer van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas. Uitgangspunt is dat zo lang mogelijk een getijgemiddeld debiet langs de Nieuwe Waterweg wordt gestuurd van 1500 m³/s. De reden hiervan is om de zoutindringing zo veel mogelijk tegen te gaan. Bij een toenemende afvoer van de Rijn wordt er meer water afgevoerd via de Haringvlietsluizen. Het beheer van de Haringvlietsluizen resulteert erin dat er relatief veel rivierwater via de noordrand van het Noordelijk Deltabekken wordt afgevoerd. De gemiddelde verdeling van de

restafvoeren is weergegeven in Figuur 17. In Tabel 5 is een overzicht gegeven van de gemiddelde waarden van de optredende maximale eb- en vloeddebieten, en de resulterende restdebieten.



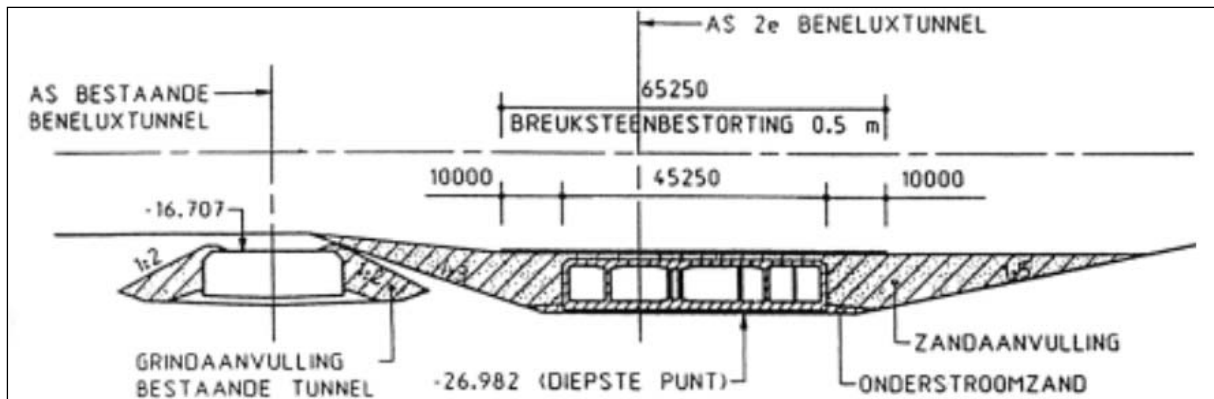
Figuur 17 - Gemiddelde waarden van de restdebieten (m³/s) in de huidige situatie [Bol, R., at al.]

Locatie	Maximaal ebdebiet [m³/s]	Maximaal vloeddebiet [m³/s]	Restdebiet [m³/s]
Nieuwe Waterweg (Hoek van Holland)	6380	6930	1280
Nieuwe Maas (Rotterdam)	2310	2480	630
Oude Maas (Westgeul)	2340	1880	650

Tabel 5 - Gemiddelde waarden van de debieten in de huidige situatie [Bol, R., at al.]

3.1.2 Bodemdiepte

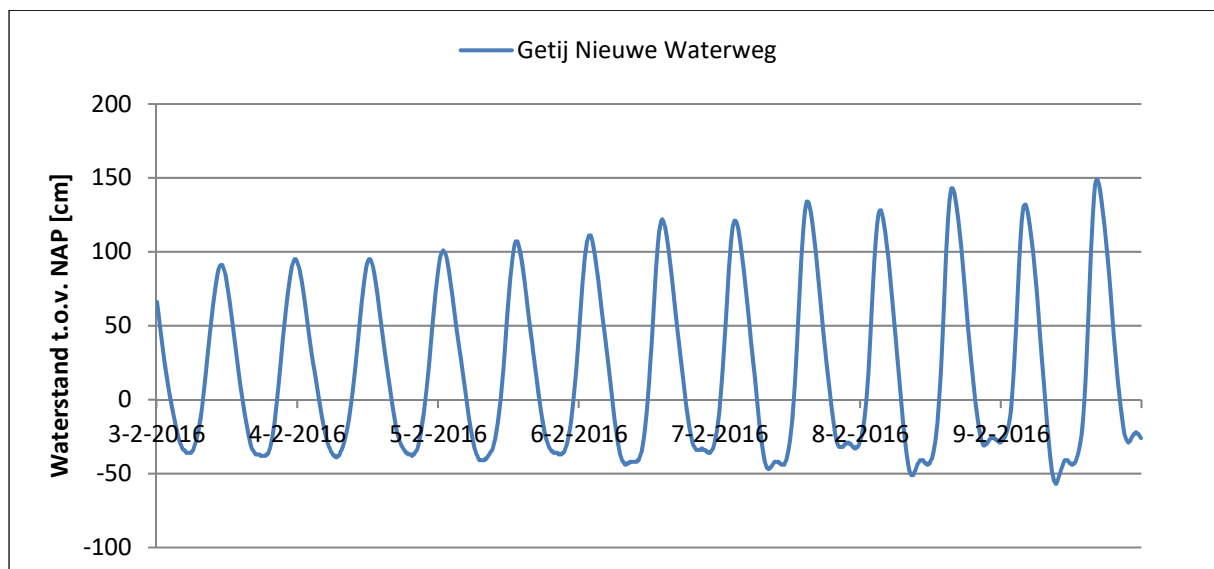
De bodemdieptes van de Nieuwe Waterweg en van de Nieuwe Maas zijn niet constant en gelijk. De bodemdiepte van de Nieuwe Waterweg varieert op dit moment van west naar oost van NAP-15,00 meter tot NAP-14,50 meter. De bodemdiepte van de Nieuwe Maas (ten oosten van de Beneluxtunnel) varieert op dit moment van west naar oost van NAP-13,40 meter tot NAP-5,20 meter. Op dit moment is er gestart met een verdieping van de Nieuwe Waterweg c.q. het Scheur tussen Hoek van Holland en de Beneluxtunnel. De bodemdiepte zal verlaagd worden van de huidige NAP-15,0 meter (tussen Hoek van Holland en de toegang van het Botlekgebied) respectievelijk 14,5 meter (tussen het Botlekgebied en de Beneluxtunnel) naar NAP-16,2 tot NAP-16,4 meter. Door de verdieping kan de maximale diepgang van schepen tijdens hoogwater met als bestemming Botlek of Vondelingenplaat toenemen van de huidige 13,7 naar 15,0 meter. Een doorsnede van de Beneluxtunnel staat in Figuur 18.



Figuur 18 - Doorsnede Beneluxtunnel [Bijlsma, W., et al., 1999]

3.1.3 Waterstanden

Omdat de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas in het zeegebied liggen (zie Figuur 16) worden de waterstand bepaald door een dubbeldaags getij. Dit betekent dat het ongeveer twee keer per dag eb en vloed is (elke 12 uur en 25 minuten). In Figuur 80 is het getij weergegeven voor de periode van 3 tot en met 9 februari 2016 nabij Vlaardingen.



Figuur 19 - Getij in de Nieuwe Waterweg bij Vlaardingen [Rijkswaterstaat, 2016]

Voor twee locaties in dit gebied, die weergegeven zijn in Figuur 20, zijn belangrijke waarden over de waterstanden gegeven.



Figuur 20 - Locaties data waterstanden [Rijkswaterstaat, 2016]

Nieuwe Waterweg

De gemiddelde over- en onderschrijdingsfrequenties per jaar voor de waterstanden in de Nieuwe Waterweg ter hoogte van Maassluis zijn gegeven in Tabel 6. Deze gegevens gaan over de periode van 1813 tot en met 1998. OLW staat voor Overeengekomen Laag Water. Het OLW 1991.0 is de waterstand op de benedenrivieren die ter plaatse met een zekere frequentie over 1987 t/m 1990 werd onderschreden.

Overschrijding hoogwaterstanden		Onderschrijding laagwaterstanden	
Frequentie	Stand [m+NAP]	Frequentie	Stand in [m+NAP]
1x per 10.000 jaar	3,40	1x per 10 jaar	-1,50
1x per 1.000 jaar	3,25	1x per 1 jaar	-1,25
1x per 100 jaar	3,09	OLW 1991.0	-0,80
1x per 10 jaar	2,81		
1x per 2 jaar (grenspeil)	2,48		
1x per jaar	2,37		
Maatgevende waarde hoogwaterstand			
Delfland, 1x per 10.000 jaar	3,40		

Tabel 6 - Gemiddelde over- en onderschrijdingsfrequentie per jaar bij Maassluis [Rijkswaterstaat, 2016]

In Tabel 7 zijn de gemeten hoog- en laagwaterstand voor de verschillende soorten getij weergegeven, evenals de gemiddelde en de hoogst en laagst gemeten waterstand. De gemiddelde waterstand bij de Maassluis is NAP+0,13 m.

Type getij	Hoogwaterstand [m+NAP]	Laagwaterstand [m+NAP]	Tijverschil [m]
Gemiddeld tij	1,12	-0,55	1,67
Springtij	1,26	-0,55	1,81
Doodtij	0,95	-0,54	1,49

Tabel 7 - Gemeten waterstanden bij Maassluis bij gemiddelde Rijnafvoer [Rijkswaterstaat, 2016]

In Tabel 8 is de gemeten hoog- en laagwatertijd gegeven. Te zien is dat de laagwatertijd veel groter is dan de hoogwatertijd. Ook staat in deze tabel de stijgingstijd (eb naar vloed) en de dalingstijd (vloed naar eb). Duidelijk is te zien dat de stijgingstijd ongeveer twee keer zo kort is als de dalingstijd.

Type tij	Hoogwatertijd [u:min]	Laagwatertijd [u:min]
Gemiddeld tij	02:34	10:18
Springtij	02:47	10:31
Doodtij	02:11	08:30
Grootheid	Tijd [u:min]	
Stijging	4:41	
Daling	7:44	

Tabel 8 - Gemiddelde havengetallen bij Maassluis bij gemiddelde Rijnafvoer [Rijkswaterstaat, 2016]

Nieuwe Maas

De gemiddelde over- en onderschrijdingsfrequenties per jaar voor de waterstanden in de Nieuwe Maas ter plaatse van Vlaardingen zijn gegeven in Tabel 9. Deze gegevens gaan over de periode van 1848 tot en met 1998.

Overschrijding hoogwaterstanden		Onderschrijding laagwaterstanden	
Frequentie	Stand [m+NAP]	Frequentie	Stand in [m+NAP]
1x per 10.000 jaar	3,33	1x per 10 jaar	-1,30
1x per 4.000 jaar	3,27	1x per jaar	-1,10
1x per 1.000 jaar	3,19	OLW 1991.0	-0,70
1x per 100 jaar	3,03		
1x per 10 jaar	2,78		
1x per 2 jaar (grenspeil)	2,50		
1x per jaar	2,38		
Maatgevende waarde hoogwaterstand			
Delfland, 1x per 10.000 jaar	3,40		
IJsselmonde, 1x per 4.000 jaar	3,35		

Tabel 9 - Gemiddelde over- en onderschrijdingsfrequentie per jaar bij Vlaardingen [Rijkswaterstaat, 2016]

In Tabel 10 zijn de gemeten hoog- en laagwaterstand voor de verschillende soorten getij weergegeven, evenals de gemiddelde en de hoogst en laagst gemeten waterstand. De gemiddelde waterstand bij de Vlaardingen is NAP+0,19 m.

Type getij	Hoogwaterstand [m+NAP]	Laagwaterstand [m+NAP]	Tijverschil [m]
Gemiddeld tij	1,24	-0,48	1,72
Springtij	1,40	-0,47	1,87
Doodtij	1,03	-0,47	1,50

Tabel 10 - Gemeten waterstanden bij Vlaardingen bij gemiddelde Rijnafvoer [Rijkswaterstaat, 2016]

In Tabel 11 is de gemeten hoog- en laagwatertijd weergegeven. Te zien is dat de laagwatertijd veel groter is dan de hoogwatertijd. In deze tabel staat ook de stijgingstijd en de dalingstijd. Ook hier is weer duidelijk te zien dat de stijgingstijd ongeveer twee keer zo kort is als de dalingstijd.

Type tij	Hoogwatertijd [u:min]	Laagwatertijd [u:min]
Gemiddeld tij	02:35	10:43
Springtij	02:42	10:50
Doodtij	02:16	09:02
Grootheid	Tijd [u:min]	
Stijging	4:17	
Daling	8:08	

Tabel 11 - Gemiddelde havengetallen bij Vlaardingen bij gemiddelde Rijnaivoer [Rijkswaterstaat, 2016]

3.1.4 Waterberging

Afhankelijk van de locatie van de afsluiting kan er als dat nodig is water op de Nieuwe Waterweg en op de Nieuwe Maas geborgen worden. In Tabel 12 staat wat voor de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas het bergend oppervlak is.

Waterweg	Lengte [km]	Gemiddelde breedte [m]	Bergend oppervlak [m ²]
Nieuwe Waterweg	20,5	575	11.787.500
Nieuwe Maas	25	365	9.125.000

Tabel 12 - Bergend oppervlak

3.2 Waterbescherming

De gebieden langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas worden door middel van dijken en waterkeringen beschermd tegen hoogwater. Een belangrijke waterkering in de Nieuwe Waterweg is de Maeslantkering.

3.2.1 Maeslantkering

De Maeslantkering bevindt zich in de Nieuwe Waterweg. De constructie bestaat uit twee drijvende, halfronde, waterkerende deuren. Bij een stormvloed sluiten deze de Nieuwe Waterweg, die daar 360 meter breed is, af. Bij normale weersomstandigheden zijn de deuren geparkeerd in afsluitbare dokken in de oevers. Bij stormvloed worden de deuren na het invaren afgezonken door de ballasttanks in de deuren vol met rivierwater te laten lopen. In de



Figuur 21 - De Maeslantkering in gesloten toestand [Rijkswaterstaat, 2017]

bodem van de rivieren ligt op NAP-17 meter een drempel, waarop de deuren neergezet worden. Als de deuren afgezonken zijn, bevindt de bovenzijde daarvan zich op NAP+5,00 meter, waardoor bij zeer extreme stormvloed water door golfslag over de deuren gaat. Bovendien zijn er ook in gesloten toestand nog een lekopeningen tussen, naast en onder de deuren van in totaal 100 m². Er wordt onderscheid gemaakt tussen het sluitcriterium en het sluitpeil. Het sluitcriterium van de Maeslantkering is een verwachte waterstand van NAP+3,00 meter bij Rotterdam en/of van NAP+2,90 meter bij Dordrecht. Het sluitpeil is afhankelijk van de Rijnaivoer bij Lobith. Bij afvoeren lager dan

6000 m³/s start de sluitoperatie bij overschrijding van een waterstandsniveau van NAP+2,00 meter ter plaatse van de kering en bij hogere afvoerniveaus start de sluitoperatie bij de stroomkentering van eb naar vloed ter plaatse van de kering [Chbab, E.H., Deltares, 2012].

Vanaf het sluitmoment begint de sluitoperatie. Eerst wordt de kering vrijwel geheel afgezonken. Vervolgens wordt een sedimentstop ingelast, om het sediment van de drempel op de bodem te laten verwijderen. Daarna wordt de kering geheel gesloten. De snelheid van het afzinken is afhankelijk van de waterstanden op de rivier en het waterniveau in de ballasttanks van de kering, maar duurt ongeveer 90 minuten. Als de waterstand aan de binnenzijde van de kering hoger wordt dan aan de buitenzijde opent de kering, en gaat de kering over in de drijvende toestand. Op deze manier wordt water gespuid van de binnen- naar de buitenzijde van de kering. Afhankelijk van de voorspelling of de waterstand bij Rotterdam en/of Dordrecht opnieuw het sluitcriterium gaat overschrijden in de eerstvolgende 24 uur wordt de kering opnieuw gesloten of geheel geopend. De sluit- en openprocedures zijn geautomatiseerd in een Beslissingsondersteunend Systeem (BOS).

3.2.2 Dijken

De bescherming van de polders rond de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas tegen hoog water wordt, naast de Maeslantkering, vooral bereikt door de omliggende dijken. In de huidige situatie wordt is de waterveiligheid gebaseerd op veiligheidsnormen voor dijkkringgebieden, zoals weergegeven in Figuur 16. Deze normen zijn gebaseerd op overschrijdingskansen van bepaalde waterstanden.

In de nabije toekomst zal het waterveiligheidsbeleid gebaseerd zijn op de risicobenadering. Hierbij wordt niet alleen gekeken naar de kans op een overstroming, maar ook naar het mogelijke gevolg. Hoe groter de kansen en de gevolgen, hoe strenger de norm. In de nieuwe normen wordt uitgegaan van overstromingskansen in plaats van een overschrijdingskansen bij de oude normen.

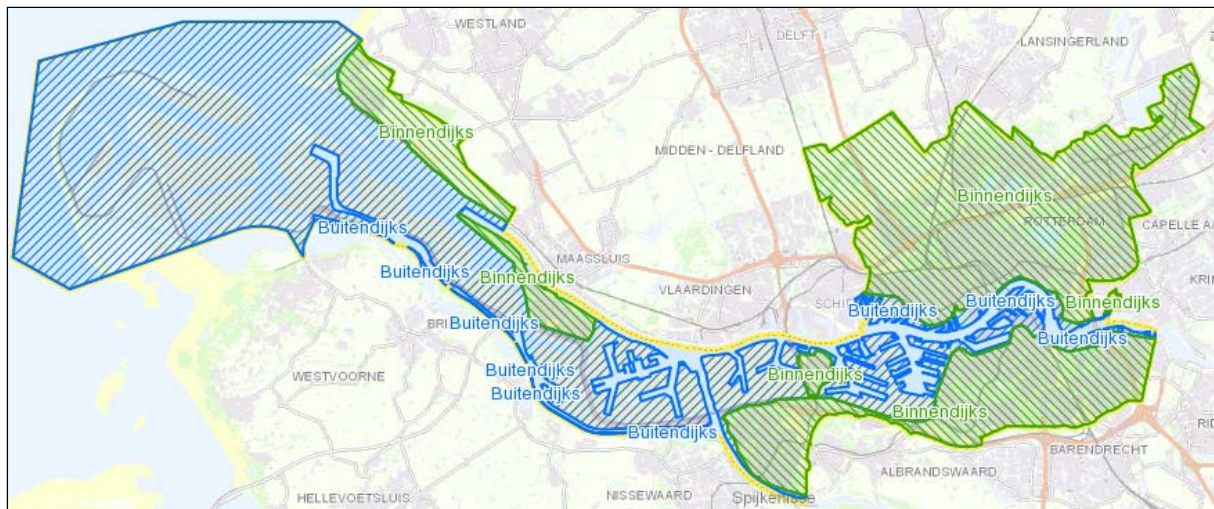
Met het nieuwe waterveiligheidsbeleid wil men de volgende doelen bereiken:

- Het waterveiligheidsbeleid biedt iedereen in Nederland die achter dijken woont ten minste een beschermingsniveau van 1/100.000 per jaar. De kans voor een individu om te overlijden als gevolg van een overstroming mag niet groter zijn dan 0,001% per jaar.
- Er wordt extra bescherming geboden op plaatsen waar kans is op grote groepen slachtoffers en/of grote economische schade en/of ernstige schade door uitval van vitale en kwetsbare infrastructuur van nationaal belang.

Deze doelen zijn omgerekend naar normspecificaties voor de verschillende waterkeringen. Deze zijn niet meer gebaseerd op dijkkringen, maar op dijktrajecten. Elk dijktraject krijgt een normspecificatie die past bij de gevolgen in dat specifieke gebied. De normspecificaties zijn ingedeeld in zes klassen, waarbij de overstromingskansen varieert van 1/300 per jaar tot 1/100.000 per jaar.

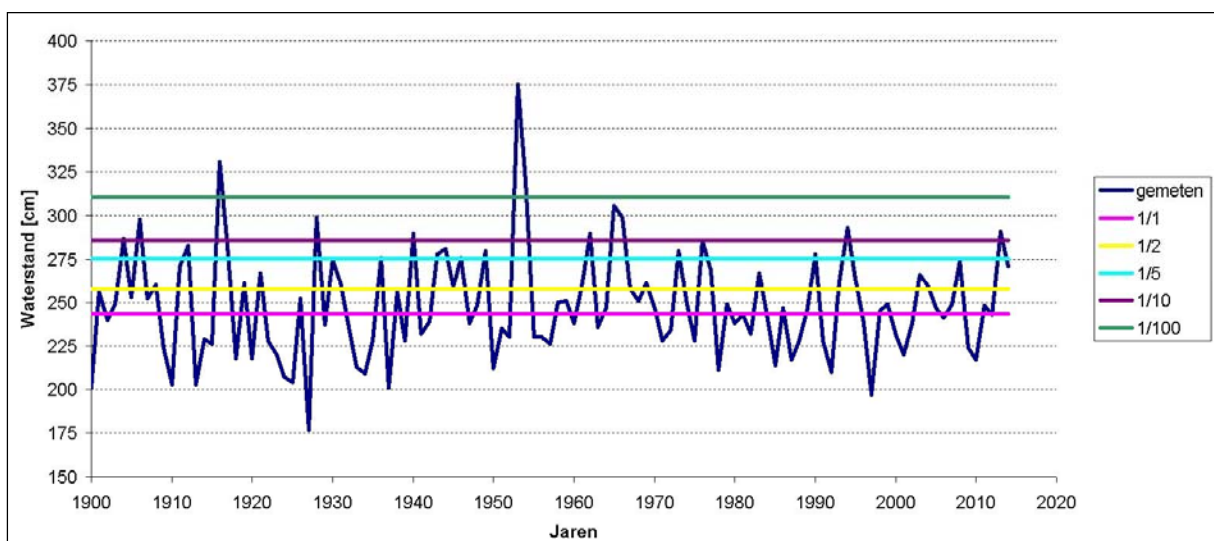
3.2.3 Buitendijkse gebieden

Rotterdam wordt beschermd door primaire keringen. Dit zijn onder andere de dijken langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas. Daarnaast worden de Maeslantkering en de Hartelkering ingezet bij een verwachte hoogwaterstand bij Rotterdam. Rotterdam beschikt daarnaast over een groot oppervlak buitendijks gebied, zoals weergegeven in Figuur 22. De oude en nieuwe havengebieden liggen voornamelijk buiten de primaire keringen, net als stedelijke gebieden zoals de Kop van Feijenoord, het Zeemans- en Lloydkwartier en het Noordereiland. Nergens in Nederland werken en wonen zoveel mensen buitendijks als in Rotterdam (circa 65.000 personen).



Figuur 22 - Binnendijkse (groen) en buitendijkse (blauw) gebieden rond Rotterdam [Rotterdam, 2015]

De buitendijkse gebieden liggen in Rotterdam hoger dan de polders achter de primaire keringen. De hoogte van de buitendijkse gebieden varieert van ongeveer NAP+3 in de stad tot circa NAP+6 meter voor de Maasvlakte in de Noordzee. Daarmee steken de buitendijkse gebieden hoog uit boven de polders (binnendijkse gebieden) die soms wel op NAP-6 meter liggen.



Figuur 23 - Maximale waterstanden per jaar bij Rotterdam [Rotterdam, 2015]

In Figuur 23 zijn de maximale waterstand per jaar in Rotterdam uitgezet tegen de tijd. Verder zijn een aantal kenmerkende frequenties van een aantal waterstanden gegeven. Verder blijkt dat de waterstanden sinds 1900 drie keer boven de 3.00m+ NAP zijn gekomen: in 1916, 1953 en 1966. Sinds 1997 beschermt de stormvloedkering Maeslantkering de stad. Deze kering sluit bij een verwachte waterstand van 3,00m +NAP.

Het ruimtegebruik van buitendijkse gebieden wordt intensiever, door stedelijke herstructurering (Stadshavens Rotterdam, Stadswerven Dordrecht) en toename van de havenactiviteiten. Ook zal het aantal buitendijkse bewoners naar verwachting toenemen, van 65.000 nu tot 80 à 100.000 in 2050. Door deze ontwikkelingen neemt het aantal mogelijk getroffen en de verwachte schade bij overstromingen toe. Zonder rekening te houden met sociaaleconomische ontwikkeling kan door de grotere kans op hoogwater de schade in buitendijkse stedelijke gebieden ongeveer verdubbelen tot 2100. Er treedt vooral schade aan inboedels en interieurs op. Schade aan gebouwen (bijvoorbeeld aan de fundering) is naar verwachting gering, omdat bij vaak voorkomende overstromingen geringe

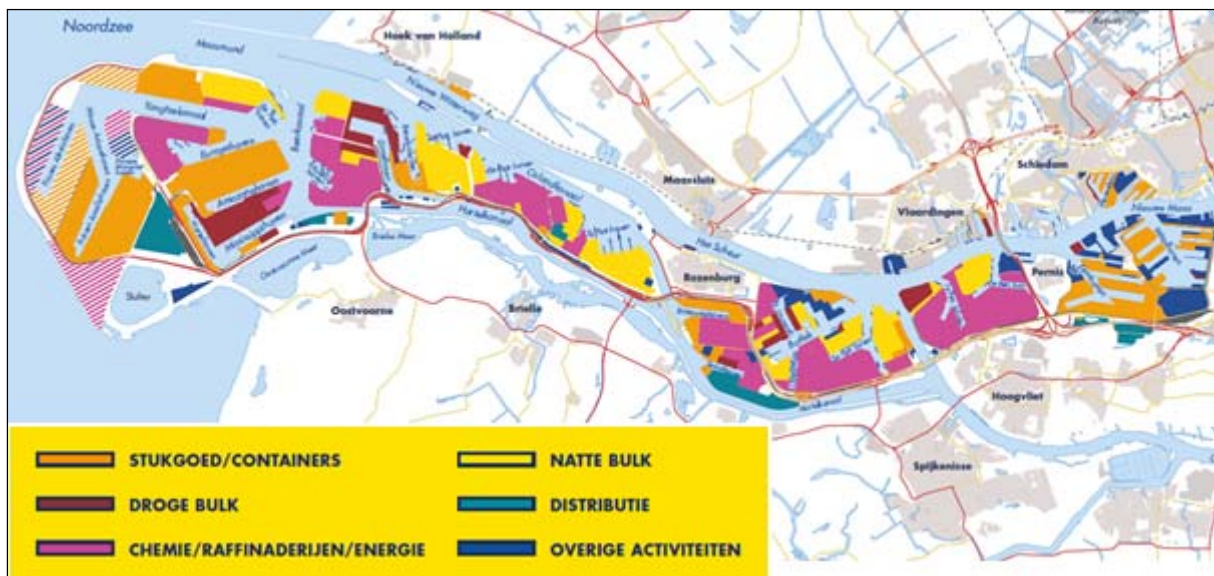
stroomsnelheden optreden. De gevolgen van overstromingen voor buitendijkse havenactiviteiten zijn niet uitgedrukt. De gevolgen kunnen bestaan uit uitval van bedrijfsprocessen, uitval van infrastructuur (elektriciteit, wegen) en milieuvervuiling. De effecten zullen toenemen, omdat door klimaatverandering steeds grotere delen van de stad en het havengebied onder water komen te staan. Grootschalige overstroming in havengebied kan maatschappelijke ontwrichting in Nederland en daarbuiten veroorzaken, bijvoorbeeld door benzinetekort. De kans hierop is weliswaar zeer klein, maar de effecten kunnen groot zijn.

3.3 Activiteiten

Vervoer over water is heel belangrijk voor de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas, vooral door de Rotterdamse havens.

3.3.1 Havens

Rotterdam is, met een jaarlijkse overslag van ongeveer 465 miljoen ton, een van de belangrijkste havens van Europa. Het havengebied (land en water) is 12.606 hectare groot, waarvan ongeveer 6.00 hectare bedrijfsterreinen. De totale lengte van het havengebied is 42 kilometer. Jaarlijks bezoeken circa 30.000 zeeschepen en 110.000 binnenvaartschepen de haven. In Figuur 24 is een plattegrond van de Rotterdamse haven weergegeven met de verschillende activiteiten die er in de haven plaatsvinden.



Figuur 24 - Plattegrond van de havens van Rotterdam [Port of Rotterdam, 2016]

De haven ondervindt nu al gevolgen van klimaatverandering. Door de zeespiegelstijging zullen de stormvloedkeringen vaker sluiten. De sluitfrequentie neemt toe van eens per elf jaar nu (plus een proefsluiting per jaar) tot eens per jaar in 2080. Dit geeft hinder voor de scheepvaart, wat schade tot gevolg heeft. Omdat het aantal scheepsbewegingen de komende decennia naar verwachting blijft groeien, zal de schade in de toekomst groter worden.

3.3.2 Scheepvaart

De Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas zijn druk bevaren waterwegen. Zowel de Nieuwe Waterweg als de Nieuwe Maas zijn een hoofdtransportas binnen het hoofdvaarwegennet.

Scheepspassages

In de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas zijn een aantal locaties waar de scheepspassages geteld worden, de zogenaamde radartelpunten. Deze locaties zijn weergegeven in de in Figuur 25. Het gaat hier om zowel beroepsvaart (zeevaart en binnenvaart) als pleziervaart.



Figuur 25 - Locaties radartelpunten (rode streepjes) [Rijkswaterstaat, 2009]

In Tabel 13 is het aantal scheepspassages voor een aantal relevante radartelpunten in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas gegeven.

Locatie	Vaarweg	Richting	Aantal	t.o.v. 2005 [%]
Hoek van Holland	Nieuwe Waterweg	Oost	38.826	-2,1
		West	44.135	3,8
Vlaardingen	Nieuwe Waterweg	Oost	44.735	5,9
		West	51.255	8,5
Vlaardingen	Nieuwe Maas	Oost	80.573	5,7
		West	98.857	10,4
Eemhaven	Nieuwe Maas	Oost	76.511	0,6
		West	94.967	2,8

Tabel 13 - Scheepspassages Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas in 2008 [Rijkswaterstaat, 2009]

Afmetingen

De grootte van de binnenvaartschepen die op een bepaalde waterweg mogen varen wordt bepaald door de CEMT-klasse. De CEMT-klasse van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas is Via [Rijkswaterstaat, 2017]. Binnen deze klasse gelden voor verschillende soorten schepen verschillende maatgevende afmetingen. In Tabel 14 is de grootste van elk van deze maatgevende afmetingen weergegeven.

Klasse	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m]
Via	145	22,8	4,0

Tabel 14 - Afmetingen CEMT-klasse Via [Rijkswaterstaat, 2017]

Op de Nieuwe Waterweg en de Maas varen ook zeeschepen. Deze zeeschepen doen vooral de Botlek, de Vondelingenplaat, de Waalhaven, de Eemhaven en de Merwehaven in Rotterdam aan. In deze havens komen zowel tankers als containerschepen. Voor de zeevaart gelden geen vastgestelde toegestane afmetingen.

Ook grote cruiseschepen doen regelmatig de haven van Rotterdam aan. Per jaar zijn het er ongeveer 75. Deze cruiseschepen meren aan bij de cruiseterminal op de Wilhelminapier. Om daar te komen maken ze gebruik van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas. De afmetingen van het grootste cruiseschip (ter wereld) die Rotterdam aangedaan heeft, staan in Tabel 15. De breedte in deze tabel is de breedte ter hoogte van de waterlijn.

Cruiseschip	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m]
Harmony of the Seas	362	47	9,3

Tabel 15 - Afmetingen grootste cruiseschip [Wikipedia, 2016]

4 Afsluiting Nieuwe Waterweg

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de afsluiting van de Nieuwe Waterweg met daarin het afvoercomplex. Begonnen is met een definiëring waarna de eisen die aan de afsluiting en het afvoermiddel gesteld worden aan de orde komen. Vervolgens is er onderzoek gedaan naar een geschikte locatie voor de afsluiting met een afvoercomplex.

4.1 Definities

Voordat er een ontwerp gemaakt wordt van een afvoercomplex in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg, is het goed om eerst helder te hebben wat met de uitdrukking “een afvoermiddel of afvoercomplex in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg” bedoeld wordt.

De Nieuwe Waterweg

Als het in het rapport over de Nieuwe Waterweg gaat, wordt vaak meer bedoeld dan alleen de Nieuwe Waterweg. Zo gaat het in de meeste gevallen om het geheel van de Nieuwe Waterweg, inclusief het Scheur, en de Nieuwe Maas (zie Figuur 26). De Nieuwe Waterweg staat op dit moment in open verbinding met de Noordzee. De Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg beschermt Rotterdam tegen hoge waterstanden. De afsluiting van de Nieuwe Waterweg kan echter ook in de Nieuwe Maas gesitueerd worden. In feite is er dan sprake van de afsluiting van de Nieuwe Maas. In het rapport wordt echter steeds gesproken over de afsluiting van de Nieuwe Waterweg.



Figuur 26 - Locatie van de verschillende rivieren [PDKO, 2018]

Afsluiting

Met de afsluiting wordt niet bedoeld de handeling of actie van het afsluiten, of het moment of tijdstip van afsluiten. Met afsluiting wordt in het verband van dit onderzoek bedoeld het voorwerp dat ervoor zorgt dat de Nieuwe Waterweg afgesloten is, bijvoorbeeld een dam of caissons. Het ontwerp van de afsluiting maakt echter geen deel uit van dit onderzoek.

Afvoercomplex of - middel

In het rapport is hoofdzakelijk onderzoek gedaan naar het afvoercomplex of -middel in de afsluiting. Deze twee woorden worden in dit rapport beiden gebruikt. Meestal wordt met het afvoermiddel het principe bedoeld hoe het water afgevoerd wordt. Dit kan door te spuien onder vrij verval of door te pompen. Het afvoercomplex ziet meer op de constructie waarmee het water afgevoerd wordt. Dit kan een spuisluis, een gemaal of een combinatie van beiden zijn. Soms worden beide termen echter door elkaar gebruikt.

4.2 Eisen

In deze paragraaf is er gekeken naar de functionele eisen, de randvoorwaarden, de uitgangspunten en de aannames voor de afsluiting van de Nieuwe Waterweg. De focus ligt op het afvoermiddel in de afsluiting. Eerst is dit in algemene bewoording omschreven waarna het concreet is gemaakt met waarden.

4.2.1 Algemeen

De verschillende eisen, randvoorwaarden, uitgangspunten en aannames zijn hier in algemene formulering op een rij gezet.

Functionele eisen

De eisen die aan de afsluiting en/of aan het afvoercomplex gesteld worden zijn:

- *Hoogwaterbescherming*
 - o Een belangrijke eis aan de afsluiting en het afvoercomplex is dat deze in staat zijn om het vooraf bepaalde waterstandsverschil te keren. Dit waterstandsverschil hangt onder andere af van de optredende rivierafvoeren, de zeespiegel(stijging) en de waterberging in het gebied. Het waterstandsverschil kan veroorzaakt worden door een hoge buitenwaterstand en een lage binnenwaterstand alsook door een lage buitenwaterstand en een hoge binnenwaterstand.
 - o De binnenwaterstand mag niet te hoog worden om overstromingen te voorkomen. Er kan dus maar een beperkte hoeveelheid water geborgen worden op de rivier achter de afsluiting.
- *Waterafvoer*

Het afvoercomplex moet beschikken over voldoende afvoercapaciteit om het vastgestelde debiet af te voeren (en eventueel ijs en sediment). Dit moet plaats kunnen vinden zonder negatieve neveneffecten zoals een te hoge opstuwung, te hoge stroomsnelheden, erosie of sedimentatie.
- *Beschermen van zoetwatervoorraad*

Ook een belangrijke eis aan de afsluiting en het afvoercomplex is dat dezen het zoute zeewater tegenhoudt. Hierdoor zullen de zoetwater inlaatpunten in de Rijn-Maasdelta in de toekomst minder bedreigd worden door zout water (externe verzilting). Dit is vooral het geval tijdens lage rivierafvoeren.
- *Scheepvaart*
 - o De afsluiting moet de scheepvaart zo min mogelijk hinderen. Er zullen scheepvaartsluizen in de afsluiting moeten komen die toegankelijk zijn voor binnenvaartschepen volgens de vooraf vastgestelde CEMT-klasse, voor zeeschepen en voor de grootste cruiseschepen ter wereld.
 - o Tijdens de bouw van de afsluiting en het afvoercomplex moet er zo min mogelijk hinder zijn voor de scheepvaart en mag het betreffende stuk rivier niet gestremd worden voor een langere periode (enkele dagen).
 - o De scheepvaart mag niet te veel hinder ervaren van stroming door en rond de afsluiting en het afvoercomplex.

- *Recreatie*
Langs en op de rivieren in het Rijnmondgebied zijn verschillende vormen van recreatie. Bij de aanleg van het afvoercomplex moet hier rekening mee worden gehouden.
- *Natuur*
 - o De afsluiting en het afvoercomplex mogen het milieu niet onacceptabel aantasten.
 - o Vissen moeten de mogelijkheid hebben om de afsluiting en het afvoercomplex te passeren. Daarom zullen de eventuele pompen in het afvoercomplex visvriendelijke moeten zijn.

Randvoorwaarden

Naast de functionele eisen zijn er nog een aantal niet te beïnvloede randvoorwaarden waaraan de afsluiting en het afvoercomplex moeten voldoen:

- *Landschap*
De afsluiting en het afvoercomplex moeten op een verantwoordelijke wijze in het landschap geïntegreerd worden. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met de omwonenden.
- *Stormvloed en rivierafvoeren*
De stormvloed en rivierafvoeren zijn niet te beïnvloeden parameters. De extreme stormvloed en de extreem hoge rivierafvoeren zijn niet op voorhand vastgelegd of te voorspellen. Wel zijn de maatgevende afvoeren van de Rijn en de Maas bekend. Deze zijn als volgt:
 - o De maatgevende Rijnafvoer bedraagt in de huidige situatie 16.000 m³/s.
 - o In 2050 bedraagt de maatgevende Rijnafvoer 17.000 m³/s.
 - o In 2100 bedraagt de maatgevende Rijnafvoer 18.000 m³/s.
- *Veiligheid*
Tijdens de levensduur van waterkeringen moeten zij een vooraf vastgestelde veiligheid kunnen garanderen. Zo zullen de afsluiting en het afvoercomplex ontworpen worden op een eens in de zoveel jaar optredende waterstand. Maar daarnaast moet er ook rekening gehouden worden met een eventuele aanvaring en moet afvoercomplex betrouwbaar zijn in operationele fase.

Uitgangspunten

Er is één uitgangspunt voor de afsluiting en het afvoercomplex:

- *Levensduur*
De gegarandeerde levensduur van de afsluiting en het afvoercomplex moet 100 jaar zijn. Alleen de vervangbare onderdelen mogen eerder vervangen worden. Er is bewust niet gekozen voor een langere levensduur, hoewel dit technisch wel mogelijk is. De eisen aan waterkeringen veranderen tegenwoordig snel, zodat een lange levensduur van een constructie niet verstandig is. De functionele levensduur is dus korter dan de technisch mogelijke levensduur.

Aannames

Om binnen het tijdsbestek van dit onderzoek tot een goed ontwerp te komen, zullen diverse aannames gemaakt worden. Deze aannames staan hieronder opgesomd. Op diverse plaatsen in het verslag zijn deze aannames verder uitgewerkt en toegelicht.

- De afsluiting en het afvoercomplex worden ontworpen op basis van de randvoorwaarden van het jaar 2100.
- Doorsneden van de vaarwegen zijn trapeziumvormig met een oeverhelling van 1:3.
- Het waterveiligheidsbeleid zal de komende tijd veranderen. In dit onderzoek wordt een ontwerp gemaakt van de afsluiting en het afvoercomplex op basis van de huidige normen.
- De verwachte zeespiegelstijging voor de toekomst wordt (na onderzoek) steeds opnieuw aangepast. Er zijn ook veel verschillende toekomstscenario's in de omloop. In dit onderzoek zal de bovenwaarde van de verwachte zeespiegelstijging uit het Deltaprogramma

aangehouden worden. De verwachte zeespiegelstijging voor 2050 bedraagt 35 cm en voor 2100 85 cm ten opzichte van 2000.

- Bij een extreem hoge zeewaterstand en grote golfslag, kunnen de golven over de afsluiting en het afvoercomplex heen slaan. Gelet op de waterstandverhoging achter de afsluiting is de overslag verwaarloosbaar ten opzichte van de Rijn- en Maasafvoer.
- De gemiddelde afvoer van de Rijn en de Maas verandert niet; de maatgevende Rijnafvoer neemt lineair toe en zal in 2050 en 2100 zijn zoals deze nu bekend is.
- De afvoerverdeling van de Rijn bij gemiddelde en maatgevende afvoer verandert niet.
- De top van een hoogwatergolf van de Rijn op een rivier duurt 3,5 dagen. In totaal duurt de hoogwatergolf ongeveer 20 dagen.
- Gemalen langs de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas, de Lek en andere rivieren kunnen water spuien op deze rivieren. Er is van uit gegaan dat deze hoeveelheden verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de Rijn- en Maasafvoer. De invloed van dit spuien zal dus niet meegenomen worden op de waterstandverhoging achter de afsluiting.

4.2.2 Concreet

Gebaseerd op bovenstaande algemeen geformuleerde eisen gelden onderstaande concrete eisen voor de afsluiting en het afvoercomplex.

Functionele eisen

- *Waterbescherming*
De maatgevende buitenhoogwaterstand bedraagt ter hoogte van Vlaardingen NAP+3,33 (1 x per 10.000 jaar).
De maatgevende buitenlaagwaterstand bedraagt NAP-1,3 m (1x per 10 jaar).
Als maximale binnenwaterstand is gekozen voor NAP+2,5 m, ter beschermingen van de buitendijkse gebieden.
- *Waterafvoer*
Afhankelijk van de locatie bedraagt het gemiddelde debiet in de huidige situatie:
 - o in de Nieuwe Maas: 630 m³/s (restdebiet);
 - o en in de Nieuwe Waterweg (Nieuwe Maas plus Oude Maas): 1280 m³/s (restdebiet).
 De maatgevende afvoer bedraagt in de huidige situatie: 3200 m³/s (0,2*16.000) (zie Paragraaf 2.1.1).
In 2050 bedraagt de maatgevende afvoer: 3400 m³/s (0,2*17.000).
In 2100 bedraagt de maatgevende afvoer: 3600 m³/s (0,2*18.000).

Randvoorwaarden

- *Stormvloeden en rivierafvoeren*
De maatgevende situatie kan bepaald worden met de regel van Turkstra. Dit houdt in dat de kans dat twee gebeurtenissen met een zeer kleine kans tegelijkertijd op treden, verwaarloosbaar is. In dit geval betekent dat, dat de kans dat de maatgevende afvoer tegelijkertijd met een stormvloed optreedt zo klein is, dat dit niet meegenomen wordt in het ontwerp. In dit geval betekent dat, dat er ontworpen is op basis van een gemiddelde stormvloed in combinatie met een extreme rivierafvoer, en andersom.
- *Veiligheid*
Tijdens de levensduur van de keringen moeten zij een bepaalde veiligheid kunnen garanderen. Zo zullen de afsluiting en het afvoercomplex ontworpen worden op een eens in de zoveel jaar optredende waterstand. Maar daarnaast moet er ook rekening gehouden worden met een eventuele aanvaring en moet de kering betrouwbaar zijn in operationele fase.

Aannames

- Zeespiegelstijging

De zeespiegelstijging voor 2050 bedraagt 35 cm ten opzichte van 2000. Ten opzichte van 2018 bedraagt de zeespiegelstijging in 2050 dan 22 cm.

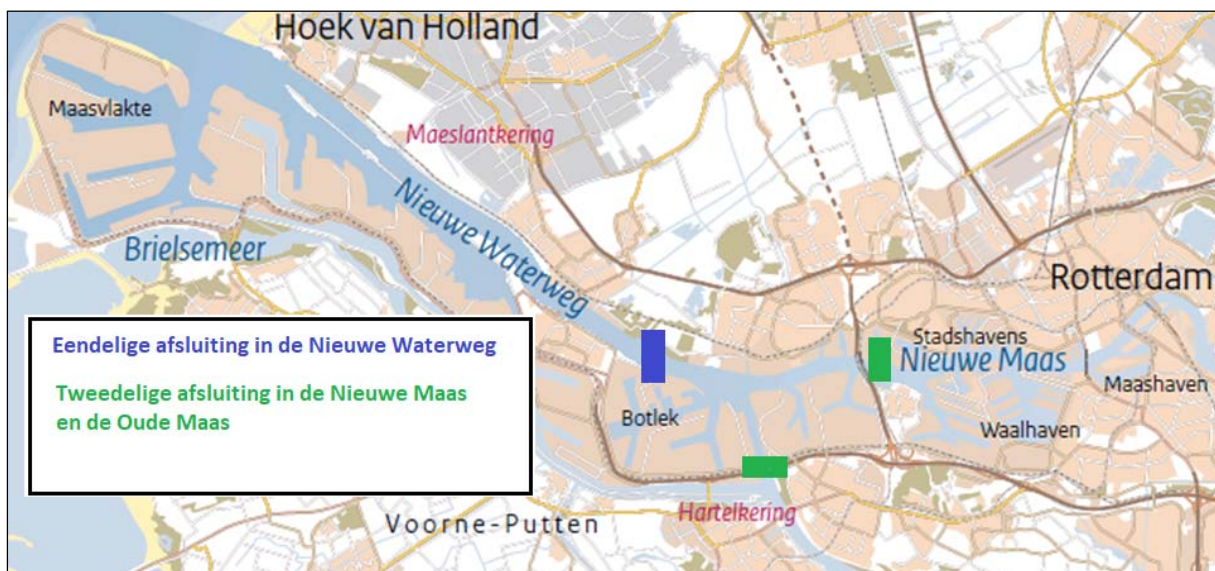
De zeespiegelstijging voor 2100 bedraagt 85 cm ten opzichte van 2000. Ten opzichte van 2018 bedraagt de zeespiegelstijging in 2100 dan 70 cm.

4.3 Locatie

In deze paragraaf zijn de mogelijke locaties voor de afsluiting van de Nieuwe Waterweg met de voor- en nadelen beschreven. Op basis hiervan is een keuze gemaakt voor een locatie waar de afsluiting moet komen. Voor de duidelijkheid is hier opgemerkt dat de locatie van de afsluiting niet alleen in de Nieuwe Waterweg gesitueerd kan worden, maar ook in de Nieuwe Maas in combinatie met een afsluiting van de Oude Maas.

4.3.1 Opties

De afsluiting in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas is op veel plaatsen mogelijk. Voor de eenvoudigheid is ervoor gekozen om de mogelijke locaties te verdelen in twee groepen, de zogenoemde hoofdvarianten. De eerste hoofdvariant komt overeen met een locatie in de Nieuwe Waterweg, vanaf Hoek van Holland tot aan de monding van de Oude Maas. De tweede hoofdvariant komt overeen met een locatie in de Nieuwe Maas, vanaf de monding van de Oude Maas tot aan monding van de Noord. In de tweede hoofdvariant is er ook een afsluiting in de Oude Maas nodig. In de eerste hoofdvariant is één afsluiting nodig, en daarom wordt deze de “Eendelige afsluiting” genoemd. De tweede hoofdvariant bestaat uit twee afsluitingen, en deze wordt daarom de “Tweedelige afsluiting” genoemd. Binnen deze twee hoofdvarianten zijn er nog verschillende opties mogelijk voor wat betreft de precieze locatie. In Figuur 27 zijn de twee verschillende hoofdvarianten voor de locatie van de afsluiting met daarin het afvoercomplex weergegeven.



Figuur 27 - De hoofdvarianten voor de locatie van de afsluiting

Zonder dat de exacte locatie van de afsluiting bekend is, staan de (gemiddelde) afmetingen die binnen deze varianten al wel vast. Deze staan in Tabel 16.

Variant	Waterweg	Breedte [m]	Diepte [m]
Eendelige afsluiting	Nieuwe Waterweg	500	16
Tweedelige afsluiting	Nieuwe Maas	450	14
	Oude Maas	300	10

Tabel 16 - Afmetingen afsluiting in hoofdvarianten

4.3.2 Vergelijking

De voor- en nadelen van de twee hoofdvarianten zijn hier op een rij gezet. Behalve de voor- en nadelen zijn ook globaal de kosten voor de twee hoofdvarianten bepaald. Nadat de voor- en nadelen en de kosten van de twee varianten met elkaar vergeleken zijn, kan er een keuze gemaakt worden.

Voor- en nadelen

De voordelen van de “Eendelige afsluiting” ten opzichte van de “Tweedelige afsluiting” zijn:

- Minder hinder voor de directe omgeving tijdens de bouw van de afsluiting, doordat de afsluiting niet direct aansluit op een havengebied.
- Minder dijkverhoging nodig, doordat in dit geval de kustlijnverkorting groter is.

De nadelen van de “Eendelige afsluiting” ten opzichte van “Tweedelige afsluiting” zijn:

- Grotere zeesluizen nodig, doordat hier grotere zeeschepen passeren.
- Meer hinder voor scheepvaart, door de wachttijden bij de sluisen. Dit geldt in dit geval voor meer grote (zee)schepen, doordat de afsluiting meer zeewaarts gelegen is. Hierdoor passeren hier meer grote (zee)schepen.

De voordelen van “Tweedelige afsluiting” ten opzichte van de “Eendelige afsluiting” zijn:

- Minder en/of kleinere (zee)sluizen nodig, doordat hier minder grote (zee)schepen passeren.
- Minder hinder voor scheepvaart, doordat de afsluiting meer in het binnenland gesitueerd is. Hierdoor passeren hier minder grote (zee)schepen.

De nadelen van “Tweedelige afsluiting” ten opzichte van de “Eendelige afsluiting” zijn:

- De afsluiting zal duurder worden, doordat deze op twee locaties zal komen.
- Meer dijkverhoging nodig, doordat in dit geval de kustlijn minder verkort wordt.

Kosten

In Tabel 17 staan de kosten, gebaseerd op referentieprojecten, voor de twee hoofdvarianten.

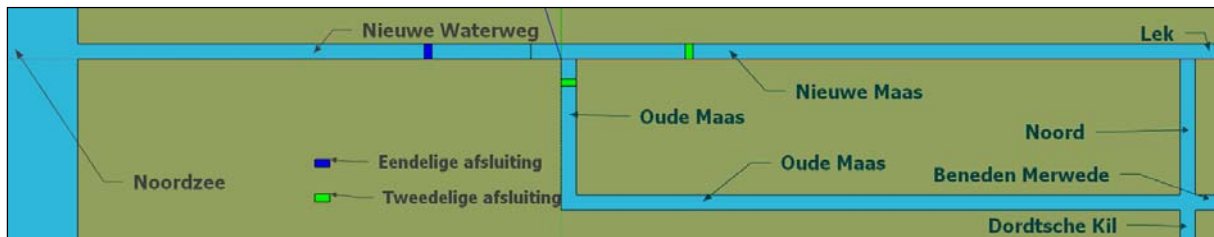
Kosten	Ongedeeld	Gedeeld
Dijkverhoging (€ 100.000 per meter)	300 miljoen	500 miljoen
Dam (€ 1.000.000 per meter)	500 miljoen	750 miljoen
Binnenvaartsluis (€ 150 miljoen per sluis)	450 miljoen	600 miljoen
Zeesluis	1,1 miljard	900 miljoen
Spuimiddel	150 miljoen	150 miljoen
Gemaal	1,5 miljard	1,5 miljard
Totaal	4,0 miljard	4,4 miljard

Tabel 17 - Kosten (€) per varianten

De afsluiting van de Nieuwe Waterweg door de “Eendelige afsluiting” is ongeveer 400 miljoen euro (10%) goedkoper dan de “Tweedelige afsluiting”. Dit zijn alleen de kosten voor wat betreft de realisatie van de afsluiting in de verschillende varianten.

In de voorgaande kostenvergelijking zijn de kosten voor het hinderen van de scheepvaart tijdens de bouw van de afsluiting nog niet meegenomen. Deze zijn in de “Eendelige afsluiting” groter, omdat hier meer scheepvaart passeert.

Ook is er voor een groot deel van de schepen in de “Tweedelige afsluiting” een alternatieve route mogelijk via de Oude Maas, als de Nieuwe Maas gestremd is. Andersom is de Nieuwe Maas als alternatieve route te gebruiken als Oude Maas gestremd is door de bouw van de afsluiting. In Figuur 28 is de ligging van de Oude Maas, de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg met de afsluitvarianten schematisch weergegeven. Duidelijk is te zien dat door de ‘ruit’ van de Oude Maas, de Nieuwe Maas en de Noord in geval van stremming in de Oude Maas of Nieuwe Maas er een alternatieve route is.



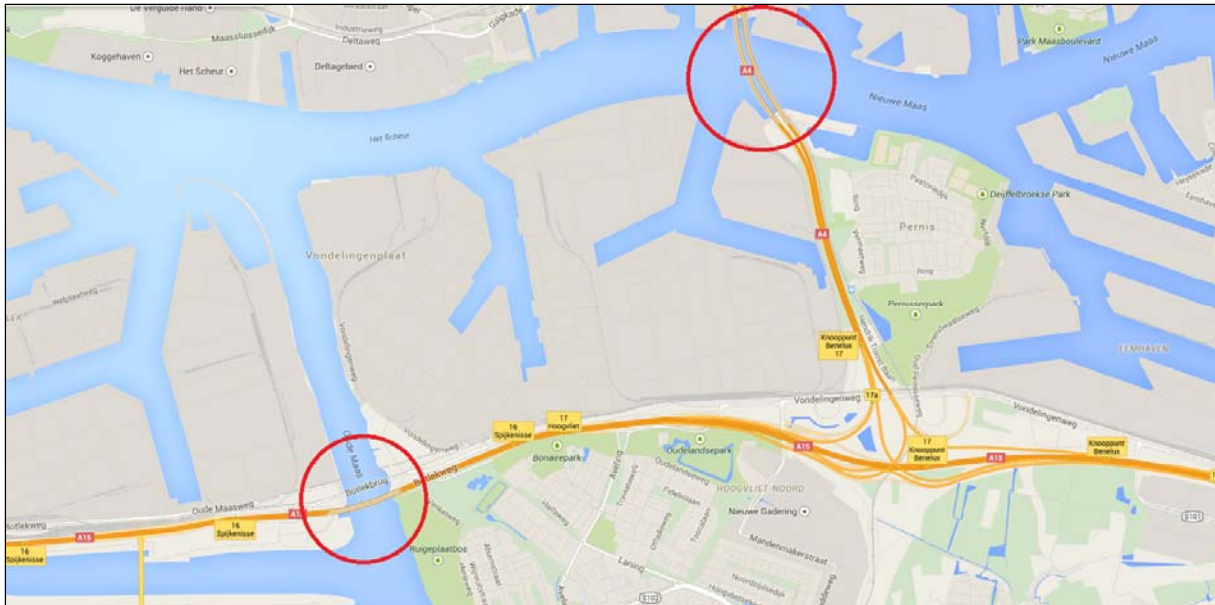
Figuur 28 - Schematische weergave waterwegen Rijnmond

Ook de kosten die het wachten bij de scheepvaartsluizen met zich meebrengt, zijn nog niet meegenomen in bovenstaande berekening. Wat al wel gesteld kan worden is dat de wachttijd bij de “Eendelige afsluiting” groter is. In de Nieuwe Waterweg, de locatie van de eendelige afsluiting, zal meer scheepvaart de sluisen moeten passeren.

