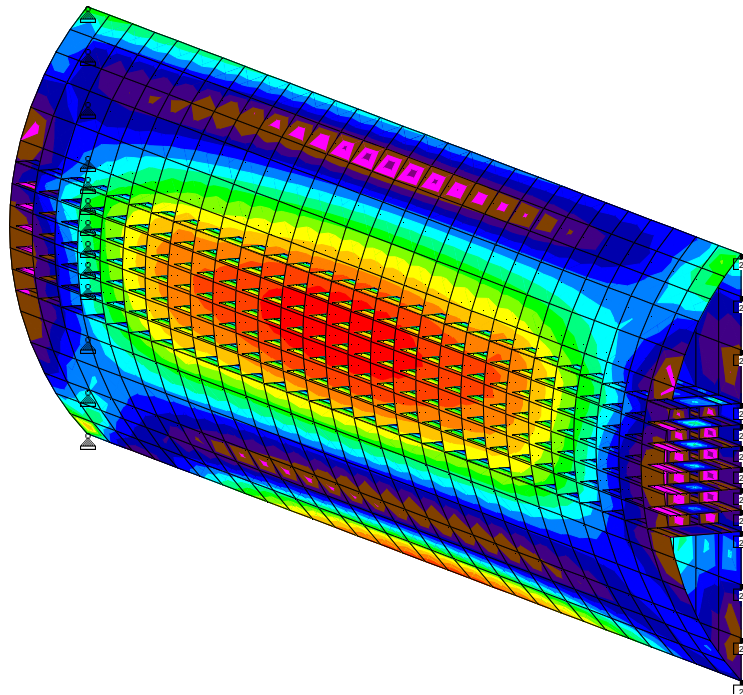


# Stormvloedkering in de Westerschelde



J.M. van der Meer  
Delft, maart 2006



# Stormvloedkering in de Westerschelde

Datum: maart 2006  
Plaats: Delft

Student: J.M. van der Meer  
Studienummer: 1058002

Afstudeercommissie: Prof. drs. ir. J.K. Vrijling  
(*voorzitter*)  
Ir. W.F. Molenaar  
(*begeleider sectie Hydraulic Engineering*)  
Dr. ing. A. Romeijn  
(*begeleider sectie Structural Engineering*)  
Ir. K. Boorsma  
(*directeur Ingenieursbureau Boorsma B.V. te Drachten*)

Afstudeerproject: Technische Universiteit Delft  
Faculteit: Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Afstudeerrichting: Structural Engineering  
Specialisatie: Hydraulic Structures



## Voorwoord

In het kader van het afstudeerproject bij de sectie 'Structural Engineering' van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft, is onderzoek gedaan naar een stormvloedkering in de Westerschelde. Na een geslaagde stageperiode bij Ingenieursbureau Boorsma. B.V. te Drachten is in opdracht van dit bureau gestart met het onderzoeken van de situatie rond de Westerschelde en een vooronderzoek naar bestaande stormvloedkeringen. Het onderzoek heeft zich steeds meer toegespitst waarbij uiteindelijk in detail is ingegaan op het ontwerp van een stalen sectordeur. Hierbij is gebruik gemaakt van het modelleringprogramma STAADpro<sup>®</sup>.

Het onderwerp en de invulling van het afstudeerproject sloten goed aan bij de specialisatie, constructieve waterbouwkunde, die ik tijdens mijn studie heb gevolgd. Dit is een combinatie van waterbouwkunde en constructiemechanica en deze vakgebieden komen ook duidelijk terug in het onderzoek. Ik wil bij deze de heer ir. K. Boorsma bedanken voor het aanbieden van deze opdracht waarin het mogelijk was deze twee vakgebieden te combineren. Daarbij is het onderwerp op dit moment actueel gezien de actualisering van het Sigmaplan in Vlaanderen en de publicaties van Ingenieursbureau Boorsma B.V. in de vakbladen.

Naast de heer ir. K. Boorsma wil ik de overige leden van mijn afstudeercommissie bedanken voor het beoordelen van de conceptverslagen en het sturen van het onderzoek; voorzitter prof. drs. ir. J.K. Vrijling in het bijzonder voor het leiden van de bijeenkomsten van de commissie; de heer ir. W.F. Molenaar als begeleider vanuit de sectie 'Hydraulic Engineering' voor de dagelijkse begeleiding en het gegeven advies en de heer dr. ing. A. Romeijn als begeleider van de sectie 'Structural Engineering' voor zijn constructieve aanwijzingen en de introductie in het programma STAADpro<sup>®</sup>.

Delft, maart 2006

J.M. van der Meer

## Samenvatting

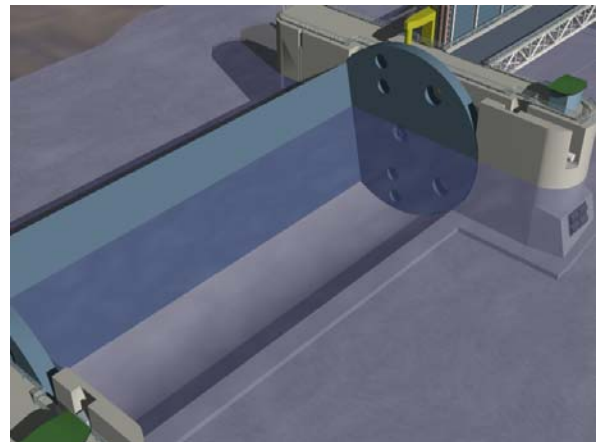
Na de stormvloed in 1953 heeft Nederland het Deltaplan ontwikkeld waarbij bijna alle zeearmen in het zuidwesten van Nederland zijn afgesloten. Alleen de Westerschelde is nog helemaal open, met name omdat de scheepvaart van en naar Antwerpen hier van groot belang is. België heeft pas na de stormvloed van 1976 het Sigmoplan opgesteld waarmee Vlaanderen beschermd moet worden tegen overstromingen. Dit plan is echter nooit voltooid en België loopt hierdoor ver achter op Nederland. Ingenieursbureau Boorsma B.V. te Drachten heeft een oplossing voor dit probleem gepubliceerd waarbij wordt uitgegaan van een stormvloedkering in de Westerschelde. In dit afstudeerproject is nader onderzoek gedaan naar deze oplossing.

In het vooronderzoek zijn verschillende oplossingen van stormvloedkeringen bekeken en is de situatie van de Westerschelde nader onderzocht. Hierna zijn verschillende oplossingen voor de problematiek bekeken:

- Dijkverhogingen
- Overloopgebieden
- Overschelde
- Stormvloedkering
- Verbreding kustgebied
- Westerschelde afdammen tot een zoetwatermeer

Deze oplossingen zijn met elkaar vergeleken en hieruit blijkt dat de stormvloedkering een hele effectieve oplossing is waarbij de bestaande functies van de Westerschelde behouden kunnen blijven en het achterland goed tegen stormvloeden kan worden beschermd.

De oplossing van de stormvloedkering is verder uitgewerkt waarbij een locatie is bepaald en een indeling voor de kering is gemaakt. In het ontwerp van Ingenieursbureau Boorsma wordt uitgegaan van sectordeuren in de scheepvaartdoorgangen met een maximale overspanning van 100-150m voor de grote containerschepen. Sectordeuren zijn eerder toegepast in de Theems en in de Eems met een overspanning van ongeveer 60m. Voor het ontwerp van de stormvloedkering dat voor dit afstudeerproject is gemaakt wordt ook uitgegaan van sectordeuren in de scheepvaartopeningen en is een maximale overspanning van 145m toegepast in de hoofdscheepvaartopening. Er is onderzocht in hoeverre deze sectordeuren geschikte afsluitmiddelen zijn voor de scheepvaartopeningen in de Westerschelde en wat de gevolgen zijn van de schaalvergroting.