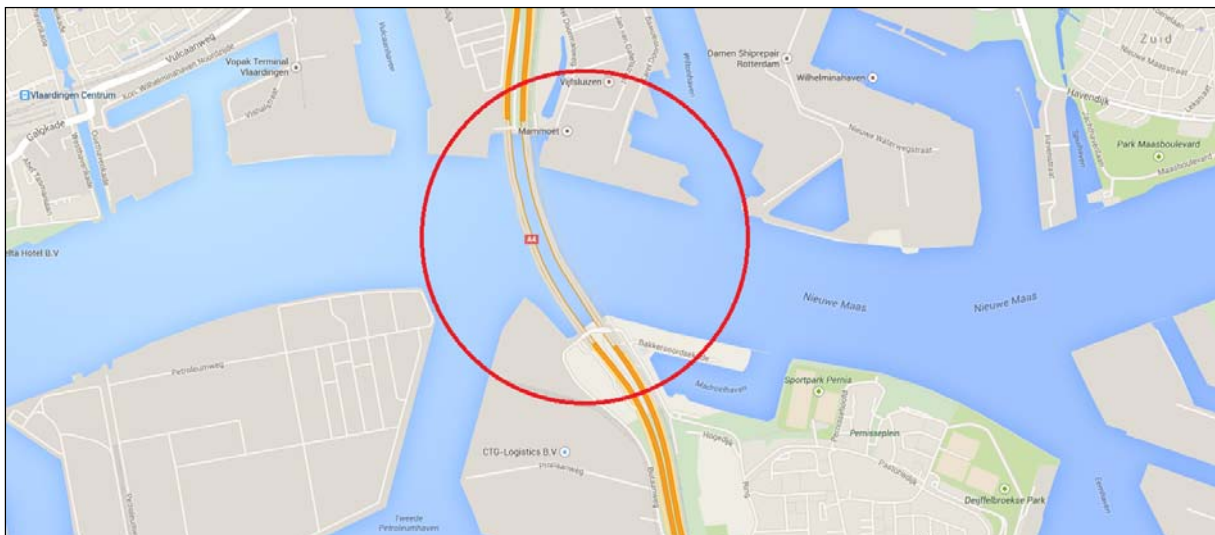
4.3.3 Conclusie locatie

Hoewel de investeringskosten voor de “Tweedelige afsluiting” hoger zijn, is de verwachting dat de totale kosten toch lager uitvallen voor de “Eendelige afsluiting”. Dit komt onder andere door de hierboven genoemde kosten voor de hinder van de scheepvaart en voor de wachttijden bij de scheepvaartsluizen. Om deze redenen is toch gekozen voor de variant van de “Tweedelige afsluiting”.

Ook de zes ingenieurs van het Plan Sluizen hebben voor deze optie gekozen, waarbij de afsluiting in de Nieuwe Maas ter hoogte van de Beneluxtunnel (in de Nieuwe Maas) is gesitueerd. Dit lijkt een logische locatie omdat de bovenzijde van de Beneluxtunnel een vaste diepte heeft. Voor de diepte van de scheepvaartsluizen in de afsluiting kan dan dezelfde diepte aangehouden worden. De diepte van de bovenzijde van de Beneluxtunnel is dan een soort drempel. De diepgang van de scheepvaart is beperkt door de tunnel. Als de afsluiting bij de Beneluxtunnel wordt gemaakt, zal de diepte voor de scheepvaart in de toekomst ook niet aangepast hoeven te worden. In de Oude Maas komt de afsluiting ter hoogte van de Botlektunnel. In Figuur 29 zijn de beide locaties weergegeven (rechtsboven in de Nieuwe Maas en linksonder in de Oude Maas). De exacte locatie in de Nieuwe Maas is weergegeven in Figuur 30. Er is vanuit gegaan dat de afsluiting niet binnen 100 meter van de Beneluxtunnel mag komen.



Figuur 29 - Locaties afsluitingen in "Tweedelige afsluiting" in de Oude Maas en de Nieuwe Maas



Figuur 30 - Locatie "Tweedelige afsluiting" in de Nieuwe Maas ter hoogte van de Beneluxtunnel

Zoals eerder vermeld gaat het in dit onderzoek alleen over de afsluiting van de Nieuwe Waterweg en niet over de afsluiting van de Oude Maas, hoewel die in deze situatie ook nodig is om ervoor te zorgen dat de 'Nieuwe Waterweg' volledig dicht is.

5 Afvoermiddel in afsluiting

In dit hoofdstuk komen allereerst algemene zaken over het afvoermiddel aan de orde. Het gaat dan om de functies van het afvoermiddel en de verschillende soorten afvoermiddelen. Ook worden enkele referentieprojecten genoemd. Daarna zijn met behulp van een morfologische kaart vier verschillende varianten gemaakt: de opensluis, de rechte koker, de venturikoker en de hevel. Deze zijn met elkaar vergeleken met behulp van een multicriteria-analyse, waarna er een keuze voor een ontwerp van het afvoermiddel is gemaakt. Daarna is op basis van de eisen en randvoorwaarden bepaald wat de afmetingen van de kokers in de afvoerconstructie zijn. Verder is het aantal kokers bepaald in het geval van spuien onder vrij verval en pompen. Omdat dit aantal niet gelijk is, is er een keuze gemaakt. Tot slot is het spuiregime en de verhouding tussen spuien en pompen bepaald. Met dat laatste wordt bedoeld dat gekeken wordt naar wanneer het gunstig om te spuien onder vrij verval en wanneer er beter gepompt kan worden.

5.1 Algemeen

In de afsluiting van de Nieuwe Waterweg zal een afvoermiddel moeten komen. Zoals eerder vermeld, moeten er ook scheepvaartsluizen in de afsluiting komen. Omdat dat geen onderdeel is van dit onderzoek, wordt er verder in dit rapport geen aandacht aan de scheepvaartsluizen besteed. Door Siebe Dorrepaal is al een ontwerp gemaakt van de scheepvaartsluizen [Dorrepaal, S.G., 2016]. In deze paragraaf zijn enkele algemene zaken over afvoermiddelen beschreven, zoals de verschillende functies, de verschillende soorten afvoermiddelen en enkele referentieprojecten.

5.1.1 Functies

Het afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg heeft meerdere functies. De belangrijkste zijn hier genoemd.

- *Afvoeren rivierwater*

Een van de belangrijkste functies van een afvoermiddel is het afvoeren van water. Een afvoermiddel bevindt zich vaak in een afsluiting van een waterweg. Door een afsluiting wordt het afvoeren van water onmogelijk gemaakt. Omdat water meestal niet geborgen kan worden, moet er een voorziening komen waardoor afvoeren mogelijk blijft.

- *Keren hoge zeewaterstand*

Een afvoermiddel bevindt zich vaak in een afsluiting die hoge waterstanden moet keren. Daarom moet het afvoermiddel in die situaties zelf ook een buitenwaterstand kunnen keren die hoger is dan de binnenwaterstand. Niet alleen de afsluiting functioneert dan als waterkering, maar dat geldt dan ook voor het afvoermiddel.

- *Regelen binnenwaterstand*

Een andere functie is het regelen van het waterpeil achter het afvoermiddel. Dit kan door de grootte van de openingen in het afvoermiddel aan te passen, of door een aantal pompen aan of uit te zetten. Zo kan geregeld worden dat er binnen een bandbreedte een bepaalde binnenwaterstand verkregen wordt. De grootte van de doorstroomopening of het aantal werkende pompen is afhankelijk van de rivierafvoer en het waterstandsverschil.

- *Verminderen zoutindringing*

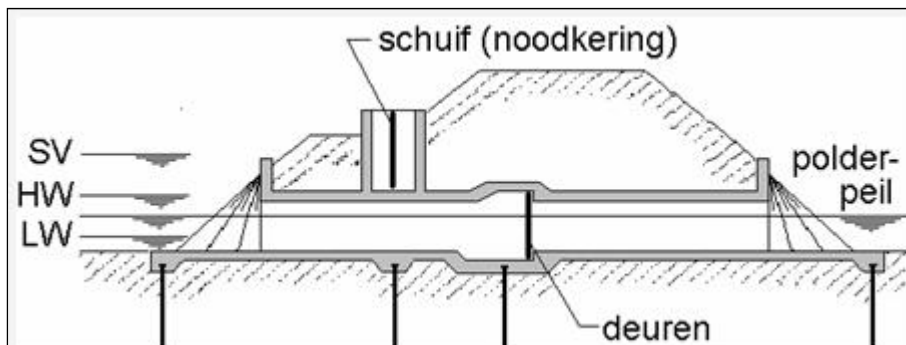
Als een afsluiting met een afvoermiddel zich op de grens van zoet- en zoutwater bevindt, kan het afvoermiddel de indringing van zoutwater tegengaan. Dit wordt bereikt door het afvoermiddel te sluiten als de waterstand van het zoute water hoger is dan de waterstand van het zoete water.

5.1.2 Principe

Er zijn twee soorten afvoermiddelen, namelijk een spuicomplex met spuisluizen en een gemaal met pompen. In het eerste geval wordt het water afgevoerd door het te spuien onder vrij verval en in het tweede geval door te malen.

Spuisluis

Een spuisluis, ook wel keersluis of uitwateringssluis genoemd, is een sluis die bedoeld is om binnenwater te spuien en buitenwater te keren. In de situatie van spuien verplaatst het water zich onder vrij verval (onder invloed van de zwaartekracht). Een spuicomplex bestaat uit een of meerdere spuisluizen. Bij een spuisluis kan gebruik worden gemaakt van het venturi-effect⁴. Ook de hevel kan als variant op een spuisluis toegepast worden. In Figuur 31 staat een voorbeeld van een dwarsdoorsnede van een spuisluis, uitgevoerd als een koker.

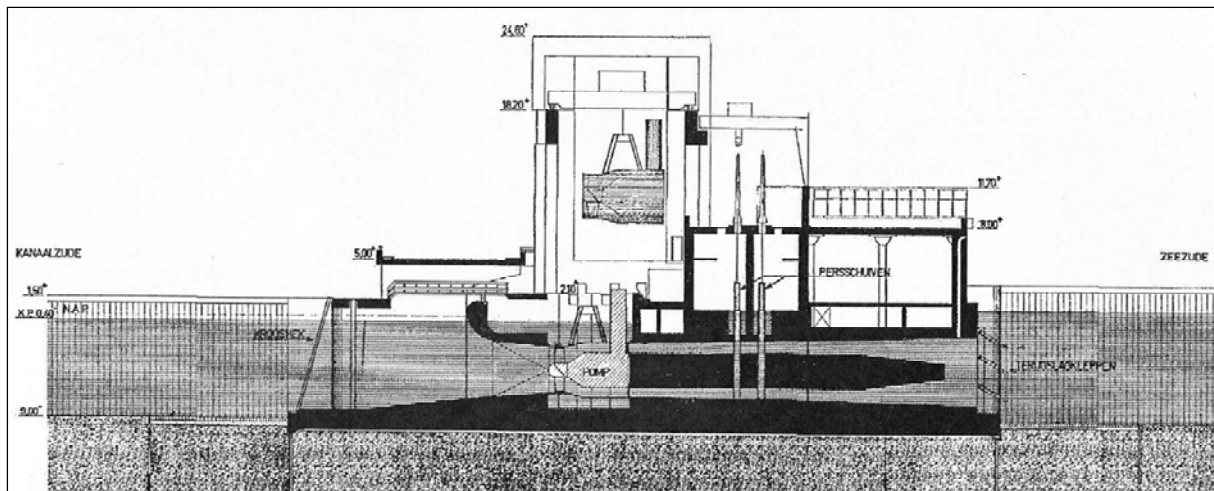


Figuur 31 - Voorbeeld dwarsdoorsnede spuisluis, rechte koker [Nipius, F., 2016]

Gemaal

Een gemaal is een installatie om water te verplaatsen van een lager naar een hoger niveau door middel van pompen. Het brengt of houdt water in een peilgebied op een bepaald peil. Een gemaal bestaat uit een of meerdere pompen. Er kunnen verschillende soorten pompen toegepast worden, zoals een zuigerpomp, een schroefpomp en een centrifugaalpomp. In Figuur 32 is een voorbeeld gegeven van een dwarsdoorsnede van een gemaal, in dit geval van gemaal IJmuiden. In deze dwarsdoorsnede is goed te zien dat gebruikt wordt gemaakt van het venturi-effect. De instroomoppervlakte (links) wordt steeds nauwer en de uitstroomoppervlakte (rechts) wordt weer wijder. Meer informatie over gemaal IJmuiden is te vinden in Paragraaf 5.1.3.

⁴ Door een geleidelijke trechtervormige vernauwing van de doorstroomoppervlakte neemt de stroomsnelheid toe. Ook zorgt een geleidelijke vernauwing en verwijding van de doorstroomoppervlakte voor minder verliezen. Deze twee effecten zorgen voor een grotere afvoercapaciteit van een spuisluis.



Figuur 32 - Voorbeeld dwarsdoorsnede gemaal IJmuiden [IJsselstijn, J., 1974]

Afvoermiddel Nieuwe Waterweg

In het afvoermiddel in de Nieuwe Waterweg zullen beide soorten van afvoermiddelen worden toegepast. Niet gelijktijdig in twee verschillende constructies, maar in een constructie dat afwisselend als spuigemaal of als pompgemaal functioneert. Het idee is om in eerste instantie een afvoerconstructie te realiseren, die als spuigemaal functioneert. De transformatie in een pompgemaal kan op twee manieren. Of het spuigemaal wordt in de loop van de tijd (geleidelijk) omgebouwd tot een definitief pompgemaal. Wanneer dit gebeurt is afhankelijk van de snelheid van de (verwachte) zeespiegelstijging. Of het spuigemaal wordt af en toe geheel of gedeeltelijk omgebouwd door pompgemaal. Dit kan bijvoorbeeld gedaan worden bij een verwachte piekafvoer van de Rijn en eventueel een hoge zee waterstand. Na een grote rivierafvoer kan het pompgemaal dan weer teruggebouwd worden tot spuigemaal. Dit kan herhaald worden zolang de zeespiegel niet zoveel gestegen is, dat er niet meer onder vrij verval gespuid kan worden of als de binnenwaterstand te hoog wordt. In Paragraaf 5.2 wordt dieper op de flexibiliteit van het afvoermiddel ingegaan.

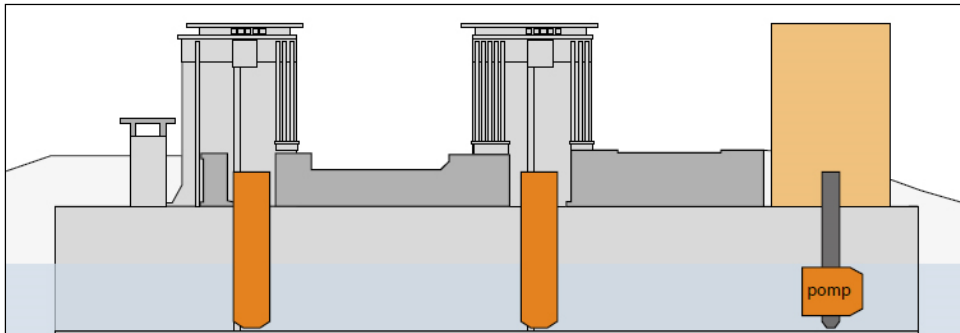
5.1.3 Referentieprojecten

Als referentieprojecten is gekozen voor zowel een of meerdere spuicomplexen en gemalen.

Pompen in spuisluizen Afsluitdijk

Een goed referentieproject is het onderzoek naar het vergroten van de spuicapaciteit van de spuisluizen in de Afsluitdijk door het plaatsen van pompen in de bestaande spuisluizen. Het grote verschil van dat onderzoek met dat van de Nieuwe Waterweg is dat het bij de Afsluitdijk om bestaande spuicomplexen gaat, terwijl in de Nieuwe Waterweg alles nieuw gebouwd zal worden. Met de spuisluizen (de Stevinsluizen) in Den Oever en Kornwerderzand wordt water uit het IJsselmeer afgevoerd naar de Waddenzee. Als het water in de Waddenzee lager staat dan in het IJsselmeer, kunnen de schuiven van de spuisluizen open. Het water uit het IJsselmeer stroomt dan onder vrij verval naar de Waddenzee. Door de zeespiegelstijging wordt de beschikbare tijd om te spuien steeds korter. Bovendien zullen de piekhoeveelheden de komende decennia door de klimaatveranderingen groter worden. Door in de spuisluizen bij Den Oever pompen te plaatsen, kan er in de toekomst ook water uit het IJsselmeer afgevoerd worden als het water in de Waddenzee hoger staat. Zo wordt de spuicapaciteit dus vergroot. De pompcapaciteit van de nieuwe pompen bedraagt ruim 400 m³/s, waarmee in Den Oever het grootste gemaal van Europa ontstaat. Rijkswaterstaat kan zo het huidige waterpeil in het IJsselmeer in de toekomst handhaven. De pompen bij Den Oever worden gefaseerd ingebouwd. Zo kan er ingespeeld worden op de werkelijke snelheid van de zeespiegelstijging, kan er steeds gebruik gemaakt worden van de nieuwste technologieën en kan er gezorgd worden voor oplossingen die ook op lange termijn standhouden.

Dit is een voorbeeld van adaptief deltamanagement. In Figuur 33 staat een tekening van de pompen die in de spuisluisen bij den Oever geplaatst zullen worden. Er bevinden zich drie spuisluisen met elk 5 spuiokers in het spui-complex bij Den Oever. Elke spuioker is 12 meter breed en 7 meter diep [De Afsluitdijk, 2017].

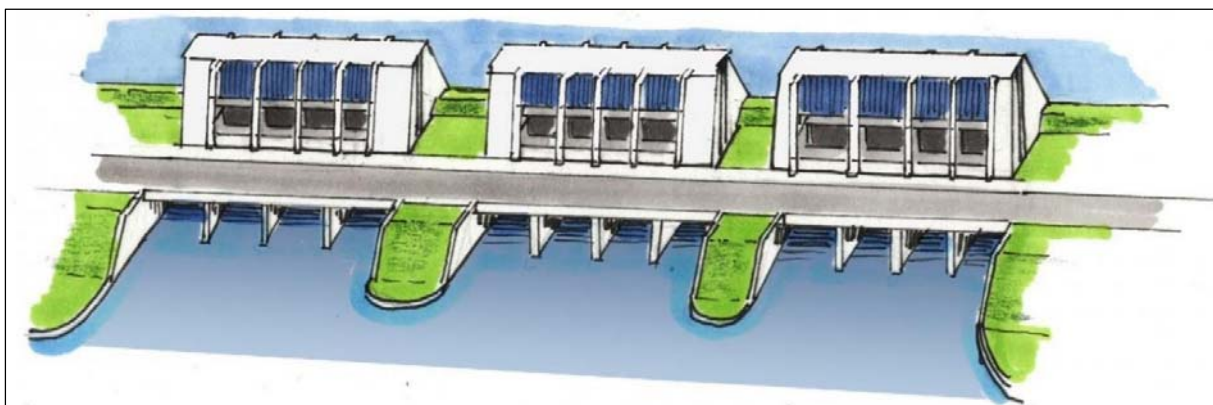


Figuur 33 - Pompen bij spui-complex Den Oever [De Ingenieur, 2015]

Pompen in de Cleveringsluizen

Momenteel vindt de afvoer van water vanuit het Lauwersmeer naar de Waddenzee plaats onder vrij verval. Bij verdergaande bodemdaling door aardgaswinning en klimaatverandering zal de waterbeheersing in het Lauwersmeer aangepast moeten worden.

In het jaarplan 2016 van het waterschap Noorderzijlvest is een onderzoek naar het plaatsen van pompen in de spuiokers van de Cleveringsluis opgenomen. Dit is een goedkoper variant voor een nieuw te bouwen gemaal Lauwersoog. Uit eerder uitgevoerde verkenningen blijkt dat het plaatsen van pompen in de kokers van de Cleveringsluis mogelijk is. Deze verkenningen gaven echter niet duidelijk aan wat het effect zal zijn op de maatgevende hoogwaterstanden op het Lauwersmeer. Tijdens een onderzoeks- en verkenningfase wordt deze variant nogmaals meegenomen. Het plaatsen van pompcapaciteit wordt onderzocht op effectiviteit in relatie tot het kostenaspect. Een verdere analyse heeft de invloed van pompen op de versterkingsopgave alsook de voor- en nadelen in kaart gebracht, in relatie tot verhoging van de regionale keringen rond het Lauwersmeer. Hieruit blijkt dat extra spui-capaciteit de omvang van de benodigde versterking van de regionale kering nauwelijks beïnvloedt. Bovendien zijn pompen niet haalbaar vanwege de financiën (in relatie tot dijkversterking).



Figuur 34 - Impressie R.J. Cleveringsluizen bij Lauwersmeer [Waterschap Noorderzijlvest, 2017]

Gemaal IJmuiden

De Spuisluis dateert uit 1940 en wordt gebruikt om water onder vrij verval van het Noordzeekanaal in de Noordzee te spuien. De Spuisluis bestaat uit zeven kokers. Onder normale omstandigheden wordt zo veel mogelijk afgevoerd via deze spuiokers. Dit kan alleen tijdens laagwater op zee,

waardoor maximaal enkele uren per dag kan worden gespuid. De afvoercapaciteit van de spuiokers is in totaal $500 \text{ m}^3/\text{s}$, in extreme situaties kan deze bij voldoende verval toenemen tot maximaal $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Als niet kan worden geloosd op zee door te hoge buitenwaterstanden en de waterstanden op het Noordzeekanaal of het Amsterdam-Rijnkanaal onacceptabel hoog dreigen te worden, wordt het gemaal ingezet om de peilen op het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal te handhaven. Het doel is om ongeveer twee derde deel van het water af te voeren via de Spuisluis en een derde deel via het Gemaal. In de praktijk komt dit ongeveer uit op een 50% - 50% verdeling.

Het Gemaal, weergegeven in Figuur 35, bestaat uit zes maalgangen die ieder voorzien zijn van een horizontale schroefpomp. Vier van de zes pompen dateren uit 1975 en hebben een capaciteit van $40 \text{ m}^3/\text{s}$. De andere twee pompen (zie Figuur 36) zijn geïnstalleerd in 2005 en hebben een capaciteit van $50 \text{ m}^3/\text{s}$. De totale capaciteit van het Gemaal is $260 \text{ m}^3/\text{s}$. Elke pomp kan worden opgetakeld en met een kraan naar het naastgelegen onderhoudsgebouw worden verplaatst, waar in droge omstandigheden onderhoudswerkzaamheden aan de pompen kunnen plaatsvinden.

De bediening van het Gemaal- en Spuicomplex IJmuiden gebeurt vanuit het Centraal Bedieningsgebouw in Schellingwoude en wordt ondersteund door een Beslissingsondersteunend Systeem (BOS). Dit systeem geeft op basis van ingewonnen gegevens een advies over in te zetten pompen en spuiokers.



Figuur 35 - Gemaal bij IJmuiden [Rijkswaterstaat, 2017]



Supergemaal in IJmuiden

Dankzij de uitbreiding met twee grote pompen kan het Gemaal IJmuiden weer vijftig jaar vooruit. De maalcapaciteit gaat van 160 naar $260 \text{ m}^3/\text{s}$ [Stam, B, 2004].

IJmuiden – Het is een fascinerend gezicht, de twee nieuwe pompen van het Gemaal IJmuiden. Speciaal voor de opening op 15 september 2004 had Rijkswaterstaat een van de twee gevaarten zo'n twintig meter uit de pompput omhoog getakeld om hoogwaardigheidsbekleders en journalisten een indruk te geven van de dimensies. De pomp is zeven meter in doorsnede en weegt 120 ton. Voor de elektrische voeding waren al twee 10 kV-stroomkabels nodig vanaf elektriciteitscentrale in Velsen-Noord.

'Gemaal IJmuiden is essentieel voor de waterhuishouding in West-Nederland', legt ing. Harm Sloomweg van Rijkswaterstaat uit, projectmanager voor de uitbreiding. Samen met de spuisluis, die zeven grote spuiokers telt, zorgt het gemaal jaarlijks voor de afvoer van drie miljard m³ water uit het Amsterdam-Rijnkanaal, het Markeren Veluwemeer. Ruim de helft hiervan komt van de waterschappen.

De spuisluis (maximale capaciteit 700 m³/s) loost bij eb twee derde, het gemaal zorgt voor het restant. Het huidige gemaal stamt uit 1975 en bestond tot dusver uit vier grote bulkpompen met een gezamenlijke maalcapaciteit van 160 m³/s.

'Uit prognoses blijkt dat dat op termijn niet voldoende is', aldus Sloomweg. Niet alleen door de zeespiegelrijzing en extra neerslag, maar ook door het grotere aanbod van waterschappen en rwzi's.

'De waterstand in het Noordzeekanaal luistert heel nauw. Ideaal is volgens het Peilbesluit -40 cm NAP maar bij precies nul meter begint de situatie penibel te worden, zoals we in november 1998 hebben gezien. Zonder uitbreiding van het gemaal bereiken we omstreeks 2050 een gemiddeld waterniveau van 20 cm boven NAP.'

In 1999 viel het besluit om het gemaal uit te breiden met twee extra pompen, goed voor 100 m³/s erbij. De bouw begon in 2002 en was in mei 2004 afgerond.

'Dit is het grootste gemaal van Europa, en waarschijnlijk ook ter wereld', aldus Sloomweg.

De uitbreiding vereiste een uitgekiende logistiek, om dat het gemaal tijdens de uitbreiding in bedrijf bleef en het sluiscomplex bereikbaar moest blijven. Voor de aanleg van de bouwkuip moest daarom de weg worden omgelegd en een tijdelijke brug worden gebouwd. Omdat het gemaal tevens als primaire waterkering dient, gebruikten de bouwers grote stalen damwanden die 8 meter boven NAP uitstaken.

De nieuwe pompen komen van Nijhuis Pompen in Winterwijk, die ze wegens ruimtegebrek liet bouwen bij een staalconstructiebedrijf in Genemuiden. Per schip kwamen ze aan in IJmuiden, waar een mobiele kraan ze in de nieuwe schachten tilde. Het gaat om elektrisch aangedreven horizontale schroefpompen. Ze hebben een waterdicht cilindrisch huis met daarin de rotor en de stator.

Tussen elektromotor en het huis bevindt zich een ringvormige ruimte waar het water doorheen stroomt. Naast Nijhuis zijn nog diverse andere bedrijven bij het project betrokken. ABB leverde elektrotechnische onderdelen, zoals de elektromotor met permanente magneten, stator en rotor. VBK/Laere was de civiele hoofdaannemer, terwijl Boskalis verantwoordelijk was voor de verbreding van het binnen- en buitenspuikanaal.



Figuur 36 - Een van de nieuwe pompen in het gemaal bij IJmuiden [Rijkswaterstaat, 2017]

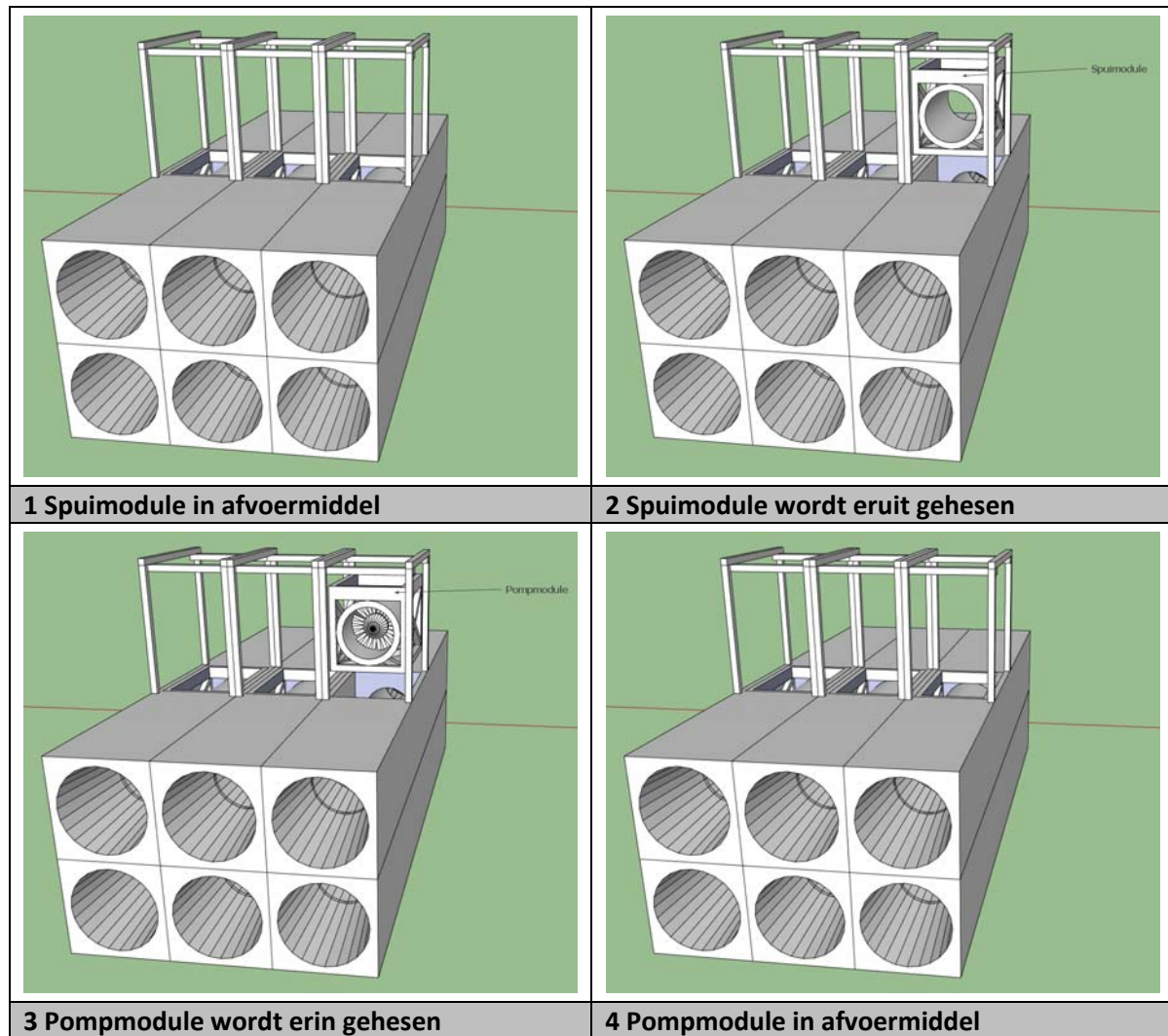
5.2 Flexibiliteit

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe flexibiliteit toegepast wordt in het afvoermiddel. Met flexibiliteit wordt in dit verband bedoeld dat de constructie flexibel of aanpasbaar is; passend voor de geldende omstandigheden in een bepaalde tijd. Kernachtig samengevat: spuien als het kan, pompen als het moet. Zoals in Paragraaf 5.1.2 gezegd is, zal het spuicomplex in de tijd (regelmatig) omgebouwd worden tot gemaal. De vier afbeeldingen in Tabel 18 laten zien waarom het afvoermiddel flexibel genoemd kan worden: het afvoermiddel wordt omgebouwd naar een situatie die het best past bij de omstandigheden in een bepaalde tijd. Concreet betekent dat: spuien in normale omstandigheden (gemiddelde zeewaterstand en gemiddelde Rijnafvoer) en pompen in extreme omstandigheden (stormvloed en/of maatgevende Rijnafvoer). In de onderstaande afbeeldingen is geen bovenbouw op de constructie getekend. De bovenbouw heeft een waterkerende functie, en die is bij de uitleg van het flexibele karakter van het afvoermiddel niet van belang.

Principe

In normale omstandigheden die vooral in de nabij toekomst nog vaak voorkomen zijn er alleen spuimodules in het afvoermiddel **(1)**. Dat is het geval bij gemiddelde waterstanden op zee en bij gemiddelde of kleine Rijnafvoeren. Deze afvoer kan dan onder vrij verval gespuid worden naar zee als de zeewaterstand lager is dan de rivierwaterstand. Als de zeewaterstand hoger is dan de rivierwaterstand wordt het afvoermiddel gesloten door bijvoorbeeld schuiven, zodat het water niet naar binnen stroomt. Op deze manier is er een gedempt getij achter de afsluiting in de Nieuwe Maas. In de situatie dat er extreme omstandigheden verwacht worden, zal de spuimodule verwisseld worden voor de pompmodule **(2 en 3)**. Dit zal nodig zijn als er een grote Rijnafvoer verwacht wordt. Ook als er een verwachte stormvloed op zee optreedt, zullen de modules verwisseld moeten worden. Dit is zeker het geval als deze twee situaties in zekere mate gelijktijdig optreden. Afhankelijk van de verwachte omstandigheden wordt bepaald hoeveel kokers omgewisseld worden. Daarnaast zullen er door de verwachte zeespiegelstijging in de verdere toekomst (richting 2100) meer pompen (definitief) een plaats krijgen in het afvoermiddel **(4)**.

Boven de kokers zal er een kraanbaan of portaalkraan komen die de spui- en pompmodules kan verplaatsen als deze verwisseld moeten worden **(2 en 3)**.



Tabel 18 - Principe transformatie van spuisluis naaremaal

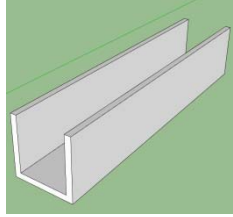
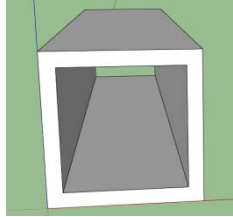
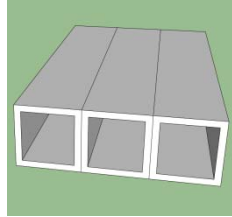
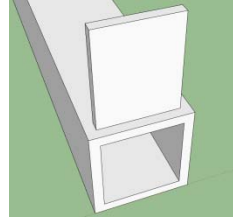
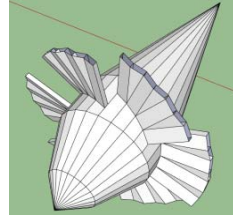
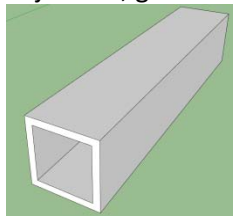
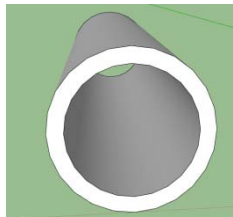
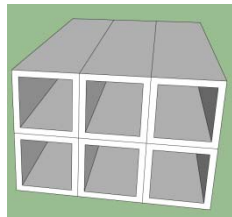
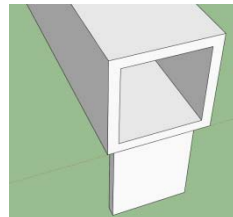
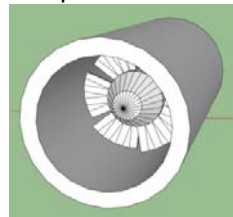
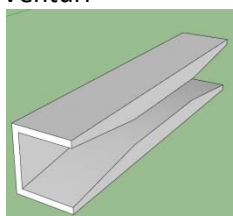
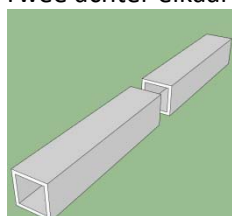
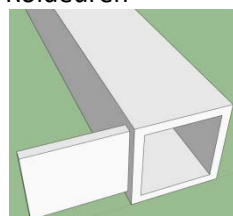
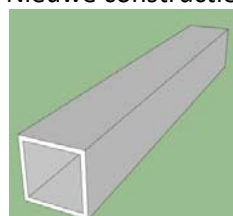
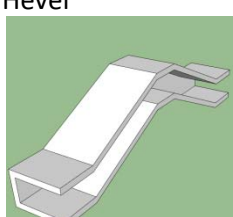
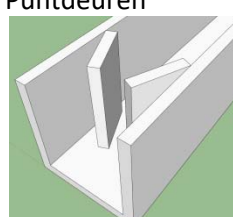
In Paragraaf 6.2.4 zal meer uitleg gegeven worden over de spui- en pompmodule en hoe deze constructief een plaats een krijgt in het afvoercomplex.

5.3 Varianten

Voor het afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg zijn een aantal varianten ontworpen. Dit is gedaan aan de hand van een morfologische kaart [Baars, S. van, et al., 2009] waarin de opties voor het afvoermiddel weergegeven zijn.

5.3.1 Opties

De verschillende mogelijkheden voor het afvoermiddel in de Nieuwe Waterweg zijn in Tabel 19 in een morfologische kaart weergegeven. Uit elke kolom wordt een optie gekozen om tot een variant te komen. Sommige opties zijn echter niet logisch of onmogelijk te combineren, terwijl andere voor de hand liggen. Door deze logische combinaties te kiezen zijn kansrijke varianten gemaakt. Hefdeuren zijn meestal het meest logisch als afsluitmiddel; het is het gemakkelijkst te bouwen en te onderhouden. Alleen als het wat betreft de hoogte niet kan of mag, zal hiervan afgeweken worden.

1 Principe	2 Doorsnede	3 Plaatsing	4 Sluiten	5 Ombouwen
Vrij verval, open 	Rechthoekig 	Naast elkaar 	Hefdeuren 	Losse pompen 
Vrij verval, gesloten 	Rond 	Twee boven elkaar 	Zakdeuren 	Pomp in kokerdeel 
Venturi 		Twee achter elkaar 	Roldeuren 	Nieuwe constructie 
Hevel 			Puntdeuren 	

Tabel 19 - Morfologische kaart ontwerp afvoermiddel

Op basis van de bovenstaande morfologische kaart zijn de volgende kansrijke varianten gemaakt.

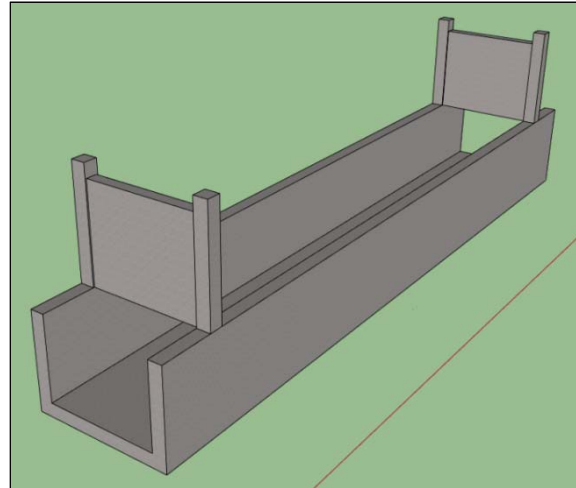
- Een open, rechthoekige spuisluis met hefdeuren waarin losse pompen geplaatst kunnen worden. De kokers zijn naast elkaar geplaatst.
- Een gesloten, ronde of vierkante koker met hefdeuren waarin losse kokerdelen met daarin pompen geplaatst kunnen worden. De kokers zijn hier naast elkaar of per twee boven elkaar geplaatst, afhankelijk van de beschikbare ruimte.
- Een gesloten, ronde of vierkante venturikoker met hefdeuren waarin losse kokerdelen met daarin pompen geplaatst kunnen worden. Ook in deze variant zijn de kokers naast of per twee boven elkaar geplaatst.
- Een hevel met ronde of vierkante kokers en hefdeuren waarin losse pompen geplaatst kunnen worden. Door de grote hoogte van constructie worden er geen kokers boven elkaar geplaatst.

5.3.2 Beschrijving

De vier varianten die in de vorige paragraaf beschreven zijn, zijn hier verder uitgewerkt.

Open sluis

De meest eenvoudige variant voor het afvoermiddel is een open sluis. Open wil zeggen dat deze aan de bovenzijde niet gesloten is, zodat het water aan de bovenzijde niet gehinderd wordt. In deze variant zullen een of meerdere schuiven geplaatst worden om de buitenwaterstand te keren als deze hoger is dan de binnenwaterstand. Figuur 37 laat een schets zien van een open sluis.



Figuur 37 - Schets-doorsnede open sluis

Voordelen

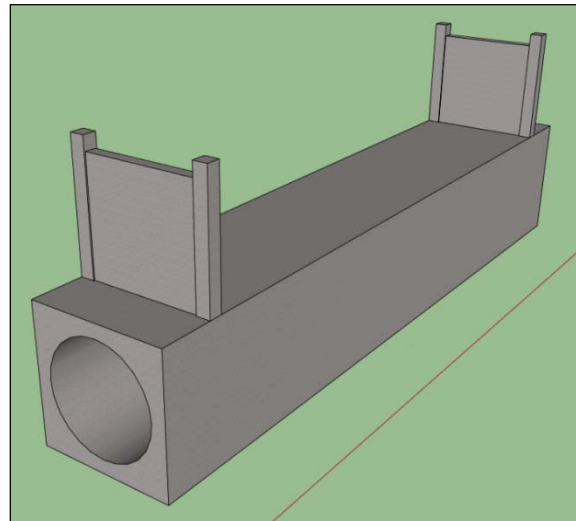
- Het is een eenvoudig ontwerp en daardoor is het eenvoudig uit te voeren.
- De afvoer is regelbaar door middel van een of meerdere schuiven.
- De bewegende delen zijn boven het water (indien de schuif naar boven verplaatst).
- In een open sluis kunnen eenvoudig pompen geplaatst worden.

Nadelen

- Er zijn relatief veel bewegende delen voor het bewegen van de schuif.
- De effectiviteit van de geplaatste pompen zal niet groot zijn, wat ongunstig is voor de afvoer.
- Er zijn relatief veel stromingsverliezen (in- en uitstroom).

Rechte koker

Een andere relatief eenvoudige variant voor het afvoermiddel is die met rechte ronde kokers. Ook bij deze variant zullen een of meerdere schuiven toegepast moeten. In Figuur 38 is een voorbeeld van een rechte koker weergegeven. In dit voorbeeld wordt de schuif of schuiven verticaal verplaatst. In geopende toestand bevindt de schuif zich boven de spuisluis. Variaties op deze hoofdvariant zijn mogelijk. Gedacht kan worden aan een schuif die horizontaal verplaatst wordt. Dit kan toegepast worden als er een beperking is voor de hoogte van de *constructie*. Een andere mogelijkheid is dat als de spuisluis geopend wordt, de schuif naar beneden verplaatst, dieper de grond in. De rechte-koker kan zowel uitgevoerd worden in een rechthoekige doorsnede als in een ronde doorsnede.



Figuur 38 - Schets ronde koker (optie: vierkante koker)

Voordelen

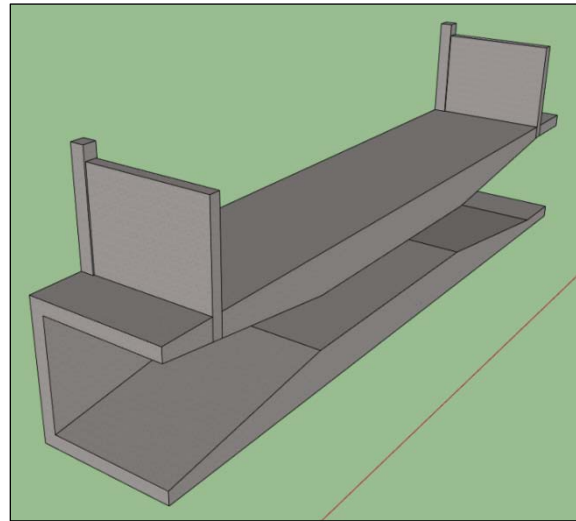
- De afvoer is regelbaar door middel van een of meerdere schuiven.
- De bewegende delen zijn boven het water (indien de schuif naar boven verplaatst).
- Een ronde koker ombouwen tot een gemaal door het plaatsen van pompen is relatief eenvoudig. Dit kan gedaan worden door een deel van de koker te vervangen voor een aparte koker met pompen.

Nadelen

- Er zijn relatief veel bewegende delen voor het bewegen van de schuif.
- Er zijn relatief veel stromingsverliezen (in- en uitstroom).

Venturikoker

Een andere variant voor het afvoermiddel is een koker met één of meerder schuiven waarbij gebruik wordt gemaakt van het zogenaamde venturi-effect. Dit wordt bereikt door de doorstroomoppervlakte geleidelijk te vernauwen en daarna weer geleidelijk te verwijden, zoals weergegeven in Figuur 39. Hierdoor treden er minder stromingsverliezen op dan bij een rechte koker zonder vernauwing van de doorstroomoppervlakte. Ook de venturikoker kan zowel uitgevoerd worden in een rechthoekige doorsnede als in een ronde doorsnede.



Figuur 39 - Schets-doorsnede venturikoker (optie: ronde koker)

Voordelen

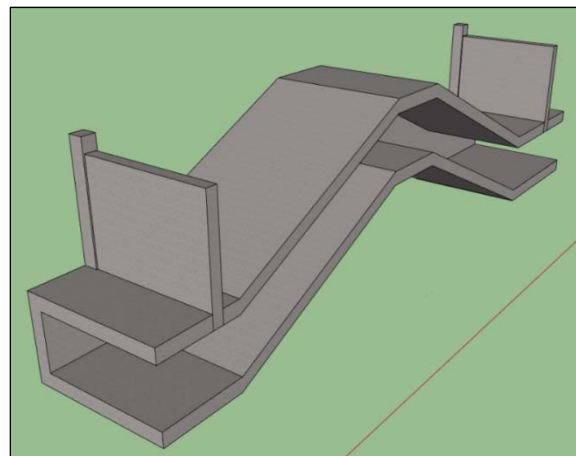
- De afvoer is regelbaar door middel van een of meerdere schuiven.
- De bewegende delen zijn boven het water (indien de schuif naar boven verplaatst).
- De afvoer is efficiënter doordat er minder stromingsverliezen zijn.
- Het is relatief gemakkelijk om te bouwen tot gemaal door het plaatsen van pompen. Dit kan gedaan worden door een deel van de koker te vervangen voor een aparte koker met pompen.

Nadelen

- Er zijn relatief veel bewegende delen, voor het bewegen van de schuif.
- Het is moeilijker te realiseren dan een rechte koker met schuif

Hevel

De laatste kansrijke variant voor een spuimiddel is een hevel. In Figuur 40 is een voorbeeld van een hevel weergegeven. Het principe van een hevel is gebaseerd op een drukverschil, waardoor het water gaat stromen. De stroming moet wel in gang worden gezet door bijvoorbeeld een pomp die de lucht uit de hevel pompt, of door een waterpomp. De hevel zal meestal uitgevoerd zijn met een ronde doorsnede



Figuur 40 - Schets-doorsnede hevel (optie: ronder koker)

Voordelen

- Bij een groter waterstandsverschil is een hevel efficiënter.
- Visueel heeft een hevel weinig impact.
- De toepassing van een hevel zorgt voor weinig bewegende delen.
- Wanneer de hevel buiten gebruik is, kan er geen (zout) water lekken.

Nadelen

- De afvoer is niet goed regelbaar.
- Er treedt extra stromingsweerstand op door de verliezen in de bochten.
- Het is relatief eenvoudig om te bouwen tot een gemaal door het plaatsen van pompen.

5.3.3 Vergelijking

De vier verschillende varianten uit de vorige paragraaf zijn door middel van een multicriteria-analyse met elkaar vergeleken.

Eerst zijn de weegfactoren bepaald, waarmee het belang van de verschillende criteria uitgedrukt wordt. In Tabel 20 staan de weegfactoren. Elke keer krijgt de meest belangrijke van twee criteria 1 punt en de minder belangrijke geen punt. Op deze manier krijgt elke criteria een aantal punten. Deze punten zijn gedeeld door het totale aantal punten. Dit geeft de weegfactoren.

		1	2	3	4	5	6	7	8	Totaal	Weegfactoren
1	Veiligheid/betrouwbaarheid	X	1	1	1	1	1	1	1	7	0,25
2	Bruikbaarheid	0	X	1	1	1	1	1	1	6	0,21
3	Aanpasbaarheid spuien/pompen	0	0	X	1	1	1	1	1	5	0,18
4	Maakbaarheid	0	0	0	X	1	1	1	1	4	0,14
5	Duurzaamheid	0	0	0	0	X	0	0	1	1	0,04
6	Mogelijkheid inspectie en onderhoud	0	0	0	0	1	X	1	1	3	0,11
7	Herbruikbaarheid	0	0	0	0	1	0	X	1	2	0,07
8	Mogelijkheid verwijderen	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0,00
	Totaal									28	1,00

Tabel 20 - Bepaling weegfactoren

Bij de vergelijking van de varianten worden de verschillende varianten onderling vergeleken op basis van de verschillende criteria. Voor elke weegfactor worden 1, 2, 3 of 4 punten gegeven. De variant die het beste scoort voor een bepaalde weegfactor krijgt 4 punten, de variant die het minste scoort krijgt 1 punt. Het totaal is berekend door het aantal punten per criteria te vermenigvuldigen met de weegfactor en dit op te tellen.

Criteria	Variant (kokervorm)				Weegfactor
	Open	Recht	Venturi	Hevel	
Veiligheid/betrouwbaarheid	1	2	3	4	0,25
Bruikbaarheid	2	3	4	1	0,21
Aanpasbaarheid spuien/pompen	2	4	3	1	0,18
Maakbaarheid	4	3	2	1	0,14
Duurzaamheid	1	2	4	3	0,04
Mogelijkheid inspectie en onderhoud	4	3	2	1	0,11
Herbruikbaarheid	4	3	2	1	0,07
Mogelijkheid verwijderen	4	3	2	1	0,00
Totaal	2,35	2,89	2,93	1,83	

Tabel 21 - Bepaling score verschillende varianten

5.3.4 Keuze

Uit Tabel 21 blijkt dat de venturikoker de hoogste score heeft op de onderzochte punten. Deze variant zal dus ook verder uitgewerkt worden. Omdat de ruimte in de Nieuwe Maas beperkt is, zal er zo mogelijk een ontwerp gemaakt worden waarbij twee kokers boven elkaar geplaatst zijn.

5.4 Spuien en pompen

Het afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg bestaat uit een aantal openingen of kokers waardoor het water wordt afgevoerd. Het afvoermiddel moet zowel als spuicomplex en als gemaal kunnen functioneren. Dit betekent dat deze doorstroomopeningen of kokers voor beide situaties moeten voldoen. De openingen of kokers kunnen dus niet elke willekeurige vorm aannemen. Voor een optimale afvoercapaciteit in de situatie van pompen dient de vorm van de kokers op de pompen aangepast te zijn. Als dat niet gebeurt, wordt de capaciteit van de pompen, hoe groot zo ook zijn, niet optimaal benut. De pompen zijn dus maatgevend voor de vorm en afmetingen van de kokers. Daarom zullen de spuikokers (kokers zonder pomp) dezelfde vorm en afmetingen hebben als de pompkokers (kokers met pomp).

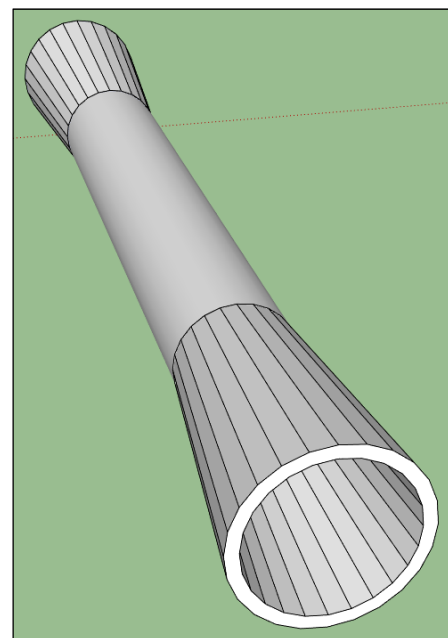
5.4.1 Pompen

Omdat de maatgevende afvoer in 2100 heel groot is, zijn veel pompen nodig. Als uitgangspunt is gekozen voor dezelfde pompen als de nieuwste pompen in gemaal IJmuiden. De eigenschappen van deze pompen staan in Tabel 22. De Net Positive Suction Head (NPSH) wordt gebruikt om cavitatie te analyseren. Cavitatie is het verschijnsel waarin de druk in de pomp lager is dan de dampdruk van de vloeistof. Hierdoor ontstaan in de pomp luchtbellen of gasbellen die vervolgens weer imploderen in de pomp. Omdat dit de pomp beschadigt, moet cavitatie dus ten alle tijden vermeden worden. NPSH 0% wil zeggen dat minimaal die waterhoogte boven de as van pomp aanwezig moet zijn om cavitatie te voorkomen.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Diameter	d_p	[m]	4,0
Capaciteit	Q_p	[m ³ /s]	50
Opvoerhoogte	h_p	[m]	1,8
Toerental	t_p	[rpm]	76
Schoephoek	θ_p	[°]	1
Rendement	R_p	[%]	86
Vermogen	P_p	[kW]	1047
NPSH 0%	$h_{nps,p}$	[m]	3,2

Tabel 22 - Eigenschappen pomp IJmuiden [Arnold, J., et al., 2002]

Op basis van Tabel 22 kan gesteld worden dat bij een maatgevende afvoer Q_m in 2100 van 3600 m³/s er 72 pompen, en dus ook 72 kokers, nodig zijn met een capaciteit Q_p van 50 m³/s. De maatgevende afvoer van 3600 m³/s is bepaald in Paragraaf 4.2. Het gaat hier om ronde kokers, wat de pompcapaciteit ten goede komt. Daarom zullen de kokers in het afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg ook rond zijn. Een indruk hiervan staan in Figuur 41.



Figuur 41 - Schets van koker

5.4.2 Spuien

Met de bekende vaststaande afmetingen die in de vorige paragraaf staan, zijn hier allereerst stromingsberekeningen gemaakt voor een afvoermiddel die werkt als spuisluis, dus een afvoer onder

vrij verval, zonder pompen. Onderzocht is hoeveel kokers er nodig zijn als er gespuid wordt onder vrij verval in 2100.

Eenvoudige berekening

In Tabel 23 is een eerste eenvoudige berekening gegeven van de stroming door het afvoermiddel in de situatie van een spuisluis (gesloten leiding). Dit is een eenvoudige berekening waarbij wrijving en verliezen niet zijn meegerekend. De onderstaande formules zijn in de berekening gebuikt.

$$A_k = 0,25 \cdot \pi \cdot d_k^2 \quad P_k = \pi \cdot d_k \quad R_k = \frac{A_k}{P_k} \quad u_{g,1} = \sqrt{\Delta h \cdot 2g}$$

$$A_b = \frac{Q_m}{u_{g,1}} \quad N = \frac{A_b}{A_k}$$

In Tabel 23 staat de berekening met als uitkomst de benodigde doorstroomoppervlakte $A_{\text{tot},1}$ en het aantal benodigde kokers N . Het verval over de constructie Δh_c is aangenomen als gemiddelde waarde.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevende afvoer	Q_m	[m ³ /s]	3600
Valversnelling bij aardoppervlak	g	[m/s ²]	9,81
Verval over constructie	Δh_c	[m]	1,0
Kokerdiameter	d_k	[m]	4,0
Kokeroppervlakte	A_k	[m ²]	12,6
Natte omtrek (perimeter) van koker	P_k	[m]	12,6
Hydraulische straal van koker	R_k	[m]	1,0
Gemiddelde stroomsnelheid	$u_{g,1}$	[m/s]	4,4
Benodigde doorstroomoppervlakte	A_b	[m ²]	812,7
Aantal benodigde kokers	N	[-]	65

Tabel 23 - Eenvoudige stromingsberekening spuiukoker

Uit Tabel 23 blijkt dat er 65 kokers nodig zijn om de maatgevende afvoer te kunnen spuien onder vrij verval. Dit zijn er minder dan het aantal benodigde kokers in het geval er pompen worden gebruikt.

Iteratieve berekening

Om in de stromingsberekeningen ook de verliezen mee te nemen, is gerekend met de formule van Darcy-Weisbach. Gebruik is gemaakt van de Swamee–Jain vergelijking (geldig voor stroming voor buizen) om de weerstandscoefficiënt λ direct op te lossen. Deze vergelijking is een schatting voor de impliciete Colebrook-Whitevergelijking waarmee de weerstandscoefficiënt λ meestal benaderend berekend wordt. De weerstandscoefficiënt λ kan ook bepaald worden met het Moody diagram, zie Bijlage A – Stromingsberekeningen.

$$Re = \frac{u_{g,2} \cdot d_k}{\nu} \quad \lambda = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/d_k + 5,74}{3,7 Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \Delta h_v = \left(\lambda \frac{L_k}{d_k} + \sum_i \xi_i \right) \frac{u_{g,2}^2}{2g}$$

$$\Delta h_r = \Delta h_c - \Delta h_v \quad u_g = \sqrt{\Delta h_r \cdot 2g} \quad N = \frac{Q_m}{A_k \cdot u_{g,2}}$$

Op basis van bovenstaande formules staat in Tabel 24 als uitkomst het aantal benodigde kokers N na een aantal iteraties. Hierbij is ook gebruik gemaakt van een aantal gegevens uit Tabel 23. De waarde voor de kokerlengte L_k in onderstaande tabel komt uit het hoofdstuk 6, waar de afmetingen van de afvoerconstructie bepaald zijn. De waarden van de verliescoëfficiënten voor de instroom en uitstroom zijn geschat.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Kinematische viscositeit	ν	[m ² /s]	0,000001
Gemiddelde ruwheid	ϵ	[-]	0,000025
Kokerlengte	L_k	[m]	45
Verliescoëfficiënt instroom	ξ_{in}	[-]	0,05
Verliescoëfficiënt uitstroom	ξ_{uit}	[-]	0,05
Reynolds getal	Re	[-]	16209860
Weerstandcoëfficiënt	λ	[-]	0,008
Totale verlies	Δh_v	[m]	0,16
Resultierend verval	Δh_r	[m]	0,84
Gemiddelde stroomsnelheid	$u_{g,2}$	[m/s]	4,1
Aantal benodigde kokers	N	[-]	71

Tabel 24 - Iteratieve stromingsberekening spuiukoker

Het benodigde aantal kokers is meer dan in de situatie van de eenvoudige berekening. Doordat nu verliezen mee zijn genomen, neemt de afvoercapaciteit per koker af. In de situatie van pompen zijn echter de meeste kokers nodig; deze situatie is maatgevend. In het ontwerp zullen dus 72 kokers nodig zijn. De totale doorstroomoppervlakte A_t is dan $72 \cdot 12,6 = 904,8 \text{ m}^2$.

5.4.3 Spuiregime

Nu het aantal benodigde kokers bepaald is, is met dat gegeven het spuiregime voor normale omstandigheden, in de situatie van een maatgevende afvoer en tijdens een stormvloed bepaald. De kans dat een maatgevende afvoer en een stormvloed gelijktijdig optreden, is verwaarloosbaar klein (zie Paragraaf 4.2.2). De spuiregimes zijn bepaald met gebruikmaking van de iteratieve berekening uit de vorige paragraaf, waarbij dezelfde formules gebruikt zijn. De spuiregimes zijn in beeld gebracht door waterstands- en spui grafieken: grafieken met daarin de zee-, rivierwaterstand en het spuidebiet. De berekeningen achter de grafieken staan in Bijlage A – Stromingsberekeningen.

2018

Een aantal waarden uit Tabel 23 en Tabel 24 zijn overgenomen om de spui grafieken te bepalen. De belangrijkste waarden die gebruikt worden, staan (nogmaals) vermeld in Tabel 25 en Tabel 26.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximale zeewaterstand	$h_{z,max}$	[m+NAP]	3,33
Minimale zeewaterstand	$h_{z,min}$	[m+NAP]	-1,3
Maximale rivierwaterstand	$h_{r,max}$	[m+NAP]	2,5
Minimale rivierwaterstand	$h_{r,min}$	[m+NAP]	-1
Gemiddelde afvoer	Q_g	[m ³ /s]	440
Maatgevende afvoer	Q_m	[m ³ /s]	3200
Lengte Nieuwe Maas	L_{NM}	[m]	25000
Gemiddelde breedte Nieuwe Maas	B_{NM}	[m]	365
Bergend oppervlakte Nieuwe Maas	A_{NM}	[m ²]	9125000

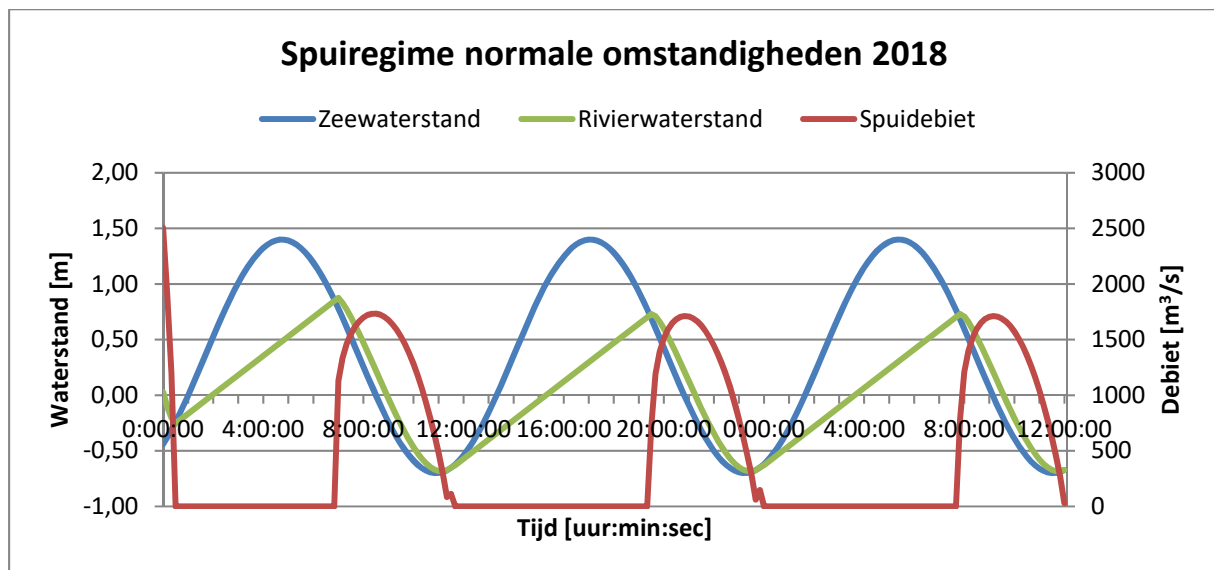
Tabel 25 - Gegevens Nieuwe Maas in 2018

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Aantal kokers	N	[-]	72
Kokerdiameter	d_k	[m]	4
Kokeroppervlakte	A_k	[m ²]	12,6
Totale doorstroomoppervlakte	A_t	[m ²]	904,8
Kokerlengte	L_k	[m]	45

Tabel 26 - Gegevens afvoerconstructie

Normale omstandigheden

Allereerst staat in Figuur 42 het spuiregime in 2018 onder normale omstandigheden: een gemiddelde Rijnafvoer en een gemiddelde waterstand op zee. Een gemiddelde waterstand op zee is een dubbeldaags getij en wordt benaderd met een sinusfunctie. Voor verdere informatie wordt verwezen naar Bijlage A – Stromingsberekeningen.

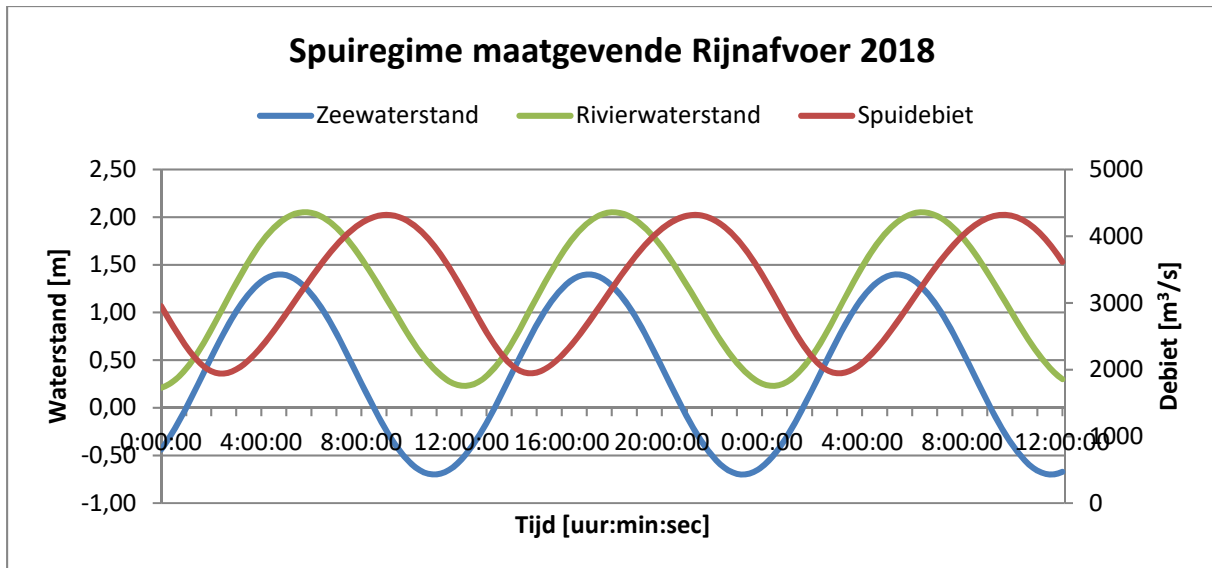


Figuur 42 - Spuiregime gemiddelde Rijnafvoer en gemiddelde zeewaterstand 2018

Uit Figuur 42 is af te leiden dat onder deze omstandigheden geen pompen nodig zijn. De rivierwaterstand blijft onder de NAP+2,5 m.

Maatgevende afvoer

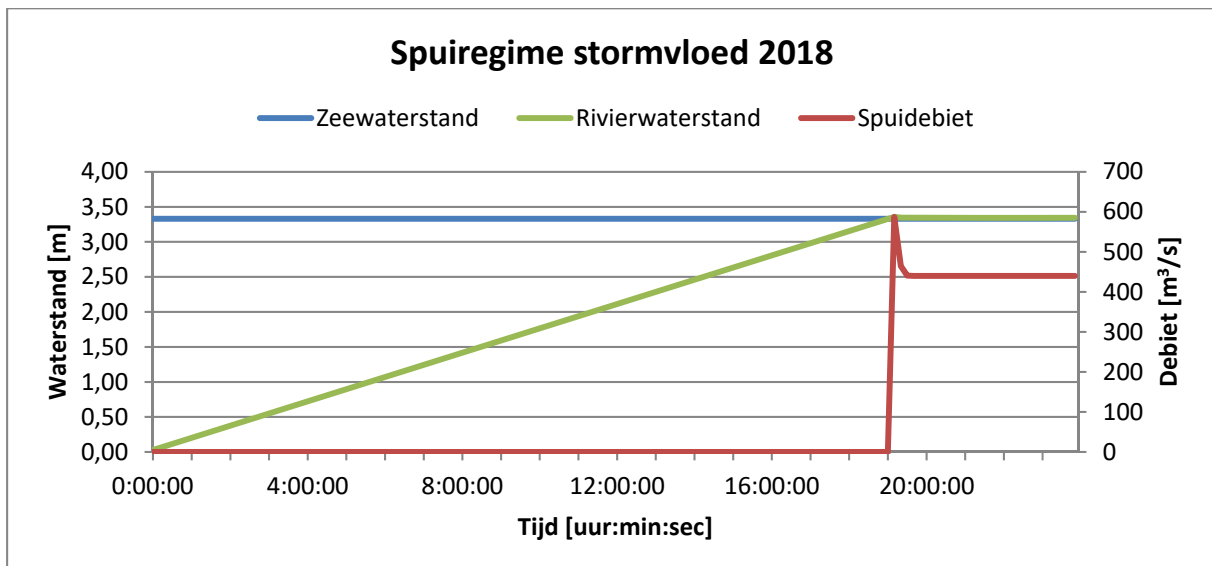
In Figuur 43 staat het spuiregime in 2018 in het geval van de maatgevende Rijnafvoer en een gemiddelde zeewaterstand (getij). In deze situatie blijft de rivierwaterstand onder de NAP+2,5 m en zijn er dus geen pompen nodig.



Figuur 43 - Spuiregime maatgevende Rijnafvoer en gemiddelde zeewaterstand 2018

Stormvloed

In het geval van een stormvloed en een gemiddelde afvoer ziet het spuiregime eruit zoals weergegeven in Figuur 44. Het blijkt dat als de rivierwaterstand op NAP+0 m begint er na ongeveer 19 uur pas gespuid kan worden onder vrij verval, omdat dan de rivierwaterstand pas hoger is dan de zeewaterstand. De rivierwaterstand heeft dan echter al over de maximale toelaatbare waterstand van NAP+2,5 m overschreden. Dit gebeurt al na ongeveer 14 uur. Om dat te voorkomen zijn vanaf minimaal dat tijdstip 9 pompen nodig om de maatgevende afvoer van 440 m³/s weg te pompen en er zo voor te zorgen de rivierwaterstand niet verder toeneemt. Deze situatie treedt op met een kans van 1 keer in de 10.000 jaar.



Figuur 44 - Spuiregime gemiddelde Rijnafvoer en stormvloed op zee 2018

2100

Omdat het afvoermiddel een levensduur heeft van 100 jaar, zal deze ontworpen moeten worden op de dan te verwachten maatgevende afvoer. Daarnaast zal de zeespiegel ook stijgen, wat eveneens invloed heeft op de afvoercapaciteit van de spuisluizen. Omdat de verwachte maatgevende afvoer en de verwachte zeespiegelstijging gegeven zijn tot 2100 (82 jaar vanaf heden), is er met deze waarden gerekend.

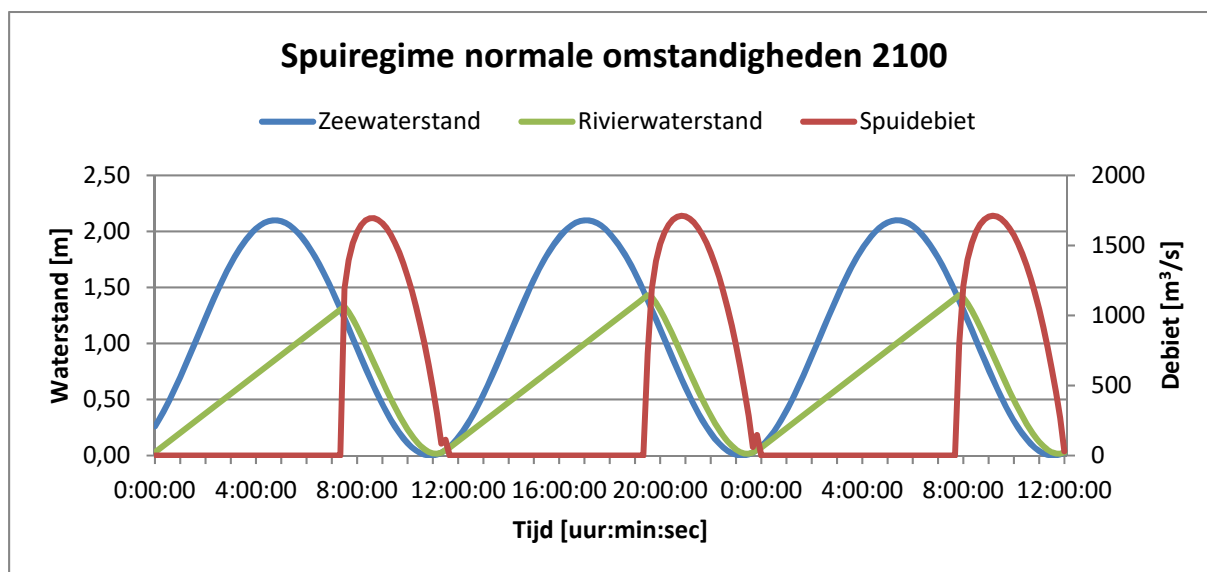
De waarden uit Tabel 25 en Tabel 26 zijn overgenomen om de spuigrafieken te bepalen. Alleen de twee waarden die gewijzigd zijn ten opzichte van 2018 staan in Tabel 27 vermeld.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Maximale zeewaterstand	$h_{z,max}$	[m+NAP]	4,03
Maatgevende afvoer	Q_m	[m ³ /s]	3600

Tabel 27 - Gewijzigde gegevens Nieuwe Maas in 2100 t.o.v. 2018

Normale omstandigheden

Allereerst staat in het spuiregime in 2100 onder normale omstandigheden: een gemiddelde Rijnafvoer en een gemiddelde waterstand op zee (dubbeldaags getij, benaderd met een sinusfunctie).

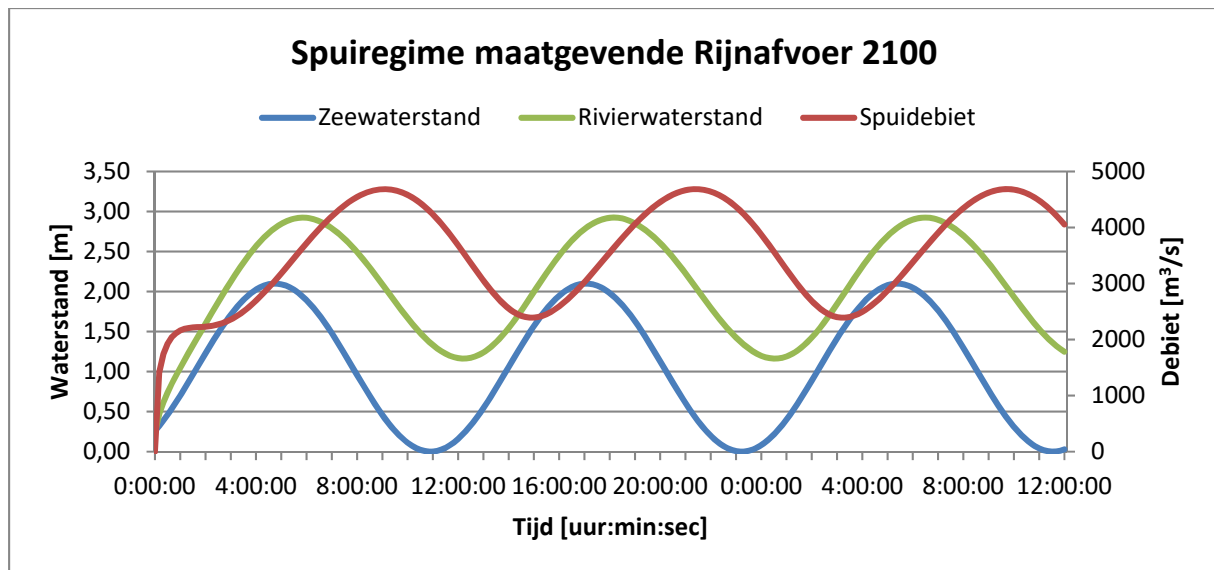


Figuur 45 - Spuiregime gemiddelde Rijnafvoer en gemiddelde zeewaterstand 2100

Uit Figuur 45 is af te leiden dat onder deze omstandigheden geen pompen nodig zijn. De rivierwaterstand blijft onder de NAP+2,5 m.

Maatgevende afvoer

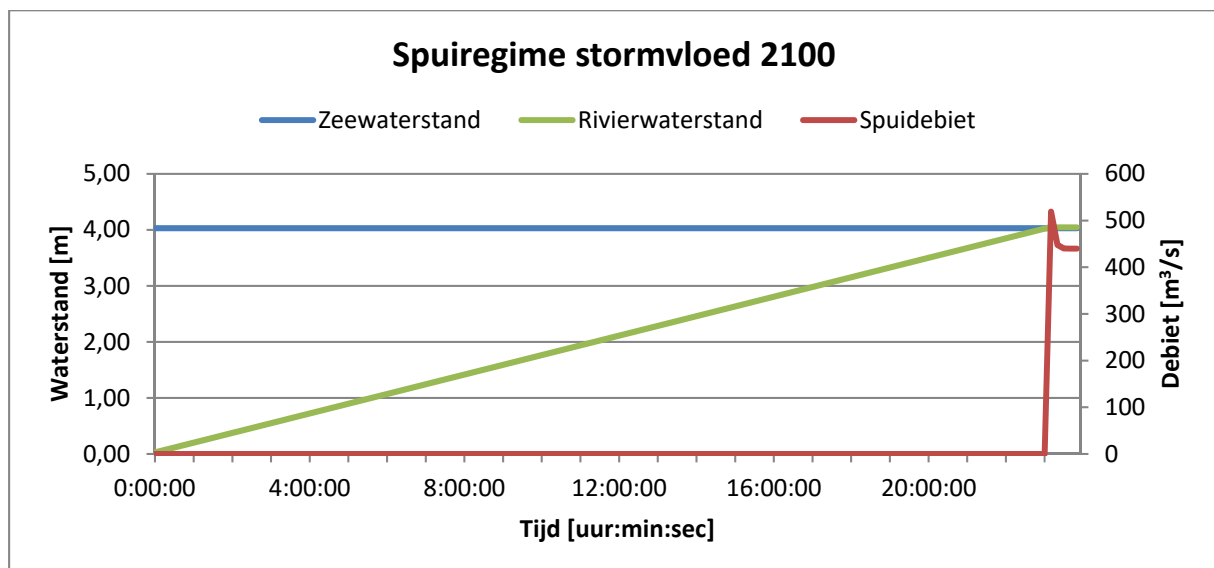
In Figuur 46 staat het spuiregime in 2018 in het geval van de maatgevende Rijnafvoer en een gemiddelde zeewaterstand (getij). In deze situatie blijft de rivierwaterstand niet onder de NAP+2,5 m en zijn er dus pompen nodig. Uit Figuur 46 blijkt dat het spuidebiet niet constant is. De oorzaak hiervan is het getij op zee, waardoor de spuicapaciteit fluctueert. Gemiddeld genomen is het spuidebiet 3600 m³/s. Om te voorkomen dat de rivierwaterstand de maximale waarde overschrijdt, zijn 72 pompen met een capaciteit nodig van 50 m³/s. De pompcapaciteit is niet afhankelijk van de zeewaterstand, en daardoor constant. Als de pompen bij een maatgevende Rijnafvoer ingezet worden als de rivierwaterstand nog onder de maximale waarde is, zal de rivierwaterstand niet toenemen. In deze situatie zijn de 72 pompen onmisbaar.



Figuur 46 - Spuiregime maatgevende Rijnafvoer en gemiddelde zeewaterstand 2100

Stormvloed

In het geval van een stormvloed en een gemiddelde afvoer ziet het spuiregime eruit zoals weergegeven in Figuur 47. Het blijkt dat als de rivierwaterstand op NAP+0 m begint er na ongeveer 23 uur pas gespuid kan worden onder vrij verval, omdat dan de rivierwaterstand pas hoger is dan de zeewaterstand. De rivierwaterstand heeft dan echter al over de maximale toelaatbare waterstand van NAP+2,5 m overschreden. Dit gebeurt nog steeds na ongeveer 14 uur. Om dat te voorkomen zijn vanaf minimaal dat tijdstip 9 pompen nodig om de maatgevende afvoer van 440 m³/s weg te pompen en er zo voor te zorgen de rivierwaterstand niet verder toeneemt. Deze situatie treedt op met een kans van 1 keer in de 10.000 jaar.



Figuur 47 - Spuiregime gemiddelde Rijnafvoer en stormvloed op zee 2100

Conclusie

Aantal pompen

In de huidige situatie zijn 9 pompen met een capaciteit van 50 m³/s nodig; in 2100 zijn er volgens de nu bekende gegevens 72 pompen nodig. Omdat ze niet gelijk allemaal aan het begin nodig zijn, is het mogelijk op verschillende momenten een aantal pompen bij te plaatsen, of beschikbaar te stellen

voor een verwachte grote Rijnafvoer. Aangezien aangenomen is dat de maatgevende Rijnafvoer lineair toeneemt (zie Paragraaf 4.2.1), kunnen het aantal pompen dat bijgeplaatst moeten worden of beschikbaar zijn, gelijkmatig over de tijd verdeeld worden. De kosten kunnen dan ook uitgespreid worden over de komende 75 jaar. In Tabel 28 staat een voorstel voor het tijdschema voor het (bij)plaatsten van pompen.

Jaar	Erbij	Totaal
2025 (bouwjaar)	12	12
2036	10	22
2047	10	32
2058	10	42
2069	10	52
2080	10	62
2091	10	72

Tabel 28 - Tijdschema aantal pompen

Uiteindelijk zal de verandering in Rijnafvoer en zeespiegelstijging gemonitord moeten worden om te zien of veranderingen overeenkomen met de verwachtingen. Als de veranderingen op grond van metingen afwijken van de verwachtingen, kan het tijdschema op grond daarvan aangepast worden.

Verhouding spuien en pompen

Zoals opgemerkt zijn in 2018 9 pompen nodig ten tijde van een stormvloed. De kans op de maatgevende waterstand bij een stormvloed is maar 1:10.000 (zie Paragraaf 3.1.3). Daardoor is de verhouding van spuien en pompen in de orde grootte van 100% spuien en 0% pompen. In 2100 zijn ook 9 pompen nodig ten tijde van een stormvloed en zijn 72 pompen nodig ten tijde van de maatgevende Rijnafvoer. De kans op de maatgevende afvoer is dan 1:1250 (zie Paragraaf 2.2.2). Aangenomen is dat er bij hoge waterstanden en grote Rijnafvoeren eerder pompen gebruikt zullen worden dan in 2018. De verhouding van spuien en pompen is dan in de orde grootte van 95% spuien en 5%.

6 Ontwerp afvoercomplex

In dit hoofdstuk staat het ontwerp van het afvoermiddel centraal. Het hoofdstuk kan globaal ingedeeld worden in drie onderwerpen. Als eerste komt de ruimtelijke inpassing van het eindontwerp (Figuur 49) van het afvoercomplex aan de orde. Gekeken wordt wat de plaats van het afvoercomplex in het geheel van de afsluiting wordt, en hoe de aansluiting van het complex op de naaste omgeving is. Ook zal hier ingegaan worden op de bouwwijze van het afvoercomplex. Vervolgens gaat het over de vorm van het afvoercomplex. Daarin zijn de afmetingen en de hoogteligging van het afvoercomplex bepaald. Ook is uitgelegd hoe het principe van flexibiliteit of aanpasbaarheid constructief een plaats krijgt in het ontwerp. In de derde plaats gaat het over de constructie van het startontwerp (Figuur 48) van het afvoercomplex. Een belangrijk onderdeel daarin is de controle van de stabiliteit van de constructie. Om die te controleren zijn eerst de belastingen die op de constructie werken bepaald. Tussendoor komt ook de fundering van de constructie aan de orde. De stabiliteit van de constructie moet in meerdere situaties voldoende zijn. De maatgevende situatie is in dit hoofdstuk uitgewerkt, de overige situaties staan in verkorte vorm in Bijlage B – Stabiliteitsberekeningen. Afsluitend zal er zal nog iets gezegd worden over het gebruik. Dan gaat het om de bediening, de energievoorziening en vispassage. Ook inspectie en onderhoud van de constructie komt kort aan de orde.

Zoals hierboven genoemd, hebben niet alle berekeningen betrekking op het eindontwerp. Bij berekeningen die betrekking hebben op het startontwerp is duidelijk gemaakt waarom het ook in het eindontwerp geldig is. Op deze manier is iets te zien van het ontwerpproces

6.1 Ruimtelijke inpassing

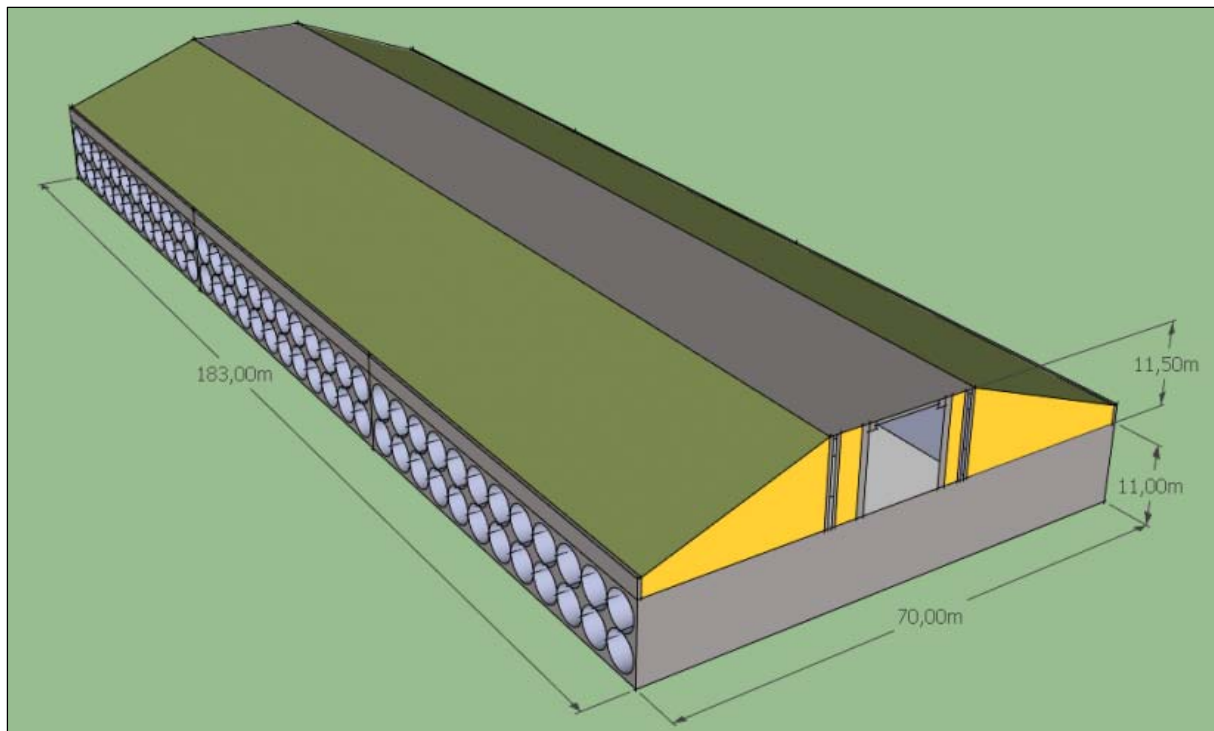
In deze paragraaf wordt het start- en het eindontwerp gepresenteerd in respectievelijk Figuur 48 en Figuur 49. Het eindontwerp is tot stand gekomen na meerdere berekeningen en controles, en is niet hetzelfde als het startontwerp. Het is heel gebruikelijk dat in een ontwerpproces de constructie veranderingen ondergaat. Dat is in dit ontwerp niet anders.

6.1.1 Ontwerpproces

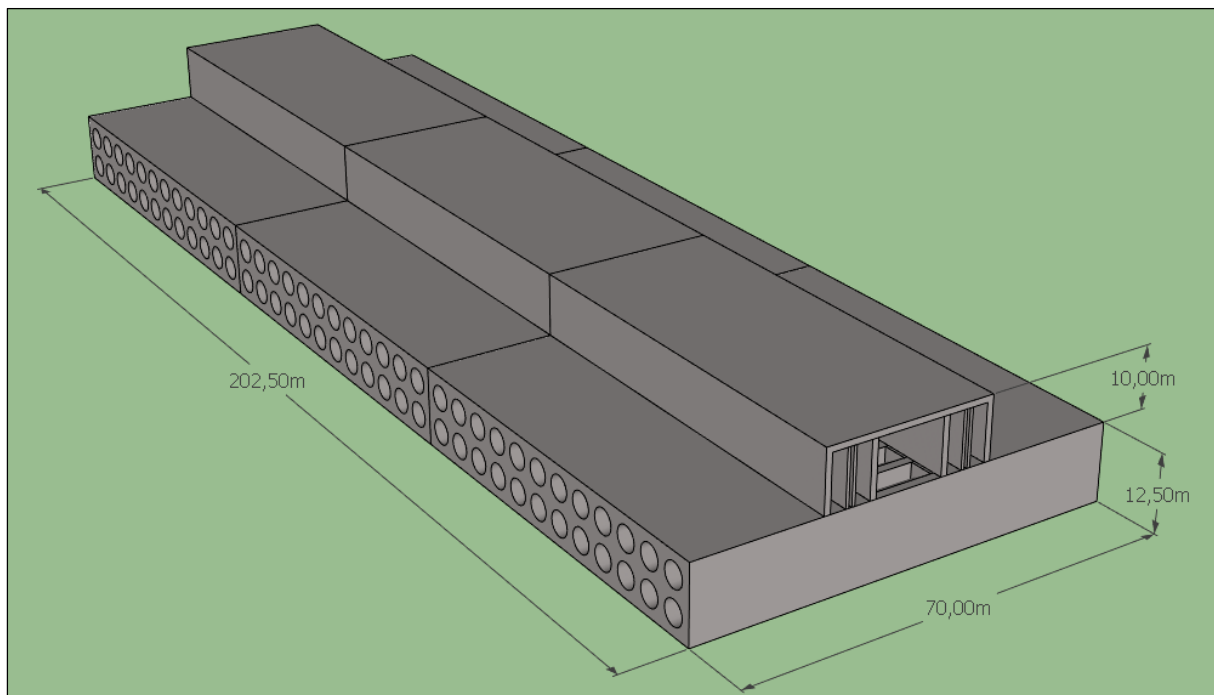
In dit onderzoek zijn ten gevolge van het ontwerpproces verschillende dingen aangepast. Achtereenvolgens zijn de volgende aanpassingen in het ontwerp gedaan.

- Wijzigen van alleen kokers naast elkaar naar twee kokers boven elkaar
- Vergroten lengte om dijklichaam genoeg ruimte te geven
- Wijzigen grootte en aantal afvoerelementen (aantal kokers per element).
- Verwijderen dijklichaam omdat bovenbelasting te groot werd, daarvoor in de plaats kwam een betonconstructie om het water te keren
- Vergroten dikte beton (en de hoogte) omdat deze te laag was ingeschat

De meeste wijzigingen zijn wel terugvertaald naar eerdere berekeningen, zodat deze niet meer te zien zijn. Alleen bij de stabiliteitsberekeningen zijn de verandering van de bovenbouw en de bovenbelasting, alsook de grotere dikte van het beton niet meegenomen. In Figuur 48 staat het startontwerp met een dijklichaam als bovenbouw (waarmee gerekend is bij de stabiliteitsberekeningen), en in Figuur 49 het eindontwerp met een aangepaste bovenbouw.



Figuur 48 - Startontwerp afvoercomplex



Figuur 49 - Eindontwerp afvoercomplex

6.1.2 Bouwwijze

In eerste instantie was het idee om de constructie prefab te maken op een andere locatie dan waar het afvoermiddel moet komen. Hiervoor was gekozen omdat dit minder hinder voor de scheepvaart zou veroorzaken dan als de constructie in situ gebouwd wordt. Er was al een geschikte locatie hiervoor gevonden: Bouwdok Barendrecht. Op deze locatie zijn in het verleden vaak tunnelsegmenten gemaakt die daarna naar hun bestemming gevaren zijn.

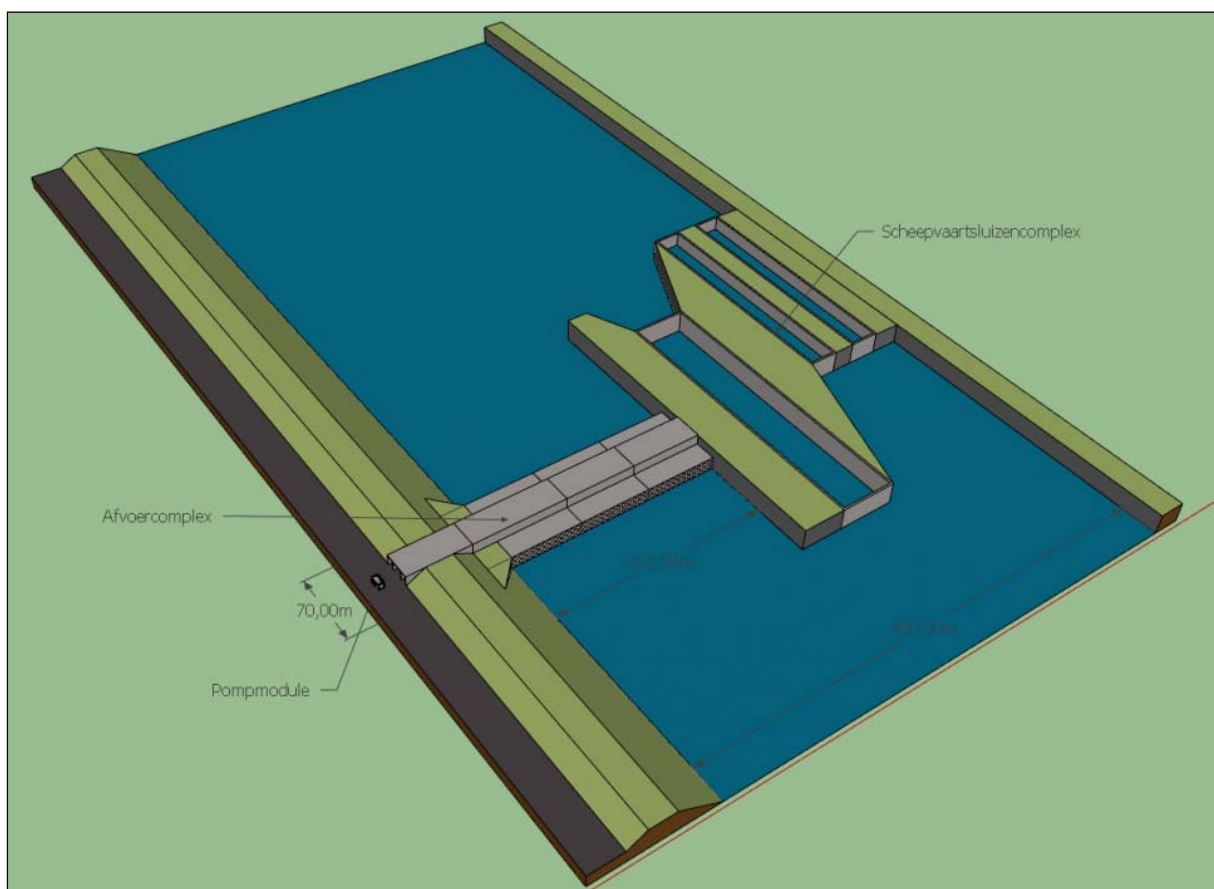
Het blijkt echter dat de afvoerelementen niet blijven drijven in water. Ze zijn in vergelijkingen met tunnelsegmenten veel zwaarder doordat er veel meer beton per inhoud van het element toegepast wordt. Daarom is er alsnog voor gekozen om de afvoerconstructie in situ te bouwen. Dit zal meer hinder voor de scheepvaart tot gevolg hebben. De hinder kan echter beperkt worden door als eerste de scheepvaartsluizen te bouwen, wat ook in situ moet gebeuren. De scheepvaartsluizen nemen ongeveer de helft van de Nieuwe Maas in beslag. Tijdens de bouw van de scheepvaartsluizen kan de scheepvaart via de andere helft van de Nieuwe Maas passeren. Nadat (een deel van) de scheepvaartsluizen voltooid zijn, kan de afvoerconstructie gebouwd worden. De schepen kunnen dan gebruikt maken van de voltooide scheepvaartsluizen. De bouw van de afvoerconstructie kan eventueel ook in delen gedaan worden, aangezien de constructie uit drie afvoerelementen bestaat.

6.1.3 Ontwerp

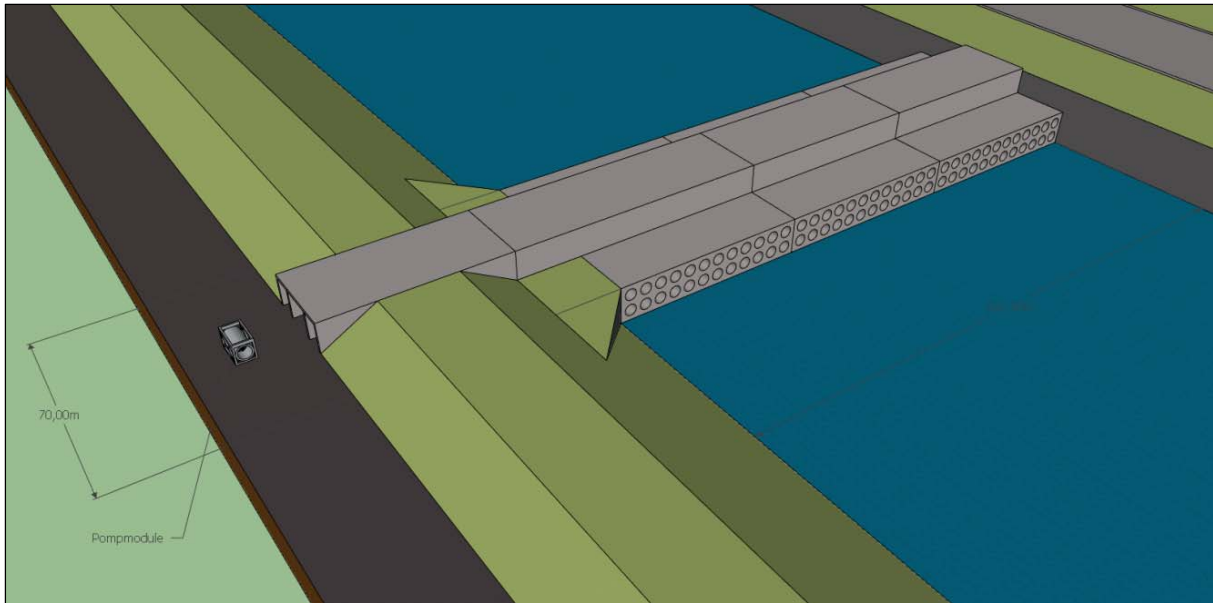
In de volgende paragrafen zijn alle onderdelen van de constructie ontworpen, berekend en gecontroleerd. Het eindontwerp is hier weergegeven door middel van schetsen. Daarbij gaat het ook om de aansluitingen. In Bijlage C – Schetsen locatie staan meer afbeeldingen die de voortgang van het ontwerp van het afvoermiddel in de omgeving weergegeven

Lopende het ontwerpproces is het ontwerp verschillende keren aangepast. In Figuur 50 staat het eindontwerp van het afvoercomplex in de afsluiting, inclusief de scheepvaartsluizen. Als basis is het oude ontwerp uit Bijlage C – Schetsen locatie, Figuur 96 gebruikt. Ook de scheepvaartsluizen (rechts) zijn hier in getekend. Omdat dit rapport niet over de scheepvaartsluizen gaat, zijn deze globaal getekend, gebaseerd op de aanname dat de totale breedte van het scheepvaartsluizencomplex ongeveer 200 meter is. De breedte van de rivier in de schetsen is 450 meter (zie Tabel 16).

In Figuur 51 is ingezoomd op het afvoercomplex. Naast het afvoercomplex, op of achter de dijk, is ruimte nodig om de spui- of pompmODULES die niet gebruikt worden op te slaan.



Figuur 50 - Ruimtelijk inpassing van de afsluiting met (het eindontwerp) van het afvoercomplex



Figuur 51 - Eindontwerp afvoercomplex met omgeving

Aansluitingen

Het afvoercomplex maakt, samen met de scheepvaartsluizen, onderdeel uit van de afsluiting van de Nieuwe Waterweg. Zoals in Figuur 51 te zien sluit het afvoercomplex aan de linkerkzijde aan op een dijk. Binnendijks zal de opslag van de pomp- en spuimodules zijn. Om de waterkering intact te laten is de bovenbouw van het afvoercomplex voortgezet door de dijk. Daardoorheen kunnen de pomp- en spuimodules naar de juiste plaats getransporteerd worden.

Aan de rechterzijde van het afvoercomplex bevinden zich de scheepvaartsluizen. Het afvoercomplex kan niet strak tegen deze sluizen aangelegd worden. Er is namelijk vanuit gegaan dat de sluisdeuren van de grootste scheepvaartsluis horizontaal richting het afvoercomplex schuiven. Een goede manier om de beperkte ruimte tussen deze sluis en het afvoercomplex op te vullen is door caissons ertussen te plaatsen. Deze hebben verticale wanden en nemen daardoor minder ruimte in dan een dijklichaam. Ook sluiten ze goed aan op het afvoercomplex aan de ene zijde en op de scheepvaartsluis aan de andere zijde.

6.2 Vorm

In deze paragraaf is de vorm van de het afvoercomplex beschreven. Eerst zijn de afmetingen van de kokers bepaald waarna van daaruit de overige maten van de afvoerconstructie volgen.

6.2.1 Koker

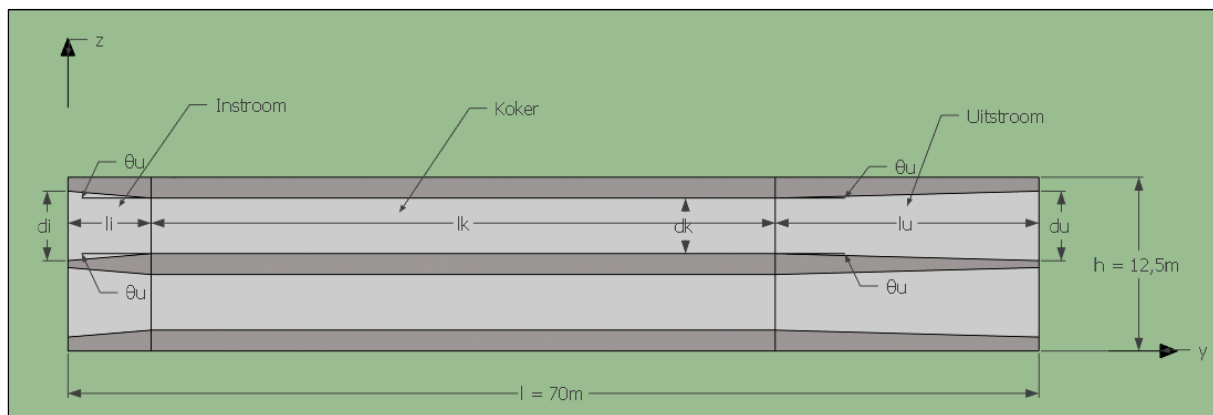
In Paragraaf 5.4 is bepaald dat er 72 kokers in de afvoerconstructie zullen komen. Ook bleek dat de inwendige diameter van de kokers in het midden (ter plaatse van de pompen) 4 meter is. Vanuit dat vertrekpunt zijn de overige afmetingen bepaald op basis van referentieprojecten, berekeningen en aannames.

Als eerste is de diameter van de in- en uitstroomopening bepaald op basis van het gemaal in IJmuiden. Ook de hellingen waaronder de instroomopening zich vernauwt en waaronder de uitstroomopening zich verwijdt, is gebaseerd op de hellingen in dat gemaal. Hieruit volgen de lengtes van de in- en uitstroomopening. Als laatste is de lengte van het middengedeelte bepaald. Er is ongeveer 10 meter nodig om de pompen in te kunnen plaatsen. Verder is er ook lengte nodig om de bovenliggende waterkering, het dijklichaam, voldoende ruimte te geven (wat gebaseerd is op het oude ontwerp). Er is uitgegaan van een totale lengte van de constructie van 70 meter. Hieruit volgt

de lengte van het middendeel. De eigenschappen van een koker staan in Tabel 29 en een doorsnede van de kokers in Figuur 52.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Instroom – rond, taps toelopend			
Lengte	l_i	[m]	6
Diameter	d_i	[m]	5 → 4
Helling	θ_i	[°]	4,8
Koker – rond (met/zonder pomp)			
Lengte	l_k	[m]	45
Diameter	d_k	[m]	4
Helling	θ_k	[°]	0
Uitstroom – rond, taps uitlopende			
Lengte	l_u	[m]	19
Diameter	d_u	[m]	4 → 5
Helling	θ_u	[°]	1,5

Tabel 29 - Eigenschappen koker



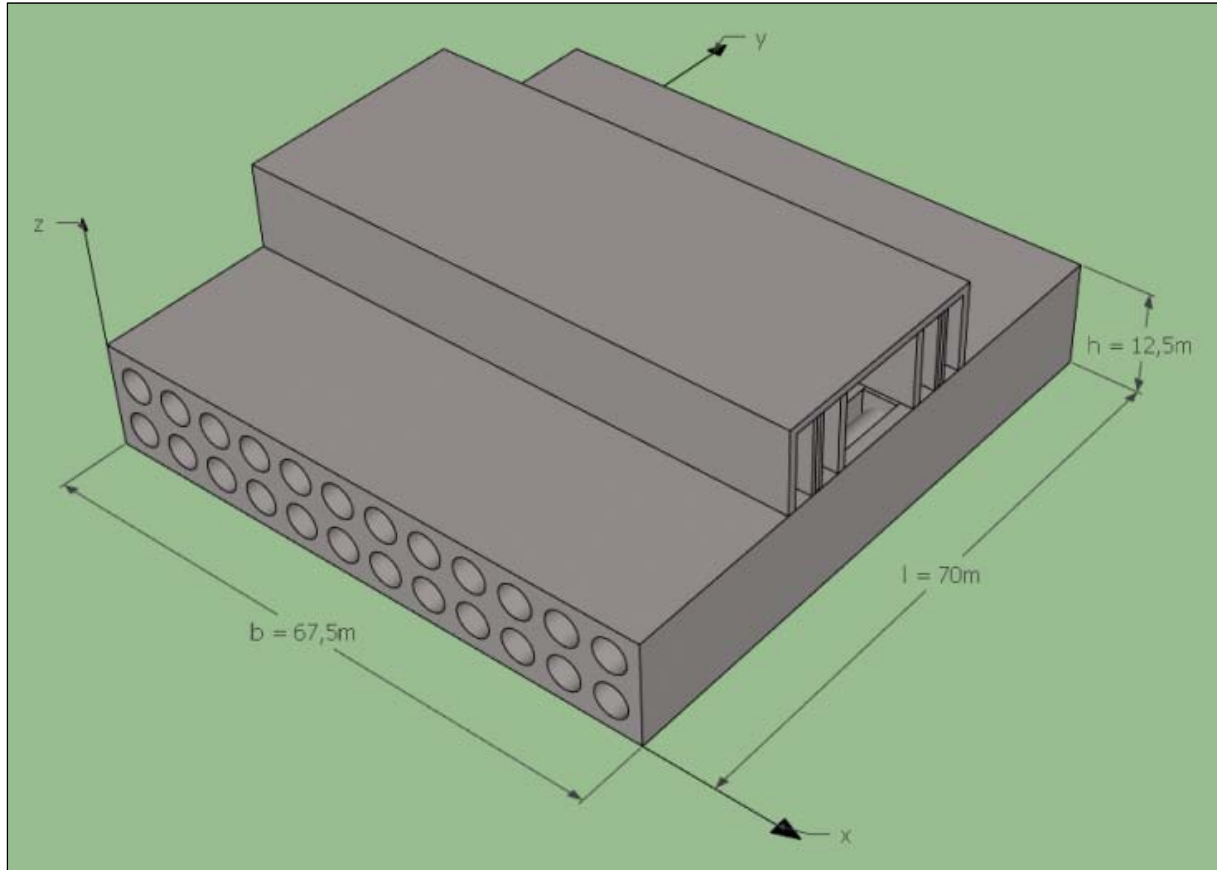
Figuur 52 - Doorsnede kokers

6.2.2 Buitenmaten

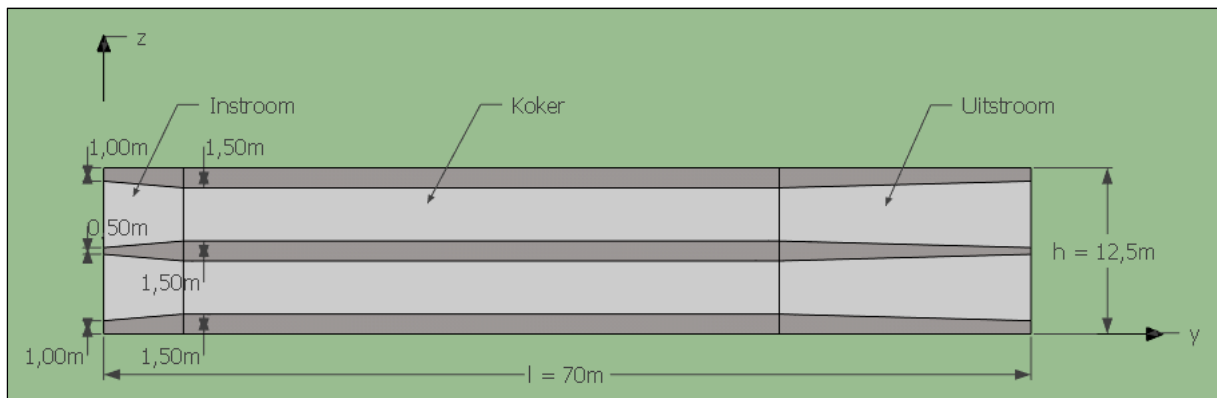
Nu de kokerafmetingen bekend zijn, zijn de overige maten van de afvoerconstructie bepaald. Eerder is al de keuze gemaakt om twee kokers boven elkaar te plaatsen. Daarom hoeven er maar 36 kokers naast elkaar geplaatst te worden. Hier is er ook voor gekozen om de totale afvoerconstructie in enkele afvoerelementen op te delen. Zo kan de constructie ook in delen opgebouwd worden. Aan de andere kant moeten er zo min mogelijk verschillen in ligging van de verschillende delen zijn, omdat er een kraanbaan in de constructie moet komen. De afvoerconstructie zal daarom in drie afvoerelementen opgedeeld worden van elk 12 kokers naast en 2 kokers boven elkaar. De afstand tussen de kokers is bij de middendelen 1,5 meter, zowel horizontaal als verticaal. Zodoende is bij de in- en uitstroomopening de afstand 0,5 meter. Ook de dikte aan de randen van een afvoerelement bedraagt ter hoogte van het middendeel 1,5 meter. Bij de in- en uitstroomopening blijft dan nog een meter over. In Tabel 30 en in Figuur 53 staan de uitwendige afmetingen van een afvoerelement. De totale breedte van de afvoerconstructie in de Nieuwe Waterweg is zodoende 202,5 meter. In Figuur 54, Figuur 55 en Figuur 56 staan de overige afmetingen in respectievelijk de langsdoorsnede, het vooraanzicht en de dwarsdoorsnede.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Lengte	l	[m]	70
Breedte	b	[m]	67,5
Hoogte	h	[m]	12,5

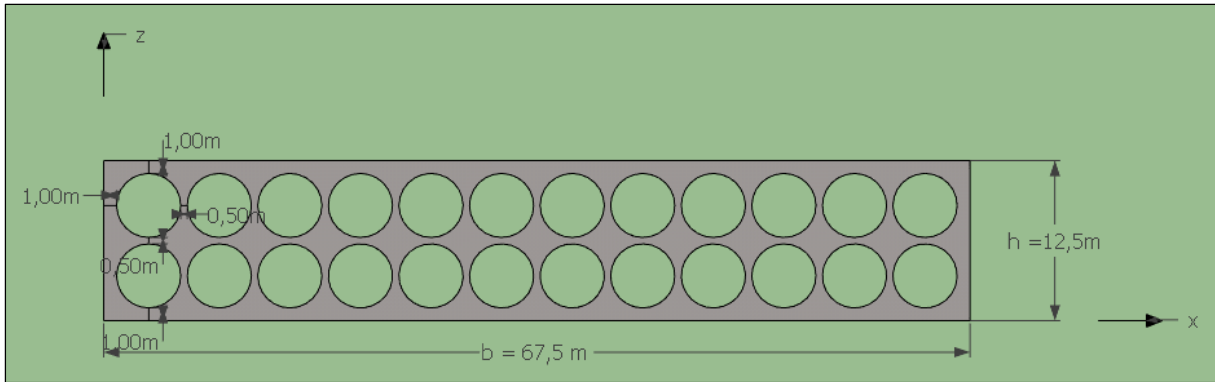
Tabel 30 - Afmetingen afvoerelement



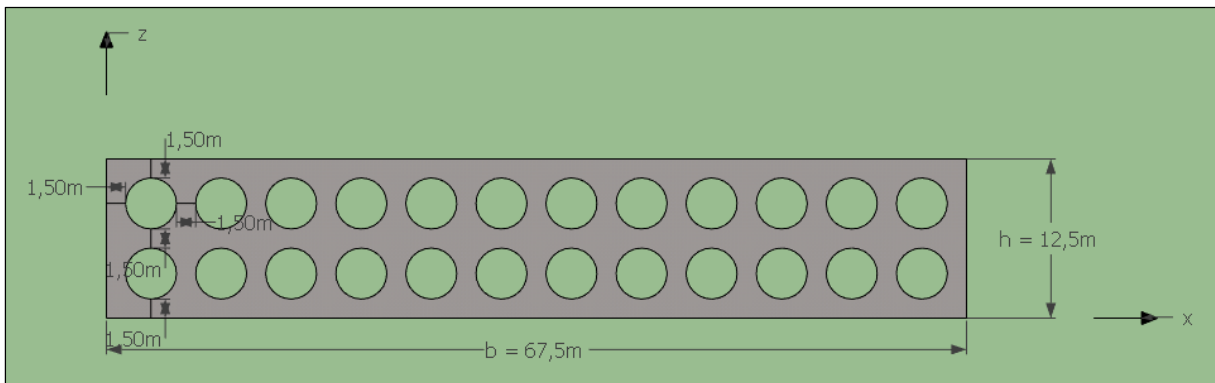
Figuur 53 - Een van de drie afvoerelementen



Figuur 54 - Afmetingen in de langsdoorsnede



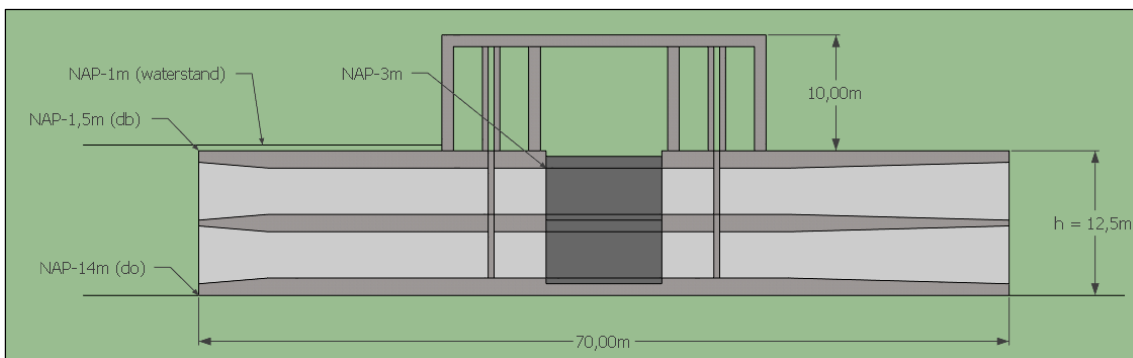
Figuur 55 - Afmetingen in het vooraanzicht



Figuur 56 - Afmetingen in de dwarsdoorsnede

6.2.3 Niveau

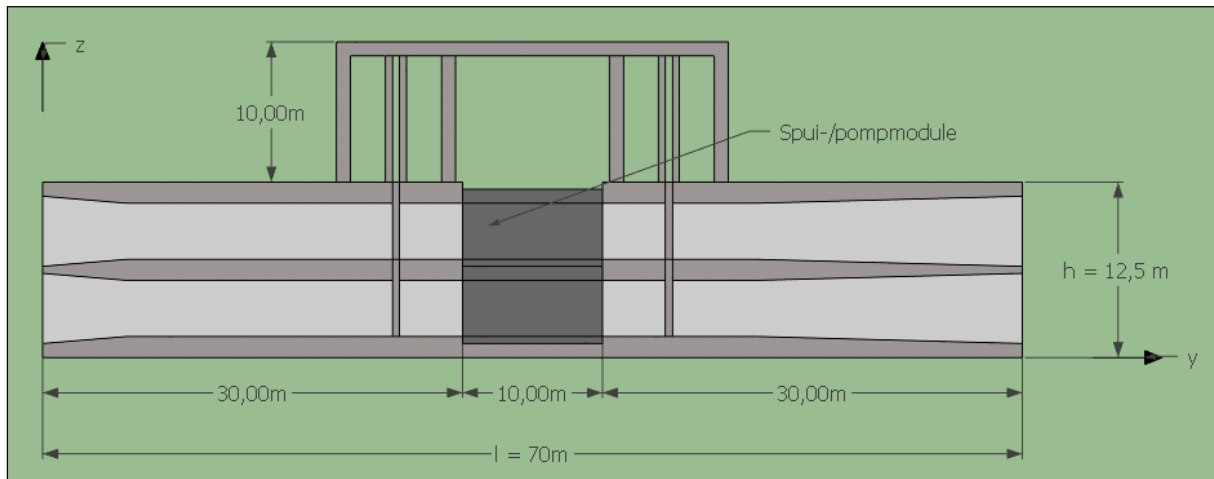
Het afvoermiddel heeft een hoogte h van 12,5 meter. De bodemdiepte van de Nieuwe Maas ter plaatse van de afsluiting is ongeveer NAP-14 m. Hoe dieper de constructie geplaatst wordt, hoe duurder dit zal zijn, aangezien er dan meer beton nodig is. Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat de bovenste kokers niet te hoog geplaatst worden. De pompen in de kokers hebben een minimale waterdiepte nodig van 1,2 meter boven de bovenzijde van de pomp (zie Paragraaf 5.4.1) om cavitatie te voorkomen. Als de onderzijde d_o van de constructie zich op NAP-14,0 m bevindt, ligt de bovenzijde d_b van de constructie op NAP-1,5 m. De bovenzijde van de pomp is dan op NAP-3,0 m. De minimale rivierwaterstand ligt op NAP-1,0 m. Zodoende blijft er minimaal 2,0 meter water boven de bovenzijde van de pomp. Dit is voldoende om cavitatie te voorkomen. Alle pompen zijn dus bij elke waterstand te gebruiken. In zijn de niveaus weergegeven.