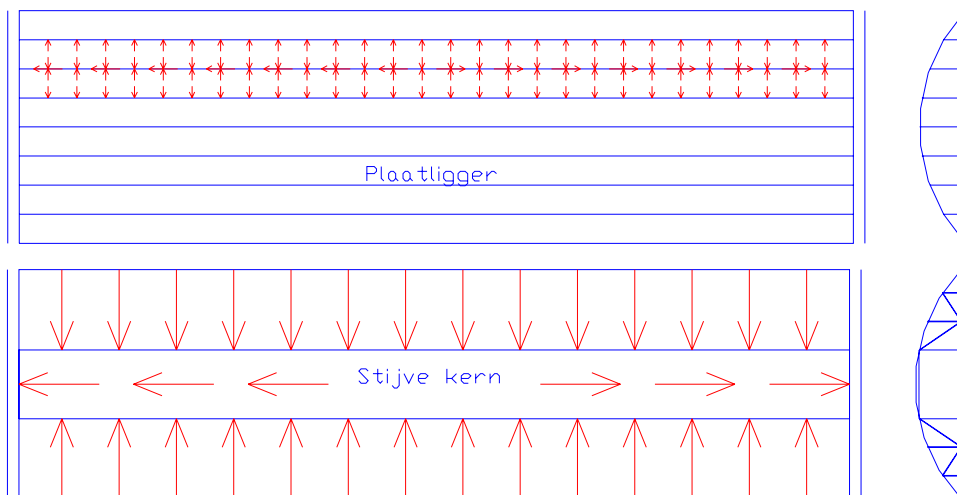


*Principeschets sectordeur [www.emssperrwerk.de]*

Voor de sectordeuren geldt dat dit principe geschikt is voor de situatie van de Westerschelde omdat de deuren tweezijdig het water kunnen keren en een onbepaalde doorvaarthoogte voor de scheepvaart garanderen. Dit laatste wordt bewerkstelligd doordat een sectordeur tijdens normale omstandigheden in een drempel op de bodem ligt opgeborgen.

Om te onderzoeken wat de gevolgen van de beoogde schaalvergroting zijn voor een sectordeur is voor de sectordeur van 145m een ontwerp gemaakt waarbij eerst de geometrie, het mechanicaschema en de belastingen op de deur zijn bepaald.

Bij het ontwerp van de sectordeur is vooral gekeken naar de constructie en de uitvoering van de grote overspanning. Hierbij is onder andere onderzocht wat de gevolgen zijn voor het hoofddraagsysteem van de constructie. In de bestaande uitvoeringen worden plaatliggers toegepast, maar er is gebleken dat dit systeem voor de grote overspanning niet meer voldoet. Daarom is er een ander systeem bedacht waarbij wordt uitgegaan van een stijve kern in het midden van de deur. Via de uitkragingen worden de belastingen naar de stijve kern overgebracht waarna deze de krachten afdraagt naar de opleggingen. Het principe van beide systemen is hieronder weergegeven.



*Links: vooraanzichten van een sectordeur. Rechts: zijaanzichten.  
Boven: krachtafdracht via plaatliggers. Onder: krachtafdracht via stijve kern.*

Voor het systeem van de stijve kern is de maatgevende doorsnede gedimensioneerd. Aan de hand van dit ontwerp is de deur hierna ingevoerd en gecontroleerd met behulp van het programma STAADpro op sterkte, stijfheid en trillingen. Na een eerste invoer is het ontwerp geoptimaliseerd waarbij de kern onder andere is aangepast aan de momentenlijn. Conclusies van de controles met behulp van het modelleringsprogramma zijn de volgende: het bedachte systeem van de stijve kern voldoet wat betreft de sterkte en is beter dan het systeem van de plaatliggers, maar de toegepaste plaatdiktes (maximaal 130mm) en de vervormingen (maximaal 945mm) zijn erg groot.

Doordat het eigengewicht van de constructie ook erg groot is (ongeveer 15000 ton) kan de bouwmethode zoals die bij de bestaande constructie in de Eems is toegepast niet worden uitgevoerd. Hierbij werd de deur in een geheel op zijn plaats gehesen. Omdat lassen van grote plaatdiktes op de bouwplaats erg bewerkelijk is lijkt de methode waarbij de deur in een geheel op een drijfconstructie naar de bouwplaats wordt gevaren de meest geschikte oplossing.

Als aanbeveling voor het ontwerp van de stormvloedkering in geheel is gesteld dat met een stroommodel zou moeten worden gekeken naar een precieze locatiebepaling en indeling van de kering waarbij de invloed op het getij en de stroming op de Westerschelde wordt meegenomen. Voor de grote sectordeur wordt aanbevolen om te kijken in hoeverre zo een hele grote overspanning daadwerkelijk nodig is. Naast de invloed van de schaalvergroting moet ook worden gekeken naar andere onderdelen van de sectordeur, zoals de bewegingswerken en de draaiax. Omdat de vervormingen van de deur bij het beschouwde ontwerp erg groot waren moet nauwkeurig worden gekeken wat de gevolgen van deze vervorming zijn en hoe deze het beste kunnen worden voorkomen.





## Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b> .....	<b>v</b>
<b>Samenvatting</b> .....	<b>vi</b>
<b>H1 Inleiding</b> .....	<b>1</b>
1.1 Aanleiding tot het afstudeeronderzoek.....	1
1.2 Doelstelling en vraagstelling.....	1
1.3 Structuurbeschrijving van het verslag.....	1
<b>H2 Stormvloedkeren in een historisch perspectief</b> .....	<b>2</b>
2.1 De geschiedenis van het stormvloedkeren.....	2
2.2 De ontwikkeling van zeekeringen.....	4
<b>H3 Situatiebeschrijving Westerschelde</b> .....	<b>6</b>
3.1 Algemeen.....	6
3.2 Functies van de Westerschelde.....	7
3.2.1 Scheepvaart.....	8
3.2.2 Natuurlijke waarden.....	9
3.3 Regiem Westerschelde.....	10
3.3.1 Getij.....	10
3.3.2 Stroomrichting en stroomsnelheden.....	12
3.3.3 Sedimenttransport.....	13
3.3.4 Afvoer Schelde.....	13
3.4 Overstromingen.....	14
3.4.1 Oorspronkelijk Sigmaplan.....	15
3.4.2 Geactualiseerde Sigmaplan.....	16
<b>H4 Oplossingen Westerschelde</b> .....	<b>17</b>
4.1 Het nul-alternatief.....	18
4.2 Dijkverhogingen.....	18
4.3 Overloopgebieden.....	19
4.4 Overschelde.....	20
4.5 Stormvloedkering.....	20
4.6 Verbreding kustgebied.....	21
4.7 Westerschelde afdammen tot zoetwatermeer.....	22
4.8 Afweging.....	23
4.9 Keuze oplossing.....	23
<b>H5 Uitwerking oplossing stormvloedkering</b> .....	<b>24</b>
5.1 Locatiekeuze stormvloedkering Westerschelde.....	24
<b>H6 Programma van Eisen en Randvoorwaarden</b> .....	<b>28</b>
6.1 Functioneel PvE.....	28
6.2 Technisch PvE.....	30
6.3 Randvoorwaarden.....	33
<b>H7 Schetsontwerpen stormvloedkering</b> .....	<b>34</b>
7.1 Ontwerpmethode.....	34
7.2 Keuze verticale hefschuiven.....	34
7.3 Vergelijking rising sectordeur en horizontale sectordeur.....	35