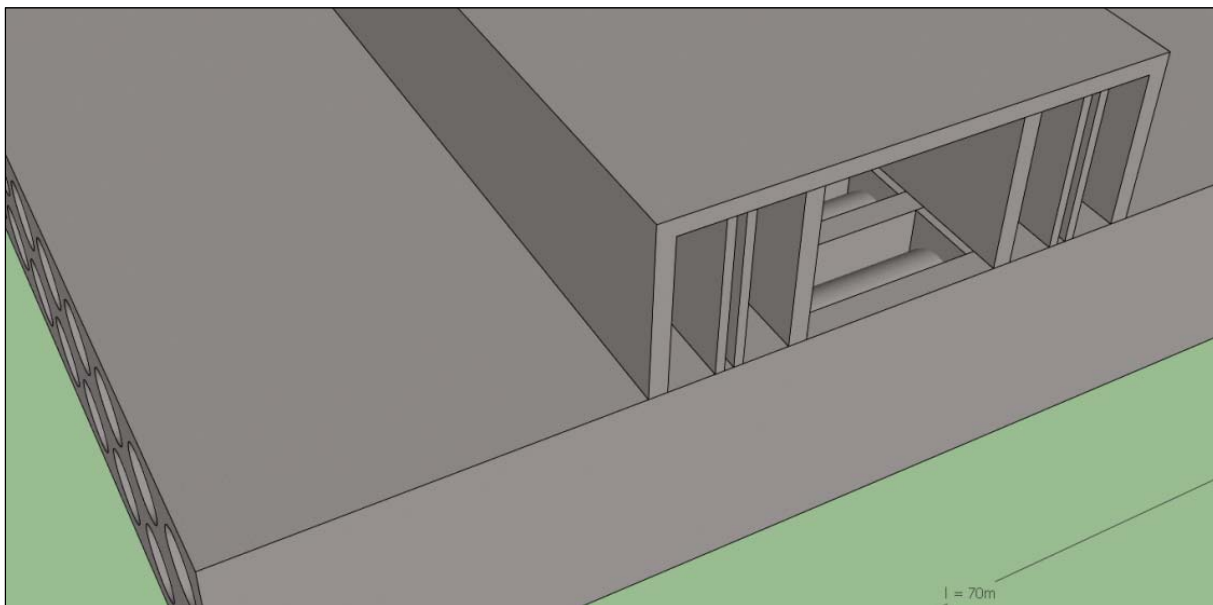
Figuur 57 - Hoogteniveau afvoerconstructie

6.2.4 Spui- en pompmodule

In Figuur 58 en Figuur 59 staat aangegeven waar de verwisselbare spui- en pompmodules in de constructie gesitueerd zijn. Er bevinden zich twee kokers boven elkaar en daardoor ook twee spui- en/of pompmodules. Deze kunnen beiden eruit gehesen worden. Als de onderste verwisseld moet worden, zal eerst de bovenste verwijderd moeten worden. Het is noodzakelijk dat boven en onder dezelfde soort module is.

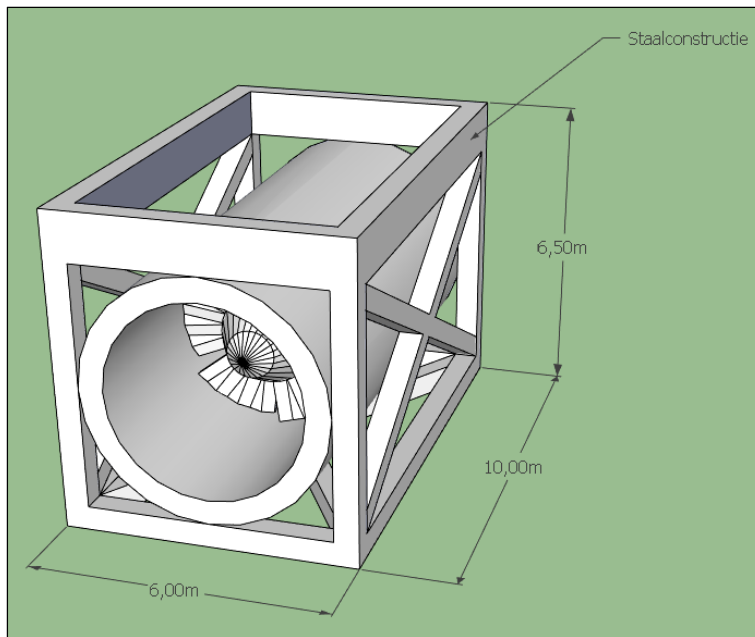


Figuur 58 - Locatie spui-/pompmodule in langsdoorsnede



Figuur 59 - Spui-/pompmodule in afvoerconstructie

In Figuur 60 staat een pompmodule met de belangrijkste afmetingen. De pompmodule bestaat uit een kokerdeel met daarin een pomp en daaromheen een staalconstructie. Door middel van een portaalkraan, die in de bovenbouw boven de kokers komt, kan deze verticaal en horizontaal verplaatst worden naar een opslagruimte, zoals te zien is in Figuur 51. De spui-module, die in eerste instantie geplaatst zal worden, is vergelijkbaar met de pompmodule. Het enige verschil is dat in de koker van deze module geen pomp is aangebracht.



Figuur 60 - Pompmodule met afmetingen

6.3 Constructief ontwerp

Om het constructieve ontwerp te bepalen en te controleren, zijn eerst de belastingen die op de afvoerconstructie berekend. Daarna is gekeken naar de fundering van de constructie. Vervolgens is de stabiliteit gecontroleerd, waarbij ook gekeken is naar piping.

6.3.1 Belastingen

De belastingen die op het afvoermiddel werken, zijn hier berekend voor een heel afvoerelement. Het gaat om horizontale belastingen, verticale belastingen en momenten. Met deze belastingen kan de stabiliteit van de constructie gecontroleerd worden. In deze berekeningen zijn de belastingfactoren meegenomen. Voor permanente belasting (eigen gewicht constructie en eigengewicht bovenbelasting) geldt een factor γ_G van 1,2 en voor variabele belasting (waterdrukken) geldt een factor γ_Q van 1,5 [Vrijling, J.K., 2011].

Onderstaand is de berekening uitgewerkt voor 2100, omdat dan de maatgevende waterstanden groter zijn dan in 2018. Als de stabiliteit (zie paragraaf 6.3.3) in 2100 voldoet, voldoet deze ook in 2018.

Horizontale belastingen

De horizontale belastingen bestaan uit de horizontale waterdruk aan de zeezijde en aan de rivierzijde en uit de golfbelasting.

Waterdruk

Een belangrijke belasting op de constructie is de horizontale waterdruk. Voor de horizontale waterdruk zijn vier maatgevende situaties. Dat zijn achtereenvolgens:

- een maximale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand;
- een minimale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een maximale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een minimale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand.

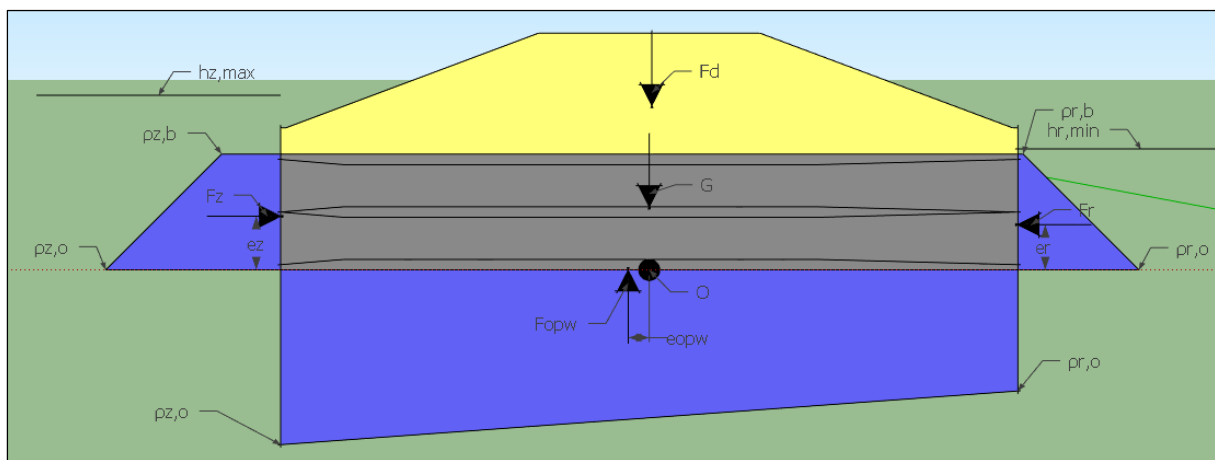
In Tabel 31 staan de bijbehorende waterstanden en de bodemdiepte waarmee gerekend is.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Maximale zeewaterstand	$h_{z,max}$	[m+NAP]	4,03
Minimale zeewaterstand	$h_{z,min}$	[m+NAP]	-1,3
Maximale rivierwaterstand	$h_{r,max}$	[m+NAP]	2,5
Minimale rivierwaterstand	$h_{r,min}$	[m+NAP]	-1
Bodemniveau Nieuwe Maas	d_0	[m+NAP]	-14,5

Tabel 31 - Maatgevende waarden 2100

De situatie van een maximale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand in 2100 is het meest extreem, in de zin dat het waterstandsverschil het grootst is. Deze situatie is hier verder uitgewerkt; de andere situaties, ook voor 2018, staan in de bijlage.

In Figuur 61 is het belastingschema gegeven dat in deze situatie optreedt met alle bijbehorende krachten.



Figuur 61 - Belastingsschema

Met behulp van onderstaande formule zijn de waterdrukken, die lineair verlopen over de hoogte, op de constructie berekend aan de onder- en bovenzijde.

$$p = \rho_w g (h - d) \qquad F = \frac{(p_o + p_b)}{2} \cdot h \cdot b$$

In Tabel 32 staat de berekening van de horizontale waterdrukken en krachten die op de afvoerconstructie werken.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Valversnelling bij aardoppervlak	g	[m/s ²]	9,81
Massadichtheid rivierwater	$\rho_{w,r}$	[kg/m ³]	1000
Massadichtheid zeewater	$\rho_{w,z}$	[kg/m ³]	1025
Waterstand	h	[m+NAP]	zie Tabel 31
Onderzijde constructie	d _o	[m+NAP]	-14,0
Bovenzijde constructie	d _b	[m+NAP]	-1,5
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	181296
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	55606
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	127530
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	5028
Drukkracht zeezijde (* γ_Q)	F _z	[kN]	149914
Drukkracht rivierzijde (* γ_Q)	F _r	[kN]	83884

Tabel 32 - Berekening horizontale waterdrukken en krachten

Golfbelasting

De golven belasten de constructie doordat ze de waterstand verhogen, en daarmee horizontale waterdruk. Omdat deze belasting wat betreft orde grootte niet veel bijdraagt aan de totale horizontale belasting, is deze verder buiten beschouwing gelaten.

Verticale belastingen

De verticale belasting bestaat uit het eigen gewicht van de constructie, de bovenbelasting en de opwaartse druk, als reactiekracht. De bovenbelasting is een dijklichaam dat functioneert als waterkering.

Met onderstaande formules zijn de verticale krachten berekend.

$$G = \gamma_b \cdot I_b \quad F_d = \gamma_z \cdot I_d \quad F_{opw} = \frac{p_{z,o} + p_{r,o}}{2} \cdot l \cdot b$$

In Tabel 33 staat de berekening van de verticale krachten die op de afvoerconstructie werken.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Eigengewicht beton	γ_b	[kN/m ³]	25
Eigengewicht zand	γ_z	[kN/m ³]	18
Inhoud betonconstructie	I _b	[m ³]	51358
Inhoud dijklichaam	I _d	[m ³]	39316
Gewicht constructie (* γ_G)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam (* γ_G)	F _d	[kN]	849218
Opwaartse kracht (* γ_Q)	F _{opw}	[kN]	1094403

Tabel 33 - Berekening verticale krachten

Bovenbelasting

De bovenbelasting waar hier mee gerekend is, bestaat voor het grootste deel uit het dijklichaam (oud ontwerp) dat zich op het afvoercomplex bevindt. Verder bestaat de bovenbelasting uit belastingen uit de bovenbouw van de constructie, zoals de deuren, het mechanisme om de pompen te plaatsen en te verwijderen. De bovenzijde van het dijklichaam bevindt zich op NAP+10,0 m. De totale hoogte van het dijklichaam is 11,5 meter. Aan beide zijden is de helling 20 graden (ongeveer 1 op 3) en de helling begint 2,5 meter boven de feitelijke constructie. Bij een breedte van het grondvlak van 70 meter (dit is de lengte van het afvoermiddel) is de breedte van de top van het dijklichaam 21 meter.

Overig

Voor de constructie zijn ook de volgende belastingen van belang.

Milieu

De constructie bevindt zich in een zout water. Dit heeft invloed op het beton. In het ontwerp van de constructie dient hier rekening mee gehouden te worden.

Scheepvaart

Voor wat betreft belasting door scheepvaart kan gedacht worden aan een mogelijke aanvaring van een schip met de constructie. In het ontwerp zal de aandacht hierbij liggen op het zo veel mogelijk voorkomen van zulke belastingen.

Momenten

De momenten zijn berekend rond O het midden van de bodem van de constructie. Omdat de arm van de kracht door eigengewicht en van het dijklichaam daar nul is, is het moment die bij die krachten hoort ook nul.

Met onderstaande formule zijn de momenten berekend.

$$M = F \cdot e$$

In Tabel 34 staat de berekening van de momenten die op de afvoerconstructie werken.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	5,1
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	4,3
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	2,0
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	771259
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	362774
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	2222895

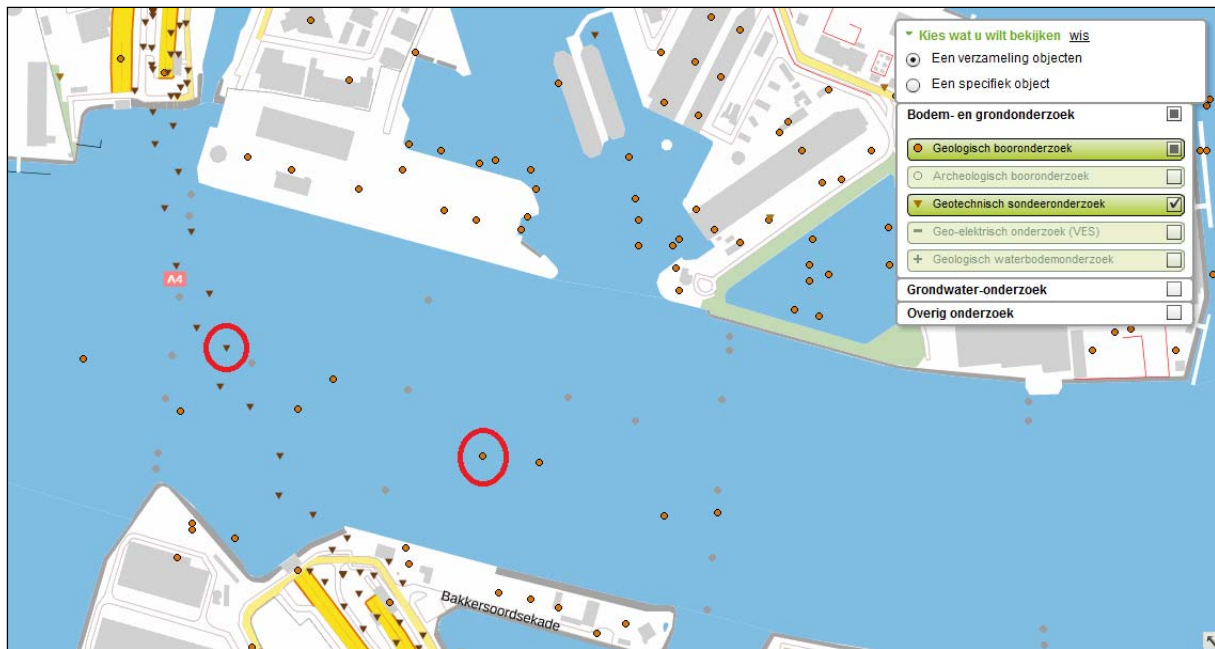
Tabel 34 - Berekening momenten

6.3.2 Fundering

Het afvoermiddel in de Nieuwe Waterweg zal een goede fundering moeten krijgen. Daarvoor is allereerst een onderzoek gedaan naar de bodem op de betreffende locatie. Aan de hand van de gegevens die daaruit verkregen worden, kan iets gezegd worden over de fundering. Ook kan hiermee gekeken worden naar de stabiliteit van de constructie.

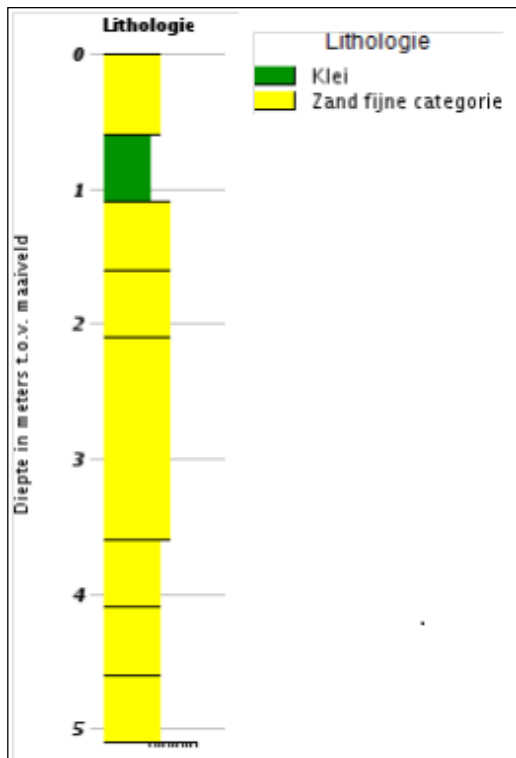
Grondgegevens

In Figuur 62 is ingezoomd op de locatie van de afsluiting. In deze afbeelding staan de plaatsen waar boormonsters (de oranje rondjes) en de sonderingen (de bruine driehoekjes) gemaakt zijn. De grijze rondjes zijn er uitgefilterd. Deze vallen buiten de eisen die gesteld zijn aan de boormonsterprofielen, zoals bijvoorbeeld het jaar van boren, de lengte van het boormonsterprofiel en de beschikbaarheid van een afbeelding van het boormonsterprofiel.

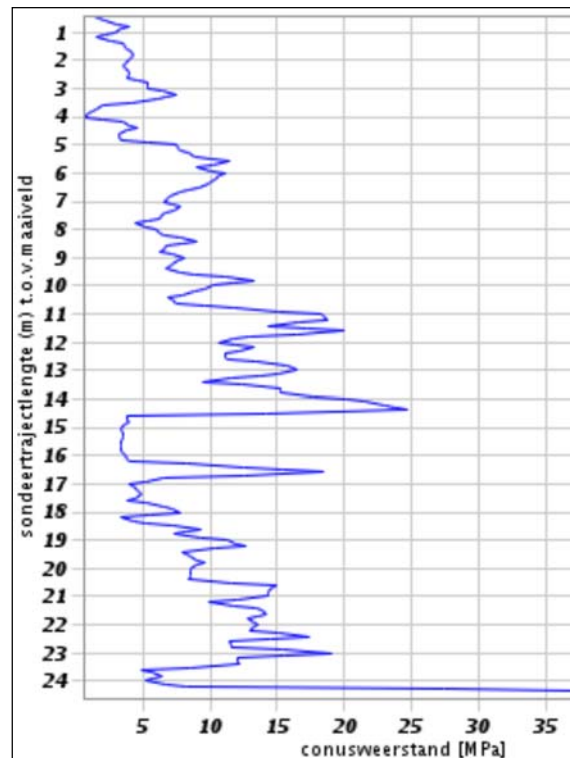


Figuur 62 - Locatie afsluiting met plaats van boormonsters en sonderingen [TNO, 2017]

In Figuur 63 is een boormonsterprofiel gegeven. Deze bevindt zich in de in de rechtse cirkel in Figuur 62. Het profiel is gegeven ten opzichte van het maaiveld, wat hier de bodemdikte van de Nieuwe Maas is.



Figuur 63 - Boormonsterprofiel [TNO, 2017]



Figuur 64 - Sondering [TNO, 2017]

In Figuur 64 is een sondering gegeven. Deze bevindt zich in de in de linkse cirkel in Figuur 62. De sondering is gegeven ten opzichte van het maaiveld. Het maaiveld is hier de bodemdikte van de Nieuwe Maas.

Optie

Uit Figuur 63 en Figuur 64 blijkt dat de eerste tot anderhalve meter van de rivierbodem, die onder andere uit klei bestaat, van geringe sterkte is. Deze laag zal eerst verwijderd en opgevuld moeten worden met een sterker materiaal, zoals zand. Als deze bodemverbetering wordt toegepast, is het niet nodig om de constructie op palen te funderen. De methode van uitbaggeren is ook toegepast bij de aanleg van de 2^e Beneluxtunnel. Omdat de onderzijde van de constructie zich hoger bevindt dan de rivierbodem zal dit verschil ook (met zand) opgevuld moeten worden. In Figuur 65 is weergegeven waar materiaal verwijderd en bodemverbetering aangebracht moet worden.

6.3.3 Stabiliteit

In deze paragraaf is de stabiliteit gecontroleerd voor de maatgevende situatie zoals eerder genoemd in Paragraaf 6.3.1: een maximale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand in 2100.

De afvoerconstructie moet stabiel zijn en niet in beweging komen door de krachten die erop werken. Dit betekent dat de som van de horizontale en de verticale krachten alsook van de momenten in evenwicht moeten zijn. Dit kan uitgedrukt worden in de volgende vergelijkingen.

$$\sum H = 0 \qquad \sum V = 0 \qquad \sum M = 0$$

De formules om de som van de horizontale en de verticale krachten en de momenten te berekenen, zijn hieronder gegeven.

$$\sum H = F_z - F_r \qquad \sum V = G + F_d - F_{opw} \qquad \sum M = M_z - M_r + M_{opw}$$

In Tabel 35 staat de uitwerking van de bovenstaande formules.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	66030
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1295548
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	2631380

Tabel 35 - Berekening van som krachten en momenten

Horizontaal

Bij de horizontale stabiliteit gaat het erom of de constructie door de krachten die erop werken niet horizontaal verplaatst. De constructie mag niet afschuiven. De resulterende horizontale kracht moet worden opgevangen door de ondergrond.

Om de horizontale stabiliteit te checken, is de onderstaande formule gebruikt.

$$\sum H < f \cdot \sum V$$

In Tabel 36 staat de uitwerking van de controle op horizontale stabiliteit. Voor de wrijvingsfactor f is de waarde van 0,5 gebruikelijk voor beton op zand.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	66030
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	647774

Tabel 36 - Berekening horizontale stabiliteit

Uit Tabel 36 blijkt dat de horizontale stabiliteit voldoet.

Rotatie

Bij rotatie stabiliteit gaat het erom dat de optredende korrelspanning nergens negatief mag zijn, oftewel er mag geen trek optreden. Kort gezegd: de constructie mag niet kantelen. De formule om de rotatie stabiliteit te checken staat hieronder.

$$e_R = \frac{\sum M}{\sum V} \leq \frac{1}{6} l$$

In Tabel 37 staat de uitwerking van de controle op rotatie stabiliteit.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	2,0
	l/6	[m]	11,7

Tabel 37 - Berekening rotatie stabiliteit

Uit Tabel 37 blijkt dat de rotatie stabiliteit voldoet.

Verticaal

Bij de verticale stabiliteit is het van belang dat de toelaatbare korrelspanning niet overschreden mag worden. Om de verticale stabiliteit te berekenen is gebruik gemaakt van de volgende formules.

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\sum V}{bl} + \frac{\sum M}{1/6 lb^2}$$

In Tabel 38 staat de uitwerking van de controle op verticale stabiliteit. De waarde van de maximaal toelaatbare korrelspanning p'_{max} is geldig voor goed gepakt zand [Vrijling, J.K., 2011].

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ²]	324
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ²]	500

Tabel 38 - Berekening verticale stabiliteit

Uit Tabel 38 blijkt dat ook de verticale stabiliteit voldoet.

6.3.4 Piping

Door het waterstandsverschil over de constructie stroomt er ook water onder en langs de constructie. Het gevaar hiervan is dat door deze stroming buisvormige kanalen onder de constructie ontstaan door interne erosie. Dit bedreigt de stabiliteit van de constructie. Hier is met de formule van Lane (zie onderstaand) gecontroleerd of er piping optreedt. Als dit het geval is, en de constructie dus niet voldoet, moeten er maatregelen getroffen worden om de kwallengte te vergroten.

$$L_p \geq \gamma \cdot C_L \cdot \Delta h \quad L_p = \sum L_v + \sum \frac{1}{3} L_h$$

In Tabel 39 staat de uitwerking van berekening met behulp van de bovenstaande formules. De constante van Lane C_L hangt af van het type grond. Hier is gekozen voor een waarde van 5,0, behorend bij grof zand. Het verval over de constructie ΔH bedraagt maximaal 5,03 meter in 2100.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Constante	C_L	[-]	5,0
Verval	Δh	[m]	5,03
Veiligheidsfactor	γ	[-]	1,5
Verticale kwellingte	L_v	[m]	0
Horizontale kwellingte	L_h	[m]	70
Totale kwellingte	L_p	[m]	23,3

Tabel 39 - Berekening kwellingte

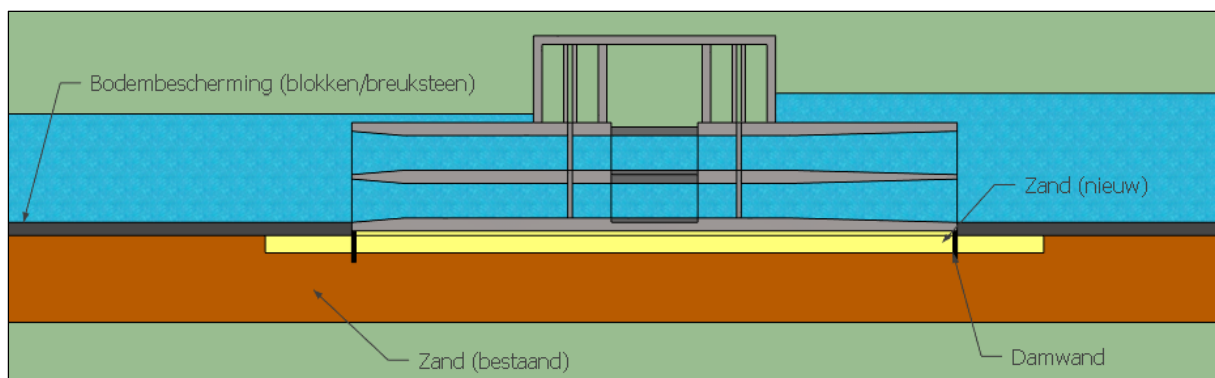
Uit bovenstaande formules volgt dat de minimale kwellingte 37,7 meter moet zijn. De totale kwellingte L_p voldoet niet, en er zijn dus maatregelen nodig om de totale kwellingte L_p te vergroten. Dit kan gedaan worden door damwanden te plaatsen onder en naast de constructie.

Damwanden

Damwanden zijn nodig om de kwellingte te vergroten. De kwellingte dient met minimaal 14,4 meter vergroot te worden. Dit wordt bereikt door bijvoorbeeld een verticale damwand onder en naast de constructie te plaatsen met een lengte van 7,2 meter. De kwellingte neemt dan toe met 10 meter. Makkelijker is om twee damwanden van 3,6 meter aan het begin en aan het einde van de constructie te plaatsen. Dit heeft ook geen negatieve invloed op de stabiliteit van de constructie. Het is juist gunstig voor de rotatiestabiliteit en de verticale stabiliteit. In Figuur 65 staat waar de damwanden moeten komen.

Bodembescherming

Voor de stabiliteit van de constructie is het noodzakelijk dat bodembescherming rond de constructie wordt aangebracht. Dit is van belang bij het instroomgedeelte, maar zeker aan de kant waar het water uit de constructie stroomt. Hier treden grote stroomsnelheden op en is de stroming turbulent. De lengte, dikte en opbouw van de bodembescherming moet aan bepaalde eisen voldoen. De uitwerking hiervan valt echter buiten de kaders van dit onderzoek. In Figuur 65 is weergegeven waar bodembescherming nodig is.



Figuur 65 - Fundering, damwanden en bodembescherming bij afvoermiddel

6.4 Overig

In deze paragraaf worden een aantal zaken die met het afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg te maken hebben, behandeld. Dan gaat het om het gebruik en de mogelijkheid tot inspectie en onderhoud.

6.4.1 Gebruik

Bij het gebruik van het afvoermiddel kan gedacht worden aan de bediening, de energievoorziening en de vispassage.

Bediening

Bij de Maeslantkering zijn de sluit- en openprocedures zijn geautomatiseerd in een Beslissingsondersteunend Systeem (BOS). Op een vergelijkbare manier zal de bediening van de schuiven en het wisselen van de spuimodules voor pompmodules plaatsvinden. Zo worden menselijke fouten voorkomen en kunnen alle gegevens die invloed hebben op de bediening snel meegenomen worden.

Energievoorziening

Als het afvoermiddel in gebruik is als gemaal is er energie nodig om de pompen te laten draaien. Maar ook als het functioneert als spuisluis is er al stroom nodig, namelijk voor het bedienen van de schuiven. Deze zijn immers al nodig als de waterstand op zee (veel) groter wordt dan de waterstand op de rivier, om zo te voorkomen dat het zoute zeewater naar binnen stroomt. Daarom zal het afvoermiddel vanaf het eerste gebruik al aangesloten moeten zijn op een energienet. Aangezien er meerdere energiecentrales in de Rotterdamse haven zijn, moet het mogelijk zijn om op een of meerdere centrales aangesloten te worden. De voorkeur heeft een aansluiting op meerdere centrales, omdat in het geval van stroomuitval bij een centrale de stroom door een andere centrale geleverd kan worden. Er zullen echter ook voldoende stroomgeneratoren bij het afvoermiddel aanwezig moeten zijn om, in het geval van stroomuitval bij alle centrales, ervoor te zorgen dat het afvoermiddel kan blijven functioneren.

Vispassage

In de huidige situatie is er een open verbinding met zee, waardoor er veel vissen gebruik maken van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas. In de situatie van spuien is er weinig gevaar voor de vissen. Er ontstaan alleen geringe waterdrukverschillen rond het afvoermiddel. Deze zijn echter niet schadelijk voor de vissen. In de situatie dat er pompen gebruikt worden, wordt het een ander verhaal. Door de snel ronddraaiende delen zullen niet alle vissen dit overleven. Aan de andere kant treedt dit jaar het Kierbesluit in werking. Het Kierbesluit betekent dat de Haringvlietsluizen 'op een kier worden gezet' als de waterstand op het Haringvliet lager is dan op zee. Dat is belangrijk voor de internationale vismigratie. Op deze manier kunnen trekvissen de sluisen passeren richting hun paaigebieden, die stroomopwaarts liggen. Daardoor is het mogelijk dat in de toekomst minder vissen het afvoermiddel in de Nieuwe Waterweg passeren, waardoor dus ook minder vissen schade oplopen.

6.4.2 Inspectie en onderhoud

Gedurende de levensduur van de afvoerconstructie zal er inspectie en onderhoud nodig zijn bij en aan de constructie. Zo zullen de afvoerkokers af en toe schoongemaakt moeten worden van planten en rommel die zich aan de wanden hecht. Dit kan onder water gedaan worden door duikers. Een andere mogelijkheid is dat de kokers droog gezet worden door de schuiven te laten zakken en het water uit de kokers weg te pompen. Als de spuimodule of de pompmodule er dan uit gehesen wordt, kan men op die manier in de kokers komen.

7 Betonconstructie afvoercomplex

In dit hoofdstuk zijn beton- en wapeningsberekeningen uitgevoerd voor de afvoerconstructie in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg. Het onderwerp van dit onderzoek richt zich vooral op de afvoerende functie van het afvoermiddel. Dit heeft als consequentie dat alleen betonberekeningen voor het afvoerende deel van de constructie gemaakt zijn. Hoewel in dit hoofdstuk van het eindontwerp (Figuur 49) uitgegaan wordt, is dat voor de berekeningen niet van belang. Eerst volgt een deel met algemene gegevens, zoals relevante afmetingen en eigenschappen van de materialen. Daarna komt de uitwerking in de lengterichting (y-richting) en de breedterichting (x-richting) aan de orde. De gebruikte formules komen uit [NEN, 2011] en [Walraven, 2010]. Als laatste volgt er nog een conclusie met daarin een overzicht van de uitkomsten.

7.1 Algemeen

In de traditionele waterbouwkunde wordt voornamelijk gebruik gemaakt van beton en staal als constructiemateriaal. Beton wordt gebruikt voor de fundering, pijlers en landhoofden. Staal wordt veelal gebruikt voor de schuiven en deuren. Omdat beton relatief zwaar is, is het zeer geschikt voor de afvoerconstructie. De constructie bevindt zich in zeewater (klasse-aanduiding: XS2 en XS3). De bijbehorende betonsterkte moet minimaal C45/55 zijn. Met deze betonsterkteklasse is dan ook verder gerekend. De eigenschappen die hier bij horen, staan in Bijlage D – Betonberekeningen,

Afmetingen

De afvoerconstructie bestaat uit drie delen van gelijke grootte. De hoofdafmetingen van elk deel staan in Tabel 30 en Figuur 53.

De afvoerconstructie bestaat uit een bovenbouw en onderbouw. De onderbouw is dat deel van de constructie waar de kokers zich bevinden. De bovenbouw bevindt zich erboven en dient onder andere als waterkering. Omdat dit onderzoek vooral gaat over de afvoerende functie van het afvoermiddel, zijn in dit rapport alleen betonberekening gemaakt voor de onderbouw. In vergelijking met de bovenbouw is, ook wat de betonberekeningen betreft, de onderbouw complexer. In het vervolg zal de bovenbouw dan ook niet meer afgebeeld worden.

In Tabel 40 staan de overige relevante afmetingen die op diverse plaatsen in het rapport gebruikt zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Strookbreedte	b_s	[m]	5,5
Kokerdiameter inwendig	d_i	[m]	4
Kokerdiameter buitenzijden	d_u	[m]	5
Kokerdiameter tussen (gemiddelde)	d_t	[m]	4,5

Tabel 40 - Overige afmetingen

Dekking

De betondekking is de afstand tussen het oppervlak van de wapening en het betonoppervlak, inclusief beugels. De betondekking wordt bepaald met de volgende formule.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

De minimale betondekking c_{min} is gelijk aan de diameter van het wapeningsstaal, 32 mm. De uitvoeringstolerantie Δc_{dev} is 10 mm. De betondekking is dus 42 mm. In de berekeningen is echter

gerekend met een betondekking van 10 cm. Deze was als eerste schatting aangenomen. Er is echter voor gekozen om deze waarde aan te blijven houden aangezien het verschil klein is in vergelijking met de hoofdafmetingen van de constructie. Ook is deze waarde aan de veilige kant.

Werkwijze

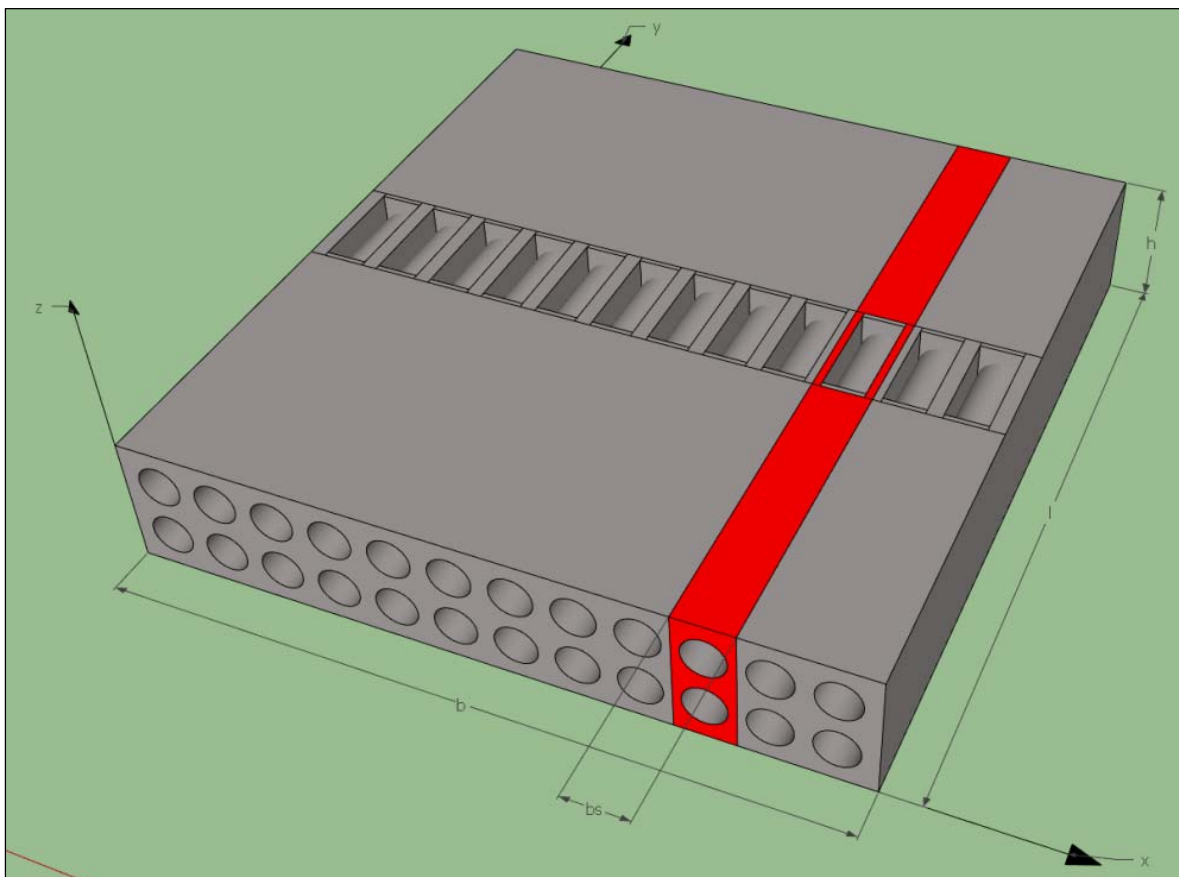
Het afvoerelement is in de lengterichting (y-richting) en in de breedterichting (x-richting) doorgerekend. In beide richtingen is met een strook gerekend met een breedte b_s van 5,5 meter. Dit is vervolgens gemodelleerd als een ligger die (gedeeltelijk) verend ondersteund is. Door de gedeeltelijke ondersteuning treden er momenten en dwarskrachten in de constructie op. Daarop zijn achtereenvolgens de wapening door buiging, de afschuifwapening en de wapening ten gevolge van wringing bepaald. Een uitgebreidere toelichting op de berekeningen is te vinden in Bijlage D – Betonberekeningen.

7.2 Lengterichting

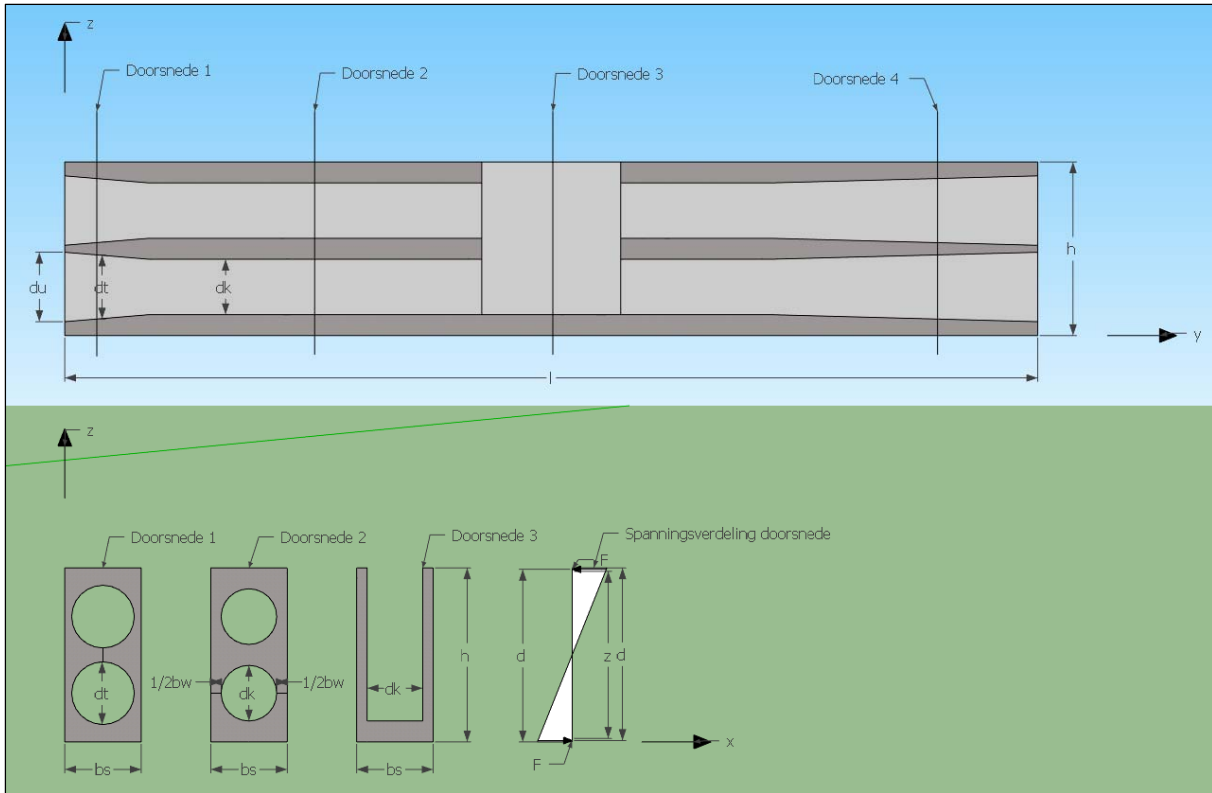
In deze paragraaf is gekeken naar de lengterichting.

7.2.1 Algemeen

Voor de uitwerking in de lengterichting is gerekend met een strook van 5,5 meter breed, met precies in het midden twee kokers boven elkaar. Dit is het rode gedeelte in Figuur 66. Op vier plaatsen in deze strook zijn de doorsnedes weergegeven en de eigenschappen ervan bepaald. Doorsnede 1 is het gemiddelde van de instroomopening, doorsnede 2 is het middendeel, doorsnede 3 is ter hoogte van het pompgedeelte en doorsnede 4 is het gemiddelde van de uitstroomopening. Doorsnede 1 is in deze situatie gelijk aan doorsnede 4. In Figuur 67 staan de dwarsdoorsnede van de strook, de drie strookdoorsnedes en de spanningsverdeling ten gevolge van buigend moment in de doorsnede.



Figuur 66 - Strook in lengterichting in afvoerdeel



Figuur 67 - Dwarsdoorsnede strook, drie strookdoorsnedes en spanningsverdeling

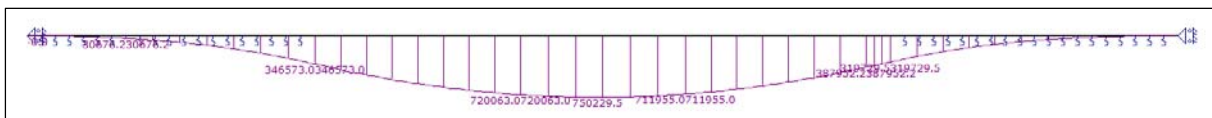
De totale belasting op het afvoerelement van 5,5 meter breed is 79553 kN. Dit bestaat uit het eigengewicht van 73228 kN en uit 6325 kN van de bovenbouw (in uiteindelijke ontwerp). Voor de beddingsconstante k_{bed} is een waarde gekozen van 50000 kN/m³ (gemiddeld voor zand).

7.2.2 Buiging

Door de belasting op de constructie treden er momenten en daardoor ook buiging in de constructie op. Afhankelijk van de ondersteuning van de constructie zal dit resulteren in sagging of hogging.

Sagging

Sagging is het moment dat ontstaat doordat de constructie in het midden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is aan de beide einden van de ligger, 17,5 meter aan beide zijden. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 68.

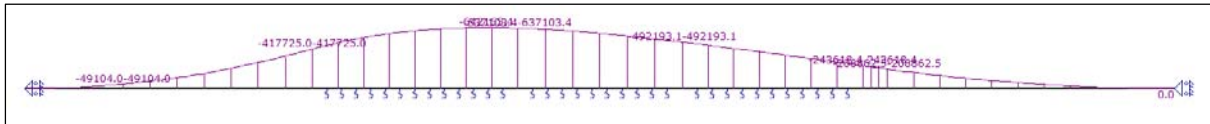


Figuur 68 - Momentenlijn (kNm) door sagging

Het maximale moment is ongeveer 750230 kNm in het midden van de onderzijde van de constructie.

Hogging

Hogging is het moment dat ontstaat doordat de constructie aan de uiteinden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is in het midden van de constructie gepositioneerd met een lengte van 35 meter. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 69.



Figuur 69 - Momentenlijn (kNm) door hogging

Het maximale moment is ongeveer 642170 kNm in niet helemaal het midden van de bovenzijde van de constructie.

Buigingswapening

Buigingswapening is wapening die zich horizontaal in de lengterichting van de constructie bevindt, daar waar de grootste trekkrachten zijn door buiging. Dat is of helemaal onderin de constructie, bij sagging, of helemaal bovenin de constructie, door hogging. Met behulp van onderstaande formules is de wapeningsoppervlakte van de langswapening berekend per strook, dat is dus per 5,5 meter breed.

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

$$A_{sl} = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{A_c}$$

In Tabel 41 en Tabel 42 staan respectievelijk de waarden voor de onderzijde en bovenzijde van bovenstaande formules. De rekenwaarde van de vloeigrens van het wapeningsstaal f_{yd} is 435 N/mm². De inwendige hefboomsarm z is geschat op de hoogte van de constructie minus 0,5 meter. Dit is aan de veilige kant. De betondoorsnede A_c is gelijk aan de A_{v2} . Dit is alleen de betondoorsnede; de openingen zijn daar niet in meegenomen.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment onderzijde	$M_{Ed,o}$	[kNm]	750230
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,o}$	[kN]	62519
Doorsnede langswapening onderzijde	$A_{sl,o}$	[mm ²]	143794
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,58

Tabel 41 - Berekening wapeningsoppervlakte onderzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de onderzijde van de constructie is ongeveer 26144 mm² per meter.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment bovenzijde	$M_{Ed,b}$	[kNm]	642170
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,b}$	[kN]	55039
Doorsnede langswapening bovenzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	123083
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,50

Tabel 42 - Berekening wapeningsoppervlakte bovenzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de bovenzijde van de constructie is ongeveer 22379 mm² per meter.

Minimum en maximum wapeningspercentage

De hoeveelheid wapening in een doorsnede moet meer zijn dan het minimum wapeningspercentage ρ_{min} en minder zijn dan het maximum wapeningspercentage ρ_{max} . In Tabel 43 staan de grenswaarden van de wapeningspercentages voor de langswapening aan onder onderzijde van de constructie (bij sagging).

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum wapeningspercentage	$\rho_{\min,o}$	[%]	0,13
Maximum wapeningspercentage	ρ_{\max}	[%]	3,15

Tabel 43 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening onderzijde constructie

De berekende wapeningspercentage aan de onderzijde van de constructie valt binnen deze grenzen.

De grenswaarden van de wapeningspercentages voor de langswapening aan de bovenzijde van de constructie (bij hogging) staan in Tabel 72.

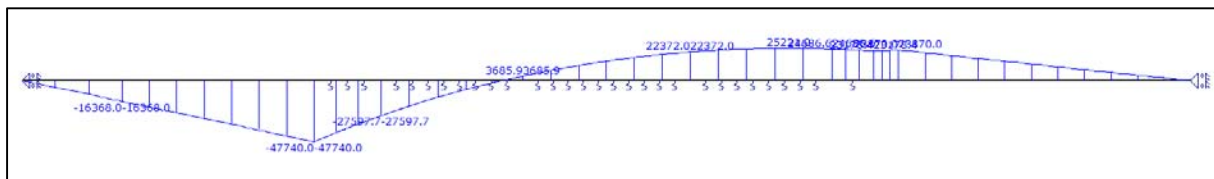
Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum wapeningspercentage	$\rho_{\min,b}$	[%]	0,14
Maximum wapeningspercentage	ρ_{\max}	[%]	3,15

Tabel 44 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening bovenzijde constructie

Ook nu valt de berekende wapeningspercentage aan de bovenzijde van de constructie binnen deze grenzen.

7.2.3 Afschuiving

Door de belasting op de constructie treden er dwarskrachten in de constructie op. Als deze groter zijn dan de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand dient schuifwapening toegepast te worden. In Figuur 70 staat de dwarskrachtenlijn, waarin te zien is dat de maximaal optredende dwarskracht 47740 kN is.



Figuur 70 - Dwarskrachtenlijn (kN) in lengterichting

Met behulp van onderstaande formules is gekeken of schuifwapening nodig is.

$$V_{Rd,c} = \left[\left(\frac{0,18}{y_c} \right) k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d \quad \text{minimum: } V_{Rd,c} = v_{\min} b_w d \quad \rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

$$A_{sl} = \frac{A_{sl,b} b_w}{b_s}$$

Indien de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$ moet schuifwapening toegepast worden. In Tabel 45 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. Voor de berekening van De doorsnede van de langswapening A_{sl} is de langswapening aan de bovenzijde $A_{sl,b}$ genomen (omdat hier minder langswapening is dan aan de onderzijde van de constructie).

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede langswapening	A_{sl}	[mm ²]	33568
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	1,5
Effectieve hoogte	d	[m]	12,4
Langswapeningspercentage	ρ_l	[-]	0,0018
Materiaalfactor	γ_c	[-]	1,5
Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$V_{Rd,c}$	[kN]	5056
Rekenwaarde schuifspanningsweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$V_{Rd,c} (v_{min})$	[N/mm ²]	0,27

Tabel 45 - Specifiekere berekening schuifspanning

De minimale schuifspanningsweerstand v_{min} in bovenstaande formule kan in deze berekening gezien worden als de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$. De rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} is nog steeds groter dan de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c} (v_{min})$. Er zal dus schuifwapening toegepast moeten worden.

Afschuifwapening

Afschuifwapening is wapening die aangebracht wordt om de schuifspanningsweerstand te vergroten. Deze wapening bevindt zich verticaal langs de rand van de constructie(elementen) en dwars op de langswapening. De afschuifwapening is berekend met onderstaande formule.

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot \cot\theta \cdot f_{ywd}} \quad \rho_w = \frac{A_{sw}/s}{b_w}$$

In Tabel 46 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde dwarskracht	V_{Ed}	[kN]	47740
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Rekenwaarde vloedgrens afschuifwapening	f_{ywd}	[N/mm ²]	435
Doorsnede afschuifwapening per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	3,660
Wapeningspercentage schuifwapening	ρ_w	[%]	0,24

Tabel 46 - Berekening afschuifwapening

Gekozen is voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 732 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 3660 mm².

Minimum schuifwapeningspercentage en maximale staafafstand

De hoeveelheid wapening in een doorsnede moet meer zijn dan het minimum schuifwapeningspercentage $\rho_{w,min}$. De staafafstand mag ook niet groter zijn dan de maximale staafafstand $s_{l,max}$. Dit is om te voorkomen dat zich afschuifscheuren kunnen vormen die niet door schuifwapening gesneden worden. Met behulp van de onderstaande formules zijn deze grenswaarden berekend.

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad s_{l,max} < 0,75d(1 + \cot\alpha)$$

In Tabel 76 staan waarden die met bovenstaande formules berekend zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum schuifwapeningspercentage	$\rho_{w,min}$	[%]	0,11
Maximum staafafstand	$S_{l,max}$	[m]	9

Tabel 47 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening

Omdat het berekende schuifwapeningspercentage ρ_w groter is dan de minimale waarde $\rho_{w,min}$ voldoet deze. De staafafstand s is kleiner dan de maximale staafafstand $S_{l,max}$ en voldoet.

Spanning drukdiagonalen

De spanning in de drukdiagonalen dienen de maximale drukspanning niet te overschrijden. De rekenwaarde van de maximale dwarskracht, begrensd door het bezwijken van de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ staat in onderstaande formule.

$$V_{Rd,max} = b_w z v f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

In Tabel 48 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

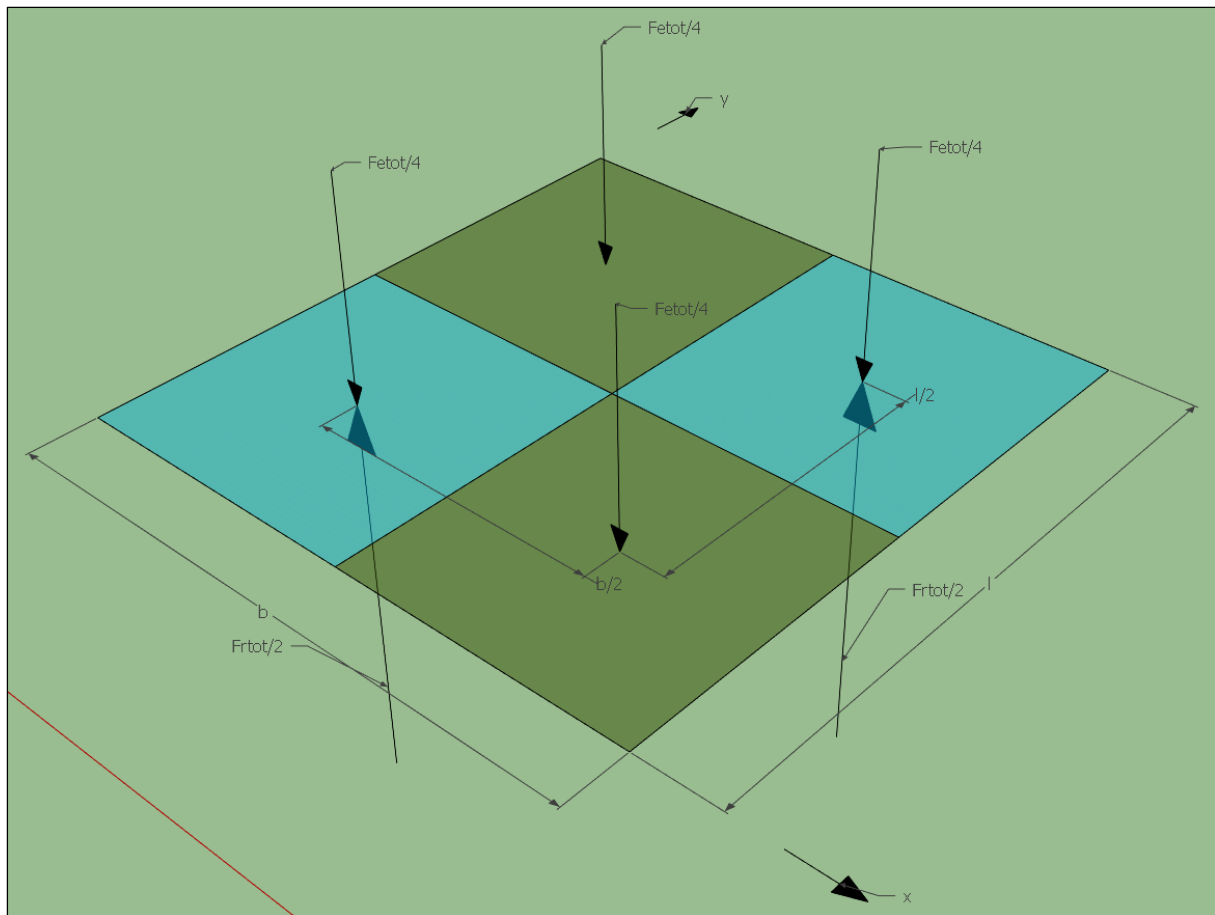
Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	v	[-]	0,492
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	1,5
Rekenwaarde maximale dwarskracht drukdiagonalen	$V_{Rd,max}$	[kN]	91614

Tabel 48 - Berekening drukspanning drukdiagonalen

De maximaal optredende dwarskracht V_{Ed} overschrijdt de rekenwaarde van de maximale dwarskracht in de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ niet, dus de drukdiagonalen voldoen.

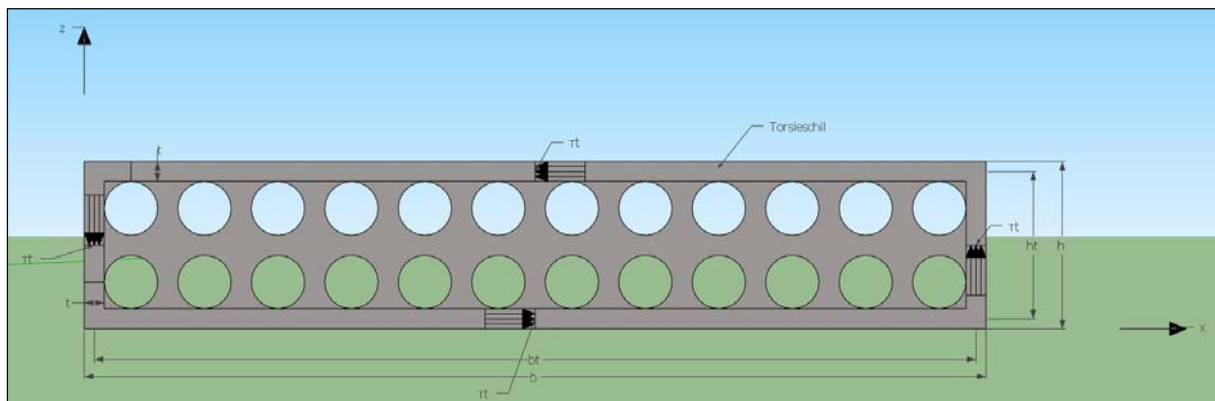
7.2.4 Wringing

Wringing (of torsie) treedt op in de constructie doordat deze in de lengte en breedte niet gelijkmatig ondersteund wordt. De totale belasting F_e is verdeeld over vier vlakken van gelijke grootte, op elk vlak $F_e/4$. De totale ondersteuning op de constructie is ook verdeeld over dezelfde vier vlakken. De totale reactiekracht F_r werkt echter maar twee van de vier vlakken, die niet naast elkaar liggen. Op deze beide vlakken werkt dan een reactiekracht van $F_e/2$ in tegengestelde richting aan de belasting. De resultanten van deze krachten, vermenigvuldigd met de arm $b/2$ of $l/2$, geven wringende momenten in beide richtingen. Dit is Figuur 71 verduidelijkt.



Figuur 71 - Lastenverdeling en ongelijkmatige ondersteuning

Met onderstaande formule is de schuifkracht V_{Ed} door wringing in de verticale wanden berekend. Bij deze berekening is gerekend met de volledige breedte van een deel van de constructie in plaats van een strook van 5,5 meter breed. In Figuur 72 staat deze volledige breedte van de constructie waarin met wringing gerekend is en waarin dus schuifstromen optreden.



Figuur 72 - Doorsnede met schuifstromen

Het torsiemoment, de schuifspanning en de dwarskracht door wringing worden berekend met behulp van onderstaande formules.

$$T_{Ed} = \frac{F_{E,tot}}{4} \cdot \frac{b}{2} \quad \tau_t = \frac{T_{Ed}}{2b_t \cdot h_t \cdot t} \quad V_{Ed} = \tau_t \cdot t \cdot h_t \quad b_t = b - t \quad h_t = h - t$$

In Tabel 49 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn. Hierbij is de belastingfactor van 1,2 (voor permanente belasting) meegenomen.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde totale belasting op constructiedeel	$F_{E,tot}$	[kN]	1171597
Breedte constructie	b	[m]	67,5
Rekenwaarde wringend moment	T_{Ed}	[kNm]	9885349
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Breedte schuifstroom	b_t	[m]	66
Dikte torsieschil	t	[m]	1,5
Schuifspanning in torsieschil door wringing	τ_t	[N/mm ²]	4,44
Rekenwaarde schuifkracht door wringing	V_{Ed}	[kN]	73225

Tabel 49 - Berekening schuifkracht door wringing

Torsiewapening

De benodigde wapening door torsie is berekend met onderstaande formules. Deze wapening bestaat uit twee delen: schuifwapening A_{sw} (berekend met de eerste formule) en langswapening A_{sl} (berekend met de tweede formule) in het lijf.

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot h_m \cdot \cot\theta} \qquad \sum A_{sl} \cdot f_{yd} = V_{Ed} \cdot \cot\theta$$

In Tabel 50 staan de waarden die met bovenstaand formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Doorsnede afschuifwapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	6,124
Doorsnede langswapening door torsie	$\sum A_{sl}$	[mm ²]	421043
Breedte constructie	b	[m]	67,5
Benodigde langswapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sl}/s	[mm ² /mm]	6,238

Tabel 50 - Berekening wapening door torsie

Voor de afschuifwapening is gekozen voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 1225 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 6124 mm². De benodigde langswapening door torsie kan willekeurig over de hoogte aangebracht worden.

Drukspanning

Ook hier wordt gecontroleerd of de drukspanning de toelaatbare spanning niet overschrijdt met behulp van onderstaande formules.

$$\sigma_c < v \cdot f_{cd} \qquad \sigma_c = \frac{V_{Ed}}{t \cdot h_t \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \qquad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \qquad t_{eff} = A/u$$

In Tabel 51 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. Wat betreft de wanddikte t waarmee in de tweede formule gerekend wordt: er wordt gerekend met de kleinste waarde van de werkelijke wanddikte t of de effectieve wanddikte t_{eff} .

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	ν	[-]	0,492
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Wanddikte	t	[m]	1,5
Omtrek doorsnede	u	[m]	160
Oppervlakte doorsnede	A	[m ²]	843,75
Effectieve wanddikte	t_{eff}	[m]	5,27
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Rekenwaarde drukspanning	σ_c	[N/mm ²]	12,90

Tabel 51 - Berekening drukspanning torsie

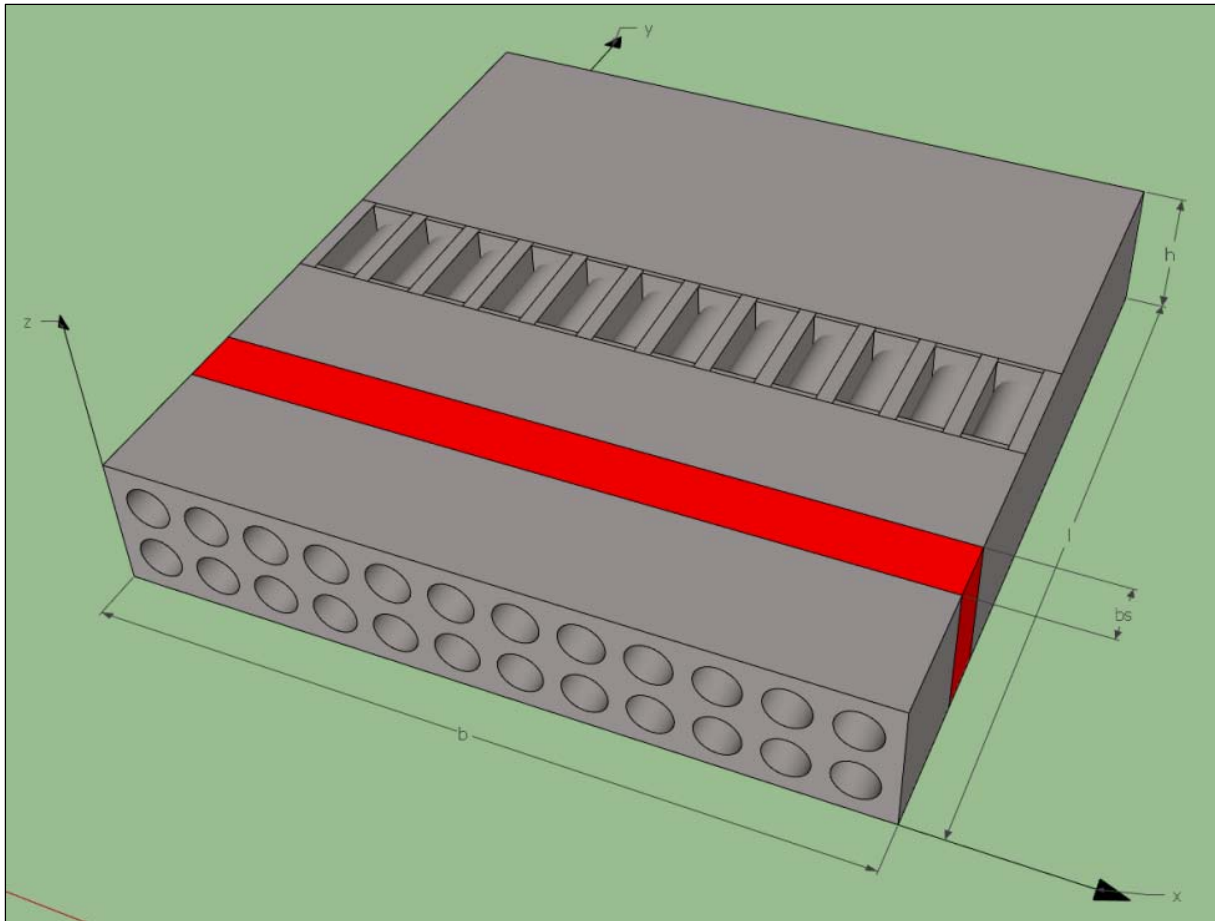
De werkelijke dikte van de torsieschil t is kleiner dan de effectieve dikte van de torsieschil, er is dus gerekend met de werkelijke dikte. De rekenwaarde van de drukspanning σ_c ten gevolge van torsie is lager dan de toegestane drukspanning $\nu \cdot f_{cd} = 14,76 \text{ N/mm}^2$. De betonconstructie voldoet.

7.3 Breedterichting

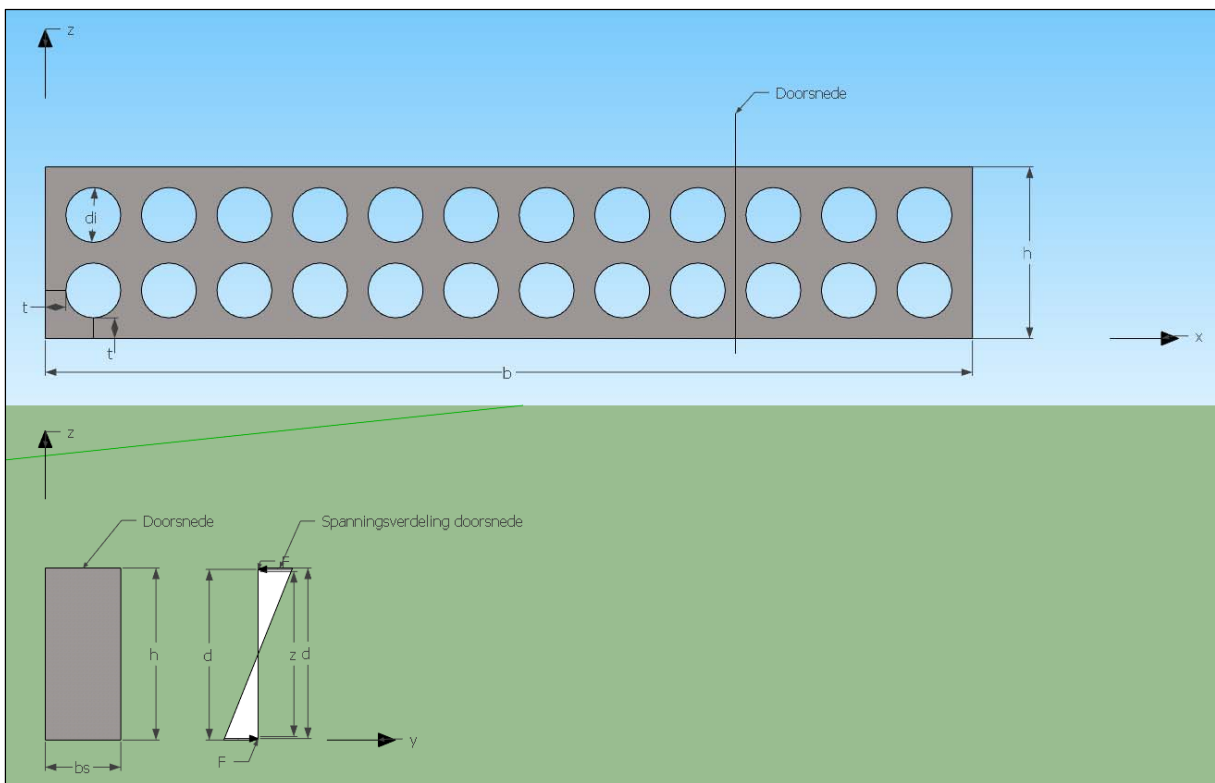
In de breedterichting is dezelfde procedure toegepast als in de lengterichting. Alleen de belangrijkste tekeningen en de uitkomst van de berekeningen staan hier. De volledige berekening is te vinden in Bijlage D – Betonberekeningen.

7.3.1 Algemeen

Voor de uitwerking in de breedterichting is ook gerekend met een strook van 5,5 meter breed. Er is voor dezelfde strookbreedte gekozen als in de lengterichting omdat dit de berekeningen iets eenvoudiger maakt. Dit is het rode gedeelte in Figuur 73. In Figuur 74 staan de dwarsdoorsnede van de strook, de strookdoorsnede en de spanningsverdeling ten gevolge van buigend moment in de doorsnede. De strookdoorsnede is genomen ter plaatse van de wanden.



Figuur 73 - Strook in breedterichting in afvoerdeel



Figuur 74 - Dwarsdoorsnede strook, strookdoorsnede en spanningsverdeling

7.3.2 Buiging

De berekende wapeningspercentages voor buigingswapening aan de onder- en bovenzijde van de constructie zijn lager dan het minimum wapeningspercentage. Er moet dus meer wapening in de doorsnede. Bij een minimaal wapeningspercentage van 0,16 % is in Tabel 52 de bijbehorende hoeveelheid langswapening per strook gegeven.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede langswapening onderzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	110139
Doorsnede langswapening bovenzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	109359

Tabel 52 - Gewijzigde wapeningsoppervlakten langswapening

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de onderzijde is ongeveer 20025 mm² per meter. De wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de bovenzijde is ongeveer 19883 mm² per meter.

7.3.3 Afschuiving

De afschuifwapening bevindt zich verticaal langs de rand van de constructie(elementen) en dwars op de langswapening. De benodigde hoeveelheid afschuifwapening (volgens het minimum schuifwapeningspercentage) staat in Tabel 46.

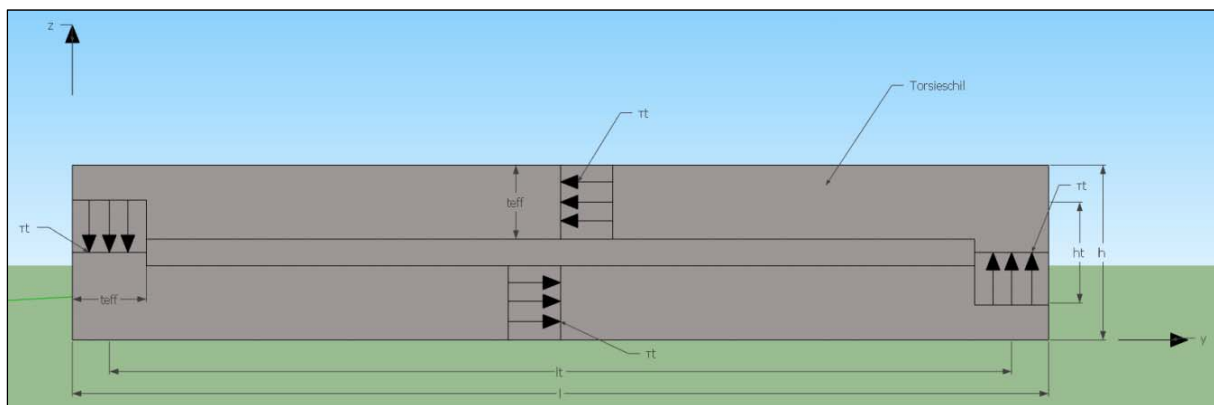
Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede afschuifwapening per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	5,903

Tabel 53 - Berekening afschuifwapening

Bij een staafafstand s van 200 mm is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 1181 mm².

7.3.4 Wringing

In Figuur 75 staat de volledige breedte van de constructie waarin met wringing gerekend is en waarin dus schuifstromen optreden. Deze doorsnede is gemaakt ter plaatse van de wanden, omdat alleen de wanden de schuifstroom door wringing op kunnen nemen.



Figuur 75 - Doorsnede met schuifstromen

Om de schuifspanning en de dwarskracht door torsie in deze doorsnede te berekenen, wordt er gebruik gemaakt van het principe dat er een torsieschil met dikte t_{eff} is.

De benodigde wapening door torsie bestaat uit twee delen: schuifwapening A_{sw} en langs wapening A_{sl} in het lijf. In Tabel 54 staat de benodigde torsiewapening.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Doorsnede afschuifwapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	10,128
Doorsnede langswapening door torsie	ΣA_{sl}	[mm ²]	455554
Benodigde langswapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sl}/s	[mm ² /mm]	6,508

Tabel 54 - Berekening wapening door torsie

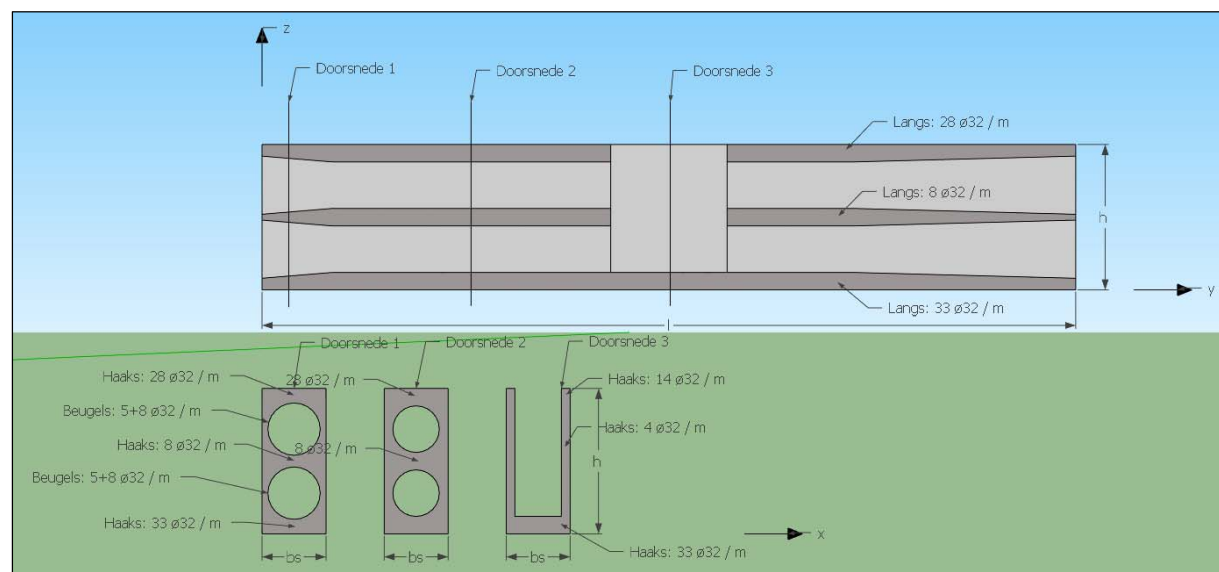
Voor de afschuifwapening is gekozen voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 2026 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 10128 mm². De benodigde langswapening door torsie kan willekeurig over de hoogte aangebracht worden.

7.4 Resultaat

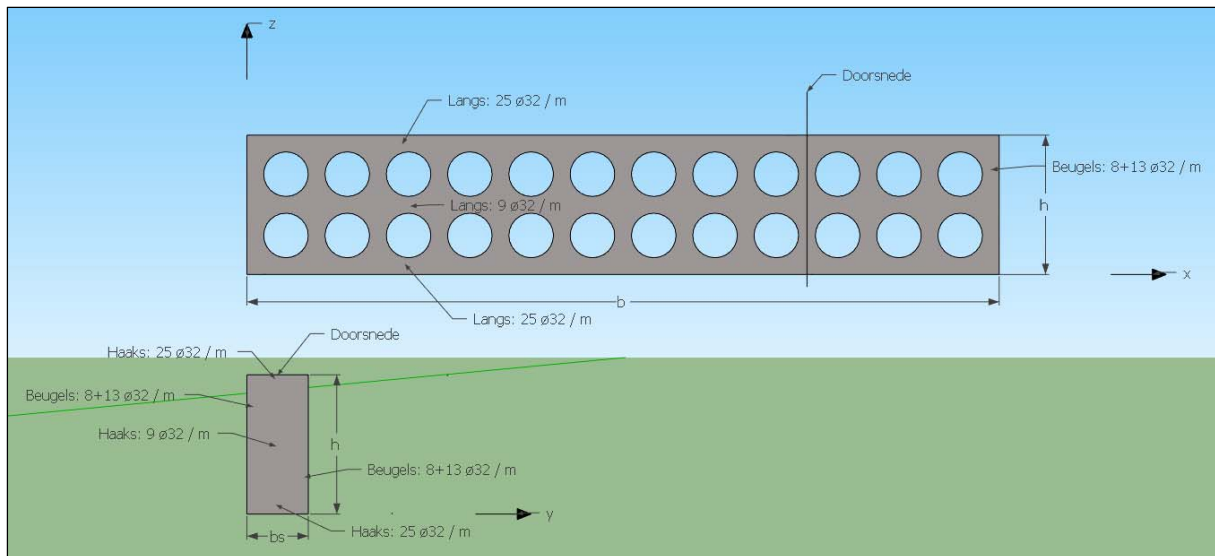
In Tabel 55 is een overzicht gegeven van alle benodigde wapeningsoppervlaktes, wapeningspercentages en een voorstel voor welke wapening aangebracht kan worden. In Figuur 76 en Figuur 77 staat waar de wapening zich in de constructie in respectievelijk de lengte- en breedterichting bevindt.

Benodigde wapening per strekkende meter				Voorgestelde wapening	
		Oppervlakte [mm ² /m]	Percentages [%]	Configuratie [n ømm/m]	Oppervlakte [mm ² /m]
Lengterichting	Buiging – boven	22379	0,50	28 ø32	22519
	Buiging – onder	26144	0,58	33 ø32	26540
	Afschuiving – beugels	3660	0,24	5 ø32	4021
	Torsie – beugels	6124	-	8 ø32	6434
	Torsie – langs	6238	-	8 ø32	6434
Dwarsrichting	Buiging – boven	19883	0,16	25 ø32	20106
	Buiging – onder	20025	0,16	25 ø32	20106
	Afschuiving – beugels	5903	0,11	8 ø32	6434
	Torsie – beugels	10128	-	13 ø32	10455
	Torsie – langs	6508	-	9 ø32	7238

Tabel 55 - Overzicht wapening in constructie



Figuur 76 - Locatie wapening lengterichting



Figuur 77 - Locatie wapening breedterichting

Er zal niet alleen wapening langs de buitenranden van de constructie geplaatst moeten worden, maar ook langs de randen van de (inwendige) kokers.

8 Conclusies en aanbevelingen

De conclusies en aanbevelingen zijn in dit hoofdstuk op een rij gezet. Voor beiden geldt dat ze onderverdeeld zijn per onderwerp van de vier deelvragen.

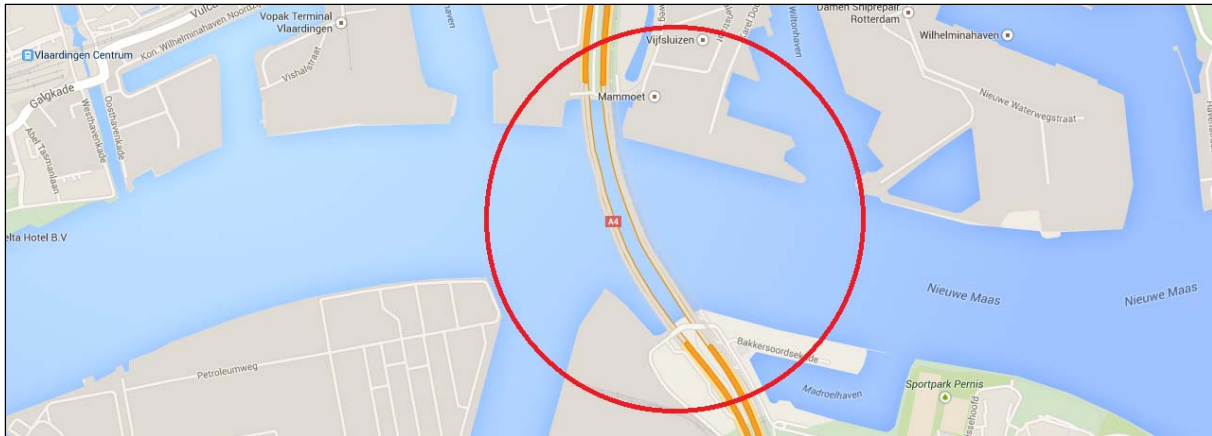
8.1 Conclusies

Nut en noodzaak afsluiting met afvoermiddel

- Door klimaatverandering zijn op de middellange en de lange termijn forse veranderingen in de waterhuishouding te verwachten zijn in de regio Rijnmond-Drechtsteden. De kans op een overstroming wordt groter; de zoetwatervoorziening wordt minder betrouwbaar. Dat is ongewenst voor de bestaande functies en de ruimtelijke ontwikkeling in de regio. De afsluiting van de Nieuwe Waterweg is een veelbelovend antwoord op deze problemen. De kans op overstromingen wordt minder; de betrouwbaarheid van de zoetwatervoorziening neemt toe. Daarom is de afsluiting van de Nieuwe Waterweg een interessant alternatief.
- Ongeveer 20 % van het water van de Rijn stroomt via de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg naar de Noordzee. De maatgevende afvoer van de Rijn zal in de toekomst door klimaatverandering toenemen tot 18.000 m³/s. Door de afsluiting van de Nieuwe Waterweg kan er daar geen water meer worden afgevoerd. Het is echter niet mogelijk om het water een andere richting op te sturen. Dat is ook niet wenselijk, aangezien doorstroming goed is voor de waterkwaliteit, ook rond de waterinlaatpunten. Daarom is het nuttig en noodzakelijk dat er een afvoermiddel in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg komt.

Locatie afsluiting en afvoermiddel

- Er is voor gekozen om de mogelijke locaties van de afsluiting met het afvoermiddel te verdelen in twee groepen, de zogenoemde hoofdvarianten. In de eerste hoofdvariant, de “Eendelige afsluiting”, is de locatie in de Nieuwe Waterweg. In de tweede hoofdvariant, de “Tweedelige afsluiting”, is er een locatie in de Nieuwe Maas en een in de Oude Maas. Binnen deze twee hoofdvarianten zijn verschillende opties mogelijk voor wat betreft de precieze locatie. Hoewel de investeringskosten voor de “Tweedelige afsluiting” hoger zijn, is de verwachting dat de totale kosten toch lager uitvallen voor de “Eendelige afsluiting”. Daarom is voor de locatie gekozen voor de variant van de “Tweedelige afsluiting”.
- Een goede locatie voor de afsluiting van de Nieuwe Maas is ter hoogte van de Beneluxtunnel. Dit is een logische locatie omdat de bovenzijde van de Beneluxtunnel een vaste diepte heeft, en als een soort drempel voor de scheepvaart gezien kan worden. Als de afsluiting nabij de Beneluxtunnel wordt gemaakt, zal de diepte voor de scheepvaart in de toekomst ook niet aangepast hoeven te worden. Wat ook meespeelt, is dat hoe verder landinwaarts de afsluiting komt, hoe kleiner de scheepvaartsluizen hoeven te zijn, wat gunstig is voor de kosten. De exacte locatie in de Nieuwe Maas is weergegeven in Figuur 78.



Figuur 78 - Locatie "Tweedelige afsluiting" in de Nieuwe Maas ter hoogte van de Beneluxtunnel

Verhouding spuien en pompen

- De verhouding tussen spuien en pompen is gebaseerd op: spuien als het kan, pompen als het moet. Het afvoermiddel is flexibel van aard: passend voor de geldende omstandigheden in een bepaalde tijd. Het spuicomplex zal in de tijd (regelmatig) aangepast worden tot gemaal. Concreet: spuien in normale omstandigheden (gemiddelde zeewaterstand en gemiddelde Rijnafvoer) en pompen in extreme omstandigheden (stormvloed en/of maatgevende Rijnafvoer).
- Als het gaat over het aantal pompen wat nodig is, in 2018 het zijn er 9, in 2100 zijn het er 72. Het is mogelijk om op verschillende momenten een aantal pompen bij te plaatsen, of beschikbaar te stellen voor een verwachte grote Rijnafvoer. In Tabel 58 staat een voorstel voor het tijdschema voor het (bij)plaatsen van pompen. Deze is gebaseerd op de aangenomen lineaire toename van de maatgevende Rijnafvoer. Als later blijkt dat de maatgevende afvoer op grond van metingen afwijkt van de verwachtingen, kan het tijdschema op grond daarvan aangepast worden. In Tabel 57 staat de ordegrrootte van de verwachte verhouding tussen spuien en pompen in 2018 en 2100.

Jaar	Erbij	Totaal
2025 (bouwjaar)	12	12
2036	10	22
2047	10	32
2058	10	42
2069	10	52
2080	10	62
2091	10	72

Tabel 56 - Tijdschema aantal pompen

Jaar	Spuien [%]	Pompen [%]
2018	100	0
2100	95	5

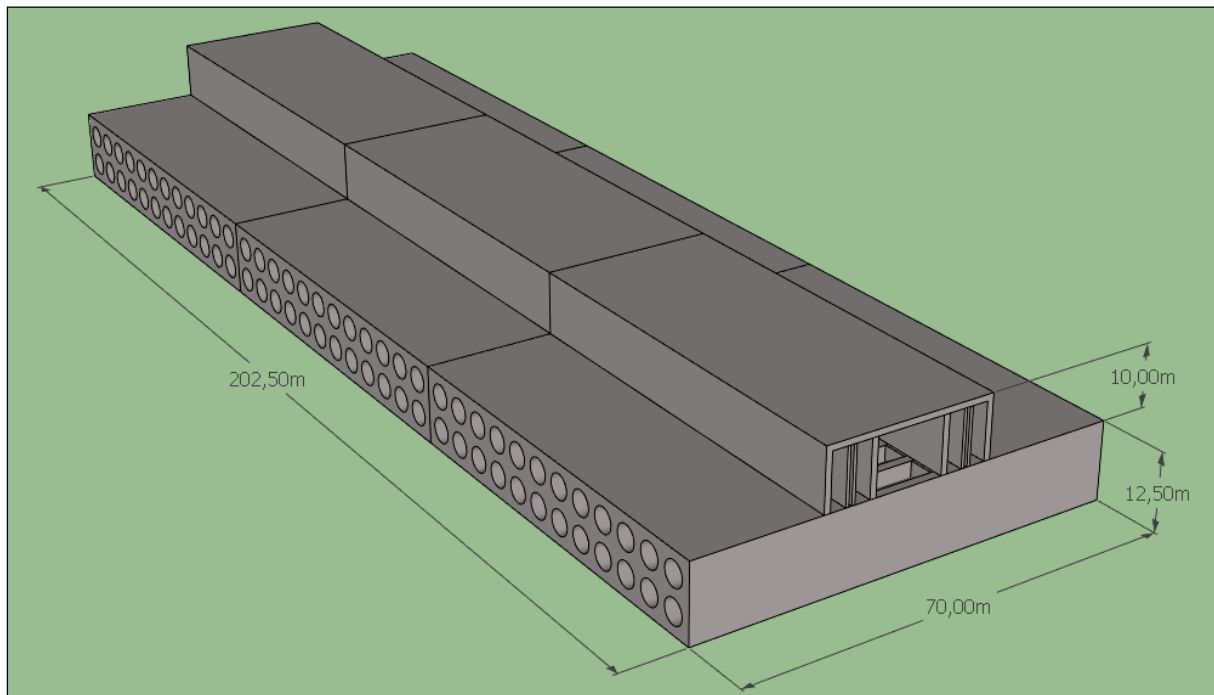
Tabel 57 - Ordegrrootte verwachte verhouding spuien en pompen

- Het aanpassen van het afvoercomplex van spuisluis tot gemaal gebeurt door het verwisselen van spuimodules voor pompmmodules. Gestart wordt met het uithijzen van de spuimodules door middel van een portaalkraan. Daarna wordt door de portaalkraan deze module verplaatst naar een opslagruimte naast het afvoercomplex. Vervolgens wordt vanaf de

opslagruimte een pompmodule naar de juiste plaats in het afvoercomplex gehesen. Daar laat de portaalkraan deze module zakken op de plaats waar eerst de spuimodule zich bevond.

Betonontwerp afvoermiddel

- Een schets van het uiteindelijke (beton)ontwerp van het afvoermiddel staat in Figuur 79. Aan de afmetingen in deze figuur is goed te zien dat er een groot volume aan beton nodig is. Het is ook een van de grootste afvoercomplexen ter wereld. Door de grootte van de constructie is er ook veel wapeningsstaal nodig. Relatief gezien valt het echter toch wel mee: de wapeningspercentages blijken groter te zijn 0,6%.



Figuur 79 - Eindontwerp afvoercomplex

- De kokers in de afvoerconstructie maakte de betonberekeningen vooral in de breedterichting lastig. Ook de uitsparing in het midden voor de spui- en pompmodule maakte het moeilijk. De wapening in lengterichting aan de bovenzijde moet om de uitsparing heen. Dit zorgt voor hogere concentraties wapening in de bovenzijde van de wanden naast de uitsparingen.

Eindconclusie

De hoofdvraag van dit onderzoek was: *Wat is een goed ontwerp voor een aanpasbaar afvoermiddel in een mogelijke afsluiting van de Nieuwe Waterweg?* Delen van het antwoord zijn in het rapport gegeven. Het uiteindelijk gepresenteerde ontwerp van het afvoercomplex heeft een flexibel karakter en voldoet aan de gestelde eisen. Het ontwerp van het afvoercomplex maakt onderdeel uit van de afsluiting van de Nieuwe Waterweg, die daarnaast bestaat uit een dam en scheepvaartsluizen.

8.2 Aanbevelingen

Algemeen

- Het ontwerp van het afvoermiddel is gebaseerd op een klimaatscenario. Een scenario is een beschrijving van mogelijke ontwikkelingen in de toekomst. Verwachtingen over de toekomst, gebaseerd op een klimaatscenario zijn dus onzeker. Daarom is het aan te bevelen de veranderingen in het klimaat en de gevolgen, zoals zeespiegelstijging, te monitoren. Verder is

het goed om te kijken hoe de oplossing wordt beïnvloed door andere (nog te ontwikkelen) klimaatscenario's.

Nut en noodzaak afsluiting met afvoermiddel

- Door de afsluiting van de Nieuwe Waterweg wordt de kans op overstromingen kleiner. Niet bekend is hoeveel minder deze kans wordt. Verder onderzoek hiernaar kan de nut en noodzaak van de afsluiting duidelijker maken.
- Door de afsluiting van de Nieuwe Waterweg neemt de betrouwbaarheid van de zoetwatervoorziening toe. Als onderzocht wordt hoe groot de toename in betrouwbaarheid is, zal dit ook voor meer duidelijkheid zorgen wat betreft de nut en noodzaak van de afsluiting.
- Op dit moment stroomt ongeveer 20 % van het water van de Rijn via de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg naar de Noordzee. Onderzocht kan worden of, en zo ja met welke maatregelen dit kan veranderen. Vervolgens dient ook onderzocht te worden welke invloed dit heeft op de waterkwaliteit rond de afsluiting van de Nieuwe Waterweg.
- Dit jaar treedt het Kierbesluit in werking. Het Kierbesluit betekent dat de Haringvlietsluizen 'op een kier worden gezet' als de waterstand op het Haringvliet lager is dan op zee. In dit rapport is niet onderzocht of dit invloed heeft op de afvoerverdeling van de Rijn over de verschillende riviertakken.

Locatie afsluiting en afvoermiddel

- Er is voor gekozen om de mogelijke locaties van de afsluiting met het afvoermiddel te verdelen in twee groepen, de zogenoemde hoofdvarianten. Er is globaal onderzoek gedaan naar het verschil in kosten tussen deze twee hoofdvarianten. Om een gefundeerdere keuze te kunnen maken, is het goed als er meer onderzoek komt naar de kosten.
- Een goede locatie voor de afsluiting van de Nieuwe Maas is ter hoogte van de Beneluxtunnel. Er is in dit onderzoek vanuit gegaan dat de diepte van de Beneluxtunnel vastligt. Dit is echter niet per definitie het geval. Er is al onderzoek gedaan door een afstudeerder naar de mogelijkheid van het verdiepen van de Beneluxtunnel. In het kader van dit onderzoek is het goed om te onderzoeken in hoeverre dit idee serieuze vormen aan kan nemen. Als verdieping van de Beneluxtunnel serieus overwogen wordt, heeft dit invloed op de locatie van de afsluiting. Deze kan dan niet te dicht tegen de Beneluxtunnel aangelegd worden. Ook zal de drempelwerking voor scheepvaart van de Beneluxtunnel dan verdwijnen. Dit kan tot gevolg hebben dat de scheepvaartsluizen ook verdiept moeten worden. Als dat nu bekend is, kan er misschien toch beter voor een andere locatie gekozen worden.

Verhouding spuien en pompen

- De verhouding tussen spuien en pompen is gebaseerd op: spuien als het kan, pompen als het moet. Het is goed als er meer onderzoek komt naar hoe de verhouding tijdens het gebruik van het afvoermiddel zal zijn. Er zal een afweging gemaakt moeten worden of men voortdurend wisselt tussen spui- en pompmodule (afhankelijk van de verwachte Rijnafoer), of dat men alleen pompmodules plaatst gebaseerd op de verwachte zeespiegelstijging. Welke consequenties heeft dit op het energieverbruik van het afvoermiddel? Wanneer is de beste tijd om de pompen te plaatsen als een grote Rijnafoer verwacht wordt? Dit zijn vragen die verder onderzoek waard zijn.
- Er is een ontwerp gemaakt voor de verwachte omstandigheden tot 2100 met als uitkomst het aantal benodigde kokers en de verhouding tussen spuien in pompen. Onderzocht kan worden hoe verdere (verwachte) zeespiegelstijging en toename van de Rijnafoer een plek in het ontwerp kunnen krijgen.

Betonontwerp afvoermiddel

- Binnen het ontwerpproces zijn verschillende keren keuzes gemaakt waardoor tot het eindontwerp gekomen is. Zoals al uit het rapport blijkt, is niet bij elke berekening met het eindontwerp gerekend. Zo moet de stabiliteit nog gecontroleerd worden voor het eindontwerp. Daarnaast kunnen sommige zaken nauwkeuriger bekeken worden, zoals de belasting van en op de bovenbouw. Ook kan er ook meer onderzoek gedaan worden naar de benodigde bodembescherming
- In het ontwerpproces lag de focus vooral op de technische en minder op de esthetisch kant. Onderzocht kan worden hoe het ontwerp van het afvoercomplex mooier kan worden.

Literatuurlijst

Arnold, J., et al. – *Ontwerpnota basisontwerp propeller pomp HP1-4000.340* – Nijhuis Pompen, 2002

Baars, S. van, et al. – *Hydraulic Structures General* – TUDelft, Collegedicaat CT3330, 2009

Bezuyen, K.G. – *Inleiding Waterbouwkunde* – TUDelft, Collegedicaat CT2320, 2009

Bijlsma, W., et al. – *2de Beneluxtunnel* – 1999

Bol, R., et al. – *Over de grens van zout en zoet, Deelrapport Water- en Zoutbeweging* – MER Beheer Haringvlietluizen

Bruggeman, W., et al. – *Deltascenario's voor 2050 en 2100, nadere uitwerking 2012-2013* – Deltares, 2013

Chbab, E.H. – *Achtergrondrapportage hydraulische belasting voor de Benedenrivieren* – Deltares, 2012

De Afsluitdijk – *De afsluitdijk* – 2017 [Online]
<https://www.deafsluitdijk.nl/>

De Ingenieur – *Afsluitdijk in revisie* – 2015 [Online]
<https://www.deingenieur.nl/artikel/afsluitdijk-in-revisie>

Deltacommissaris – *Deltacommissaris* – 2017 [Online]
<https://www.deltacommissaris.nl/>

Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden – *Deltaprogramma 2012 Probleemanalyse Rijnmond-Drechtsteden* – 2011

Deltaprogramma, Rijnmond-Drechtsteden – *Deltaprogramma 2013 Probleemanalyse Rijnmond-Drechtsteden* – 2012

Deltaprogramma – *Deltaprogramma 2015: Werk aan de delta, de beslissingen om Nederland veilig en leefbaar te houden* – 2014

Dorrepaal, S.G. – *Closure of the New Waterway - An adaptive and innovative design of a lock complex in Rotterdam* – Afstudeerscriptie, 2016

Erfgoedhuis Zuid-Holland – *Geschiedenis van Zuid-Holland* – 2016 [Online]
<https://www.geschiedenisvanzuidholland.nl/verhalen/de-aanleg-van-de-nieuwe-waterweg>

Helpdesk Water – *Helpdesk Water* – Rijksoverheid, 2017 [Online]
<https://www.helpdeskwater.nl/>

Hoogenboom, P.C.J. – *Aantekeningen over wringing* – Collegedictaat, 2014

IJsselstijn, J. – *Gemaal te IJmuiden* – Cement, 1974

Nipius, F. – *InfraWiki.nl* – 2016 [Online]
<http://www.infrawiki.nl/>

Klein Tank, A., et al. – *KNMI'14 klimaatscenario's voor Nederland* – Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2015

Klijn F., et al. – *Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?* – Deltares, 2015

KNMI – *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut* – 2016 [Online]
<https://www.knmi.nl/home>

Maier, V. – *Developing a model to predict structural behaviour of caissons subjected to uneven bedding* – Afstudeerscriptie, 2013

Ministerie van Verkeer en Waterstaat – *Nationaal Waterplan 2009-2015* – 2009

Ministerie van Infrastructuur en Milieu – *Nationaal Waterplan 2016-2021* – 2014

NEN – *NEN-EN 1992-1-1+C2 (nl), Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen* – 2011

Kuiper, R., et al. – *Samenhang in de Zuidwestelijke Delta - Naar een vitale, veerkrachtige en veilige delta - Achtergrondrapport* – Planbureau voor de Leefomgeving, 2013

Overbeek, P. – *De Rijn in de Atlas* – Plein M, 2011 [Online]
<https://pleinm.wordpress.com/2011/05/26/de-rijn-in-de-atlas/>

PDOK – *OpenTopo achtergrondkaart* – 2018 [Online]
<http://pdokviewer.pdok.nl/>

Port of Rotterdam – *Port of Rotterdam* – 2017 [Online]
<https://www.portofrotterdam.com/nl>

Port of Rotterdam – *Feiten & cijfers, Een schat aan informatie* – Havenbedrijf Rotterdam, 2016

Rijkswaterstaat – *Rijkswaterstaat* – 2016 [Online]
<https://www.rijkswaterstaat.nl/>

Rijkswaterstaat – *Beeldarchief* – 2017 [Online]
<https://beeldbank.rws.nl/>

Rijkswaterstaat – *Richtlijnen Vaarwegen 2017 - Kader verkeerskundig vaarwegontwerp Rijkswaterstaat* – Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2017

Rijkswaterstaat – *Vaarwegen in Nederland* – 2017

Rijkswaterstaat – *Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen* – 2009

Rotterdam – *Gemeente Rotterdam* – 2017 [Online]
<https://www.rotterdam.nl/>

Ruimte voor de Rivier – *Milieu-effectrapport Ruimte voor de Rivier* – 2005

Stam, B. – *Supergemaal in IJmuiden* – Technisch Weekblad, 2004 [Online]
<https://www.technischweekblad.nl/nieuws/supergemaal-in-ijmuiden/item5913>

Stichting Deltawerken Online – *Deltawerken online* – 2017 [Online]
<http://www.deltawerken.com/>

STOWA – *Gemalen of vermalen worden, onderzoek naar de visvriendelijkheid van 26 opvoerwerktuigen* – 2012

TNO – *DINOloket, Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond* – 2017 [Online]
<https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>

Vis, H., et al. – *Fysische omstandigheden in de gemaalpompen bij IJmuiden in relatie tot vis* – VisAdvies, 2010

Vries, A. de, et al. – *Vraag en aanbod van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta, een verkenning* – Kennis voor Klimaat, 2009

Vrijling, J.K. – *Manual hydraulic structures* – TUDelft, Collegedicaat CT3330, 2011

Walraven, J.C. – *Gewapend Beton* – TUDelft, Collegedicaat CT2052, 2010

Waterforum – *Overstromingen in Duitse Rijngebied door klimaatverandering reduceren gevolgen in Nederland* – 2015 [Online]
<https://www.waterforum.net/overstromingen-in-duitse-rijngebied-door-klimaatverandering-reduceren-gevolgen-in-nederland/>

Waterschap Hollandse Delta – *Kier Haringvliet* – 2018 [Online]
<https://www.kierharingvliet.nl/index.html>

Waterschap Noorderzijlvest – *Kredietaanvraag verkenning regionale keringen Lauwersmeer en plaatsen pompcapaciteit spuikokers Cleveringsluis* – 2016

Waterschap Noorderzijlvest – *Plan van Aanpak Onderzoek Haalbaarheid Proef Pomp Lauwersoog* – 2017

Waveren, H. van, et al. – *Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en de zoetwatervoorziening.* – Rijkswaterstaat, 2015

Weeda, T.R. – *Feasibility study of lowering the Beneluxtunnel* – Afstudeerscriptie, 2015

Wikipedia – *De vrije encyclopedie* – 2016 [Online]
<https://nl.wikipedia.org/>

Zuidwestelijke Delta – *Zuidwestelijke Delta* – 2016 [Online]
<https://www.zwdelta.nl/>

Bijlage A – Stromingsberekeningen

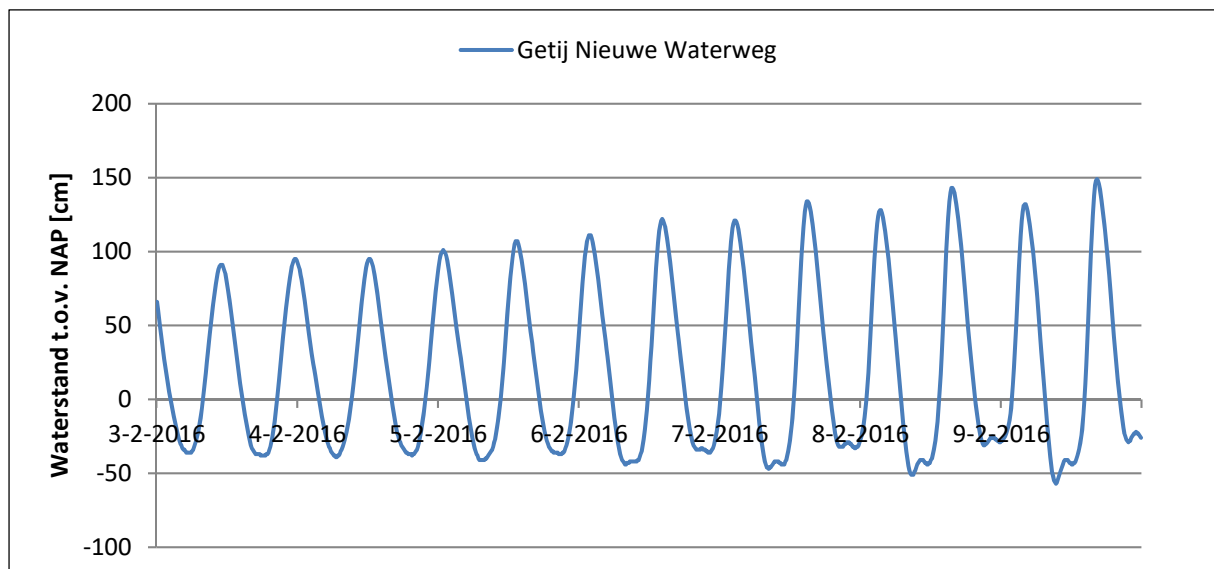
In deze bijlage staat achtergrondinformatie bij de stromingsberekeningen die in Paragraaf 5.4 gemaakt zijn.

Waterstanden

Voor het bepalen van het benodigde aantal en de grootte van de spuisluizen en pompen is het van belang om de waterstanden op de Nieuwe Waterweg te kennen. Dan gaat het om de buitenwaterstand (zeezijde) en de binnenwaterstand (rivierzijde) ten opzichte van de afsluiting.