<b>H8</b>	<b>Dimensionering stormvloedkering</b> .....	<b>36</b>
	8.1 Kerende hoogte.....	36
	8.1.1 Berekening golfoverslaghoogte.....	37
	8.2 Indeling kering.....	39
	8.2.1 Scheepvaartopeningen.....	39
	8.2.2 Hefschuiven.....	39
	8.2.3 Totaaloverzicht indeling kering.....	40
<b>H9</b>	<b>Uitwerking hoofdscheepvaartopening</b> .....	<b>42</b>
	9.1 Onderzoeksvragen.....	42
	9.2 Verwachtingen.....	42
<b>H10</b>	<b>Constructief ontwerp sectordeur</b> .....	<b>44</b>
	10.1 Geometrie.....	44
	10.2 Mechanica schematisering.....	47
	10.3 Belastingen.....	49
	10.3.1 Ontwerp met betrekking tot vermoeiingssterkte.....	49
	10.3.2 Belastingsituaties.....	50
	10.3.3 Belastingfactoren.....	52
	10.4 Materiaalkeuze.....	53
<b>H11</b>	<b>Dimensionering van de stalen sectordeur</b> .....	<b>54</b>
	11.1 Plaatligger.....	54
	11.2 Stijve kern.....	57
<b>H12</b>	<b>Controle met behulp van STAADpro</b> .....	<b>58</b>
	12.1 Invoer ontwerp in STAADpro.....	58
	12.1.1 Randvoorwaarden opstellen.....	58
	12.1.2 Invoer geometrie.....	59
	12.1.3 Invoer profieleeigenschappen.....	59
	12.1.4 Aanbrengen belasting.....	60
	12.1.5 Aanbrengen randvoorwaarden.....	61
	12.2 Resultaten van eerste invoer.....	62
	12.2.1 Controle op sterkte.....	63
	12.2.2 Controle op stijfheid.....	65
	12.2.3 Controle trillingen.....	66
	12.2.4 Conclusies na eerste invoer.....	67
	12.3 Tweede invoer, eerste stap optimalisatie.....	68
	12.4 Derde invoer, tweede stap optimalisatie.....	68
	12.4.1 Aanpassen flenzen.....	69
	12.4.2 Aanpassen lijven.....	70
	12.4.3 Resultaten tweede stap optimalisatie.....	70
	12.5 Conclusies resultaten STAADpro.....	71
	12.5.1 Conclusies sterkte constructie.....	71
	12.5.2 Conclusies stijfheid constructie.....	72
<b>H13</b>	<b>Uitvoering sectordeur</b> .....	<b>74</b>
	13.1 Bouwmethode 1: Eén geheel op pontons.....	74
	13.2 Bouwmethode 2: Eén geheel als schip.....	75
	13.3 Bouwmethode 3: Opgedeeld in lengterichting.....	76
	13.4 Bouwmethode 4: Opgedeeld in kern en uitkragingen.....	76
	13.5 Conclusie.....	77
<b>H14</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>78</b>
	14.1 Conclusies.....	78
	14.2 Aanbevelingen.....	80

<b>Literatuur</b> .....	<b>81</b>
<b>Bijlagen</b> .....	<b>83</b>
Bijlage 1: Overzicht verschillende soorten stormvloedkeringen.....	84
Bijlage 2: Beschrijving verschillende stormvloedkeringen.....	86
B2.1 Oosterscheldekering.....	87
B2.2 Maeslantkering.....	89
B2.3 Theemskering.....	91
B2.4 Eemskering.....	94
B2.5 Kering St. Petersburg.....	97
B2.6 Kering Venetië.....	100
B2.7 Kering Cardiff Bay.....	103
B2.8 Kering New Orleans.....	105
B2.9 Bronnenlijst beschrijving keringen.....	107
Bijlage 3: Geactualiseerd Sigmaplan.....	109
Bijlage 4: Locatiekaarten.....	111
B4.1 Overzicht locatie 1.....	111
B4.2 Overzicht locatie 2.....	112
B4.3 Overzicht locatie 3.....	113
Bijlage 5: Artikel Hyundai, toekomstige containerschepen.....	114
Bijlage 6: Gegevens Rijkswaterstaat voor bodemprofiel.....	115
Bijlage 7: Bepaling toelaatbaar overslagdebiet.....	116
Bijlage 8: Pijlers hefschuiven, berekening stabiliteit.....	117
Bijlage 9: Berekening golfbelasting.....	122
Bijlage 10: Uitvoer Excel-bestanden.....	124
B10.1 Koker 1.....	124
B10.2 Koker 2.....	125
B10.3 Koker 3.....	126
Bijlage 11: Resultaten plaatsspanningen uit STAADpro, eerste invoer.....	127
B11.1 Belasting 1: Stormvloed.....	127
B11.2 Belasting 2: y-eigen.....	128
B11.3 Belasting 3: z-eigen.....	129
B11.4 Belasting 4: Combinatie.....	130
B11.5 Elementen opleggingen.....	131
B11.6 Elementen midden constructie.....	132
Bijlage 12: Resultaten plaatsspanningen uit STAADpro, derde invoer.....	133
B12.1 Belasting 1: Stormvloed.....	133
B12.2 Belasting 2: y-eigen.....	134
B12.3 Belasting 3: z-eigen.....	135
B12.4 Belasting 4: Combinatie.....	136
B12.5 Elementen opleggingen.....	137
B12.6 Elementen midden constructie.....	138

# H1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding tot het afstudeeronderzoek

Nederland heeft vanaf de stormvloed in 1953 met behulp van het Deltaplan alle zeearmen in het zuidwesten afgesloten, ofwel permanent ofwel met behulp van beweegbare keringen. Alleen de Westerschelde is open gebleven. In Vlaanderen heeft men ook een plan om het land tegen stormvloed te beschermen, het Sigmaplan. Wat veiligheid betreft ligt dit plan echter ver achter op het Deltaplan. Dit is de reden dat men in België op dit moment druk bezig is om het Sigmaplan te herzien. In het blad 'De Ingenieur' (uitgave 11, 18 juni 2004) heeft ir. K. Boorsma zijn eigen plan gepubliceerd om de problematiek rondom de Westerschelde aan te pakken. In dit plan wordt een oplossing beschreven die uitgaat van een stormvloedkering in de Westerschelde. Een doorvaartopening van 100 tot 150 meter moet in deze kering de doorgang verlenen aan schepen die over de Westerschelde de haven van Antwerpen willen bereiken. Er wordt voorgesteld om deze opening met een sectordeur af te sluiten zoals dit ook gedaan is in de Eems nabij Gandersum (Duitsland). In het studie-essay 'Westerschelde-estuarium' (Ingenieursbureau Boorsma b.v., maart 2004) wordt hierover opgemerkt dat deze keuze enige nadere en vergelijkende studies met andere oplossingen en toepassingen vergt. Dit afstudeeronderzoek is hier een direct gevolg van.

## 1.2 Doelstelling en vraagstelling

Met dit afstudeeronderzoek is geprobeerd om inzicht te krijgen in de situatie van de Westerschelde en in de mogelijkheden van oplossingen met stormvloedkeringen. Met deze kennis is geprobeerd om de volgende vragen te beantwoorden:

- Is een stormvloedkering een geschikte oplossing voor de situatie van de Westerschelde?
- Is de sectordeur zoals voorgesteld in het plan van ir. K. Boorsma een geschikte oplossing voor het afsluiten van de doorvaartopening?
- De grootste overspanning die tot nu toe met de voorgestelde sectordeur is afgesloten bedraagt ongeveer 60 meter. In het plan van ir. K. Boorsma wordt een overspanning van 100 tot 150 meter voorgesteld. Wat zijn de gevolgen van deze schaalvergroting?

## 1.3 Structuurbeschrijving van het verslag

De eerste hoofdstukken zijn beschrijvend over de geschiedenis van het stormvloedkeren (H2) en de situatie van de Westerschelde (H3). Hierna wordt een overzicht gegeven welke oplossingen voor de situatie van de Westerschelde in ogenschouw genomen moeten worden. Er wordt gekozen om de stormvloedkering verder uit te werken. In hoofdstuk vijf tot acht wordt de gehele kering uitgewerkt waarbij wordt gekeken naar de locatie, de gestelde eisen, de verschillende oplossingen en de belangrijkste afmetingen. Vanaf hoofdstuk negen wordt verder ingegaan op de uitwerking en het ontwerp van de hoofdscheepvaartopening. In hoofdstuk twaalf zal dit ontwerp worden gecontroleerd met behulp van het programma STAADpro. Aan het eind van het rapport (H14) worden de conclusies en aanbevelingen gegeven.

## H2 Stormvloedkeren in een historisch perspectief

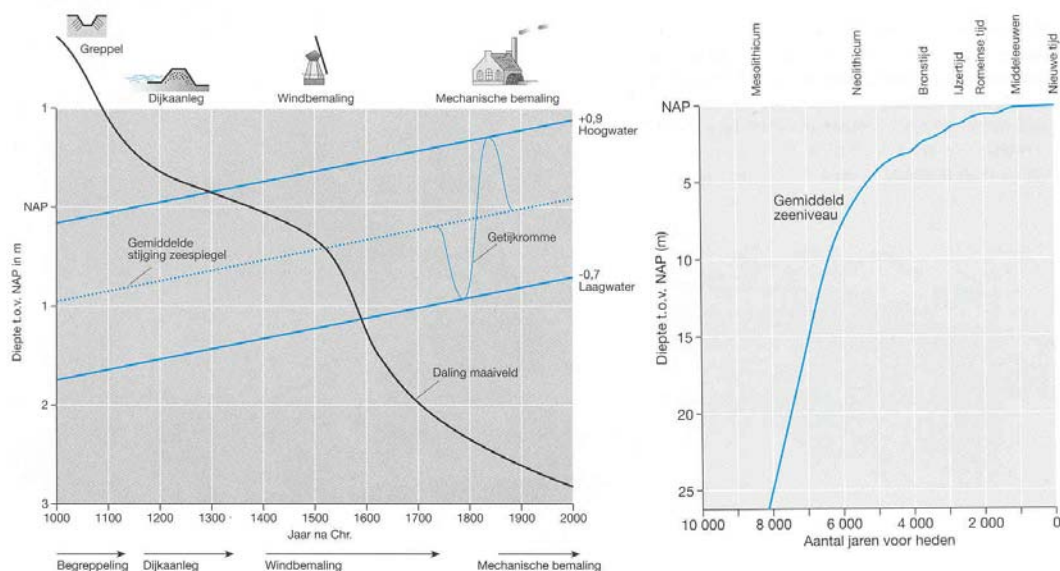
### 2.1 De geschiedenis van stormvloedkeren in Nederland

De afgelopen 10 eeuwen is het laag gelegen deel van Nederland voor het grootste deel door mensen aangepast en beheerst. In de loop van de jaren zijn de materialen en technieken veranderd, maar het doel is altijd geweest om de leefomstandigheden te verbeteren. De ervaring die Nederland hiermee heeft opgedaan, heeft geleid tot een toonaangevende positie in de waterbouwkunde. De vraag die nu heerst is of we trots onze kennis en technieken aan het buitenland door kunnen geven of dat we tot andere inzichten moeten komen.

Vanaf de 9<sup>e</sup> eeuw is de mens gaan ingrijpen in de watersystemen van het laagland. Om de grond geschikt te maken voor akkerbouw ging mens het veengebied systematisch ontwateren. Dit gebeurde door greppels en ontwateringsloten te graven. Gevolg hiervan was dat de veenvorming stopte en het land begon in te klinken. Door de daling van het land kwamen hele gebieden regelmatig onder water te staan. In eerste instantie werd een passieve oplossing voor dit probleem gekozen door de woonplaatsen verhoogd aan te leggen op terpen. Om ook de gewassen te beschermen ontstonden in de 11<sup>e</sup> eeuw de eerste dijken. In het begin werden deze dijken gebouwd van droge pluggen gras of van wier, later zijn deze geleidelijk vervangen door kleidijken met een stenen talud.

Het inklinkende gebied werd steeds groter en door de voortdurende bodemdaling werd het verschil met de buitenwaterstanden ook steeds groter. In de 13<sup>e</sup> eeuw werden veenstroompjes afgedamd en werden de eerste sluizen gebouwd om bij lage buitenwaterstanden te kunnen spuien. Deze constructies waren in het begin van hout gemaakt. Rond deze afdammingen ontstonden ook vaak nederzettingen met namen die eindigen op 'dam'.

Nieuwe materialen, zoals metselwerk en later beton, en nieuwe technieken zoals de windmolens om te pompen maakten grotere projecten mogelijk. Polders konden kunstmatig droog gehouden worden en in de 16<sup>e</sup> eeuw begon men met het droogleggen van meren. Het land werd niet alleen meer verdedigd tegen het water, maar er werd ook land gewonnen. In de 19<sup>e</sup> eeuw kon met behulp van stoomgemalen nog grotere delen worden drooggepompt zoals de Haarlemmermeer.



Figuur 2.1: Trend in de stijging van de zeespiegel in de afgelopen eeuwen en de bodemdaling [L.10]

In figuur 2.1 is te zien hoe het de zeespiegel in de afgelopen eeuwen is gestegen en hoe het maaiveld als gevolg van de verschillende menselijke ingrepen in gedaald in diezelfde periode. Door de stijging van de zeespiegel en tegelijkertijd de daling van het land is de afgelopen eeuwen het grootste deel van ons land onder zeeniveau komen te liggen. Dit betekent dat het land bij een overstroming erg kwetsbaar is. Hier komt bij dat, onder andere door de goede landbouwomstandigheden en omdat men zich er blijkbaar veilig voelde, veel mensen zijn gaan wonen in het laag gelegen deel van Nederland. Het is dus juist in deze tijd belangrijk om overstromingen te voorkomen en daarom zijn goede waterkeringen nodig. Deze keringen moeten natuurlijk goed bijgehouden worden en deze moeten worden aangepast aan de hydraulische omstandigheden. Maatregelen hiertoe worden echter vaak pas genomen nadat er een ramp is opgetreden. Voorbeelden hiervan zijn de afsluiting van de Zuiderzee en de Deltawerken. Beide projecten hebben ertoe geleid dat de kuststrook die beschermd moet worden enorm is ingekort. Dit soort projecten zijn mogelijk gemaakt doordat de techniek zich heeft ontwikkeld en hebben geleid tot omstandigheden waarin goed te leven valt. De hydraulische omstandigheden veranderen nog steeds en het lijkt dus logisch, gezien de ontwikkelingen van de afgelopen eeuwen, dat ook in de toekomst hierop met (nieuwe) technische oplossingen wordt gereageerd.

Toch zijn er tegenwoordig ook ideeën die de ontwikkeling van de afgelopen eeuwen moeten terugdraaien. Bijvoorbeeld in het rapport 'Changing estuaries, changing views' [L.8] wordt gesteld dat door de manier waarop Nederland zich heeft beschermd tegen het water het alleen maar onveilig geworden is. Het land is volgebouwd achter de hoge dijken waardoor het risico voor overstromingen erg groot is geworden. Volgens de auteurs is er geen toekomst voor dijken en grote waterkeringen. Nederlanders moeten dan ook niet zomaar de kennis en vaardigheden die ze op dit gebied hebben, blijven exporteren. De auteurs willen liever de blokkade van het water opheffen en de natuurlijke processen vrij laten verlopen. Flexibele en technische oplossingen, zoals drijvende huizen, zouden wel samen kunnen gaan met deze natuurlijke processen.

In het waterbeleid van Nederland is deze opvatting gedeeltelijk terug te vinden met de nieuwe slogan 'ruimte voor water'. Voor de rivieren worden overloopgebieden bedacht die bij hoogwater onder water kunnen lopen. In het kustgebied wordt getracht om meer gebieden voor het getij toegankelijk te maken. Hiermee worden ook meer natuurlijke waarden gecreëerd. Met ontpoldering, het weer toegankelijk maken van binnendijks gebied voor de zee, wordt bij een estuarium vaak geprobeerd het overstromingsrisico te verkleinen. Door deze ontpoldering zal het estuarium een grotere komberging krijgen wat in eerste instantie inderdaad zal leiden tot minder hoge waterstanden omdat de toegang tot het estuarium nog gelijk is. Door de lagere waterstand in het estuarium zal het verschil met de buitenwaterstand echter groter worden en neemt de stroomsnelheid in de monding van het estuarium toe. Hierdoor zal de monding uitschuren en uiteindelijk groter worden waardoor het getij makkelijker kan doordringen in het estuarium en de waterstanden weer hoger zullen worden. Ook de overloopgebieden zijn niet altijd ideaal. Vaak is er veel te weinig ruimte om grote overloopgebieden te maken. De gebieden zorgen dan even voor een verlaging van de waterstand, maar bij aanhoudend hoogwater of een volgende vloedgolf bieden de overloopgebieden geen uitkomst meer. Daarnaast kan het een behoorlijke overlast geven voor de eigenaren van de overloopgebieden wanneer hun land onder water komt te staan en na het hoogwater een laag slib achterblijft.

Het is logisch om in de gevallen waar veel ruimte is die niet duur is, het water ook de ruimte te geven. Er zijn echter ook gevallen waar bebouwing, landbouw en industrie in de jaren zo zijn opgebouwd en ontwikkeld dat het land niet zomaar kan worden blootgesteld aan het water en dus beschermd moet worden. Dit is in Nederland het geval, maar ook in veel andere landen waar havens aan zee zijn gebouwd en steden zijn ontwikkeld. In dat geval lijkt het logischer dat de ontwikkeling zoals die de afgelopen eeuwen in Nederland heeft plaatsgevonden zal doorzetten. De kustlijn zal zich verder sluiten en met behulp van technologische ontwikkelingen zullen de waterkeringen op peil gehouden worden.