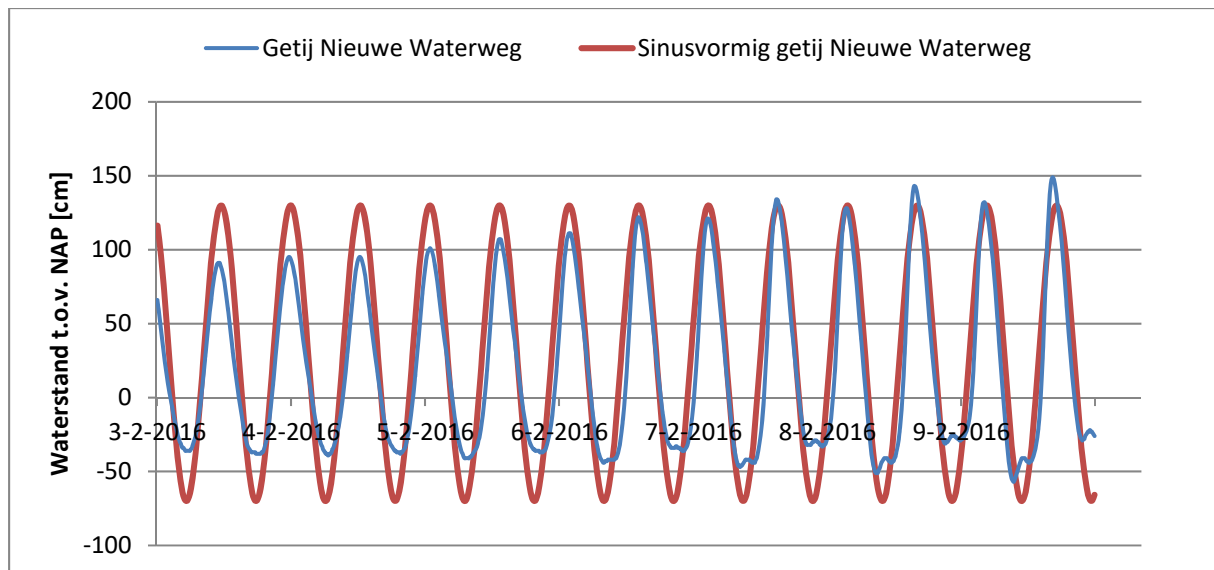
Buitenwaterstand

De buitenwaterstand op de Nieuwe Waterweg is niet constant, maar wordt bepaald door een dubbeldaags getij. Dit betekent dat het ongeveer twee keer per dag eb en vloed is (elke 12 uur en 25 minuten). In Figuur 80 is het getij weergegeven voor de periode van 3 tot en met 9 februari 2016 nabij Vlaardingen. In de nabijheid hiervan zal ook de afsluiting van de Nieuwe Waterweg gesitueerd worden.



Figuur 80 - Getij in de Nieuwe Waterweg bij Vlaardingen [Rijkswaterstaat, 2016]

Om met de waterstanden de grootte van het afvoermiddel te bepalen, is van het bovenstaande getij een gemiddeld getij gemaakt. Dit is gedaan door het getij te benaderen met een sinusfunctie, zoals weergegeven in Figuur 81. Dit is een goede benadering van het getij op de Nieuwe Waterweg nabij Vlaardingen. Er is ook nog een maandelijkse variatie in het getij door invloed van de maan. Voor de eenvoudigheid is deze echter niet meegenomen.



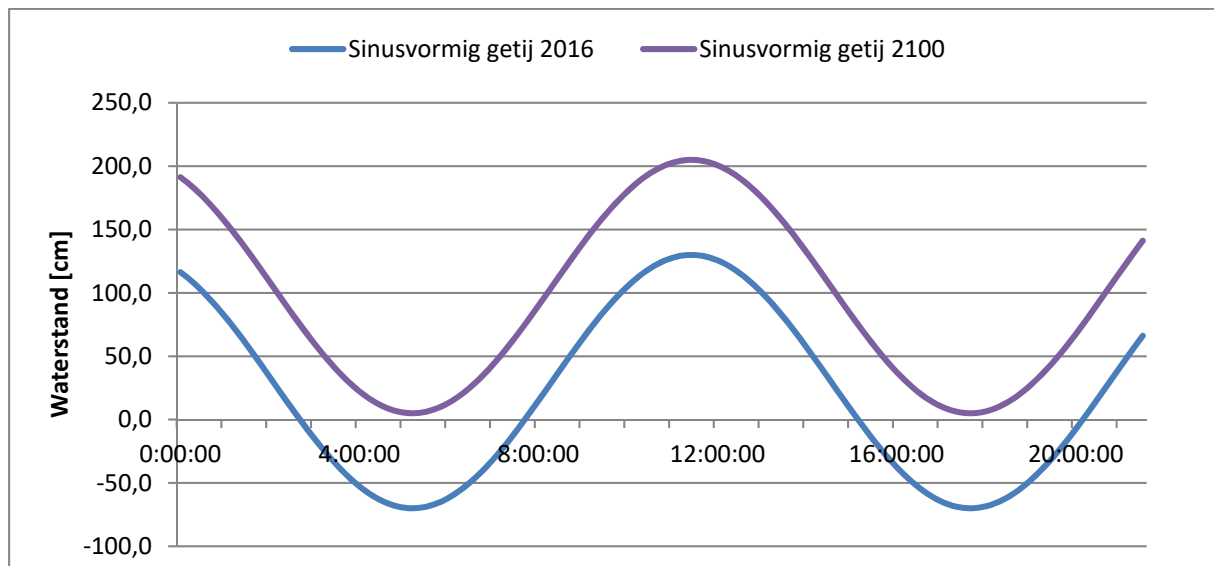
Figuur 81 - Sinusvormig getij in de Nieuwe Waterweg

De gebruikte sinusfunctie is:

$$h_z = 1,05 \cdot \sin(0,85 \cdot (n - 11)) + 0,35$$

Zeespiegelstijging

Door de in de toekomst verwachte zeespiegelstijging zullen de maatgevende waterstanden voor de Nederlandse kust stijgen. Dit heeft ook gevolgen voor het verwachte getij op de Nieuwe Waterweg is ook het geval op de Nieuwe Waterweg, zoals weergegeven in Figuur 82. De zeespiegelstijging bedraagt in 2100 70 cm ten opzichte van 2016 (zie Paragraaf 4.2.2). Eigenlijk gaat het hier om de zeespiegelstijging ten opzichte van 2016, maar voor het gemak is het getij van 2016 gelijk genomen voor 2018.



Figuur 82 - De invloed van de zeespiegelstijging op het (sinusvormig) getij in de Nieuwe Waterweg

Binnenwaterstand

De binnenwaterstand staat na de afsluiting niet meer onder invloed van het getij. Deze wordt dan vooral bepaald door de afvoer van de Rijn en door water dat uit de polders door gemalen op het

binnenwater wordt gespuid. In het geval van spuien onder vrij verval is de binnenwaterstand ook afhankelijk van de waterstand op zee.

Berging

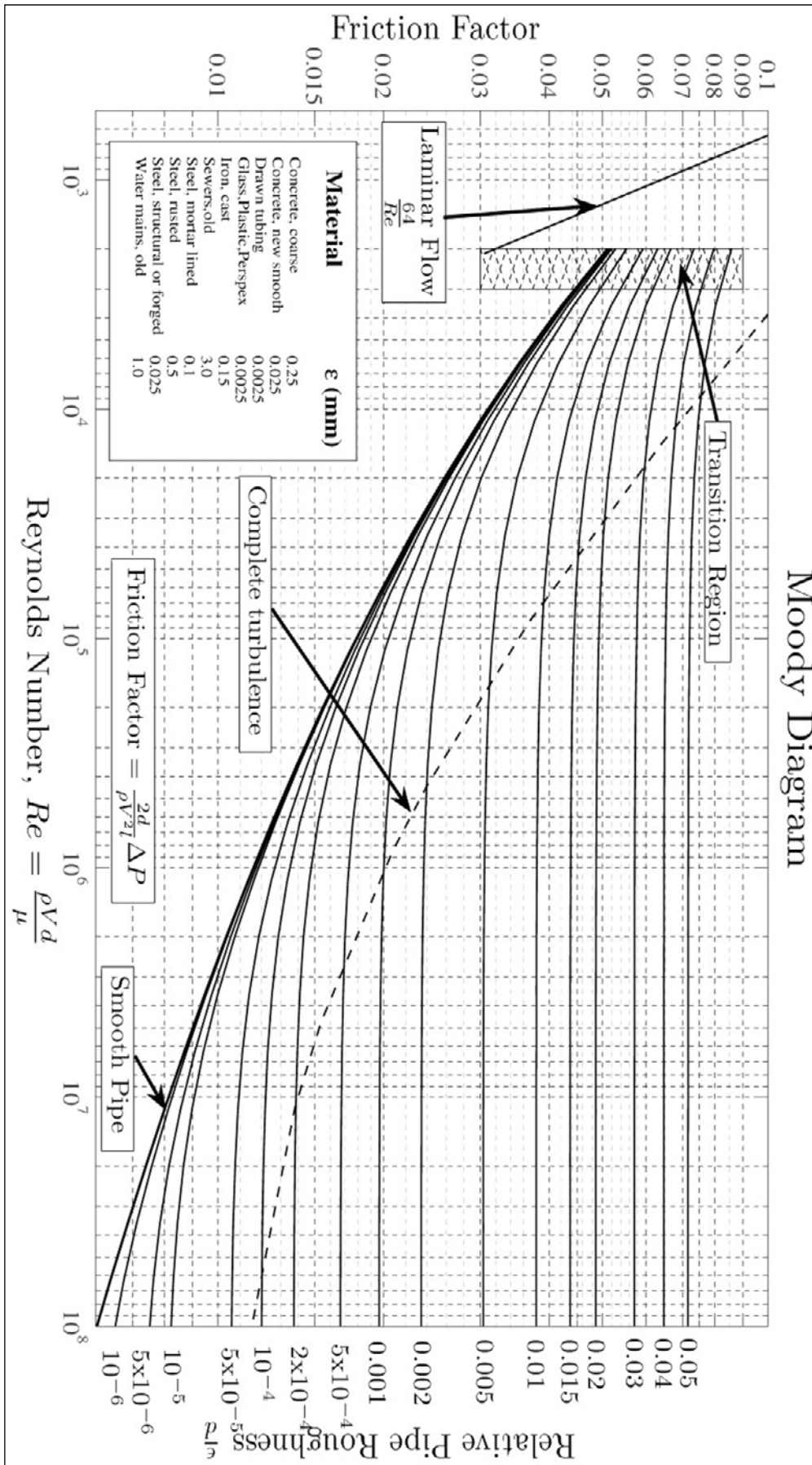
Een klein deel van het water dat via de Rijn, de Nederrijn, de Lek en de Nieuwe Maas naar de afsluiting stroomt, kan op de Nieuwe Maas geborgen worden. Er wordt alleen van berging op de Nieuwe Maas uitgegaan en niet op de Lek. Dit is omdat de Nieuwe Maas dan een afgesloten rivierarm is waarbij het water geen andere kant op kan. Berging op de Lek is echter moeilijk te bepalen omdat dat via de Noord in verbinding staat met vele andere wateren binnen de delta. De lengte van de Nieuwe Maas bedraagt ongeveer 25 kilometer en de gemiddelde breedte is ongeveer 365 meter. Het bergend oppervlak is dus ongeveer $9,1 \cdot 10^6$ vierkante meter.

Instroom

Het water dat via de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg naar zee stroomt, komt hoofdzakelijk van de Rijn. 20% van het debiet van de Rijn stroomt via de Nederrijn en de Lek naar de afsluiting. De huidige maatgevende afvoer op van de Nieuwe Maas is $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ (20% van $16000 \text{ m}^3/\text{s}$). Dit zal in 2010 toenemen $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ (20% van $18000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Diagram van Moody

In Figuur 83 staat het diagram van Moody wat doorgaans gebruikt wordt om de weerstandscoefficiënt λ in de Colebrook-Whitevergelijking op te lossen.



Figuur 83 - Diagram van Moody

Spuiregime

De berekeningen achter de grafieken van de spuiregimes uit Paragraaf 5.4.3 zijn hier op een rij gezet, evenals de uitkomsten in getallen. Voor elke situatie zijn alleen de waarden van het eerste uur weergegeven om de hoeveelheid bladvulling te beperken.

Formules

De waarden in de tabellen die volgen zijn verkregen met behulp van de volgende formules.

$$\begin{aligned}
 h_{r,n} &= h_{r,n-1} + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A_b} \cdot 600 & h_{z,n} &= 1,05 \cdot \sin(0,85 \cdot (n - 11)) + 0,35 & \Delta h_{c,n} &= h_{r,n} - h_{z,n} \\
 Re &= \frac{u \cdot d_k}{\nu} & \lambda &= \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{\epsilon/d_k}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2} & \Delta h_v &= \left(\lambda \frac{L_k}{d_k} + \sum_i \xi_i \right) \frac{u^2}{2g} \\
 u &= \sqrt{(\Delta h_c - \Delta h_v) \cdot 2g} & Q_{uit} &= u \cdot A_t
 \end{aligned}$$

In Tabel 58 staat wat de waarvoor de symbolen in de bovenstaande formules staan en wat de vaste waarde van sommige symbolen is. Een streepje, wil zeggen dat deze waarden variabel zijn per situatie en tijdstip, de uitkomst daarvan staat in de volgende tabellen. Voor meer uitleg wordt verwezen naar Paragraaf 5.4.3.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rivierwaterstand	$h_{r,n}$	[m]	-
Zeewaterstand	$h_{z,n}$	[m]	-
Instroomdebiet	Q_{in}	[m ³ /s]	-
Uitstroomdebiet	Q_{uit}	[m ³ /s]	-
Verval over constructie	$h_{c,n}$	[m]	-
Stroomsnelheid	u	[m/s]	-
Kokerdiameter	d_k	[m]	4
Kinematische viscositeit	ν	[m ² /s]	0,000001
Reynolds getal	Re	[-]	-
Gemiddelde ruwheid	ϵ	[-]	0,000025
Weerstandscoefficiënt	λ	[-]	-
Kokerlengte	L_k	[m]	45
Verliescoëfficiënt instroom	ξ_{in}	[-]	0,05
Verliescoëfficiënt uitstroom	ξ_{uit}	[-]	0,05
Totale verlies	Δh_v	[m]	-
Totale doorstroomoppervlakte	A_t	[m ²]	-

Tabel 58 - Gebruikte grootheden en waarden

De waterstand t.o.v. NAP in de volgende tabellen komt uit meetgegevens van Rijkswaterstaat [Rijkswaterstaat, 2016] (voor een voorbeeld, zie Figuur 80).

Uitkomst

2018 - Normale omstandigheden

n	Tijd dag	[uur:min:sec]	Waterstand [cm+NAP]	Q _{in} [m ³ /s]	h _{r,n} [m]	h _{z,n} [m]	Δh [m]	Re [-]	λ [-]	Δh _v [m]	u [m/s]	Q _{uit} [m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	440	0,03	-0,44	0,47	11072683	0,01	0,08	2,8	2505
2	1	00:10:00	-25	440	-0,11	-0,38	0,27	8408715	0,01	0,05	2,1	1902
3	1	00:20:00	-24	440	-0,20	-0,31	0,11	5285872	0,01	0,02	1,3	1196
4	1	00:30:00	-23	440	-0,25	-0,24	-0,01	0	0,00	0,00	0,0	0
5	1	00:40:00	-21	440	-0,22	-0,16	-0,06	0	0,00	0,00	0,0	0
6	1	00:50:00	-20	440	-0,19	-0,08	-0,11	0	0,00	0,00	0,0	0
7	1	01:00:00	-18	440	-0,17	0,00	-0,17	0	0,00	0,00	0,0	0
8	1	01:10:00	-16	440	-0,14	0,09	-0,22	0	0,00	0,00	0,0	0
9	1	01:20:00	-13	440	-0,11	0,17	-0,28	0	0,00	0,00	0,0	0
10	1	01:30:00	-10	440	-0,08	0,26	-0,34	0	0,00	0,00	0,0	0
11	1	01:40:00	-6	440	-0,05	0,35	-0,40	0	0,00	0,00	0,0	0
12	1	01:50:00	-1	440	-0,02	0,44	-0,46	0	0,00	0,00	0,0	0
13	1	02:00:00	5	440	0,01	0,53	-0,52	0	0,00	0,00	0,0	0
14	1	02:10:00	12	440	0,04	0,61	-0,58	0	0,00	0,00	0,0	0
15	1	02:20:00	20	440	0,07	0,70	-0,63	0	0,00	0,00	0,0	0
16	1	02:30:00	29	440	0,09	0,78	-0,69	0	0,00	0,00	0,0	0
17	1	02:40:00	40	440	0,12	0,86	-0,74	0	0,00	0,00	0,0	0
18	1	02:50:00	51	440	0,15	0,94	-0,79	0	0,00	0,00	0,0	0
19	1	03:00:00	63	440	0,18	1,01	-0,83	0	0,00	0,00	0,0	0
20	1	03:10:00	75	440	0,21	1,08	-0,87	0	0,00	0,00	0,0	0
21	1	03:20:00	87	440	0,24	1,14	-0,90	0	0,00	0,00	0,0	0
22	1	03:30:00	99	440	0,27	1,19	-0,93	0	0,00	0,00	0,0	0
23	1	03:40:00	110	440	0,30	1,24	-0,95	0	0,00	0,00	0,0	0
24	1	03:50:00	119	440	0,33	1,29	-0,96	0	0,00	0,00	0,0	0
25	1	04:00:00	126	440	0,35	1,32	-0,97	0	0,00	0,00	0,0	0
26	1	04:10:00	132	440	0,38	1,35	-0,97	0	0,00	0,00	0,0	0
27	1	04:20:00	135	440	0,41	1,38	-0,96	0	0,00	0,00	0,0	0
28	1	04:30:00	137	440	0,44	1,39	-0,95	0	0,00	0,00	0,0	0
29	1	04:40:00	137	440	0,47	1,40	-0,93	0	0,00	0,00	0,0	0
30	1	04:50:00	136	440	0,50	1,40	-0,90	0	0,00	0,00	0,0	0
31	1	05:00:00	134	440	0,53	1,39	-0,86	0	0,00	0,00	0,0	0
32	1	05:10:00	130	440	0,56	1,38	-0,82	0	0,00	0,00	0,0	0
33	1	05:20:00	126	440	0,59	1,35	-0,77	0	0,00	0,00	0,0	0
34	1	05:30:00	121	440	0,62	1,32	-0,71	0	0,00	0,00	0,0	0
35	1	05:40:00	115	440	0,64	1,29	-0,64	0	0,00	0,00	0,0	0
36	1	05:50:00	109	440	0,67	1,24	-0,57	0	0,00	0,00	0,0	0
37	1	06:00:00	103	440	0,70	1,19	-0,49	0	0,00	0,00	0,0	0
38	1	06:10:00	96	440	0,73	1,14	-0,41	0	0,00	0,00	0,0	0
39	1	06:20:00	89	440	0,76	1,07	-0,31	0	0,00	0,00	0,0	0
40	1	06:30:00	82	440	0,79	1,01	-0,22	0	0,00	0,00	0,0	0
41	1	06:40:00	74	440	0,82	0,94	-0,12	0	0,00	0,00	0,0	0
42	1	06:50:00	66	440	0,85	0,86	-0,01	0	0,00	0,00	0,0	0
43	1	07:00:00	59	440	0,88	0,78	0,10	4999267	0,01	0,02	1,2	1131
44	1	07:10:00	51	440	0,83	0,70	0,13	5899282	0,01	0,02	1,5	1334
45	1	07:20:00	43	440	0,77	0,61	0,16	6462823	0,01	0,03	1,6	1462
46	1	07:30:00	35	440	0,70	0,52	0,18	6858253	0,01	0,03	1,7	1551
47	1	07:40:00	27	440	0,63	0,44	0,20	7147879	0,01	0,03	1,8	1617
48	1	07:50:00	20	440	0,55	0,35	0,21	7360819	0,01	0,03	1,8	1665
49	1	08:00:00	12	440	0,47	0,26	0,22	7512245	0,01	0,04	1,9	1699
50	1	08:10:00	5	440	0,39	0,17	0,22	7610486	0,01	0,04	1,9	1721
51	1	08:20:00	-2	440	0,31	0,08	0,22	7660187	0,01	0,04	1,9	1733
52	1	08:30:00	-9	440	0,22	0,00	0,22	7663872	0,01	0,04	1,9	1734
53	1	08:40:00	-15	440	0,14	-0,09	0,22	7622796	0,01	0,04	1,9	1724
54	1	08:50:00	-20	440	0,05	-0,17	0,22	7537433	0,01	0,04	1,9	1705

2018 - Maatgevende afvoer

n	Tijd dag	[uur:min:sec]	Waterstand [cm+NAP]	Q _{in} [m ³ /s]	h _{r,n} [m]	h _{z,n} [m]	Δh [m]	Re [-]	λ [-]	Δh _v [m]	u [m/s]	Q _{uit} [m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	3200	0,21	-0,44	0,65	13052388	0,01	0,11	3,3	2952
2	1	00:10:00	-25	3200	0,23	-0,38	0,60	12586238	0,01	0,10	3,1	2847
3	1	00:20:00	-24	3200	0,25	-0,31	0,56	12120522	0,01	0,09	3,0	2742
4	1	00:30:00	-23	3200	0,28	-0,24	0,52	11660670	0,01	0,09	2,9	2638
5	1	00:40:00	-21	3200	0,32	-0,16	0,48	11212450	0,01	0,08	2,8	2536
6	1	00:50:00	-20	3200	0,36	-0,08	0,44	10781884	0,01	0,07	2,7	2439
7	1	01:00:00	-18	3200	0,41	0,00	0,41	10375117	0,01	0,07	2,6	2347
8	1	01:10:00	-16	3200	0,47	0,09	0,38	9998242	0,01	0,06	2,5	2262
9	1	01:20:00	-13	3200	0,53	0,17	0,36	9657069	0,01	0,06	2,4	2184
10	1	01:30:00	-10	3200	0,60	0,26	0,33	9356867	0,01	0,06	2,3	2116
11	1	01:40:00	-6	3200	0,67	0,35	0,32	9102092	0,01	0,05	2,3	2059
12	1	01:50:00	-1	3200	0,74	0,44	0,30	8896151	0,01	0,05	2,2	2012
13	1	02:00:00	5	3200	0,82	0,53	0,29	8741232	0,01	0,05	2,2	1977
14	1	02:10:00	12	3200	0,90	0,61	0,29	8638240	0,01	0,05	2,2	1954
15	1	02:20:00	20	3200	0,98	0,70	0,28	8586852	0,01	0,05	2,1	1942
16	1	02:30:00	29	3200	1,06	0,78	0,28	8585670	0,01	0,05	2,1	1942
17	1	02:40:00	40	3200	1,15	0,86	0,28	8632447	0,01	0,05	2,2	1953
18	1	02:50:00	51	3200	1,23	0,94	0,29	8724337	0,01	0,05	2,2	1973
19	1	03:00:00	63	3200	1,31	1,01	0,30	8858128	0,01	0,05	2,2	2004
20	1	03:10:00	75	3200	1,39	1,08	0,31	9030436	0,01	0,05	2,3	2043
21	1	03:20:00	87	3200	1,46	1,14	0,33	9237843	0,01	0,05	2,3	2090
22	1	03:30:00	99	3200	1,54	1,19	0,34	9476998	0,01	0,06	2,4	2144
23	1	03:40:00	110	3200	1,61	1,24	0,36	9744661	0,01	0,06	2,4	2204
24	1	03:50:00	119	3200	1,67	1,29	0,38	10037730	0,01	0,06	2,5	2270
25	1	04:00:00	126	3200	1,73	1,32	0,41	10353244	0,01	0,07	2,6	2342
26	1	04:10:00	132	3200	1,79	1,35	0,44	10688376	0,01	0,07	2,7	2418
27	1	04:20:00	135	3200	1,84	1,38	0,47	11040421	0,01	0,08	2,8	2497
28	1	04:30:00	137	3200	1,89	1,39	0,50	11406784	0,01	0,08	2,9	2580
29	1	04:40:00	137	3200	1,93	1,40	0,53	11784965	0,01	0,09	2,9	2666
30	1	04:50:00	136	3200	1,96	1,40	0,56	12172548	0,01	0,09	3,0	2753
31	1	05:00:00	134	3200	1,99	1,39	0,60	12567192	0,01	0,10	3,1	2843
32	1	05:10:00	130	3200	2,02	1,38	0,64	12966626	0,01	0,11	3,2	2933
33	1	05:20:00	126	3200	2,03	1,35	0,68	13368636	0,01	0,11	3,3	3024
34	1	05:30:00	121	3200	2,05	1,32	0,72	13771069	0,01	0,12	3,4	3115
35	1	05:40:00	115	3200	2,05	1,29	0,76	14171825	0,01	0,13	3,5	3206
36	1	05:50:00	109	3200	2,05	1,24	0,81	14568858	0,01	0,13	3,6	3295
37	1	06:00:00	103	3200	2,04	1,19	0,85	14960172	0,01	0,14	3,7	3384
38	1	06:10:00	96	3200	2,03	1,14	0,90	15343827	0,01	0,15	3,8	3471
39	1	06:20:00	89	3200	2,01	1,07	0,94	15717934	0,01	0,15	3,9	3555
40	1	06:30:00	82	3200	1,99	1,01	0,98	16080657	0,01	0,16	4,0	3637
41	1	06:40:00	74	3200	1,96	0,94	1,03	16430217	0,01	0,17	4,1	3716
42	1	06:50:00	66	3200	1,93	0,86	1,07	16764895	0,01	0,17	4,2	3792
43	1	07:00:00	59	3200	1,89	0,78	1,11	17083028	0,01	0,18	4,3	3864
44	1	07:10:00	51	3200	1,85	0,70	1,15	17383020	0,01	0,19	4,3	3932
45	1	07:20:00	43	3200	1,80	0,61	1,19	17663338	0,01	0,19	4,4	3995
46	1	07:30:00	35	3200	1,75	0,52	1,22	17922518	0,01	0,20	4,5	4054
47	1	07:40:00	27	3200	1,69	0,44	1,25	18159170	0,01	0,20	4,5	4108
48	1	07:50:00	20	3200	1,63	0,35	1,28	18371976	0,01	0,21	4,6	4156
49	1	08:00:00	12	3200	1,57	0,26	1,31	18559701	0,01	0,21	4,6	4198
50	1	08:10:00	5	3200	1,50	0,17	1,33	18721191	0,01	0,22	4,7	4235
51	1	08:20:00	-2	3200	1,43	0,08	1,35	18855379	0,01	0,22	4,7	4265
52	1	08:30:00	-9	3200	1,36	0,00	1,37	18961290	0,01	0,22	4,7	4289
53	1	08:40:00	-15	3200	1,29	-0,09	1,38	19038045	0,01	0,22	4,8	4306
54	1	08:50:00	-20	3200	1,22	-0,17	1,38	19084868	0,01	0,22	4,8	4317

2018 - Stormvloed

n	Tijd dag	[uur:min:sec]	Waterstand [cm+NAP]	Q _{in} [m ³ /s]	h _{r,n} [m]	h _{z,n} [m]	Δh [m]	Re [-]	λ [-]	Δh _v [m]	u [m/s]	Q _{uit} [m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	440	0,03	3,33	-3,30	0	0	0	0	0
2	1	00:10:00	-25	440	0,06	3,33	-3,27	0	0	0	0	0
3	1	00:20:00	-24	440	0,09	3,33	-3,24	0	0	0	0	0
4	1	00:30:00	-23	440	0,12	3,33	-3,21	0	0	0	0	0
5	1	00:40:00	-21	440	0,14	3,33	-3,19	0	0	0	0	0
6	1	00:50:00	-20	440	0,17	3,33	-3,16	0	0	0	0	0
7	1	01:00:00	-18	440	0,20	3,33	-3,13	0	0	0	0	0
8	1	01:10:00	-16	440	0,23	3,33	-3,10	0	0	0	0	0
9	1	01:20:00	-13	440	0,26	3,33	-3,07	0	0	0	0	0
10	1	01:30:00	-10	440	0,29	3,33	-3,04	0	0	0	0	0
11	1	01:40:00	-6	440	0,32	3,33	-3,01	0	0	0	0	0
12	1	01:50:00	-1	440	0,35	3,33	-2,98	0	0	0	0	0
13	1	02:00:00	5	440	0,38	3,33	-2,95	0	0	0	0	0
14	1	02:10:00	12	440	0,41	3,33	-2,92	0	0	0	0	0
15	1	02:20:00	20	440	0,43	3,33	-2,90	0	0	0	0	0
16	1	02:30:00	29	440	0,46	3,33	-2,87	0	0	0	0	0
17	1	02:40:00	40	440	0,49	3,33	-2,84	0	0	0	0	0
18	1	02:50:00	51	440	0,52	3,33	-2,81	0	0	0	0	0
19	1	03:00:00	63	440	0,55	3,33	-2,78	0	0	0	0	0
20	1	03:10:00	75	440	0,58	3,33	-2,75	0	0	0	0	0
21	1	03:20:00	87	440	0,61	3,33	-2,72	0	0	0	0	0
22	1	03:30:00	99	440	0,64	3,33	-2,69	0	0	0	0	0
23	1	03:40:00	110	440	0,67	3,33	-2,66	0	0	0	0	0
24	1	03:50:00	119	440	0,69	3,33	-2,64	0	0	0	0	0
25	1	04:00:00	126	440	0,72	3,33	-2,61	0	0	0	0	0
26	1	04:10:00	132	440	0,75	3,33	-2,58	0	0	0	0	0
27	1	04:20:00	135	440	0,78	3,33	-2,55	0	0	0	0	0
28	1	04:30:00	137	440	0,81	3,33	-2,52	0	0	0	0	0
29	1	04:40:00	137	440	0,84	3,33	-2,49	0	0	0	0	0
30	1	04:50:00	136	440	0,87	3,33	-2,46	0	0	0	0	0
31	1	05:00:00	134	440	0,90	3,33	-2,43	0	0	0	0	0
32	1	05:10:00	130	440	0,93	3,33	-2,40	0	0	0	0	0
33	1	05:20:00	126	440	0,95	3,33	-2,38	0	0	0	0	0
34	1	05:30:00	121	440	0,98	3,33	-2,35	0	0	0	0	0
35	1	05:40:00	115	440	1,01	3,33	-2,32	0	0	0	0	0
36	1	05:50:00	109	440	1,04	3,33	-2,29	0	0	0	0	0
37	1	06:00:00	103	440	1,07	3,33	-2,26	0	0	0	0	0
38	1	06:10:00	96	440	1,10	3,33	-2,23	0	0	0	0	0
39	1	06:20:00	89	440	1,13	3,33	-2,20	0	0	0	0	0
40	1	06:30:00	82	440	1,16	3,33	-2,17	0	0	0	0	0
41	1	06:40:00	74	440	1,19	3,33	-2,14	0	0	0	0	0
42	1	06:50:00	66	440	1,22	3,33	-2,11	0	0	0	0	0
43	1	07:00:00	59	440	1,24	3,33	-2,09	0	0	0	0	0
44	1	07:10:00	51	440	1,27	3,33	-2,06	0	0	0	0	0
45	1	07:20:00	43	440	1,30	3,33	-2,03	0	0	0	0	0
46	1	07:30:00	35	440	1,33	3,33	-2,00	0	0	0	0	0
47	1	07:40:00	27	440	1,36	3,33	-1,97	0	0	0	0	0
48	1	07:50:00	20	440	1,39	3,33	-1,94	0	0	0	0	0
49	1	08:00:00	12	440	1,42	3,33	-1,91	0	0	0	0	0
50	1	08:10:00	5	440	1,45	3,33	-1,88	0	0	0	0	0
51	1	08:20:00	-2	440	1,48	3,33	-1,85	0	0	0	0	0
52	1	08:30:00	-9	440	1,50	3,33	-1,83	0	0	0	0	0
53	1	08:40:00	-15	440	1,53	3,33	-1,80	0	0	0	0	0
54	1	08:50:00	-20	440	1,56	3,33	-1,77	0	0	0	0	0

2100 - Normale omstandigheden

	Tijd		Waterstand	Q _{in}	h _{r,n}	h _{z,n}	Δh	Re	λ	Δh _v	u	Q _{uit}
n	dag	[uur:min:sec]	[cm+NAP]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m/s]	[m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	440	0,03	0,26	-0,23	0	0,00	0,00	0,0	0
2	1	00:10:00	-25	440	0,06	0,32	-0,26	0	0,00	0,00	0,0	0
3	1	00:20:00	-24	440	0,09	0,39	-0,30	0	0,00	0,00	0,0	0
4	1	00:30:00	-23	440	0,12	0,46	-0,35	0	0,00	0,00	0,0	0
5	1	00:40:00	-21	440	0,14	0,54	-0,39	0	0,00	0,00	0,0	0
6	1	00:50:00	-20	440	0,17	0,62	-0,44	0	0,00	0,00	0,0	0
7	1	01:00:00	-18	440	0,20	0,70	-0,50	0	0,00	0,00	0,0	0
8	1	01:10:00	-16	440	0,23	0,79	-0,55	0	0,00	0,00	0,0	0
9	1	01:20:00	-13	440	0,26	0,87	-0,61	0	0,00	0,00	0,0	0
10	1	01:30:00	-10	440	0,29	0,96	-0,67	0	0,00	0,00	0,0	0
11	1	01:40:00	-6	440	0,32	1,05	-0,73	0	0,00	0,00	0,0	0
12	1	01:50:00	-1	440	0,35	1,14	-0,79	0	0,00	0,00	0,0	0
13	1	02:00:00	5	440	0,38	1,23	-0,85	0	0,00	0,00	0,0	0
14	1	02:10:00	12	440	0,41	1,31	-0,91	0	0,00	0,00	0,0	0
15	1	02:20:00	20	440	0,43	1,40	-0,97	0	0,00	0,00	0,0	0
16	1	02:30:00	29	440	0,46	1,48	-1,02	0	0,00	0,00	0,0	0
17	1	02:40:00	40	440	0,49	1,56	-1,07	0	0,00	0,00	0,0	0
18	1	02:50:00	51	440	0,52	1,64	-1,12	0	0,00	0,00	0,0	0
19	1	03:00:00	63	440	0,55	1,71	-1,16	0	0,00	0,00	0,0	0
20	1	03:10:00	75	440	0,58	1,78	-1,20	0	0,00	0,00	0,0	0
21	1	03:20:00	87	440	0,61	1,84	-1,23	0	0,00	0,00	0,0	0
22	1	03:30:00	99	440	0,64	1,89	-1,26	0	0,00	0,00	0,0	0
23	1	03:40:00	110	440	0,67	1,94	-1,28	0	0,00	0,00	0,0	0
24	1	03:50:00	119	440	0,69	1,99	-1,29	0	0,00	0,00	0,0	0
25	1	04:00:00	126	440	0,72	2,02	-1,30	0	0,00	0,00	0,0	0
26	1	04:10:00	132	440	0,75	2,05	-1,30	0	0,00	0,00	0,0	0
27	1	04:20:00	135	440	0,78	2,08	-1,30	0	0,00	0,00	0,0	0
28	1	04:30:00	137	440	0,81	2,09	-1,28	0	0,00	0,00	0,0	0
29	1	04:40:00	137	440	0,84	2,10	-1,26	0	0,00	0,00	0,0	0
30	1	04:50:00	136	440	0,87	2,10	-1,23	0	0,00	0,00	0,0	0
31	1	05:00:00	134	440	0,90	2,09	-1,19	0	0,00	0,00	0,0	0
32	1	05:10:00	130	440	0,93	2,08	-1,15	0	0,00	0,00	0,0	0
33	1	05:20:00	126	440	0,95	2,05	-1,10	0	0,00	0,00	0,0	0
34	1	05:30:00	121	440	0,98	2,02	-1,04	0	0,00	0,00	0,0	0
35	1	05:40:00	115	440	1,01	1,99	-0,97	0	0,00	0,00	0,0	0
36	1	05:50:00	109	440	1,04	1,94	-0,90	0	0,00	0,00	0,0	0
37	1	06:00:00	103	440	1,07	1,89	-0,82	0	0,00	0,00	0,0	0
38	1	06:10:00	96	440	1,10	1,84	-0,74	0	0,00	0,00	0,0	0
39	1	06:20:00	89	440	1,13	1,77	-0,65	0	0,00	0,00	0,0	0
40	1	06:30:00	82	440	1,16	1,71	-0,55	0	0,00	0,00	0,0	0
41	1	06:40:00	74	440	1,19	1,64	-0,45	0	0,00	0,00	0,0	0
42	1	06:50:00	66	440	1,22	1,56	-0,34	0	0,00	0,00	0,0	0
43	1	07:00:00	59	440	1,24	1,48	-0,24	0	0,00	0,00	0,0	0
44	1	07:10:00	51	440	1,27	1,40	-0,12	0	0,00	0,00	0,0	0
45	1	07:20:00	43	440	1,30	1,31	-0,01	0	0,00	0,00	0,0	0
46	1	07:30:00	35	440	1,33	1,22	0,11	5272388	0,01	0,02	1,3	1193
47	1	07:40:00	27	440	1,28	1,14	0,15	6166537	0,01	0,02	1,5	1395
48	1	07:50:00	20	440	1,22	1,05	0,17	6703666	0,01	0,03	1,7	1516
49	1	08:00:00	12	440	1,15	0,96	0,19	7053613	0,01	0,03	1,8	1595
50	1	08:10:00	5	440	1,07	0,87	0,20	7282040	0,01	0,03	1,8	1647
51	1	08:20:00	-2	440	0,99	0,78	0,21	7420825	0,01	0,04	1,9	1679
52	1	08:30:00	-9	440	0,91	0,70	0,21	7487276	0,01	0,04	1,9	1694
53	1	08:40:00	-15	440	0,83	0,61	0,21	7491378	0,01	0,04	1,9	1695
54	1	08:50:00	-20	440	0,75	0,53	0,21	7439063	0,01	0,04	1,9	1683

2100 - Maatgevende afvoer

n	Tijd dag	[uur:min:sec]	Waterstand [cm+NAP]	Q _{in} [m ³ /s]	h _{r,n} [m]	h _{z,n} [m]	Δh [m]	Re [-]	λ [-]	Δh _v [m]	u [m/s]	Q _{uit} [m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	3600	0,24	0,26	-0,02	0	0,00	0,00	0,0	0
2	1	00:10:00	-25	3600	0,47	0,32	0,15	6267738	0,01	0,03	1,6	1418
3	1	00:20:00	-24	3600	0,62	0,39	0,23	7704946	0,01	0,04	1,9	1743
4	1	00:30:00	-23	3600	0,74	0,46	0,28	8520794	0,01	0,05	2,1	1927
5	1	00:40:00	-21	3600	0,85	0,54	0,31	9030193	0,01	0,05	2,3	2043
6	1	00:50:00	-20	3600	0,95	0,62	0,33	9355427	0,01	0,06	2,3	2116
7	1	01:00:00	-18	3600	1,05	0,70	0,35	9560953	0,01	0,06	2,4	2163
8	1	01:10:00	-16	3600	1,14	0,79	0,36	9686692	0,01	0,06	2,4	2191
9	1	01:20:00	-13	3600	1,24	0,87	0,36	9760024	0,01	0,06	2,4	2208
10	1	01:30:00	-10	3600	1,33	0,96	0,37	9801035	0,01	0,06	2,5	2217
11	1	01:40:00	-6	3600	1,42	1,05	0,37	9825121	0,01	0,06	2,5	2222
12	1	01:50:00	-1	3600	1,51	1,14	0,37	9844366	0,01	0,06	2,5	2227
13	1	02:00:00	5	3600	1,60	1,23	0,37	9868336	0,01	0,06	2,5	2232
14	1	02:10:00	12	3600	1,69	1,31	0,37	9904547	0,01	0,06	2,5	2240
15	1	02:20:00	20	3600	1,78	1,40	0,38	9958777	0,01	0,06	2,5	2253
16	1	02:30:00	29	3600	1,87	1,48	0,38	10035294	0,01	0,06	2,5	2270
17	1	02:40:00	40	3600	1,95	1,56	0,39	10137050	0,01	0,06	2,5	2293
18	1	02:50:00	51	3600	2,04	1,64	0,40	10265857	0,01	0,07	2,6	2322
19	1	03:00:00	63	3600	2,12	1,71	0,41	10422559	0,01	0,07	2,6	2358
20	1	03:10:00	75	3600	2,21	1,78	0,43	10607203	0,01	0,07	2,7	2399
21	1	03:20:00	87	3600	2,29	1,84	0,45	10819188	0,01	0,07	2,7	2447
22	1	03:30:00	99	3600	2,36	1,89	0,47	11057412	0,01	0,08	2,8	2501
23	1	03:40:00	110	3600	2,43	1,94	0,49	11320390	0,01	0,08	2,8	2561
24	1	03:50:00	119	3600	2,50	1,99	0,51	11606358	0,01	0,08	2,9	2625
25	1	04:00:00	126	3600	2,57	2,02	0,54	11913356	0,01	0,09	3,0	2695
26	1	04:10:00	132	3600	2,63	2,05	0,57	12239293	0,01	0,09	3,1	2768
27	1	04:20:00	135	3600	2,68	2,08	0,60	12581996	0,01	0,10	3,1	2846
28	1	04:30:00	137	3600	2,73	2,09	0,64	12939244	0,01	0,10	3,2	2927
29	1	04:40:00	137	3600	2,77	2,10	0,67	13308801	0,01	0,11	3,3	3010
30	1	04:50:00	136	3600	2,81	2,10	0,71	13688429	0,01	0,12	3,4	3096
31	1	05:00:00	134	3600	2,85	2,09	0,75	14075907	0,01	0,12	3,5	3184
32	1	05:10:00	130	3600	2,87	2,08	0,80	14469037	0,01	0,13	3,6	3273
33	1	05:20:00	126	3600	2,89	2,05	0,84	14865654	0,01	0,14	3,7	3363
34	1	05:30:00	121	3600	2,91	2,02	0,89	15263627	0,01	0,14	3,8	3453
35	1	05:40:00	115	3600	2,92	1,99	0,93	15660869	0,01	0,15	3,9	3542
36	1	05:50:00	109	3600	2,92	1,94	0,98	16055335	0,01	0,16	4,0	3632
37	1	06:00:00	103	3600	2,92	1,89	1,03	16445028	0,01	0,17	4,1	3720
38	1	06:10:00	96	3600	2,91	1,84	1,08	16827998	0,01	0,18	4,2	3806
39	1	06:20:00	89	3600	2,90	1,77	1,13	17202350	0,01	0,18	4,3	3891
40	1	06:30:00	82	3600	2,88	1,71	1,17	17566239	0,01	0,19	4,4	3973
41	1	06:40:00	74	3600	2,86	1,64	1,22	17917881	0,01	0,20	4,5	4053
42	1	06:50:00	66	3600	2,83	1,56	1,27	18255546	0,01	0,21	4,6	4129
43	1	07:00:00	59	3600	2,79	1,48	1,31	18577570	0,01	0,21	4,6	4202
44	1	07:10:00	51	3600	2,75	1,40	1,36	18882352	0,01	0,22	4,7	4271
45	1	07:20:00	43	3600	2,71	1,31	1,40	19168357	0,01	0,23	4,8	4336
46	1	07:30:00	35	3600	2,66	1,22	1,44	19434124	0,01	0,23	4,9	4396
47	1	07:40:00	27	3600	2,61	1,14	1,47	19678261	0,01	0,24	4,9	4451
48	1	07:50:00	20	3600	2,55	1,05	1,51	19899459	0,01	0,24	5,0	4501
49	1	08:00:00	12	3600	2,49	0,96	1,54	20096485	0,01	0,25	5,0	4546
50	1	08:10:00	5	3600	2,43	0,87	1,56	20268194	0,01	0,25	5,1	4585
51	1	08:20:00	-2	3600	2,37	0,78	1,58	20413528	0,01	0,26	5,1	4617
52	1	08:30:00	-9	3600	2,30	0,70	1,60	20531522	0,01	0,26	5,1	4644
53	1	08:40:00	-15	3600	2,23	0,61	1,62	20621310	0,01	0,26	5,2	4664
54	1	08:50:00	-20	3600	2,16	0,53	1,63	20682125	0,01	0,26	5,2	4678

2100 - Stormvloed

n	Tijd dag	[uur:min:sec]	Waterstand [cm+NAP]	Q _{in} [m ³ /s]	h _{r,n} [m]	h _{z,n} [m]	Δh [m]	Re [-]	λ [-]	Δh _v [m]	u [m/s]	Q _{uit} [m ³ /s]
1	1	00:00:00	-25	440	0,03	4,03	-4,00	0	0	0	0	0
2	1	00:10:00	-25	440	0,06	4,03	-3,97	0	0	0	0	0
3	1	00:20:00	-24	440	0,09	4,03	-3,94	0	0	0	0	0
4	1	00:30:00	-23	440	0,12	4,03	-3,91	0	0	0	0	0
5	1	00:40:00	-21	440	0,14	4,03	-3,89	0	0	0	0	0
6	1	00:50:00	-20	440	0,17	4,03	-3,86	0	0	0	0	0
7	1	01:00:00	-18	440	0,20	4,03	-3,83	0	0	0	0	0
8	1	01:10:00	-16	440	0,23	4,03	-3,80	0	0,00	0,00	0,0	0
9	1	01:20:00	-13	440	0,26	4,03	-3,77	0	0,00	0,00	0,0	0
10	1	01:30:00	-10	440	0,29	4,03	-3,74	0	0,00	0,00	0,0	0
11	1	01:40:00	-6	440	0,32	4,03	-3,71	0	0,00	0,00	0,0	0
12	1	01:50:00	-1	440	0,35	4,03	-3,68	0	0,00	0,00	0,0	0
13	1	02:00:00	5	440	0,38	4,03	-3,65	0	0,00	0,00	0,0	0
14	1	02:10:00	12	440	0,41	4,03	-3,62	0	0,00	0,00	0,0	0
15	1	02:20:00	20	440	0,43	4,03	-3,60	0	0,00	0,00	0,0	0
16	1	02:30:00	29	440	0,46	4,03	-3,57	0	0,00	0,00	0,0	0
17	1	02:40:00	40	440	0,49	4,03	-3,54	0	0,00	0,00	0,0	0
18	1	02:50:00	51	440	0,52	4,03	-3,51	0	0,00	0,00	0,0	0
19	1	03:00:00	63	440	0,55	4,03	-3,48	0	0,00	0,00	0,0	0
20	1	03:10:00	75	440	0,58	4,03	-3,45	0	0,00	0,00	0,0	0
21	1	03:20:00	87	440	0,61	4,03	-3,42	0	0,00	0,00	0,0	0
22	1	03:30:00	99	440	0,64	4,03	-3,39	0	0,00	0,00	0,0	0
23	1	03:40:00	110	440	0,67	4,03	-3,36	0	0,00	0,00	0,0	0
24	1	03:50:00	119	440	0,69	4,03	-3,34	0	0,00	0,00	0,0	0
25	1	04:00:00	126	440	0,72	4,03	-3,31	0	0,00	0,00	0,0	0
26	1	04:10:00	132	440	0,75	4,03	-3,28	0	0,00	0,00	0,0	0
27	1	04:20:00	135	440	0,78	4,03	-3,25	0	0,00	0,00	0,0	0
28	1	04:30:00	137	440	0,81	4,03	-3,22	0	0,00	0,00	0,0	0
29	1	04:40:00	137	440	0,84	4,03	-3,19	0	0,00	0,00	0,0	0
30	1	04:50:00	136	440	0,87	4,03	-3,16	0	0,00	0,00	0,0	0
31	1	05:00:00	134	440	0,90	4,03	-3,13	0	0,00	0,00	0,0	0
32	1	05:10:00	130	440	0,93	4,03	-3,10	0	0,00	0,00	0,0	0
33	1	05:20:00	126	440	0,95	4,03	-3,08	0	0,00	0,00	0,0	0
34	1	05:30:00	121	440	0,98	4,03	-3,05	0	0,00	0,00	0,0	0
35	1	05:40:00	115	440	1,01	4,03	-3,02	0	0,00	0,00	0,0	0
36	1	05:50:00	109	440	1,04	4,03	-2,99	0	0,00	0,00	0,0	0
37	1	06:00:00	103	440	1,07	4,03	-2,96	0	0,00	0,00	0,0	0
38	1	06:10:00	96	440	1,10	4,03	-2,93	0	0,00	0,00	0,0	0
39	1	06:20:00	89	440	1,13	4,03	-2,90	0	0,00	0,00	0,0	0
40	1	06:30:00	82	440	1,16	4,03	-2,87	0	0,00	0,00	0,0	0
41	1	06:40:00	74	440	1,19	4,03	-2,84	0	0,00	0,00	0,0	0
42	1	06:50:00	66	440	1,22	4,03	-2,81	0	0,00	0,00	0,0	0
43	1	07:00:00	59	440	1,24	4,03	-2,79	0	0,00	0,00	0,0	0
44	1	07:10:00	51	440	1,27	4,03	-2,76	0	0,00	0,00	0,0	0
45	1	07:20:00	43	440	1,30	4,03	-2,73	0	0,00	0,00	0,0	0
46	1	07:30:00	35	440	1,33	4,03	-2,70	0	0,00	0,00	0,0	0
47	1	07:40:00	27	440	1,36	4,03	-2,67	0	0,00	0,00	0,0	0
48	1	07:50:00	20	440	1,39	4,03	-2,64	0	0,00	0,00	0,0	0
49	1	08:00:00	12	440	1,42	4,03	-2,61	0	0,00	0,00	0,0	0
50	1	08:10:00	5	440	1,45	4,03	-2,58	0	0,00	0,00	0,0	0
51	1	08:20:00	-2	440	1,48	4,03	-2,55	0	0,00	0,00	0,0	0
52	1	08:30:00	-9	440	1,50	4,03	-2,53	0	0,00	0,00	0,0	0
53	1	08:40:00	-15	440	1,53	4,03	-2,50	0	0,00	0,00	0,0	0
54	1	08:50:00	-20	440	1,56	4,03	-2,47	0	0,00	0,00	0,0	0

Bijlage B – Stabiliteitsberekeningen

In deze bijlage is de stabiliteit gecontroleerd voor de overige zeven situaties die niet behandeld zijn in Paragraaf 6.3.3. Hier zijn alleen kort de resultaten weergegeven. Voor de gevolgde procedure (formules en sommige waarden) wordt naar Paragraaf 6.3.1 en 6.3.3 verwezen.

Het gaat om de volgende situaties in 2018:

- een maximale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand;
- een minimale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een maximale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een minimale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand.

Ook de drie overgebleven situaties voor 2100 zijn hier uitgewerkt. Dat zijn:

- een minimale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een maximale zeewaterstand en een maximale rivierwaterstand;
- een minimale zeewaterstand en een minimale rivierwaterstand.

In Tabel 59 Tabel 60 staan de waterstanden en de bodemdiepte waarmee gerekend is.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximale zeewaterstand	$h_{z,max}$	[m+NAP]	3,33
Minimale zeewaterstand	$h_{z,min}$	[m+NAP]	-1,3
Maximale rivierwaterstand	$h_{r,max}$	[m+NAP]	2,5
Minimale rivierwaterstand	$h_{r,min}$	[m+NAP]	-1
Bodemniveau Nieuwe Maas	d_0	[m+NAP]	-14,5

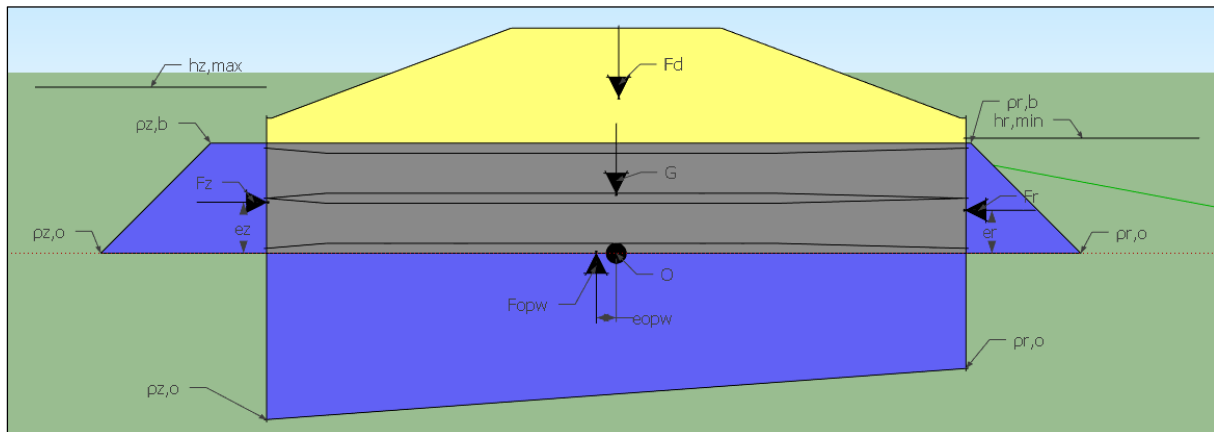
Tabel 59 - Maatgevende waarden 2018

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximale zeewaterstand	$h_{z,max}$	[m+NAP]	4,03
Minimale zeewaterstand	$h_{z,min}$	[m+NAP]	-1,3
Maximale rivierwaterstand	$h_{r,max}$	[m+NAP]	2,5
Minimale rivierwaterstand	$h_{r,min}$	[m+NAP]	-1
Bodemniveau Nieuwe Maas	d_0	[m+NAP]	-14,5

Tabel 60 - Maatgevende waarden 2100

Voor elke situatie dienen eerst de verschillende belastingen berekend te worden inclusief belastingsfactoren, zoals ook gebeurd is in Paragraaf 6.3.1. Het gaat om horizontale belastingen, verticale belastingen en momenten. Met deze belastingen is de stabiliteit van de constructie gecontroleerd.