## 2.2 De ontwikkeling van zeekeringen

Hoewel zeekeringen in het begin alleen water hoefden tegen te houden om het land tegen stormvloed te beschermen zijn de functies die deze keringen uitoefenen in de loop van de eeuwen flink toegenomen:

- Landwinning
- Waterbeheersing ten gunste van landbouw
- Rivierafvoer doorlaten
- Schepen doorlaten
- Natuurwaarden behouden en creëren
- Wegverbinding creëren
- Energie opwekken
- Stuwen voor scheepvaart
- Recreatieve omstandigheden creëren

Om het beschermen tegen stormvloed met sommige andere functies te combineren zijn in de loop van de tijd beweegbare delen in de keringen opgenomen. In het begin waren deze beweegbare delen vaak een klein onderdeel van een grote permanente kering. Een voorbeeld hiervan is de afsluitdijk. Met deze aarden dijk werd de kustlijn ingekort en een zoetwatermeer gecreëerd. De beweegbare delen moeten er hiervoor zorgen dat het rivierwater kan worden afgevoerd. De beweegbare delen in zulke keringen zijn meestal maar een klein onderdeel van de totale kering omdat de constructie erg duur is. Meestal zijn deze delen gesloten en wordt er alleen water doorgelaten om de specifieke functie uit te voeren.

Tegenwoordig komt het ook voor dat een doorlaatbare kering onder normale omstandigheden de waterstroom open laat, maar deze waterstroom kan afsluiten indien dit nodig is. Dit noemen we een stormvloedkering. Theoretisch gezien kan een stormvloedkering variëren tussen volledig gesloten en volledig open en alle standen daartussen, dit maakt de kering erg flexibel en bruikbaar voor vele doeleinden. Belangrijke redenen om de waterstroom in normale omstandigheden open te laten is om de scheepvaart zo min mogelijk te hinderen in de doorvaart en om de natuurlijke omstandigheden zo veel mogelijk te bewaren.

Nederland heeft internationale bekendheid gekregen met de grote stormvloedkeringen die gebouwd zijn zoals de Oosterschelde kering in 1986 en de Maeslantkering in 1997. De eerste stormvloedkering in Nederland is al snel na de watersnoodramp van 1953 gebouwd. Al in 1958 werd de stormvloedkering in de Hollandse IJssel als eerste bouwwerk van het Deltaplan afgebouwd om Zuid-Holland tegen stormvloed te beschermen. De stormvloedkeringen verschillen nogal van elkaar. Dit hangt voornamelijk af van de gekozen oplossing voor het afsluitmiddel. Hieronder zullen enkele algemene voor- en nadelen van een stormvloedkering worden opgesomd.



Figuur 2.2: De stormvloedkering in de Hollandse IJssel [www.neeltjeans.nl]

#### Algemene voordelen van een stormvloedkering:

- De kering keert het water op het moment dat dit nodig is en kan daarnaast vele andere functies uitvoeren.
- De kering verkort de kustlijn en kan daarmee dijkverhogingen achter de kering overbodig maken.
- Het is mogelijk om de scheepvaart doorgang te geven zonder deze al te veel te hinderen. Dit hangt ook af van de oplossing die is gekozen.
- Het stroomprofiel van de waterstroom kan theoretisch gezien vrijwel ongewijzigd blijven. Dit betekent dat stroomsnelheden en sediment transport ook niet zullen veranderen. In de praktijk zal het stroomprofiel altijd iets aangepast worden door de drempel en eventuele pijlers van de kering. Ook bij grote afdichtingen kan ervoor worden gekozen om deze gedeeltelijk permanent af te sluiten en gedeeltelijk met een stormvloedkering. In dat geval wordt het stroomprofiel wel aangepast.
- Doordat het getij vrijwel ongehinderd een estuarium in kan stromen, kunnen natuurlijke waarden achter de kering ook blijven behouden.
- De mate waarin het water wordt tegengehouden of wordt doorgelaten kan, afhankelijk van het gekozen afsluitmiddel, worden bepaald.
- Het kan er voor zorgen dat bij hoogwater achter de kering een laagwaterpeil blijft waardoor een eventuele rivier langer kan afvoeren zonder dat het last heeft van de hoge buitenwaterstand.

#### Algemene nadelen van een stormvloedkering:

- Het is een kostbaar bouwwerk, zeker waar grote waterstromen moeten worden afgesloten. Daar kan tegenin gebracht worden dat kilometers dijk verhogen ook kostbaar is.
- Omdat het moeilijk is in te schatten wat de effecten van de stormvloedkering op de stroomsnelheid en de sedimenttransporten precies zijn, kan op de lange termijn het natuurlijke evenwicht zich anders instellen dan gepland. Hierdoor kunnen beoogde natuurlijke waarden ook gaan afwijken.
- De kering kan falen tijdens de sluitingsprocedure.
- Omdat een stormvloedkering verschillende functies kan vervullen kan het ook lastig zijn om een afweging te maken wanneer de kering moet sluiten.
- Het plotseling afsluiten van een waterstroom kan een translatie golf opleveren en dit kan negatieve gevolgen hebben voor het milieu, de scheepvaart en aanliggende betrokkenen. Wanneer een opening- of sluitingsprocedure gecontroleerd wordt uitgevoerd, kan de translatiegolf beheerst worden en beperkt blijven.

In het kader van het vooronderzoek voor dit afstudeeronderwerp is ook gekeken naar de specifieke voor- en nadelen van verschillende soorten stormvloedkeringen. Hiervoor zijn ook enkele grote stormvloedkeringen in het binnen- en buitenland beschreven. Een overzicht hiervan is terug te vinden in bijlage 1 en 2 van dit rapport.

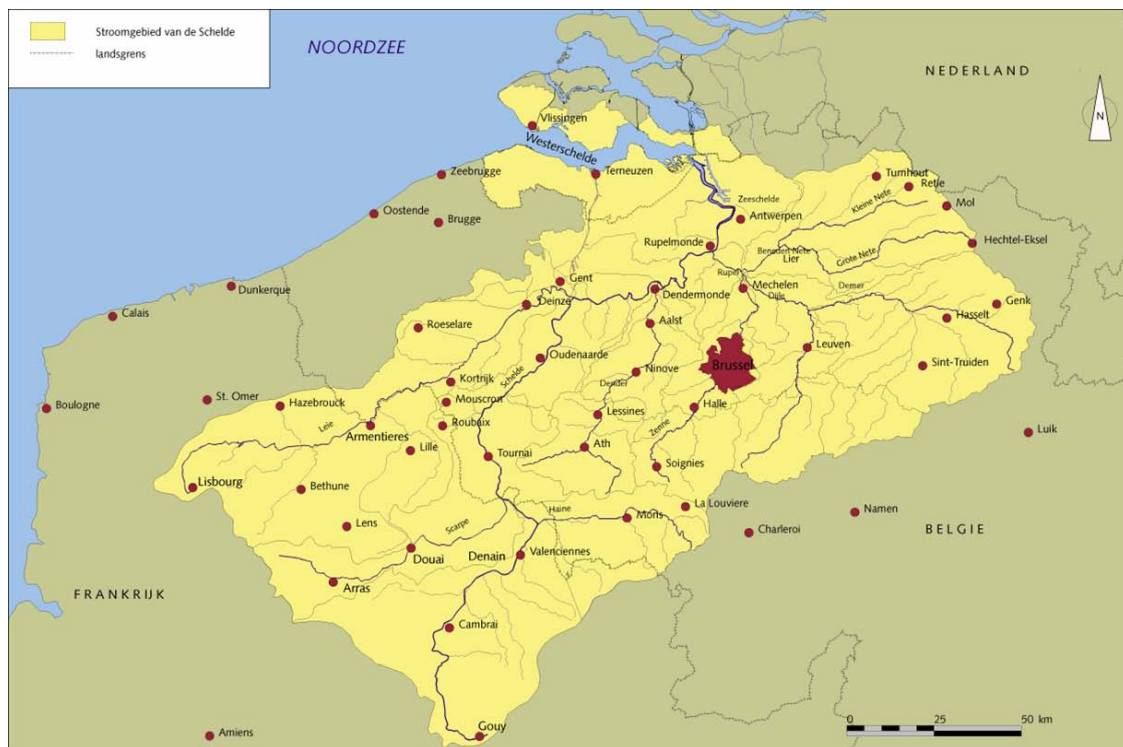


### H3 Situatiebeschrijving Westerschelde

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste aspecten die van belang zijn om de situatie rondom de Westerschelde te kunnen begrijpen. Hierbij wordt ingegaan op de ontstaansgeschiedenis, het gebruik van de Westerschelde en welke veiligheidsplannen van toepassing zijn.

#### 3.1 Algemeen

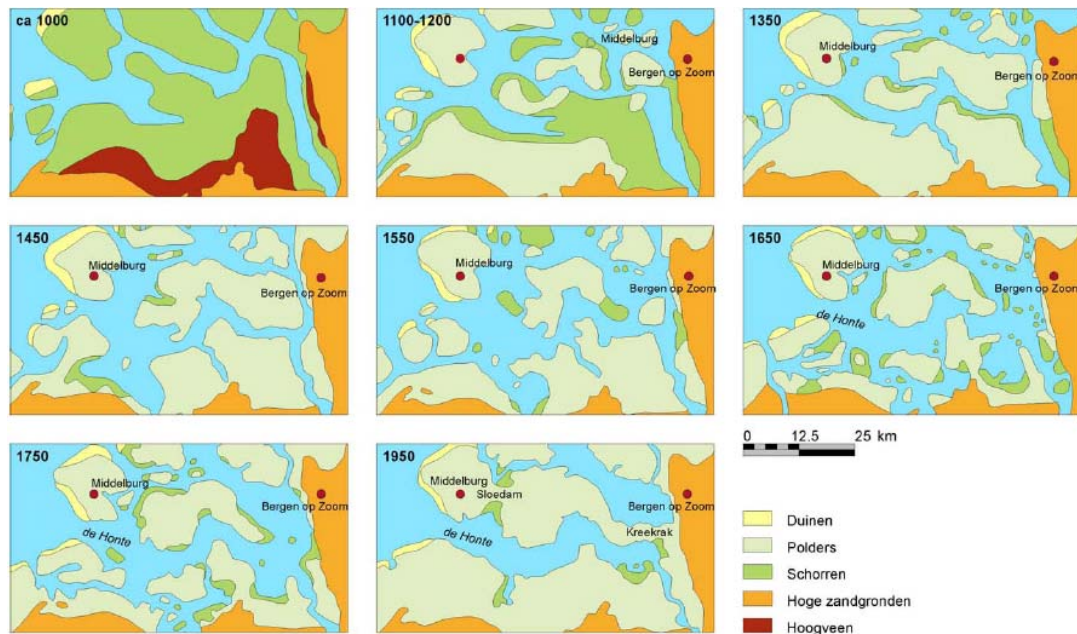
De Westerschelde is het Nederlandse en meest stroomafwaarts gelegen deel van de rivier de Schelde. Deze regenrivier ontspringt in het Franse Gouy en mondt na ongeveer 350 km bij Vlissingen uit in de Noordzee. Vooral in België komen tal van kleinere rivieren uit op de Schelde die op deze manier een stroomgebied heeft dat een groot gedeelte van België bestrijkt. Dit stelsel van rivieren zorgt voor een gemiddelde afvoer van  $110 \text{ m}^3/\text{s}$ . Naast deze rivierafvoer heeft ook getijdenwerking een invloed op de rivier. Als een riviermond ook wordt beïnvloed door getijdenwerking heet dit een estuarium. De Westerschelde vormt het zoute- en brakke deel van het Schelde-estuarium, welke loopt tot aan Gent omdat tot daar de invloed van de Noordzee merkbaar is. De vorm en karakteristieken van een estuarium hangen sterk af van de verhouding tussen getijvolume en de rivierafvoer. Bij het Schelde-estuarium is het getij sterk overheersend. Het getijvolume is namelijk 2,2 miljard  $\text{m}^3$  water, terwijl gedurende een getij maar 5 miljoen  $\text{m}^3$  rivierwater wordt afgevoerd.



Figuur 3.1

Overzicht stroomgebied van de Schelde. De Schelde is onder te verdelen in drie gedeelten: De Bovenschelde loopt vanaf de bron in Frankrijk tot aan Gent waar het Schelde-estuarium begint. De Zeeschelde loopt vanaf Gent tot aan de Nederlandse grens en de Westerschelde loopt vanaf de grens tot Vlissingen waar de rivier in de Noordzee uitmondt. [L.25]

In figuur 3.2 is te zien hoe het getijdengeulensysteem de Honte (later Westerschelde) door de jaren heen is veranderd ten gevolge van de invloed van de zee. Sinds dit getijdengeulensysteem in ongeveer de 12<sup>e</sup> eeuw aansluiting kreeg met de Schelde is de invloed van de zee op de Schelde steeds meer toe gaan nemen.



Figuur 3.2 Ontwikkeling van zeebekken de Honte (later Westerschelde) en de verbinding met de Schelde onder invloed van de zee.[L. 15]

Hoewel het riskant was om zich te vestigen in een overstroombare kustvlakte waren er ook voordelen die er voor hebben gezorgd dat altijd veel mensen zich hier probeerden te vestigen. Dankzij de vele rivieren waren er altijd goede transport mogelijkheden en de vruchtbare bodem was zeer geschikt voor de landbouw. Vanaf de 13<sup>e</sup> tot de 19<sup>e</sup> eeuw zijn er onafgebroken delen van de valleigebieden langs de rivier ingepolderd, waaronder ook de delen langs de Westerschelde. Dit veiligstellen van stukken land langs de rivier is altijd gepaard gegaan met overstromingen waarna weer opnieuw dijken moesten worden aangelegd en verhoogd. Desondanks is het stroomgebied van de Schelde aantrekkelijk om te vestigen en is dit tegenwoordig een dichtbevolkt gebied.

### 3.2 Functies van de Westerschelde

Er zijn vele verschillende activiteiten die op en langs de Westerschelde plaatsvinden. De Westerschelde vervult een belangrijke rol voor de economie aangezien er veel (zee)scheepvaart plaatsvindt. Ook wordt er commercieel gevist, voornamelijk op garnalen en kokkels, en wordt de Westerschelde gebruikt voor zandwinning. Langs de Westerschelde is er ook industrie die invloed heeft op de Westerschelde. Naast deze economische activiteiten vindt er ook recreatie plaats en heeft de Westerschelde een ecologische waarde. Deze aspecten hebben verschillende belangen die met elkaar kunnen botsen. Een voorbeeld hiervan is dat bagger werkzaamheden ter verruiming van de vaargeul negatieve effecten hebben op het watersysteem en zo de natuurlijke waarden als ook de vissers benadelen. Om er voor te zorgen dat alle functies goed beschermd worden en kunnen worden ontwikkeld zijn er verschillende commissies en beleidsplannen ingesteld. Belangrijk bij de plannen voor de Westerschelde is dat er grensoverschrijdend gedacht wordt, omdat er ook twee landen zijn die afhankelijk zijn van dit gebied. Voor het beleid op de lange termijn is de Langetermijnvisie Schelde-estuarium van toepassing. Deze visie is een initiatief van de Technische Scheldec commissie (TSC) om samen met

Vlaanderen het streefbeeld te beschrijven omtrent veiligheid tegen overstromen, toegankelijkheid van de Scheldehavens en natuurlijkheid van het gebied zoals dat er in 2030 uit zou moeten zien. Deze visie is in 2001 gepubliceerd. Vervolgens is het project Ontwikkelingsschets 2010 gestart. Hierin moeten concrete projecten en maatregelen worden opgenomen die oplossingen moeten bieden voor problemen nu en in de toekomst. De meningen van zowel de Vlaamse als de Nederlandse regering moeten hierin duidelijk zijn verwerkt. Proses is de Vlaams-Nederlandse organisatie die verantwoordelijk is voor het begeleiden van het project Ontwikkelingsschets 2010 en deze heeft in september 2004 voorstellen gedaan voor besluiten.

### 3.2.1 Scheepvaart

De Westerschelde wordt door de beroepsvaart intensief gebruikt. Het vormt de directe verbinding met de Noordzee voor de vier grote Scheldehavens: Antwerpen, Gent, Terneuzen en Vlissingen. De beroepsvaart bestaat uit zeevaart en binnenvaart. Van de zeeschepen heeft een groot percentage Antwerpen als bestemming. Voor de binnenvaart op de Westerschelde is vooral het traject Hansweert-Terneuzen van belang. Dit is een belangrijke schakel in de route die het Rijnmongebied verbindt met Antwerpen, Gent en Noord-Frankrijk.