Maximale zeewaterstand en minimale rivierwaterstand - 2018



Figuur 84 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	174257
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	48567
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	127530
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	5028
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	141006
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	83884

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	1069459

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	5,1
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	4,3
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	1,8
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	715582
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	362774
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	1931889

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	57122
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1320491
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	2284698

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	57122
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	660246

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	1,7
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

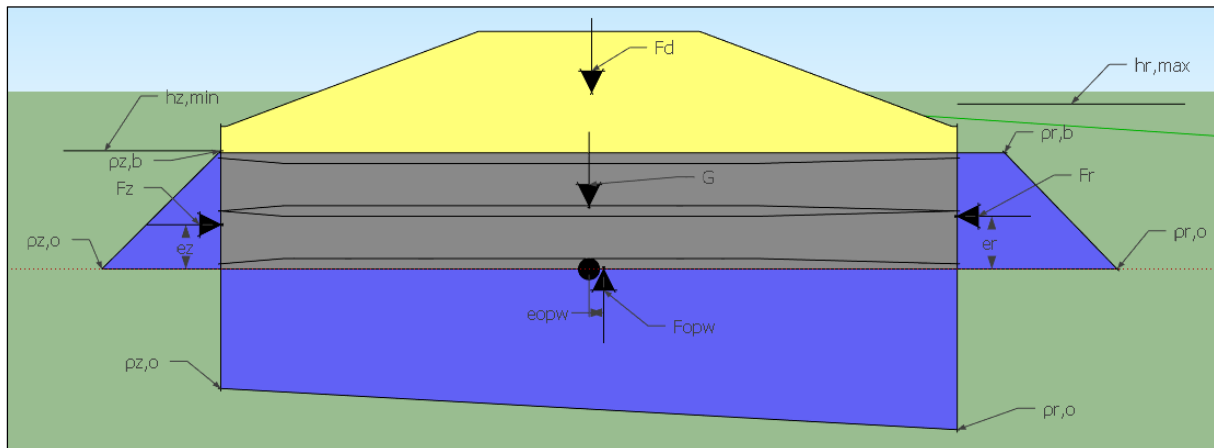
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	323
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Minimale zeewaterstand en maximale rivierwaterstand - 2018



Figuur 85 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	127702
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	2011
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	161865
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	40221
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	82084
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	127883

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	1026152

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	4,2
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	5,0
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	1,4
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	347319
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	638895
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	1412440

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	45799
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1363799
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	1704017

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	45799
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	681899

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	1,2
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

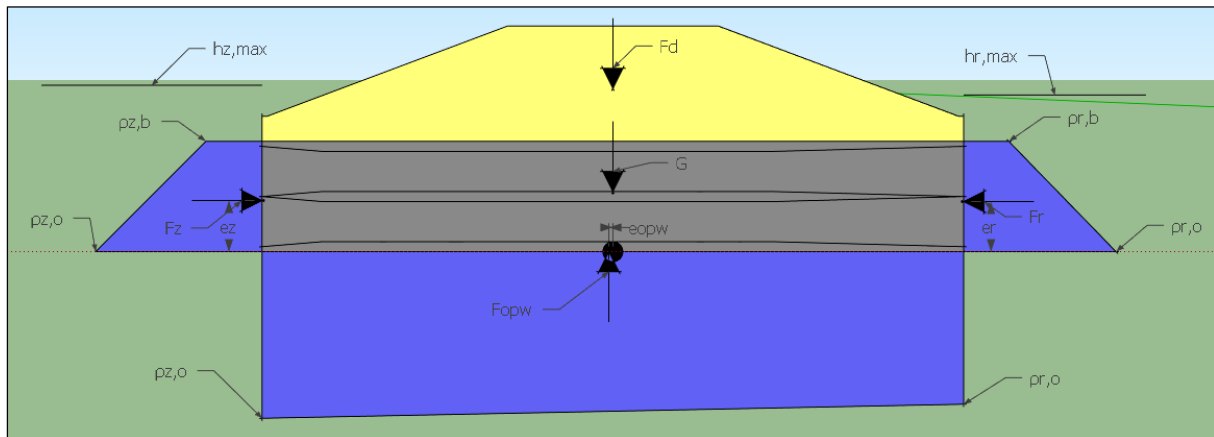
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	321
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Maximale zeewaterstand en maximale rivierwaterstand - 2018



Figuur 86 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	174257
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	48567
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	161865
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	40221
Drukkracht zeezijde ($*\gamma_Q$)	F_z	[kN]	141006
Drukkracht rivierzijde ($*\gamma_Q$)	F_r	[kN]	127883

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($*\gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($*\gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($*\gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	1191134

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	5,1
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	5,0
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	0,4
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	715582
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	638895
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	512352

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	13123
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1198817
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	589039

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	13123
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	599408

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	0,5
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

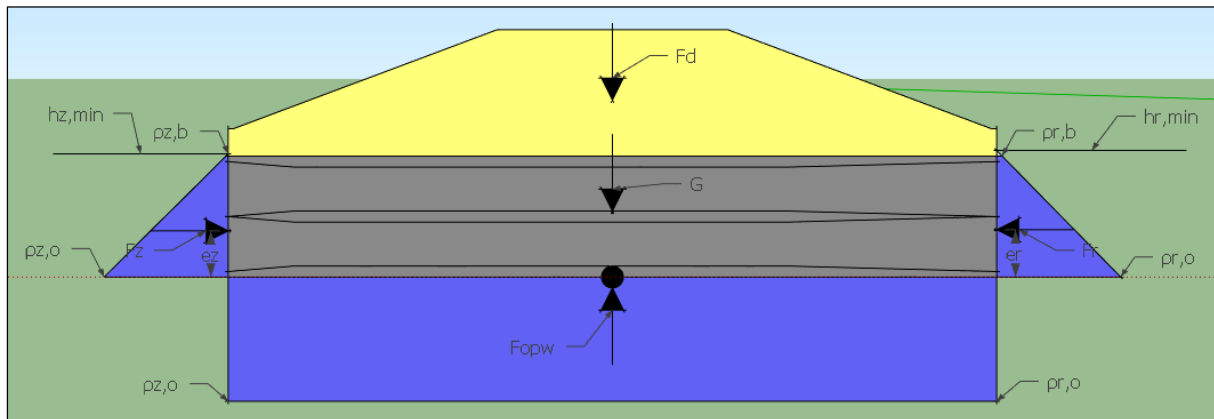
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	265
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Minimale zeewaterstand en minimale rivierwaterstand - 2018



Figuur 87 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	127702
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	2011
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	127530
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	5028
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	82084
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	83884

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	904477

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	4,2
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	4,3
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	0,0
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	347319
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	362774
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	7098

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	1800
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1485473
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	22553

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	1800
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	742737

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	0,0
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

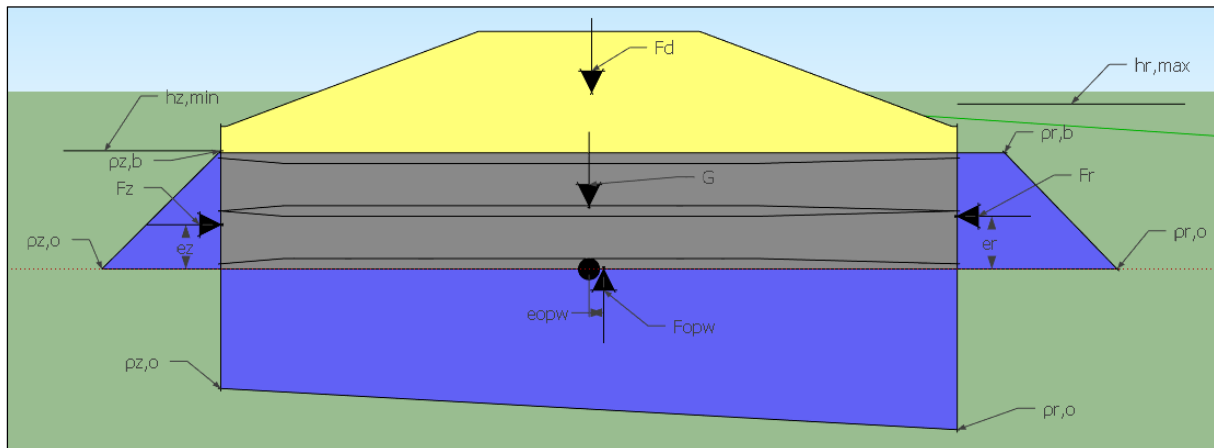
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	315
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Minimale zeewaterstand en maximale rivierwaterstand - 2100



Figuur 88 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	127702
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	2011
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	161865
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	40221
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	82084
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	127883

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	1026152

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	4,2
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	5,0
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	1,4
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	347319
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	638895
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	1412440

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	45799
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1363799
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	1704017

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	45799
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	681899

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	1,2
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

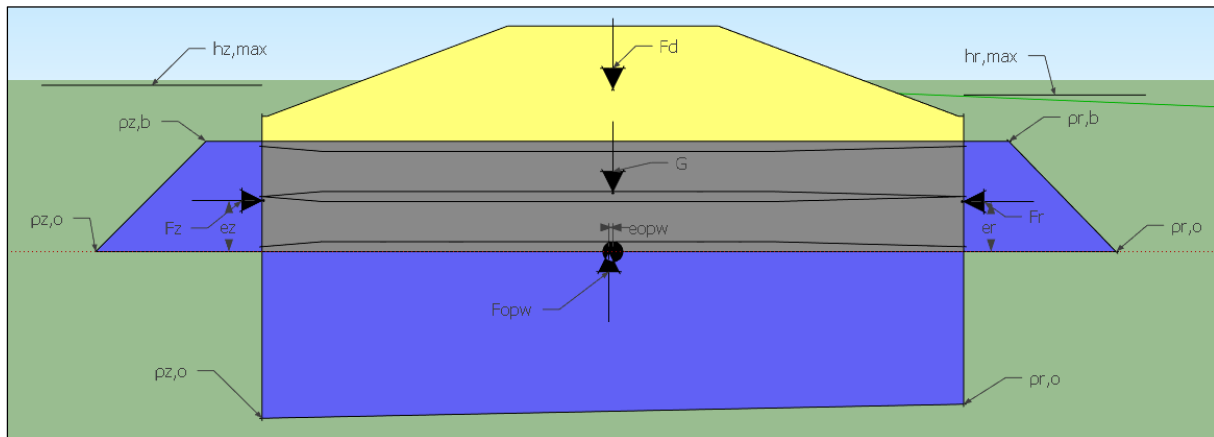
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	321
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Maximale zeewaterstand en maximale rivierwaterstand - 2100



Figuur 89 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	181296
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	55606
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	161865
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	40221
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	149914
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	127883

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	1216077

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	5,1
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	5,0
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	0,7
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	771259
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	638895
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	803357

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	22032
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1173873
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	935721

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	22032
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	586937

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	0,8
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

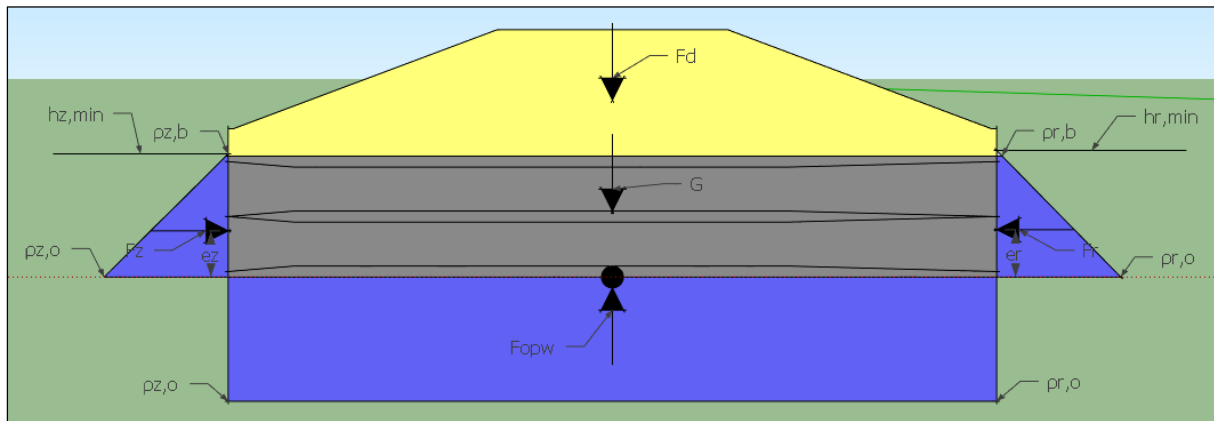
Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	266
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

Voldoet

Minimale zeewaterstand en minimale rivierwaterstand - 2100



Figuur 90 - Belastingsschema

Belastingen

Horizontale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Waterdruk zeezijde onder	$p_{z,o}$	[Pa]	127702
Waterdruk zeezijde boven	$p_{z,b}$	[Pa]	2011
Waterdruk rivierzijde onder	$p_{r,o}$	[Pa]	127530
Waterdruk rivierzijde boven	$p_{r,b}$	[Pa]	5028
Drukkracht zeezijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_z	[kN]	82084
Drukkracht rivierzijde ($\cdot \gamma_Q$)	F_r	[kN]	83884

Verticale belastingen

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Gewicht constructie ($\cdot \gamma_G$)	G	[kN]	1540732
Gewicht dijklichaam ($\cdot \gamma_G$)	F_d	[kN]	849218
Opwaartse kracht ($\cdot \gamma_Q$)	F_{opw}	[kN]	904477

Momenten

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Arm drukkracht zeezijde	e_z	[m]	4,2
Arm drukkracht rivierzijde	e_r	[m]	4,3
Arm opwaartse kracht	e_{opw}	[m]	0,0
Moment drukkracht zeezijde	M_z	[kNm]	347319
Moment drukkracht rivierzijde	M_r	[kNm]	362774
Moment opwaartse kracht	M_{opw}	[kNm]	7098

Evenwicht

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	1800
Som van de verticale krachten	ΣV	[kN]	1485473
Som van de momenten	ΣM	[kNm]	22553

Stabiliteit**Horizontaal**

$$\Sigma H < f \cdot \Sigma V$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Wrijvingsfactor	f	[-]	0,5
Som van de horizontale krachten	ΣH	[kN]	1800
	$f \cdot \Sigma V$	[kN]	742737

Voldoet

Rotatie

$$e_R = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \leq \frac{1}{6} l$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Afstand tot punt O	e	[m]	0,0
	$l/6$	[m]	11,7

Voldoet

Verticaal

$$\sigma_{k,max} < p'_{max} \quad \sigma_{k,max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{bl} + \frac{\Sigma M}{1/6 lb^2}$$

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maximaal optredende korrelspanning	$\sigma_{k,max}$	[kN/m ₂]	315
Maximaal toelaatbare korrelspanning	p'_{max}	[kN/m ₂]	500

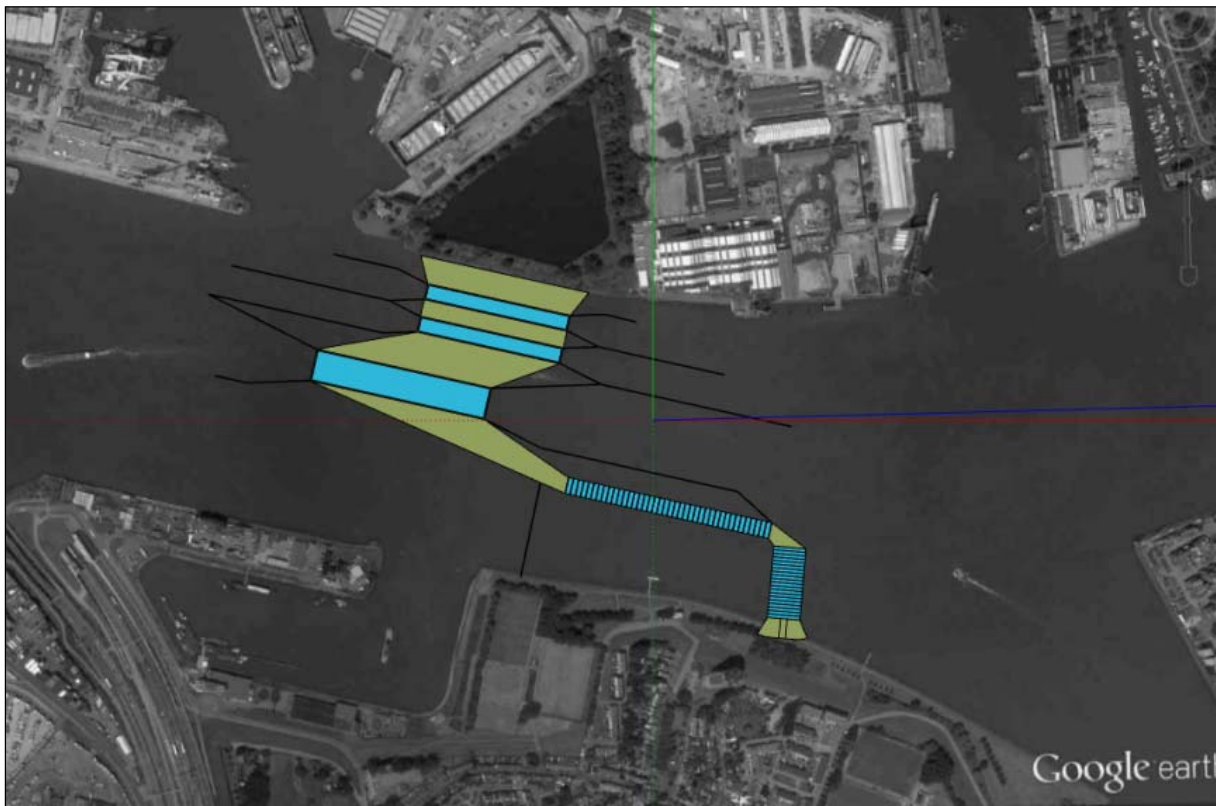
Voldoet

Bijlage C – Schetsen locatie

In deze bijlage zijn de schetsen weergegeven van de locatie van de afsluiting met daarin het afvoermiddel in de Nieuwe Waterweg gedurende het ontwerpproces. De vorderingen daarvan zijn in de telkens gewijzigde ontwerpschetsen af te lezen. Elke ontwerpschets wordt voorzien van een korte toelichting.

Eerste ontwerp

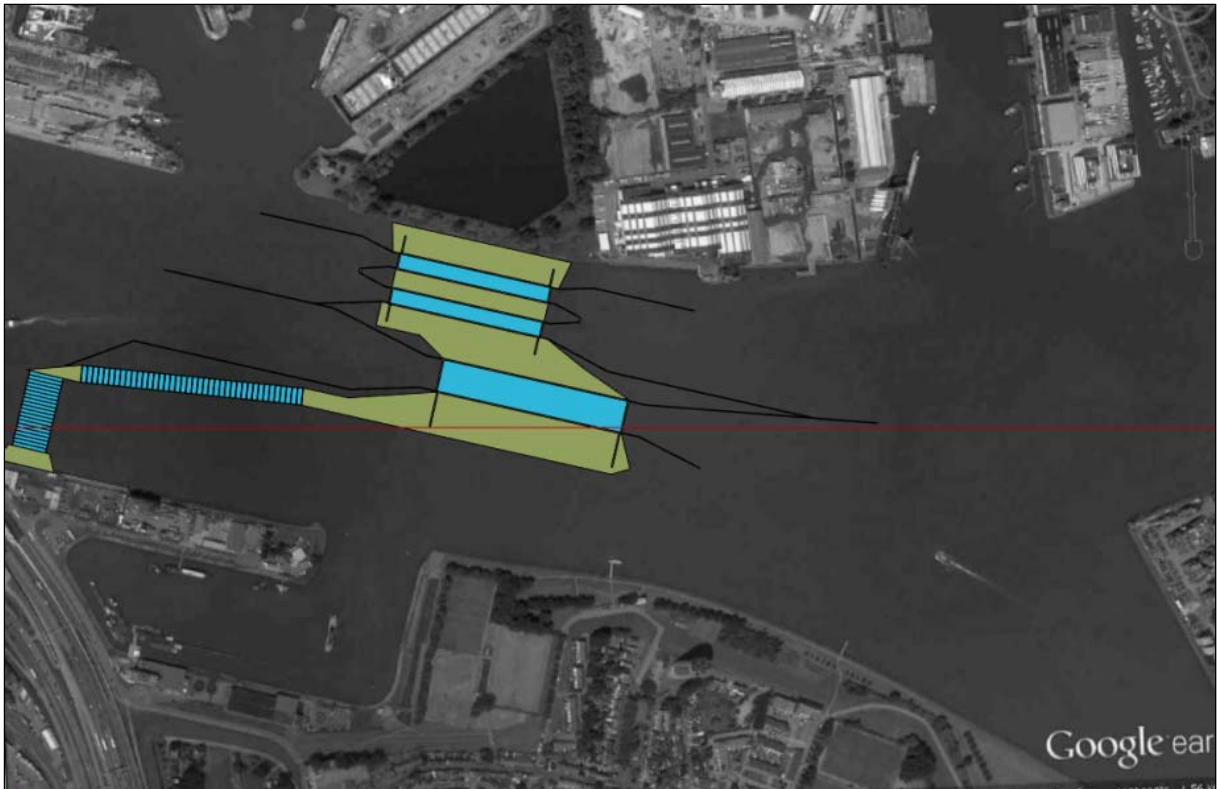
Figuur 91 toont het eerste ontwerp van de afsluiting met de verschillende afvoercomplexen en de scheepvaartsluizen (boven). De Noordzee is links van de afsluiting. Links in de afbeelding ligt de Beneluxtunnel. Rechtsonder bevinden zich de spuisluizen en in het midden, in de lengterichting van de rivier, ligt het gemaal. Met het oog op de beschikbare ruimte is voor deze opzet van de afsluiting is gekozen.



Figuur 91 - Eerste ontwerp

Tweede ontwerp

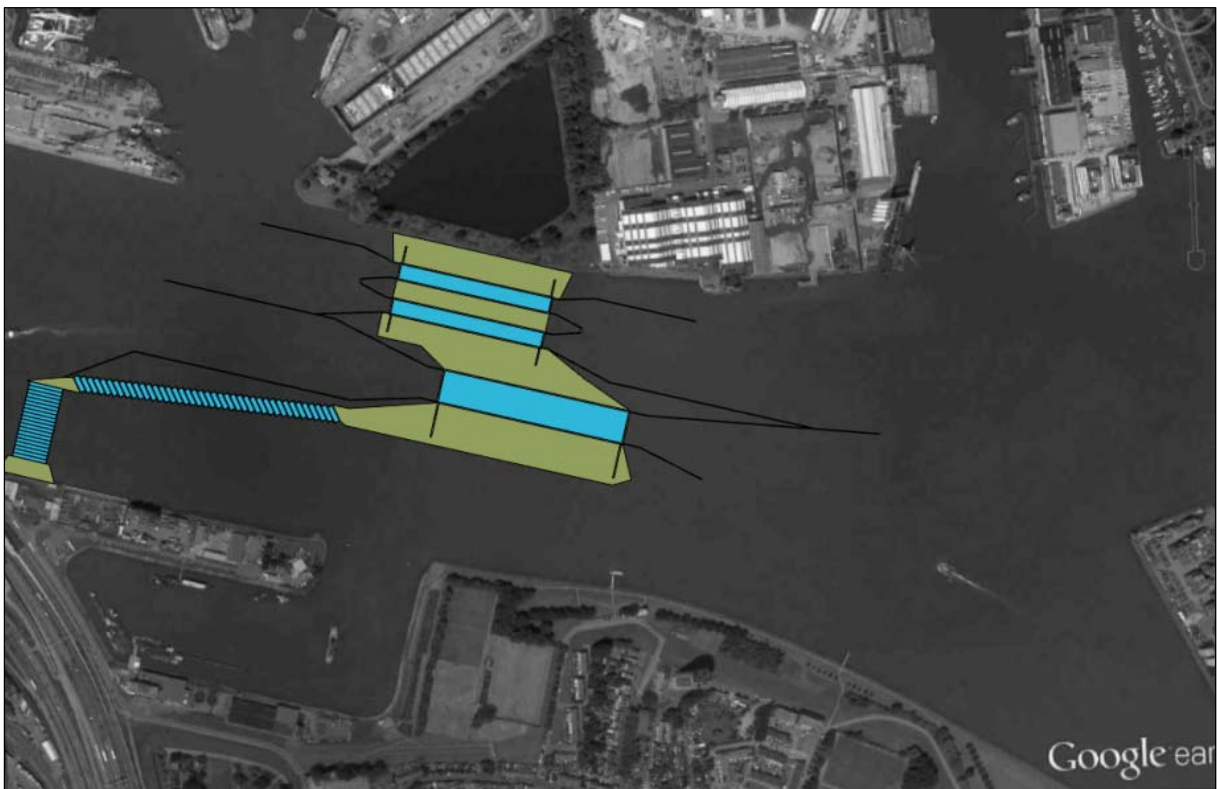
Het tweede ontwerp (Figuur 92) is een verticale spiegeling van het eerste ontwerp. Dit is gedaan om de doorstroming van het water (van rechts naar links) te verbeteren. Met name de doorstroming door de spuisluizen zal dan toenemen.



Figuur 92 - Tweede ontwerp

Derde ontwerp

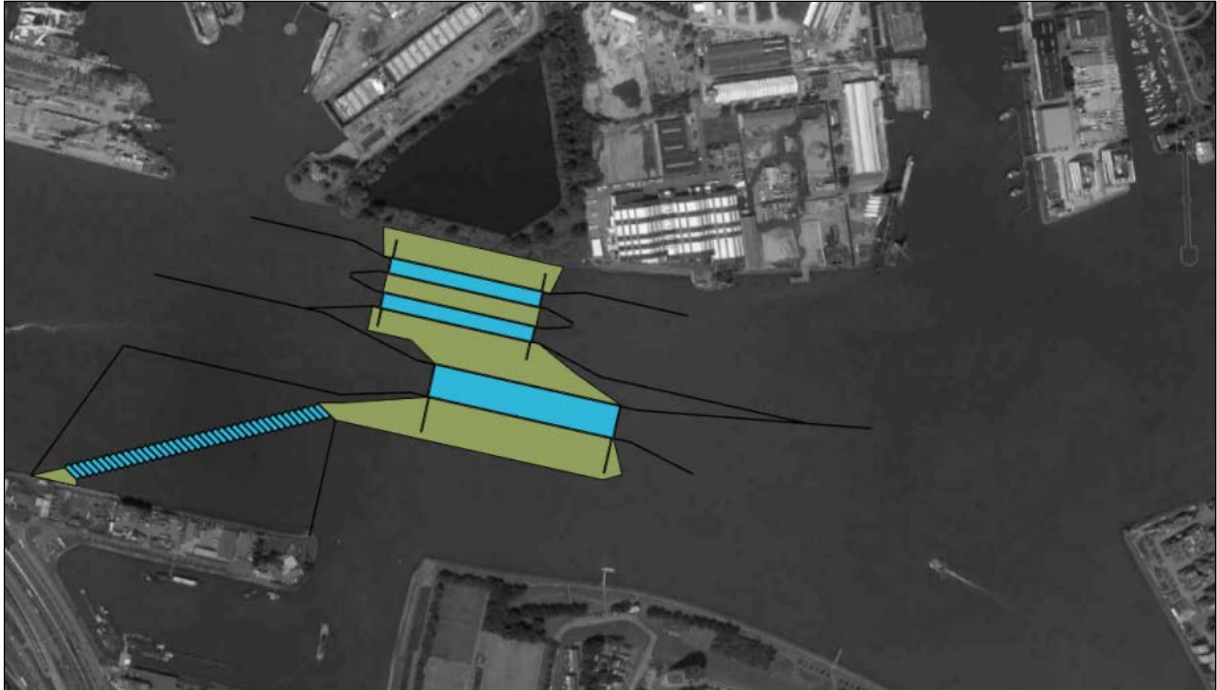
Om de doorstroming door het gemaal (in de lenterichting van de rivier) te verbeteren, zijn de kokers van het gemaal gedraaid (tegen de klok in). Dit is te zien in Figuur 93.



Figuur 93 - Derde ontwerp

Vierde ontwerp

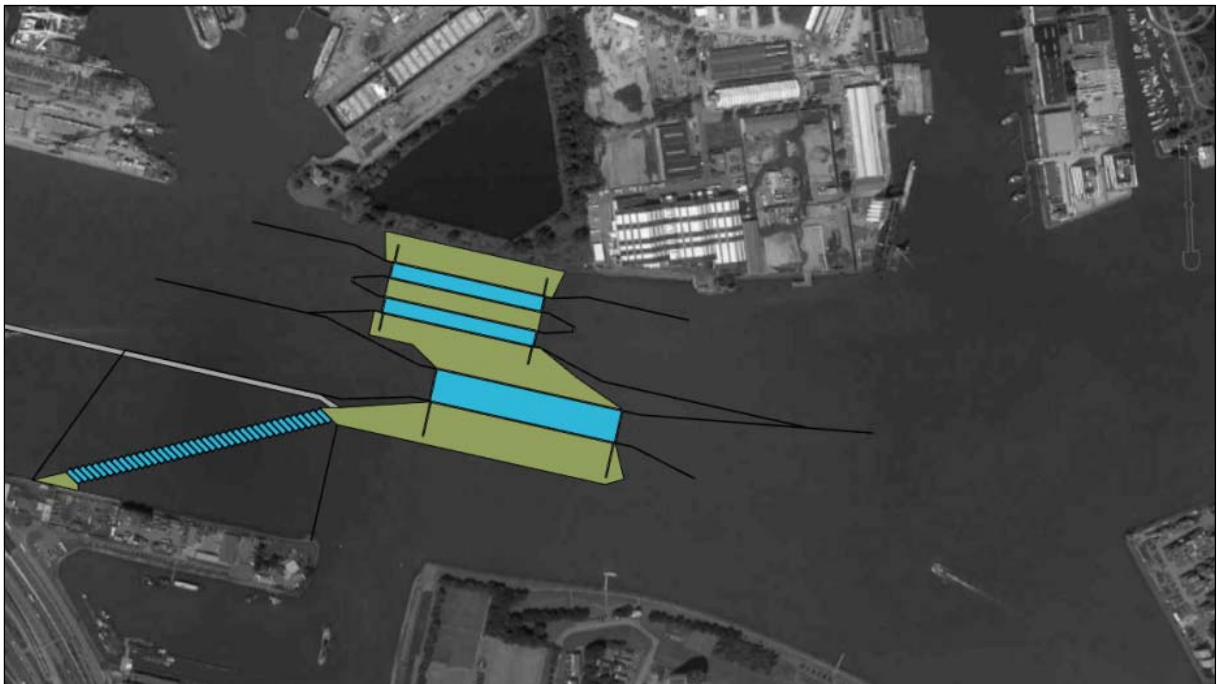
Lopende het ontwerpproces is het idee gekomen om de spuisluizen en het gemaal te combineren in een complex. Omdat de kokers wel nog allen naast elkaar lagen, was het complex nog te breed om naast de scheepvaartsluizen te liggen. Daarom is het afvoercomplex diagonaal naast de scheepvaartsluizen geplaatst, zoals te zien is Figuur 94.



Figuur 94 - Vierde ontwerp

Vijfde ontwerp

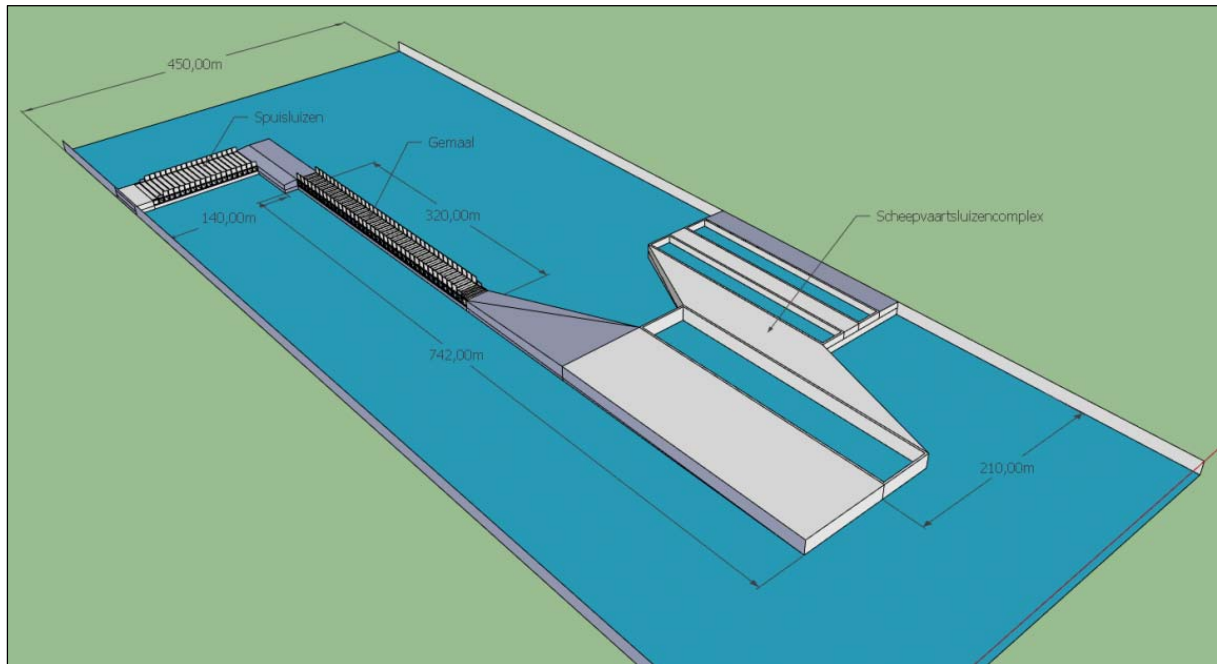
Tot slot is er tussen het afvoercomplex en de scheepvaartsluizen een strekdam geplaatst (Figuur 95). Dit moet de hinder van de stroming rond het afvoercomplex voor de scheepvaart verminderen.



Figuur 95 - Vijfde ontwerp

3D schets

In Figuur 96 is een 3D schets gepresenteerd van het afvoermiddel in de afsluiting. Ook de scheepvaartsluizen (rechts) zijn hier in getekend. Deze schets is gebaseerd op het tweede ontwerp, zoals weergegeven in Figuur 92. Aangenomen is dat de totale breedte van het scheepvaartsluizencomplex ongeveer 200 meter is. De breedte van de rivier in de schetsen is 450 meter (zie Tabel 16). Het afvoercomplex is in dit ontwerp verdeeld in een spuicomplex (links, in de breedterichting van de rivier) en een gemaal (midden, in de lengterichting van de rivier). In dit ontwerp waren deze twee verschillende manieren van afvoeren nog gescheiden.



Figuur 96 - Ruimtelijke inpassing tweede ontwerp afvoercomplex met scheepvaartsluizen

Bijlage D – Betonberekeningen

In deze bijlage zijn beton- en wapeningsberekeningen uitgevoerd voor de afvoerconstructie in de afsluiting van de Nieuwe Waterweg. Het onderwerp van dit onderzoek richt zich vooral op de afvoerende functie van het afvoermiddel. Dit heeft als consequentie dat alleen betonberekeningen voor het afvoerende deel van de constructie gemaakt zijn.

Structuur bijlage

Na deze inleiding met daarin de structuur van het document en de werkwijze volgt eerste een paragraaf met algemene gegevens, zoals relevante afmetingen en eigenschappen van de materialen. Daarna komt de uitwerking in de lengterichting (y-richting) en de breedterichting (x-richting) aan de orde. Als laatste volgt er nog een conclusie met daarin een overzicht van de uitkomsten.

Algemeen

Hier komen een aantal algemene zaken aan de orde, zoals eigenschappen van materialen, afmetingen en de werkwijze.

Eigenschappen materialen

In onderstaande tabellen staan de eigenschappen van het beton en betonstaal die gebruikt worden voor de berekening van de afvoerconstructie.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde	Vergelijking/opmerking
Betonsterkteklasse	C	[-]	45/55	
Karakteristieke druksterkte beton	f_{ck}	[MPa]	45	
Rekenwaarde druksterkte beton	f_{cd}	[MPa]	30	
Gemiddelde druksterkte beton	f_{cm}	[MPa]	53	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
Gemiddelde treksterkte beton	f_{ctm}	[MPa]	3,8	$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$
Gemiddelde elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	[GPa]	36	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$
Rekenwaarden elasticiteitsmodulus beton	E_{cd}	[GPa]	30	$E_{cd} = E_{cm}/1,2$
Poisson-factor beton	ν	[-]	0,2	ongescheurd beton
Schuifmodulus	G	[MPa]	15	$G = E_{cm}/(2*(1+\nu))$
Kruip beton	ϕ_{ef}	[-]	0	$\phi_{ef} = \phi(\infty, t_0)$
Reductiefactor EI_c - scheur en kruip	K_c	[-]	0,3	$K_c = 0,3/(1+0,5*\phi_{ef})$
Reductiefactor EI_s	K_s	[-]	0	

Tabel 61 - Eigenschappen beton

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde	Vergelijking/opmerking
Betonsterkteklasse	B	[-]	500	
Karakteristieke vloeigrens wapeningsstaal	f_{yk}	[N/mm ²]	500	
Partiële veiligheidscoëfficiënt	γ	[-]	1,15	
Rekenwaarde vloeigrens wapeningsstaal	f_{yd}	[N/mm ²]	435	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma$

Tabel 62 - Eigenschappen betonstaal

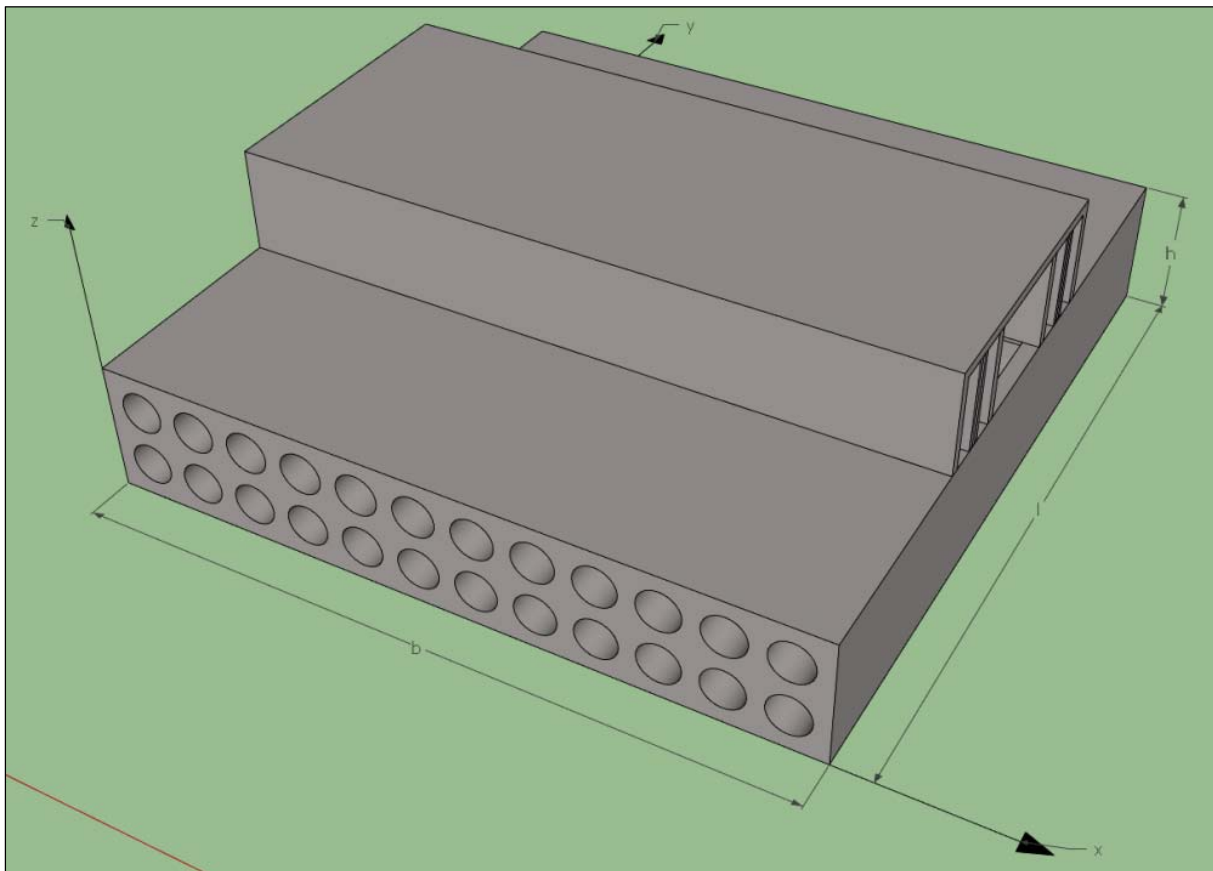
Afmetingen

Hoofdafmetingen afvoerconstructie

De afvoerconstructie bestaat uit drie delen van gelijke grootte. De hoofdafmetingen van elk deel staan in Tabel 63 en Figuur 97. De drie delen liggen in de breedte naast elkaar. Zodoende is de totale lengte (drie keer de breedte) van de gehele afvoerconstructie 202,5 meter.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Lengte	L	[m]	70,0
Breedte	B	[m]	67,5
Hoogte	H	[m]	12,5

Tabel 63 - Hoofdafmetingen deel afvoerconstructie



Figuur 97 - Deel afvoerconstructie

De afvoerconstructie bestaat uit een bovenbouw en onderbouw, wat ook te zien is in Figuur 97. De onderbouw is dat deel van de constructie waar de kokers zich bevinden. De bovenbouw bevindt zich erboven en dient onder andere als waterkering. Omdat dit onderzoek vooral gaat over de afvoerende functie van het afvoermiddel, zijn in dit rapport alleen betonberekening gemaakt voor de onderbouw. In vergelijking met de bovenbouw is, ook wat de betonberekeningen betreft, de onderbouw complexer. In het vervolg zal de bovenbouw dan ook niet meer afgebeeld worden.

Overige afmetingen

In Tabel 64 staan de overige relevante afmetingen die op diverse plaatsen gebruikt zijn.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Strookbreedte	b_s	[m]	5,5
Kokerdiameter koker	d_k	[m]	4
Kokerdiameter buitenzijden	d_u	[m]	5
Kokerdiameter tussen (gemiddelde)	d_t	[m]	4,5

Tabel 64 - Overige afmetingen

Dekking

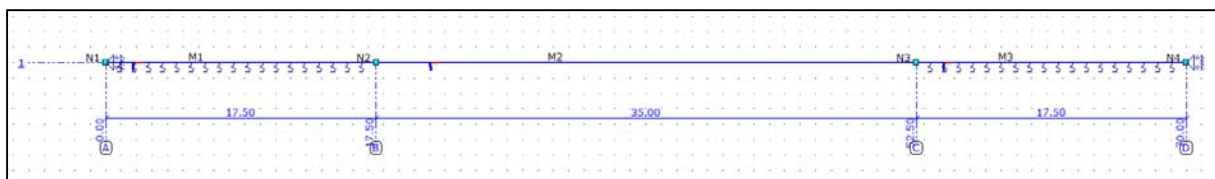
De betondekking is de afstand tussen het oppervlak van de wapening en het betonoppervlak, inclusief beugels. De betondekking wordt bepaald met de volgende formule.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

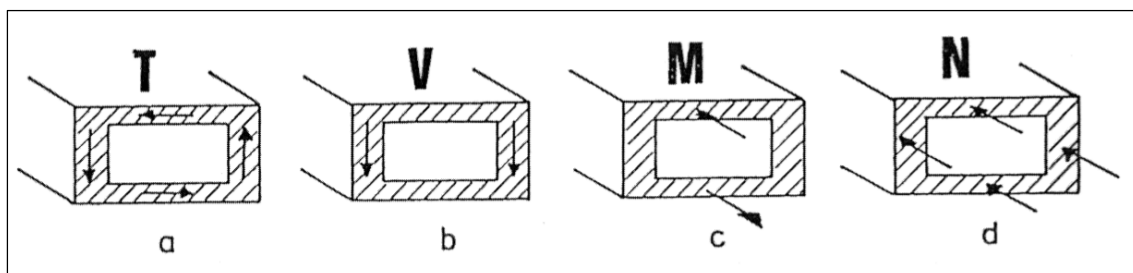
De minimale betondekking c_{min} is gelijk aan de diameter van het wapeningsstaal, 32 mm. De uitvoeringstolerantie Δc_{dev} is 10 mm. De betondekking is dus 42 mm. In de berekeningen is echter gerekend met een betondekking van 10 cm. Deze was als eerste schatting aangenomen. Er is echter voor gekozen om deze waarde aan te blijven houden aangezien het verschil klein is in vergelijking met de hoofdafmetingen van de constructie. Ook is de waarde aan de veilige kant.

Werkwijze

Het afvoerelement is in de lengterichting (y-richting) en in de breedterichting (x-richting) doorgerekend. In beide richtingen is met een strook gerekend met een breedte b_s van 5,5 meter. Dit is vervolgens gemodelleerd als een ligger die (gedeeltelijk) verend ondersteund is. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 98. Door de gedeeltelijke ondersteuning treden er momenten en dwarskrachten in de constructie op. Daarop zijn achtereenvolgens de wapening door buiging, de afschuifwapening en de wapening ten gevolge van wringing bepaald. In Figuur 99 staat als voorbeeld de krachten op een kokerdoorsnede door wringing, afschuiving, buiging en normaalkracht. Normaalkracht is hier niet van toepassing.



Figuur 98 - Ligger op gedeeltelijk verende ondersteuning

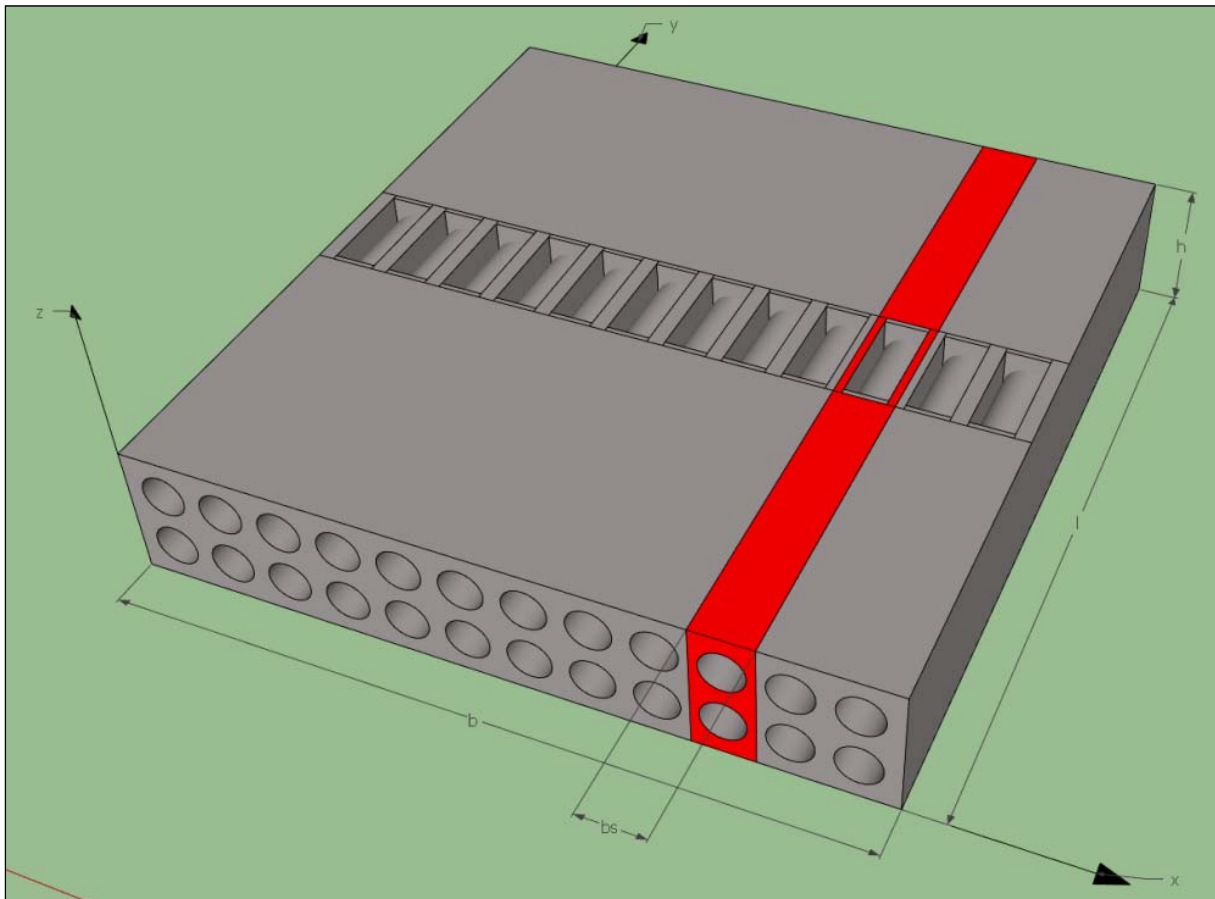


Figuur 99 - Krachten op een kokerdoorsnede door wringing (a), afschuiving (b), buiging (c) en normaalkracht (d)

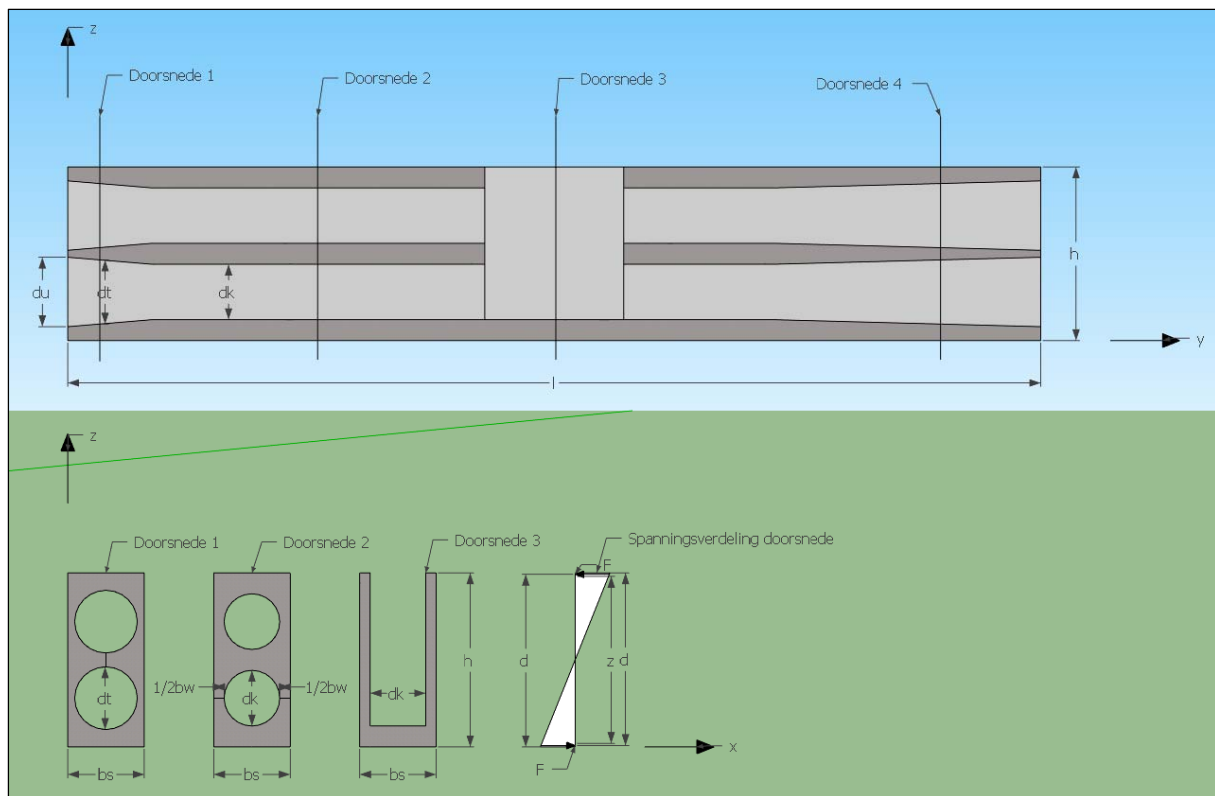
Lengterichting

Overzicht

Voor de uitwerking in de lengterichting is gerekend met een strook van 5,5 meter breed, met precies in het midden twee kokers boven elkaar. Dit is het rode gedeelte in Figuur 100. Op vier plaatsen in deze strook zijn de doorsnedes weergegeven en de eigenschappen ervan bepaald. Doorsnede 1 is het gemiddelde van de instroomopening, doorsnede 2 is het middendeel, doorsnede 3 is ter hoogte van het pompedeelte en doorsnede 4 is het gemiddelde van de uitstroomopening. Doorsnede 1 is in deze situatie gelijk aan doorsnede 4. In Figuur 101 staan de dwarsdoorsnede van de strook, de drie strookdoorsnedes en de spanningsverdeling ten gevolge van buigend moment in de doorsnede.



Figuur 100 - Strook in lengterichting in afvoerdeel



Figuur 101 - Dwarsdoorsnede strook, drie strookdoorsnedes en spanningsverdeling

Belasting

De totale belasting op het afvoerelement van 5,5 meter breed is 79553 kN. Dit bestaat uit het eigengewicht van 73228 kN en uit 6325 kN van de bovenbouw. Bij een lengte van 70 meter bedraagt de verdeelde belasting inclusief een belastingfactor van 1,2 (voor permanente belasting) 1364 kN per strekkende meter.

Bedding

Voor de beddingsconstante k_{bed} is een waarde gekozen van 50000 kN/m³ (gemiddeld voor zand). Vermenigvuldigd met de breedte van een strook van 5,5 meter is dat 275000 kN/m².

Stijfheid

In Tabel 65 staan de formules die gebruikt zijn om de verschillende stijfheden van de doorsneden van de liggers te berekenen. Met behulp van deze stijfheden zijn de momenten en de krachten in de constructie en doorsneden bepaald. Met deze gegevens kan de wapening in de doorsnedes berekend worden.

Formule	Vergelijking
Massacentrum (t.o.v. vast punt)	$z = \frac{z_i A_i}{A_i}$
Buigstijfheid (algemeen)	$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$

Tabel 65 - Gebruikte formules voor de stijfheden

In Tabel 66, Tabel 67 en Tabel 68 staan respectievelijk waarden van de grootheden van doorsneden 1 (en 4), 2 en 3 die met de formules uit Tabel 65 verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Betondoorsnede 1	A_{y1}	[m ²]	36,9
Massacentrum 1	z_{y1}	[m]	6,25
Traagheidsmoment buiging 1	I_{y1}	[m ⁴]	614,4
Buigstijfheid 1	EI_{y1}	[kNm ²]	6635215101

Tabel 66 - Uitwerking doorsnede 1 (en 4)

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Betondoorsnede 2	A_{y2}	[m ²]	43,6
Massacentrum 2	z_{y2}	[m]	6,25
Traagheidsmoment buiging 2	I_{y2}	[m ⁴]	680,0
Buigstijfheid 2	EI_{y2}	[kNm ²]	7343818505

Tabel 67 - Uitwerking doorsnede 2

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Betondoorsnede 3	A_{y3}	[m ²]	24,8
Massacentrum 3	z_{y3}	[m]	4,9
Traagheidsmoment buiging 3	I_{y3}	[m ⁴]	382,8
Buigstijfheid 3	EI_{y3}	[kNm ²]	4133868750

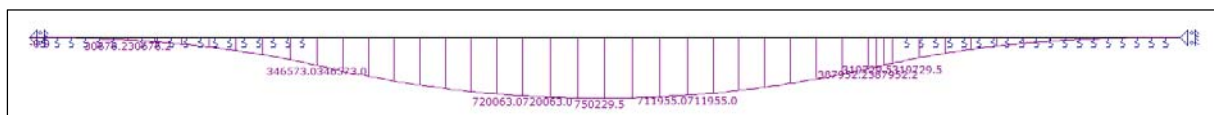
Tabel 68 - Uitwerking doorsnede 3

Buiging

Door de belasting op de constructie treden er momenten en daardoor ook buiging in de constructie op. Afhankelijk van de ondersteuning van de constructie zal dit resulteren in saggings of hogging.

Sagging

Sagging is het moment dat ontstaat doordat de constructie in het midden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is aan de beide einden van de ligger, 17,5 meter aan beide zijden. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 102.

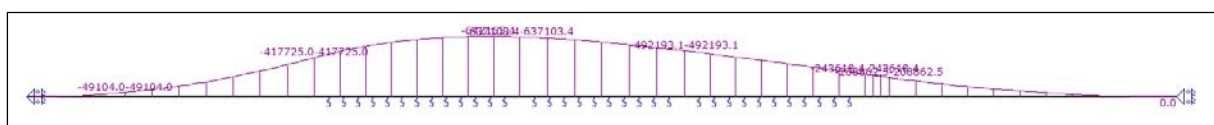


Figuur 102 - Momentenlijn (kNm) door saggings

Het maximale moment is ongeveer 750230 kNm in het midden van de onderzijde van de constructie.

Hogging

Hogging is het moment dat ontstaat doordat de constructie aan de uiteinden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is in het midden van de constructie gepositioneerd met een lengte van 35 meter. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 103.



Figuur 103 - Momentenlijn (kNm) door hogging

Het maximale moment is ongeveer 642170 kNm in niet helemaal het midden van de bovenzijde van de constructie.

Buigingswapening

Buigingswapening is wapening die zich horizontaal in de lengterichting van de constructie bevindt, daar waar de grootste trekkrachten zijn door buiging. Dat is of helemaal onderin de constructie, bij saggings, of helemaal bovenin de constructie, door hogging. Met behulp van onderstaande formules is de wapeningsoppervlakte van de langswapening berekend per strook, dat is dus per 5,5 meter breed.

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

$$A_{sl} = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{A_c}$$

In Tabel 69 en Tabel 70 staan respectievelijk de waarden voor de onderzijde en bovenzijde van bovenstaande formules. De rekenwaarde van de vloeigrens van het wapeningsstaal f_{yd} is 435 N/mm². De inwendige hefboomsarm z is geschat op de hoogte van de constructie minus 0,5 meter. Dit is aan de veilige kant. De betondoorsnede A_c is gelijk aan de A_{y2} . Dit is alleen de betondoorsnede; de openingen zijn daar niet in meegenomen.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment onderzijde	$M_{Ed,o}$	[kNm]	750230
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,o}$	[kN]	62519
Doorsnede langswapening onderzijde	$A_{sl,o}$	[mm ²]	143794
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,58

Tabel 69 - Berekening wapeningsoppervlakte onderzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de onderzijde van de constructie is ongeveer 26144 mm² per meter.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment bovenzijde	$M_{Ed,b}$	[kNm]	642170
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,b}$	[kN]	55039
Doorsnede langswapening bovenzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	123083
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,50

Tabel 70 - Berekening wapeningsoppervlakte bovenzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de bovenzijde van de constructie is ongeveer 22379 mm² per meter.