Naast de beroepsvaart is er op de Westerschelde ook recreatievaart, maar deze vindt vooral in de monding vrij veel plaats. Verder is de recreatievaart op de Westerschelde klein. In onderstaande tabel zijn enkele gegevens samengevat die een indicatie geven van de scheepvaartbewegingen op de Westerschelde.

Totaal aantal scheepvaartbewegingen	200.000
Aandeel binnenvaart	50.000
Aandeel zeevaart	50.000
Aandeel zeevaart met bestemming Antwerpen	30.000

Tabel 3.1: Overzicht van de scheepvaartbewegingen op de Westerschelde [bron: [www.delta-wateren.nl](http://www.delta-wateren.nl)]

Deze gegevens komen overeen met de statistieken die op de site van de Antwerpse haven zijn te vinden [1.6]. Hier staat vermeld dat er 15.283 schepen in 2005 zijn aangemeerd. Dit aantal is de afgelopen 20 jaar niet veel veranderd. Wel zijn de schepen veel groter geworden en worden er dus in totaal meer goederen overgeslagen. In 2005 betrof dit een record hoeveelheid van meer dan 160 miljoen ton. Het grootste aandeel wordt verscheept met containerschepen.



Figuur 3.3: Vooral veel containerschepen doen de haven van Antwerpen aan. [[www.nedships.nl](http://www.nedships.nl)]



### 3.2.2 Natuurlijke waarden

Het estuarium waar de Westerschelde deel van uit maakt is een dynamisch natuurgebied. Ten gevolge van het getij ontstaan er eb- en vloedgeulen. Hiertussen liggen platen die droogvallen tijdens eb. Naast deze platen zijn slikken en schorren kenmerken van een estuarium. Slikken zijn stroken slijk tussen de geulen en de dijk en stromen bij vloed over. Schorren zijn vroeger slikken geweest, maar zijn ten gevolge van sedimentatie steeds verder opgehoogd en stromen slechts af en toe nog over. Het Land van Saeftinge is met 3000 ha het grootste aaneengesloten brakwaterschor van West-Europa. Deze slikken en schorren zijn het leefgebied van soms zeldzame planten en bodemdieren. Verder is de Westerschelde een internationaal belangrijk vogelgebied.



Figuur 3.5: Luchtfoto van het Land van Saeftinge [[www.hetzeeuwselandschap.nl](http://www.hetzeeuwselandschap.nl)]

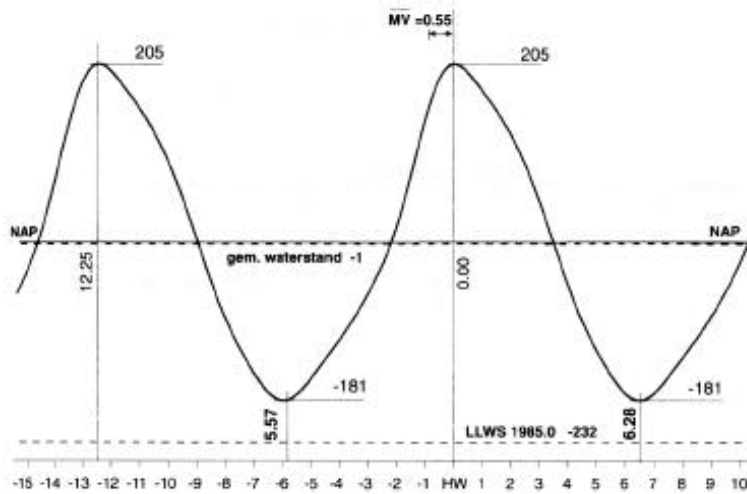
Vervuilingen die sinds ongeveer 1900 hebben plaatsgevonden, maar vooral van de jaren zeventig en tachtig, hebben de waterkwaliteit sterk verslechterd. Hierdoor is onder andere de visstand sterk achteruit gegaan. Ook de baggerwerkzaamheden hebben een negatieve invloed op het natuursysteem van de Westerschelde. Bij de baggerwerkzaamheden wordt tegenwoordig echter een compensatiebeleid toegepast. De waterkwaliteit is de laatste jaren weer verbeterd en dit heeft reeds een positief effect op de aanwezige dierenpopulaties.

## 3.3 Regiem Westerschelde

Zoals al is beschreven is de Westerschelde een estuarium dat vooral door het getij wordt bepaald. Het getijvolume is 2,2 miljard m<sup>3</sup> water, dit is de hoeveelheid water die in een volledige getijcyclus, van ongeveer 12 uur, het estuarium in- en uitstroomt. In diezelfde tijd wordt maar 5 miljoen m<sup>3</sup> water door de rivier de Schelde afgevoerd. Hieronder zullen enkele andere karakteristieken van het regiem worden beschreven.

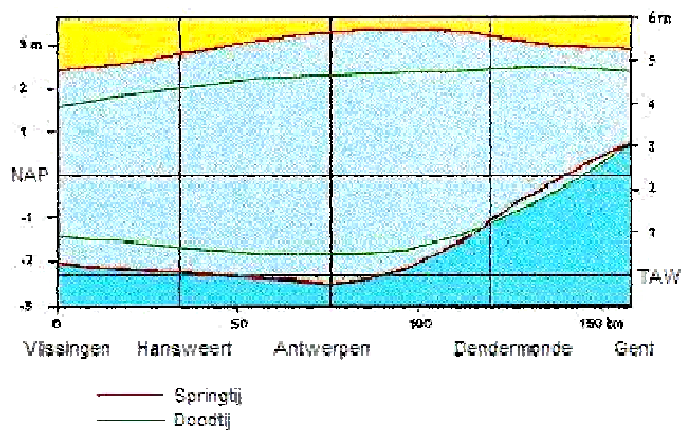
### 3.3.1 Getij

De waterstanden in de monding van de Westerschelde hebben een vrij regelmatig karakter als gevolg van een dubbeldaags getij zoals dat via de Noordzee aankomt. Dit getij wordt bepaald door het dubbeldaags maangetij (M2) en het dubbeldaags zonsetij (S2). Hierdoor ontstaat een dubbeldaags getij waarvan de getijdecuclus ongeveer 12 uur en 25 minuten bedraagt. De twee hoog- en laagwaterstanden die op een dag voorkomen kunnen nogal van elkaar verschillen door de dagelijkse ongelijkheid. De gemiddelde waterstanden als gevolg van het getij in de monding van de Westerschelde zijn in onderstaande figuur 3.6 aangegeven voor de locatie Vlissingen. De gemiddelde getijslag, dit is het verschil tussen hoogwater en laagwater, is hier 3,86 meter.



Figuur 3.6: Gemiddelde waterstand bij Vlissingen [L. 12]

De getijdegolf plant zich met een snelheid van ongeveer 10 m/s voort in de richting van Antwerpen en Gent. Ongeveer 2 uur na hoogwater bij Vlissingen is het hoogwater in Antwerpen. Doordat het estuarium richting Antwerpen smaller en ondieper wordt, stuwt het water dat richting Antwerpen stroomt op. Hierdoor worden de hoogwaterstanden richting Antwerpen hoger en de laagwaterstanden lager. Na Antwerpen gaan de wrijvingsverliezen overheersen en neemt het getijverschil weer af. Dit is ook te zien in figuur 3.7.