Minimum en maximum wapeningspercentage

De hoeveelheid wapening in een doorsnede moet meer zijn dan het minimum wapeningspercentage ρ_{min} en minder zijn dan het maximum wapeningspercentage ρ_{max} . Het minimum wapeningspercentage is gebaseerd op het scheurmoment van de doorsnede. De gaten tellen dus in theorie mee, maar omdat zij zodanig gepositioneerd zijn, dat ze nauwelijks invloed hebben, worden ze niet meegenomen. Met behulp van de onderstaande formules zijn deze grenswaarden berekend.

$$\rho_{min} = \frac{A_{s,min}}{A_c} \quad A_{s,min} = \frac{k_c k f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} \quad k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right] \quad \sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh} \quad k_1 = \frac{2h^*}{3h}$$

$$\rho_{max} < 0,35 \frac{f_{ck}}{f_{yk}}$$

In Tabel 71 staan de grenswaarden van de wapeningspercentages voor de langswapening aan onderzijde van de constructie (bij sagging). De normaalkracht N_{Ed} is gelijk aan de maatgevende trekkracht $F_{Ed,o}$ uit Tabel 69. De gemiddelde waarde van de treksterkte $f_{ct,eff}$ is gelijk aan gemiddelde treksterkte van beton f_{ctm} . De oppervlakte van het beton in de trekzone is gelijk aan de helft van de totale betondoorsnede A_{v2} . De maximaal toelaatbare wapeningspanning σ_s is gelijk aan de vloeigrens f_{yk} van de wapening.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Hoogte	h	[m]	12,5
	h^*	[m]	1,0
Coëfficiënt voor normaalkrachten	k_1	[-]	0,05
Normaalkracht onderzijde	N_{Ed}	[kN]	62519
Breedte	b	[m]	5,5
Gemiddelde betonspanning	σ_c	[N/mm ²]	0,9
Gemiddelde waarde van de treksterkte	$f_{ct,eff}$	[N/mm ²]	3,8
Coëfficiënt voor spanningverdeling	k_c	[-]	0,26
Coëfficiënt voor niet-gelijkmatige eigenspanningen	k	[-]	0,65
Oppervlakte beton in trekzone	A_{ct}	[m ²]	21,8
Maximaal toelaatbare wapeningspanning	σ_s	[N/mm ²]	500
Minimale wapeningsoppervlakte	$A_{s,min}$	[mm ²]	27573
Minimum wapeningspercentage	$\rho_{min,o}$	[%]	0,13
Maximum wapeningspercentage	ρ_{max}	[%]	3,15

Tabel 71 - Berekening grenswaarden wapeningspercentages langswapening onderzijde constructie

De berekende wapeningspercentage aan de onderzijde van de constructie valt binnen deze grenzen.

Op dezelfde wijze zijn de grenswaarden van de wapeningspercentages voor de langswapening aan de bovenzijde van de constructie berekend (bij hoging). Dezen staan in Tabel 72. De normaalkracht N_{Ed} is nu gelijk aan de maatgevende trekkracht $F_{Ed,b}$ uit Tabel 70.

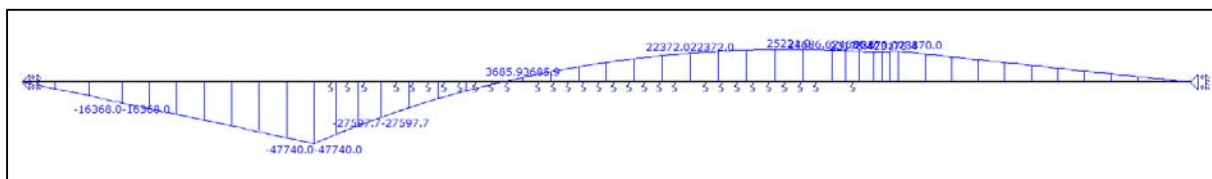
Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Minimum wapeningspercentage	$\rho_{min,b}$	[%]	0,14
Maximum wapeningspercentage	ρ_{max}	[%]	3,15

Tabel 72 - Berekening grenswaarden wapeningspercentages langswapening bovenzijde constructie

Ook nu valt de berekende wapeningspercentage aan de bovenzijde van de constructie binnen deze grenzen.

Afschuiving

Door de belasting op de constructie treden er dwarskrachten in de constructie op. Als deze groter zijn dan de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand dient schuifwapening toegepast te worden. In Figuur 104 staat de dwarskrachtenlijn, waarin te zien is dat de maximaal optredende dwarskracht 47740 kN is.



Figuur 104 - Dwarskrachtenlijn (kN) in lengterichting

Eenvoudige berekening

Eerst is met een eenvoudige berekening gecontroleerd of de rekenwaarde van de schuifspanning groter of kleiner is dan minimale schuifspanningsweerstand v_{min} . Dit is gedaan met behulp van onderstaande formules.

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w d} \leq v_{min} \quad v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (d \text{ in mm})$$

Indien de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan de minimale schuifspanningsweerstand v_{min} moet schuifwapening toegepast worden. In Tabel 73 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. De effectieve hoogte d is de werkelijke hoogte minus de betondekking. Deze is hier geschat op 0,1 meter. In onderstaande tabel is b_w gelijk aan de strookbreedte b_s minus de diameter van de inwendige koker.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Effectieve hoogte	d	[m]	12,4
Schaaleffect	k	[-]	1,13
Minimale schuifspanningsweerstand	v_{min}	[N/mm ²]	0,28
Rekenwaarde dwarskracht	V_{Ed}	[kN]	47740
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	1,5
Rekenwaarde schuifspanning	v_{Ed}	[N/mm ²]	2,57

Tabel 73 - Eenvoudige berekening schuifspanning

Omdat de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan schuifspanningsweerstand v_{min} zal er schuifwapening toegepast moeten worden.

Specifieke berekening

Nu uit bovenstaande eenvoudige berekening blijkt dat de schuifwapening nodig is, kan er met een specifiekere berekening nogmaals gekeken worden of schuifwapening daadwerkelijk nodig is. Dit is gedaan met behulp van onderstaande formules.

$$V_{Rd,c} = \left[\left(\frac{0,18}{\gamma_c} \right) k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d \quad \text{minimum: } V_{Rd,c} = v_{min} b_w d \quad \rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

$$A_{sl} = \frac{A_{sl,b} \cdot b_w}{b_s}$$

Indien de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$ moet schuifwapening toegepast worden. In Tabel 74 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. Voor de berekening van De doorsnede van de langswapening A_{sl} is de langswapening aan de bovenzijde $A_{sl,b}$ genomen (omdat hier minder langswapening is dan aan de onderzijde van de constructie).

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede langswapening	A_{sl}	[mm ²]	33568
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	1,5
Effectieve hoogte	d	[m]	12,4
Langswapeningspercentage	ρ_l	[-]	0,0018
Materiaalfactor	γ_c	[-]	1,5
Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$V_{Rd,c}$	[kN]	5056
Rekenwaarde schuifspanningsweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$V_{Rd,c} (v_{min})$	[N/mm ²]	0,27

Tabel 74 - Specifiekere berekening schuifspanning

De minimale schuifspanningsweerstand v_{min} in bovenstaande formule kan in deze berekening gezien worden als de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$. De rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} is nog steeds groter dan de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$ (v_{min}). Er zal dus schuifwapening toegepast moeten worden.

Afschuifwapening

Afschuifwapening is wapening die aangebracht wordt om de schuifspanningsweerstand te vergroten. Deze wapening bevindt zich verticaal langs de rand van de constructie(elementen) en dwars op de langswapening. De afschuifwapening is berekend met onderstaande formule.

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot \cot \theta \cdot f_{ywd}} \quad \rho_w = \frac{A_{sw}/s}{b_w}$$

Uit: Dictaat CT2052, Gewapend Beton, Maart 2010 – Paragraaf 10.3.2

In Tabel 75 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde dwarskracht	V_{Ed}	[kN]	47740
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Rekenwaarde vloeigrens afschuifwapening	f_{ywd}	[N/mm ²]	435
Doorsnede afschuifwapening per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	3,660
Wapeningspercentage schuifwapening	ρ_w	[%]	0,24

Tabel 75 - Berekening afschuifwapening

Gekozen is voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 732 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 3660 mm².

Minimum schuifwapeningspercentage en maximale staafafstand

De hoeveelheid wapening in een doorsnede moet meer zijn dan het minimum schuifwapeningspercentage $\rho_{w,min}$. De staafafstand mag ook niet groter zijn dan de maximale staafafstand $s_{l,max}$. Dit is om te voorkomen dat zich afschuifscheuren kunnen vormen die niet door schuifwapening gesneden worden. Met behulp van de onderstaande formules zijn deze grenswaarden berekend.

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad s_{l,max} < 0,75d(1 + \cot \alpha)$$

In Tabel 76 staan waarden die met bovenstaande formules berekend zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum schuifwapeningspercentage	$\rho_{w,min}$	[%]	0,11
Maximum staafafstand	$S_{l,max}$	[m]	9

Tabel 76 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening

Omdat het berekende schuifwapeningspercentage ρ_w groter is dan de minimale waarde $\rho_{w,min}$ voldoet deze. De staafafstand s is kleiner dan de maximale staafafstand $S_{l,max}$ en voldoet.

Spanning drukdiagonalen

De spanning in de drukdiagonalen dienen de maximale drukspanning niet te overschrijden. De rekenwaarde van de maximale dwarskracht, begrensd door het bezwijken van de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ staat in onderstaande formule.

$$V_{Rd,max} = b_w z v f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

In Tabel 77 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

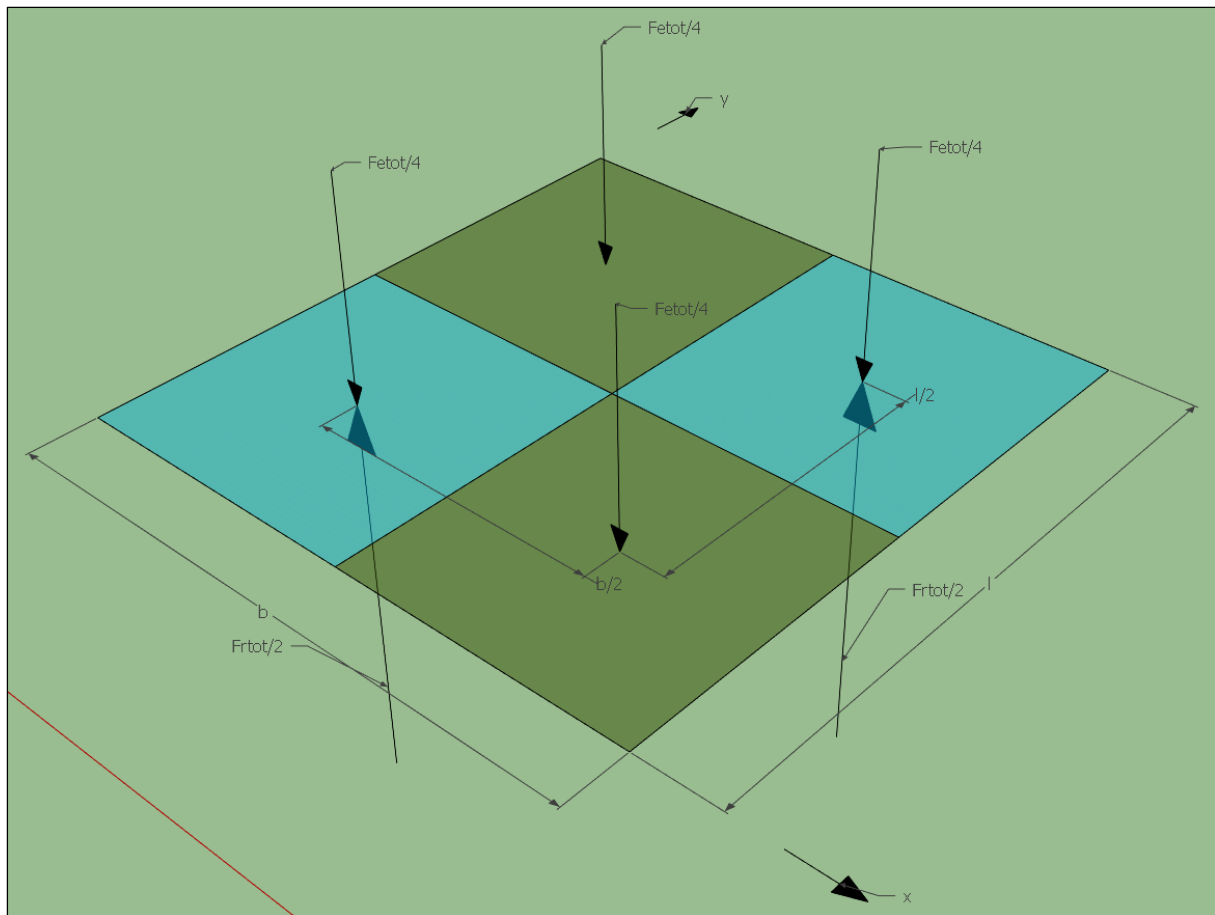
Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	v	[-]	0,492
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	1,5
Rekenwaarde maximale dwarskracht drukdiagonalen	$V_{Rd,max}$	[kN]	91614

Tabel 77 - Berekening drukspanning drukdiagonalen

De maximaal optredende dwarskracht V_{Ed} overschrijdt de rekenwaarde van de maximale dwarskracht in de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ niet, dus de drukdiagonalen voldoen.

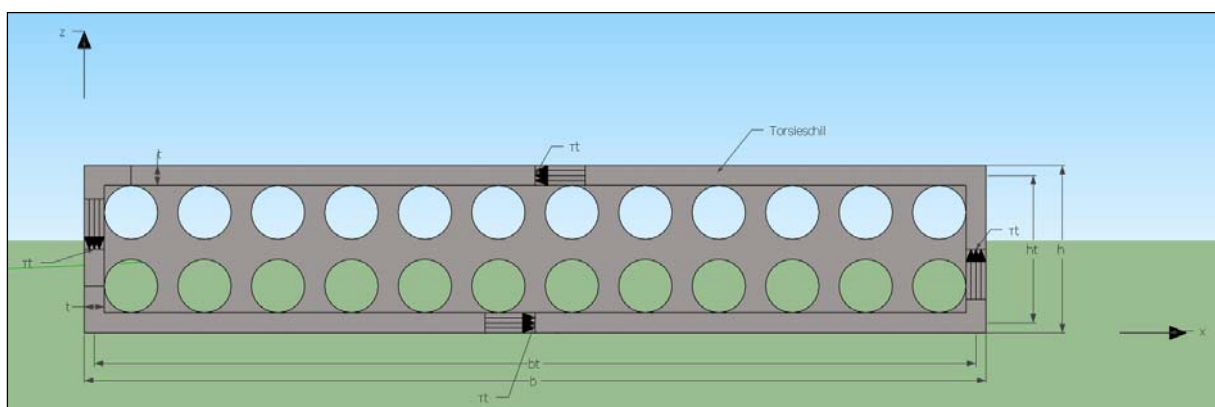
Wringing

Wringing (of torsie) treedt op in de constructie doordat deze in de lengte en breedte niet gelijkmatig ondersteund wordt. De totale belasting F_e is verdeeld over vier vlakken van gelijke grootte, op elk vlak $F_e/4$. De totale ondersteuning op de constructie is ook verdeeld over dezelfde vier vlakken. De totale reactiekracht F_r werkt echter maar twee van de vier vlakken, die niet naast elkaar liggen. Op deze beide vlakken werkt dan een reactiekracht van $F_e/2$ in tegengestelde richting aan de belasting. De resultanten van deze krachten, vermenigvuldigd met de arm $b/2$ of $l/2$, geven wringende momenten in beide richtingen. Dit is in Figuur 105 verduidelijkt.



Figuur 105 - Lastenverdeling en ongelijkmatige ondersteuning

Met onderstaande formule is de schuifkracht V_{Ed} door wringing in de verticale wanden berekend. Bij deze berekening is gerekend met de volledige breedte van een deel van de constructie in plaats van een strook van 5,5 meter breed. In Figuur 106 staat deze volledige breedte van de constructie waarin met wringing gerekend is en waarin dus schuifstromen optreden.



Figuur 106 - Doorsnede met schuifstromen

Het torsiemoment, de schuifspanning en de dwarskracht door wringing worden berekend met behulp van onderstaande formules.

$T_{Ed} = \frac{F_{E,tot}}{4} \cdot \frac{b}{2}$	$\tau_t = \frac{T_{Ed}}{2b_t \cdot h_t \cdot t}$	$V_{Ed} = \tau_t \cdot t \cdot h_t$	$b_t = b - t$	$h_t = h - t$
--	--	-------------------------------------	---------------	---------------

In Tabel 78 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn. Hierbij is de belastingfactor van 1,2 (voor permanente belasting) meegenomen.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde totale belasting op constructiedeel	$F_{E,tot}$	[kN]	1171597
Breedte constructie	b	[m]	67,5
Rekenwaarde wringend moment	T_{Ed}	[kNm]	9885349
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Breedte schuifstroom	b_t	[m]	66
Dikte torsieschil	t	[m]	1,5
Schuifspanning in torsieschil door wringing	τ_t	[N/mm ²]	4,44
Rekenwaarde schuifkracht door wringing	V_{Ed}	[kN]	73225

Tabel 78 - Berekening schuifkracht door wringing

Torsiewapening

De benodigde wapening door torsie is berekend met onderstaande formules. Deze wapening bestaat uit twee delen: schuifwapening A_{sw} (berekend met de eerste formule) en langswapening A_{sl} (berekend met de tweede formule) in het lijf.

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot h_m \cdot \cot\theta} \qquad \sum A_{sl} \cdot f_{yd} = V_{Ed} \cdot \cot\theta$$

In Tabel 79 staan de waarden die met bovenstaand formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Doorsnede afschuifwapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	6,124
Doorsnede langswapening door torsie	$\sum A_{sl}$	[mm ²]	421043
Breedte constructie	b	[m]	67,5
Benodigde langswapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sl}/s	[mm ² /mm]	6,238

Tabel 79 - Berekening wapening door torsie

Voor de afschuifwapening is gekozen voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 1225 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 6124 mm². De benodigde langswapening door torsie kan willekeurig over de hoogte aangebracht worden.

Drukspanning

Ook hier wordt gecontroleerd of de drukspanning de toelaatbare spanning niet overschrijdt met behulp van onderstaande formules.

$$\sigma_c < v \cdot f_{cd} \qquad \sigma_c = \frac{V_{Ed}}{t \cdot h_t \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \qquad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \qquad t_{eff} = A/u$$

In Tabel 80 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. Wat betreft de wanddikte t waarmee in de tweede formule gerekend wordt: er wordt gerekend met de kleinste waarde van de werkelijke wanddikte t of de effectieve wanddikte t_{eff} .

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	v	[-]	0,492
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Wanddikte	t	[m]	1,5
Omtrek doorsnede	u	[m]	160
Oppervlakte doorsnede	A	[m ²]	843,75
Effectieve wanddikte	t_{eff}	[m]	5,27
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	11
Rekenwaarde drukspanning	σ_c	[N/mm ²]	12,90

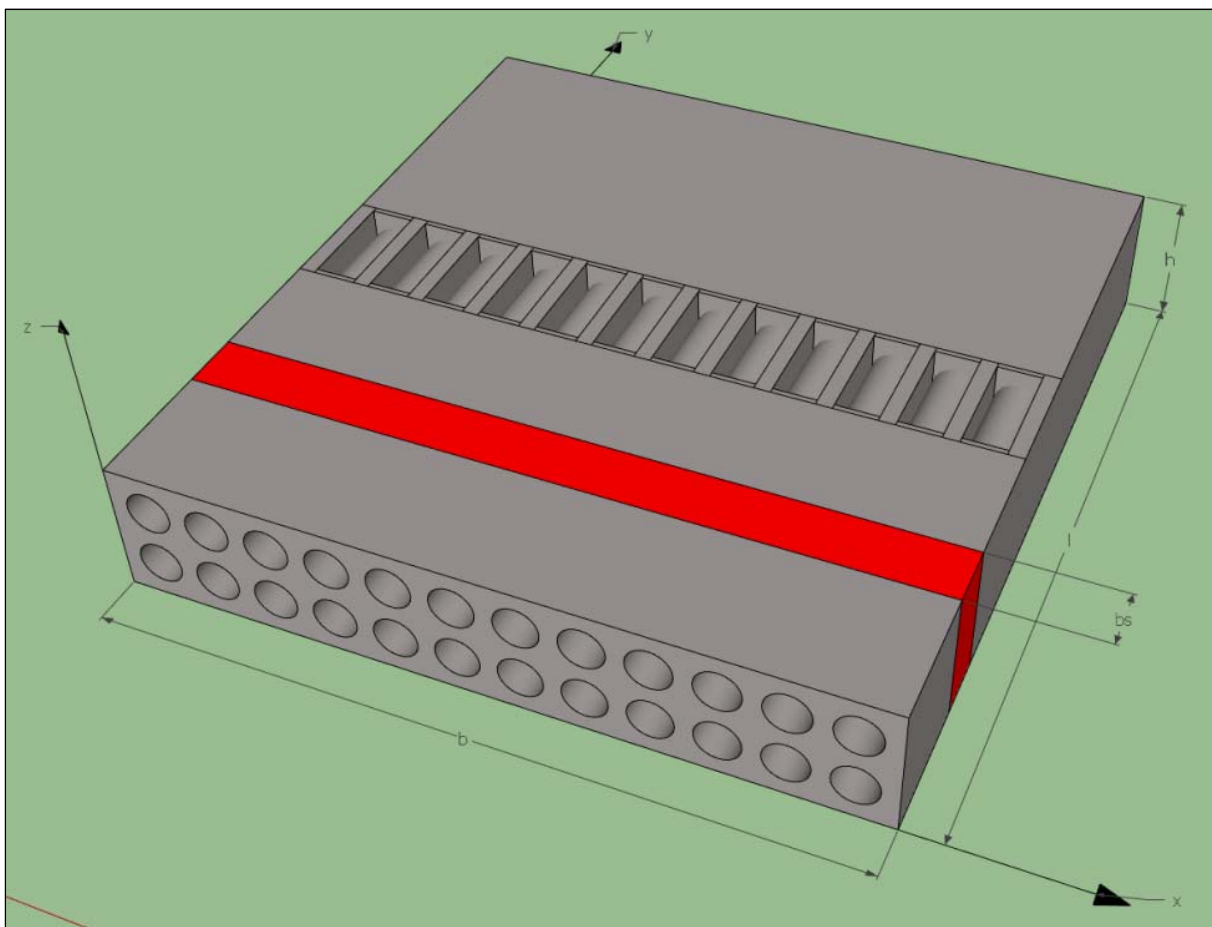
Tabel 80 - Berekening drukspanning torsie

De werkelijke dikte van de torsieschil t is kleiner dan de effectieve dikte van de torsieschil, er is dus gerekend met de werkelijke dikte. De rekenwaarde van de drukspanning σ_c ten gevolge van torsie is lager dan de toegestane drukspanning $v \cdot f_{cd} = 14,76 \text{ N/mm}^2$. De betonconstructie voldoet.

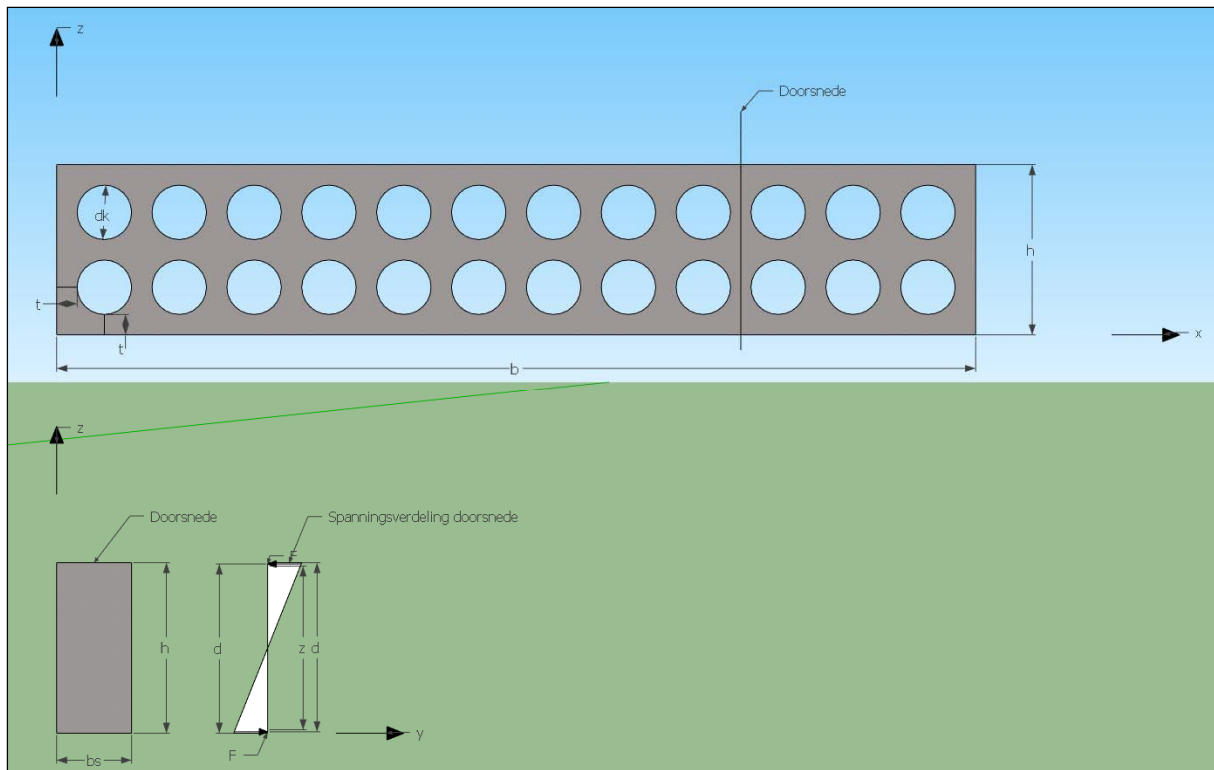
Breedterichting

Overzicht

Voor de uitwerking in de breedterichting is ook gerekend met een strook van 5,5 meter breed. Er is voor dezelfde strookbreedte gekozen als in de lengterichting omdat dit de berekeningen iets eenvoudiger maakt. Deze strook bevindt zich ongeveer op de helft van het midden. Dit is het rode gedeelte in Figuur 107. Als de strook in het midden genomen zou zijn, zou dit een heel ander aanzicht en een andere doorsnede opleveren dan nu het geval is. Dit is echter niet gedaan omdat dit alleen geldt voor het midden dat 10 meter breed is. Ten opzichte van de totale breedte van 70 meter is dat niet veel en waarschijnlijk is het ook niet maatgevend. In Figuur 108 staan de dwarsdoorsnede van de strook, de strookdoorsnede en de spanningsverdeling ten gevolge van buigend moment in de doorsnede. De strookdoorsnede is niet genomen ter plaatse van de kokers, maar bij de wanden. Op die plaatsen is immers ook de grootste weerstand tegen vervormingen.



Figuur 107 - Strook in breedterichting in afvoerdeel



Figuur 108 - Dwarsdoorsnede strook, strookdoorsnede en spanningsverdeling

Belasting

De totale belasting op het afvoerelement van 5,5 meter breed is 70613 kN. Dit bestaat uit het eigengewicht van 70613 kN en uit 6099 kN van de bovenbouw. Bij een lengte van 67,5 meter bedraagt de verdeelde belasting inclusief een belastingfactor van 1,2 (voor permanente belasting) 1364 kN per strekkende meter.

Bedding

De beddingsconstante is 50000 kN/m^3 . Dit is een gemiddelde waarde voor zand. Vermenigvuldigd met de breedte van het afvoerelement van 5,5 meter is dat 275000 kN/m^2 .

Stijfheid

In de breedterichting zijn dezelfde formules als die in de lengterichting gebruikt om de stijfheden voor de doorsneden te berekenen. In Tabel 81 staan de waarden van de grootheden van doorsnede van die met de formules uit Tabel 65 verkregen zijn.

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Betonddoorsnede	A_x	$[\text{m}^2]$	68,8
Massacentrum	z_x	$[\text{m}]$	6,25
Traagheidsmoment buiging	I_x	$[\text{m}^4]$	895,2
Buigstijfheid	EI_x	$[\text{kNm}^2]$	9667968750

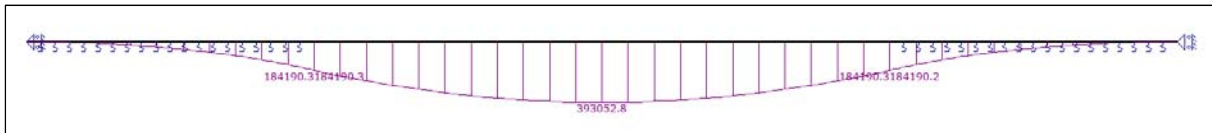
Tabel 81 - Uitwerking strookdoorsnede

Buiging

Door de belasting op de constructie treden er momenten en daardoor ook buiging in de constructie op. Afhankelijk van de ondersteuning van de constructie zal dit resulteren in sagging of hogging.

Sagging

Sagging is het moment dat ontstaat doordat de constructie in het midden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is aan de beide einden van de ligger, 17,5 meter aan beide zijden. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 109.

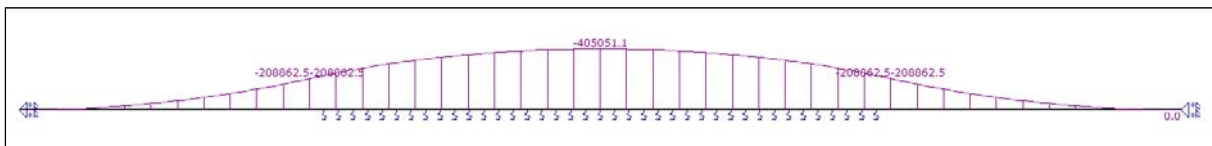


Figuur 109 - Momentenlijn (kN) door sagging

Het maximale moment is ongeveer 393053 kNm in het midden van de onderzijde van de constructie.

Hogging

Hogging is het moment dat ontstaat doordat de constructie aan de uiteinden niet ondersteund wordt. De opleggingslengte (elastische ondersteuning) is 50% van de totale lengte en is in het midden van de constructie gepositioneerd met een lengte van 35 meter. Dit geeft de momentenlijn zoals weergegeven in Figuur 110.



Figuur 110 - Momentenlijn (kNm) door hogging

Het maximale moment is ongeveer 405051 kNm in niet helemaal het midden van de bovenzijde van de constructie.

Buigingswapening

Buigingswapening is wapening die zich horizontaal in de lengterichting van de constructie bevindt, daar waar de grootste trekkrachten zijn door buiging. Dat is of helemaal onderin de constructie, bij sagging, of helemaal bovenin de constructie, door hogging. Met behulp van onderstaande formules is de wapeningsoppervlakte van de langswapening berekend per strook, dat is dus per 5,5 meter breed.

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

$$A_{sl} = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{A_c}$$

In Tabel 82 en Tabel 83 staan respectievelijk de waarden voor de onderzijde en bovenzijde van bovenstaande formules. De rekenwaarde van de vloeigrens van het wapeningsstaal f_{yd} is 435 N/mm². De inwendige hefboomsarm z is geschat op de hoogte van de constructie minus 0,5 meter. Dit is aan de veilige kant. De betondoorsnede A_c is gelijk aan de A_x .

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment onderzijde	$M_{Ed,o}$	[kNm]	393053
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,o}$	[kN]	32754
Doorsnede langswapening onderzijde	$A_{sl,o}$	[mm ²]	75335
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,11

Tabel 82 - Berekening wapeningsoppervlakte onderzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de onderzijde van de constructie is ongeveer 13697 mm² per meter.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Maatgevend moment bovenzijde	$M_{Ed,b}$	[kNm]	405051
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Maatgevende trekkracht	$F_{Ed,b}$	[kN]	33754
Doorsnede langswapening bovenzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	77635
Wapeningspercentage langswapening	ρ_l	[%]	0,11

Tabel 83 - Berekening wapeningsoppervlakte bovenzijde constructie per strook

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de bovenzijde van de constructie is ongeveer 14115 mm² per meter.

Minimum en maximum wapeningspercentage

Het minimum wapeningspercentage ρ_{min} en het maximum wapeningspercentage ρ_{max} in de breedterichting zijn op dezelfde manier berekend als in de lengterichting. In Tabel 84 staan de grenswaarden van de wapeningspercentages voor de langswapening. Het minimumwapeningspercentage aan onder onderzijde van de constructie is bij sagging en het minimumwapeningspercentage aan bovenzijde van de constructie is bij hogging.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum wapeningspercentage onderzijde	$\rho_{min,o}$	[%]	0,16
Minimum wapeningspercentage bovenzijde	$\rho_{min,b}$	[%]	0,16
Maximum wapeningspercentage	ρ_{max}	[%]	3,15

Tabel 84 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening

De berekende wapeningspercentages aan de onder- en bovenzijde van de constructie zijn lager dan het minimum wapeningspercentage. Er moet dus meer wapening in de doorsnede. Bij een minimaal wapeningspercentage van 0,16 % is in Tabel 85 de bijbehorende hoeveelheid langswapening per strook gegeven.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede langswapening onderzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	110139
Doorsnede langswapening bovenzijde	$A_{sl,b}$	[mm ²]	109359

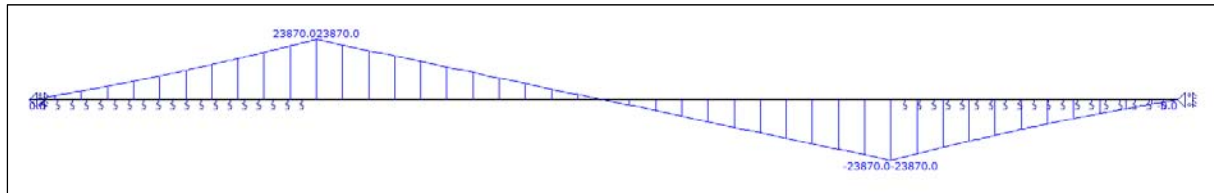
Tabel 85 - Gewijzigde wapeningsoppervlakten langswapening

Bovenstaande wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de onderzijde is ongeveer 20025 mm² per meter. De wapeningsoppervlakte van de langswapening aan de bovenzijde is ongeveer 19883 mm² per meter.

Afschuiving

Door de belasting op de constructie treden er dwarskrachten in de constructie op. Als deze groter zijn dan de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand dient schuifwapening toegepast te worden.

In Figuur 111 staat de dwarskrachtenlijn, waarin te zien is dat de maximaal optredende dwarskracht 23870 kN is. Deze waarde is de maatgevende dwarskracht.



Figuur 111 - Dwarskrachtenlijn (kN) in breedterichting

Eenvoudige berekening

Eerst is met een eenvoudige berekening gecontroleerd of de rekenwaarde van de schuifspanning groter of kleiner is dan minimale schuifspanningsweerstand v_{min} . Dit is gedaan met behulp van onderstaande formules.

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w d} \leq v_{min} \quad v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (d \text{ in mm})$$

Indien de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan de minimale schuifspanningsweerstand v_{min} moet schuifwapening toegepast worden.

In Tabel 86 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. De hoogte van de constructie geldt alleen daar waar geen gaten van de kokers aanwezig zijn. De effectieve hoogte d is de werkelijke hoogte minus de betondekking. Deze is hier geschat op 0,1 meter. In onderstaande tabel is b_w gelijk aan de strookbreedte b_s .

Grootheid	Symbol	Eenheid	Waarde
Hoogte constructie	d	[m]	12,4
Schaaleffect	k	[-]	1,13
Minimale schuifspanningsweerstand	v_{min}	[N/mm ²]	0,28
Rekenwaarde dwarskracht	V_{Ed}	[kN]	23870
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	5,5
Rekenwaarde schuifspanning	v_{Ed}	[N/mm ²]	0,35

Tabel 86 - Eenvoudige berekening schuifspanning

Omdat de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan schuifspanningsweerstand v_{min} zal er schuifwapening toegepast moeten worden.

Specifieke berekening

Nu uit bovenstaande eenvoudige berekening blijkt dat de schuifwapening nodig is, kan er met een specifiekere berekening nogmaals gekeken worden of schuifwapening daadwerkelijk nodig is. Dit is gedaan met behulp van onderstaande formules.

$$V_{Rd,c} = [(0,18/\gamma_c)k(100\rho_l f_{ck})^{1/3}]b_w d \quad \text{minimum: } V_{Rd,c} = v_{min} b_w d \quad \rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

Indien de rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} groter is dan de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$ moet schuifwapening toegepast worden.

In Tabel 87 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn. De doorsnede van de langswapening A_{sl} is gelijk aan de langswapening aan de bovenzijde $A_{sl,b}$ (omdat hier minder langswapening is dan aan de onderzijde van de constructie).

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Doorsnede langswapening	A_{sl}	[mm ²]	109359
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	5,5
Hoogte constructie	d	[m]	12,4
Langswapeningspercentage	ρ_l	[-]	0,0016
Materiaalfactor	γ_c	[-]	1,5
Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$V_{Rd,c}$	[kN]	17823
Rekenwaarde schuifspanningsweerstand (zonder dwarskrachtwapening)	$v_{Rd,c} (v_{min})$	[N/mm ²]	0,26

Tabel 87 - Specifiekere berekening schuifspanning

De minimale schuifspanningsweerstand v_{min} in bovenstaande formule kan in deze berekening gezien worden als de rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c}$. De rekenwaarde van de schuifspanning v_{Ed} is nog steeds groter dan de schuifspanningsweerstand $v_{Rd,c} (v_{min})$. Er zal dus schuifwapening toegepast moeten worden.

Afschuifwapening

Afschuifwapening is wapening die aangebracht wordt om de schuifspanningsweerstand te vergroten. Deze wapening bevindt zich verticaal langs de rand van de constructie(elementen) en dwars op de langswapening. De afschuifwapening is berekend met onderstaande formule.

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot \cot\theta \cdot f_{ywd}} \quad \rho_w = \frac{A_{sw}/s}{b_w}$$

In Tabel 88 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde dwarskracht	V_{Ed}	[kN]	23870
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Rekenwaarde vloeigrens afschuifwapening	f_{ywd}	[N/mm ²]	435
Doorsnede afschuifwapening per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	1,830
Wapeningspercentage schuifwapening	ρ_w	[%]	0,03

Tabel 88 - Berekening afschuifwapening

Ook in de breedterichting is gekozen voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 366 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 1830 mm².

Minimum schuifwapeningspercentage en maximale staafafstand

Het minimum schuifwapeningspercentage $\rho_{w,min}$ en de maximale staafafstand $s_{l,max}$ zijn gelijk aan die in de lengterichting. In Tabel 89 staan deze waarden.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Minimum schuifwapeningspercentage	$\rho_{w,min}$	[%]	0,11
Maximum staafafstand	$s_{l,max}$	[m]	9

Tabel 89 - Grenswaarden wapeningspercentages langswapening

Het berekende schuifwapeningspercentage ρ_w is kleiner dan de minimale waarde $\rho_{w,min}$. Er moet meer schuifwapening in de lengterichting in de constructie komen. Bij een minimaal

afschuifwapeningspercentage $\rho_{w,min}$ van 0,11 % hoort een doorsnede van de afschuifwapening per eenheid van lengte A_{sw}/s van 5,903 mm²/mm. Bij een staafafstand s van 200 mm is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 1181 mm².

De staafafstand s is kleiner dan de maximale staafafstand $s_{l,max}$ en voldoet.

Spanning drukdiagonalen

De spanning in de drukdiagonalen dienen de maximale drukspanning niet te overschrijden. De rekenwaarde van de maximale dwarskracht, begrensd door het bezwijken van de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ staat in onderstaande formule.

$$V_{Rd,max} = b_w z v f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

In Tabel 90 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn.

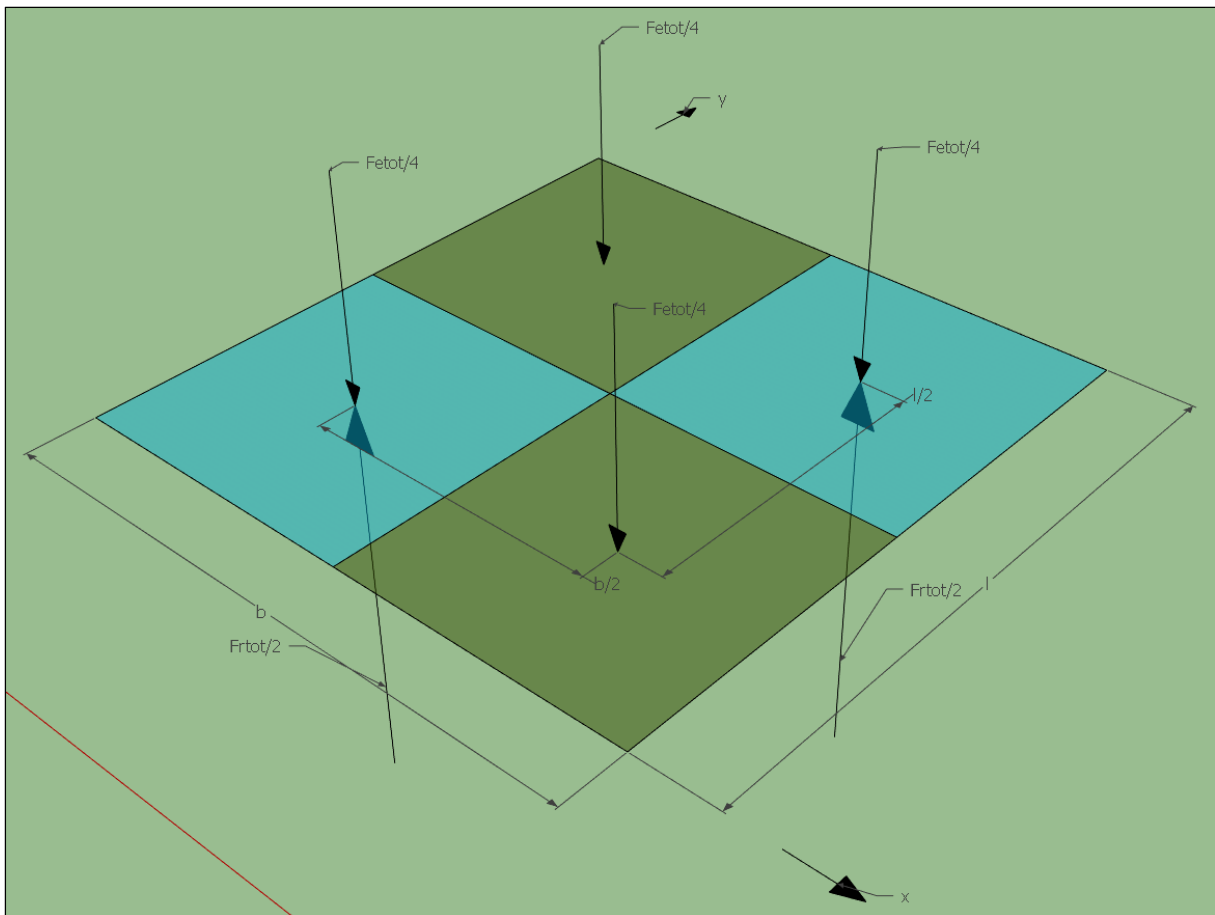
Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	v	[-]	0,492
Inwendige hefboomsarm	z	[m]	12
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Kleinste breedte betondoorsnede trekzone	b_w	[m]	5,5
Rekenwaarde maximale dwarskracht drukdiagonalen	$V_{Rd,max}$	[kN]	335917

Tabel 90 - Berekening drukspanning drukdiagonalen

De maximaal optredende dwarskracht V_{Ed} overschrijdt de rekenwaarde van de maximale dwarskracht in de drukdiagonalen $V_{Rd,max}$ niet, dus de drukdiagonalen voldoen.

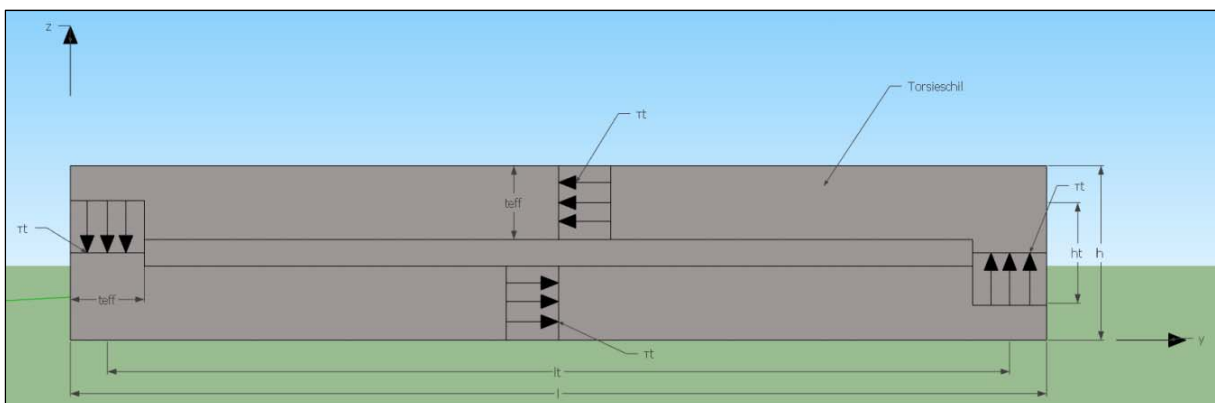
Wringing

Wringing (of torsie) treedt op in de constructie doordat deze in de lengte en breedte niet gelijkmatig ondersteund wordt. De achterliggende theorie is in de vorige paragraaf gegeven. Voor de duidelijkheid is hier opnieuw de afbeelding van de theorie gegeven in Figuur 112.



Figuur 112 - Lastenverdeling en ongelijkmatige ondersteuning

Met onderstaande formule is de schuifkracht V_{Ed} door wringing in de verticale wanden berekend. Bij deze berekening is gerekend met de volledige breedte van een deel van de constructie in plaats van een strook van 5,5 meter breed. In Figuur 113 staat deze volledige breedte van de constructie waarin met wringing gerekend is en waarin dus schuifstromen optreden. Deze doorsnede is gemaakt ter plaatse van de wanden en niet ter plaatse van de kokers, omdat alleen de wanden de schuifstroom door wringing op kunnen nemen.



Figuur 113 - Doorsnede met schuifstromen

Om de schuifspanning en de dwarskracht door torsie in deze doorsnede te berekenen, wordt er gebruik gemaakt van het principe dat er een torsieschil met dikte t_{eff} is. Het torsiemoment, de schuifspanning en de dwarskracht door wringing kunnen ook berekend worden met behulp van onderstaande formules.

$$T_{Ed} = \frac{F_{E,tot}}{4} \cdot \frac{l}{2} \quad \tau_t = \frac{T_{Ed}}{2l_t \cdot h_t \cdot t_{eff}} \quad V_{Ed} = \tau_t \cdot t_{eff} \cdot h_t \quad l_t = l - t_{eff} \quad h_t = h - t_{eff}$$

In Tabel 91 staan de waarden die met bovenstaande formules verkregen zijn. Hierbij is de belastingfactor van 1,2 (voor permanente belasting) meegenomen.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Rekenwaarde totale belasting op constructiedeel	$F_{E,tot}$	[kN]	1171597
Lengte constructie	l	[m]	70,0
Rekenwaarde torsiemoment	T_{Ed}	[kNm]	10251473
Omtrek doorsnede	u	[m]	165
Oppervlakte doorsnede	A	[m ²]	875
Effectieve dikte torsieschil	t_{eff}	[m]	5,30
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	7,2
Lengte schuifstroom	l_t	[m]	64,7
Schuifspanning in torsieschil door wringing	τ_t	[N/mm ²]	2,08
Rekenwaarde schuifkracht door wringing	V_{Ed}	[kN]	79227

Tabel 91 - Berekening schuifkracht door wringing

Torsiewapening

De benodigde wapening door torsie is berekend met onderstaande formules. Deze wapening bestaat uit twee delen: schuifwapening A_{sw} (berekend met de eerste formule) en langs wapening A_{sl} (berekend met de tweede formule) in het lijf.

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot h_t \cdot \cot\theta} \quad \sum A_{sl} \cdot f_{yd} = V_{Ed} \cdot \cot\theta$$

In Tabel 92 staan de waarden die met bovenstaand formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	7,2
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Doorsnede afschuifwapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sw}/s	[mm ² /mm]	10,128
Doorsnede langswapening door torsie	$\sum A_{sl}$	[mm ²]	455554
Lengte	l	[m]	70,0
Benodigde langswapening door torsie per eenheid van lengte	A_{sl}/s	[mm ² /mm]	6,508

Tabel 92 - Berekening wapening door torsie

Voor de afschuifwapening is gekozen voor een staafafstand s van 200 mm. De doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} is dan 2026 mm². Per meter is de doorsnede van de afschuifwapening A_{sw} 10128 mm². De benodigde langswapening door torsie kan willekeurig over de hoogte aangebracht worden.

Drukspanning

Ook hier wordt gecontroleerd of de drukspanning de toelaatbare spanning niet overschrijdt met behulp van onderstaande formules.

$$\sigma_c < v \cdot f_{cd} \quad \sigma_c = \frac{V_{Ed}}{t_{eff} \cdot h_t \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \quad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

In Tabel 93 staan de waarden die door middel van bovenstaande formules verkregen zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde
Sterktereductiefactor gescheurd beton	v	[-]	0,492
Hoek tussen drukdiagonalen en as ligger	θ	[°]	21,8
Effectieve wanddikte	t_{eff}	[m]	5,30
Hoogte schuifstroom	h_t	[m]	7,20
Rekenwaarde drukspanning	σ_c	[N/mm ²]	6,03

Tabel 93 - Berekening drukspanning torsie

De rekenwaarde van de drukspanning σ_c ten gevolge van torsie is lager dan de toegestane drukspanning $v \cdot f_{cd} = 14,76 \text{ N/mm}^2$. De betonconstructie voldoet.

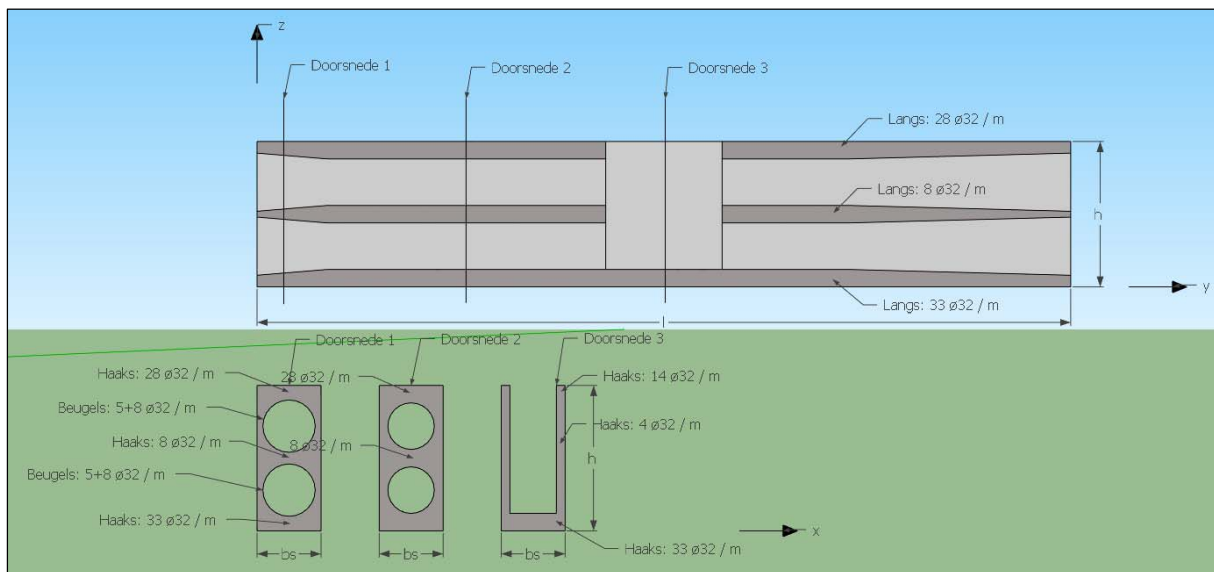
Afsluiting

Wapening

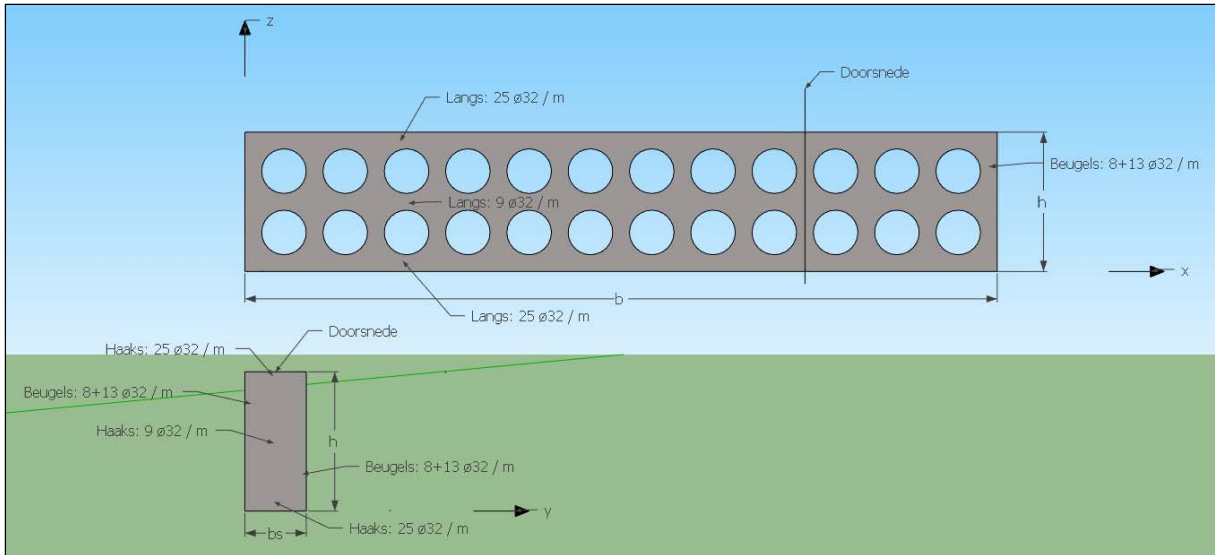
In Tabel 94 is een overzicht gegeven van alle benodigde wapeningsoppervlaktes, wapeningspercentages en een voorstel voor welke wapening aangebracht kan worden. In Figuur 114 en Figuur 115 staat waar de wapening zich in de constructie in respectievelijk de lengte- en breedterichting bevindt.

Benodigde wapening per strekkende meter				Voorgestelde wapening	
		Oppervlakte [mm ² /m]	Percentages [%]	Configuratie [n ømm/m]	Oppervlakte [mm ² /m]
Lengterichting	Buiging – boven	22379	0,50	28 ø32	22519
	Buiging – onder	26144	0,58	33 ø32	26540
	Afschuiving – beugels	3660	0,24	5 ø32	4021
	Torsie – beugels	6124	-	8 ø32	6434
	Torsie – langs	6238	-	8 ø32	6434
Dwarsrichting	Buiging – boven	19883	0,16	25 ø32	20106
	Buiging – onder	20025	0,16	25 ø32	20106
	Afschuiving – beugels	5903	0,11	8 ø32	6434
	Torsie – beugels	10128	-	13 ø32	10455
	Torsie – langs	6508	-	9 ø32	7238

Tabel 94 - Overzicht wapening in constructie



Figuur 114 - Locatie wapening lengterichting



Figuur 115 - Locatie wapening breedterrichting