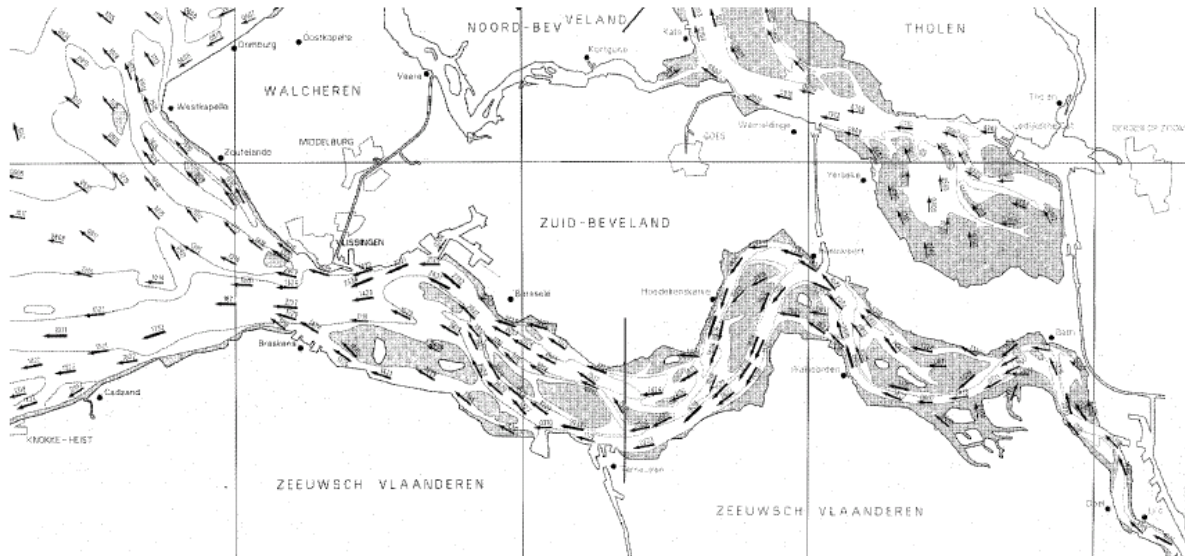
Figuur 3.7: Overzicht van de gemiddelde waterstanden bij spring- en doortij in het Schelde estuarium ten opzichte van het Nederlandse en Belgische referentiepeil (NAP= 2,33m TAW). [1.9]

### 3.3.2 Stroomrichting en stroomsnelheden

In onderstaande figuren zijn de stroomrichtingen aangegeven op de Westerschelde enkele uren voor en na hoogwater bij Vlissingen. De grote pijlen geven de hogere stroomsnelheden aan. Deze vinden vooral plaats in de hoofdgeulen. Bij gemiddeld getij bedragen de stroomsnelheden ongeveer 1- 2 m/s. Bij springtij kunnen de maximale stroomsnelheden groter zijn dan 2 m/s.



Figuur 3.8: Stroomrichtingen op de Westerschelde 4 uur voor hoogwater [Hydrografische dienst, 2000]



Figuur 3.9: Stroomrichtingen op de Westerschelde 4 uur na hoogwater [Hydrografische dienst, 2000]

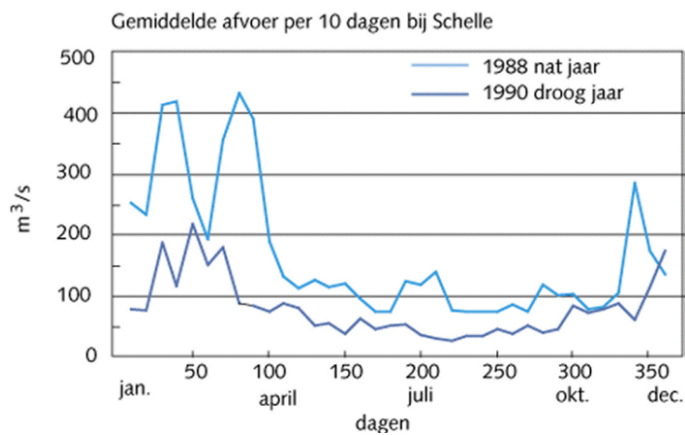
Het volume dat tijdens vloed het estuarium binnenstroomt wordt vooral in de Westerschelde geborgen. Het vloeddebiet neemt dan ook snel af richting Antwerpen. Bij Vlissingen bedraagt dit namelijk  $78000 \text{ m}^3/\text{s}$  en bij de Nederlandse grens is dit nog maar  $11000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.3.3 Sedimenttransport

Zand en slib wordt voornamelijk door de getijstroom vervoerd. Bij vloed stroomt het mee de Westerschelde op en bij eb weer terug richting zee. Het netto sedimenttransport vindt dan ook in de grote geulen rond de zandplaten plaats. Op plaatsen waar het minder hard stroomt bezinkt het sediment. Zo kunnen in de vaarwegen drempels ontstaan. Deze ontstaan vooral in het oosten van de Westerschelde waaruit blijkt dat de vloedstroom sterker is en deze het netto sedimenttransport bepaald. Om de scheepvaart niet te hinderen worden de drempels weggebaggerd. Jaarlijks wordt ongeveer 11 miljoen m<sup>3</sup> zand weggehaald en in het westen van de Westerschelde weer teruggestort om zo de zandbalans te behouden.

### 3.3.4 Afvoer Schelde

De Schelde is een regenrivier en de gemiddelde afvoer is 110 m<sup>3</sup>/s. In de loop van de jaren is dit gemiddelde iets toegenomen en de verwachting is ook dat dit in de toekomst zo zal zijn. Per jaar kan de afvoer sterk verschillen. In elk jaar afzonderlijk liggen de pieken in de herfst en de winter.



Figuur 3.10: Afvoer van de Schelde in een nat en een droog jaar. [L.25]



### 3.4 Overstromingen

Zoals al eerder gezegd is er in de kuststreek altijd een strijd geweest tussen de bewoners en het water. Maatregelen om de situatie te verbeteren worden vaak pas genomen nadat de ramp zich al heeft voltrokken. Na de watersnoodramp van 1953, waarbij een groot gedeelte van Zuidwest-Nederland en Vlaanderen onder water loopt, reageren de Nederlanders met het Deltaplan. Er zijn tijdens de storm 1.836 Nederlandse burgers overleden en er is veel materiële schade. Het Deltaplan moet voorkomen dat een dergelijke ramp in de toekomst weer voorkomt. Meteen na de ramp wordt begonnen met het afsluiten van de zeegaten, alleen de Westerschelde en de Nieuwe Waterweg blijven open in verband met de scheepvaart. Het grote en innovatieve plan wordt in 1986 voltooid. Meteen hierna wordt de mogelijkheid onderzocht voor een beweegbare stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. In 1997 wordt dit afgerond met de Maeslantkering en blijft de Westerschelde als enige zeearm open. In het oorspronkelijke Deltaplan werd de kans op een overstroming gesteld op 1/10.000 per jaar. Voor sommige gebieden is dit aangepast en voor de Westerschelde geldt een kans van 1/4.000 per jaar

Hoewel tijdens de stormvloed van 1953 ook delen van Vlaanderen onderlopen en er materiële schade is, ligt het aantal slachtoffers met 18 overledenen veel lager. De Vlaamse regering komt dan ook niet echt met een plan zoals Nederland. Wel komt er een wet waarmee de overheid de mogelijkheid krijgt om dijken te verbeteren en wordt er een waarschuwingdienst ingesteld. Dit kan niet voorkomen dat tijdens een zware storm in 1976 op verschillende plaatsen langs het Zeescheldebekken dijken door breken en ook woongebieden onder water komen te staan. Hoewel de omvang van de ramp minder groot is dan in 1953 zijn de bewoners van de getroffen dorpen ontevreden over het feit dat de situatie sinds 1953 niet verbeterd is. Naar aanleiding van de stormvloed van 1976 stelt België het Sigmoplan op dat het Zeescheldebekken moet beveiligen tegen overstromingen.

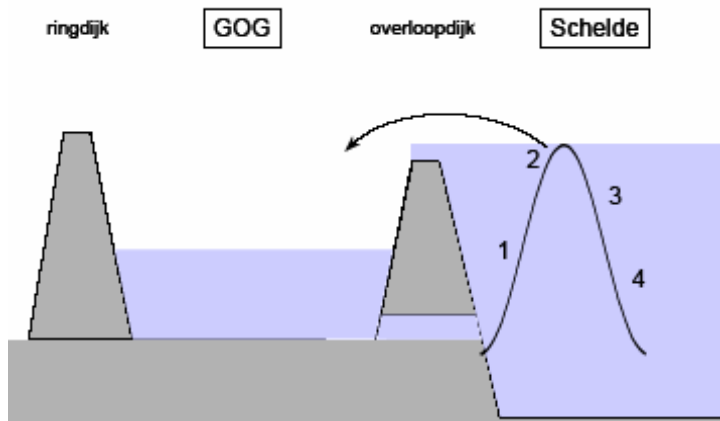


*Figuur 3.11: Dijkdoorbraak ten gevolge van de de storm in 1976. [L.34]*

### 3.4.1 Het oorspronkelijke Sigmaplan

Het oorspronkelijk Sigmaplan werd al in 1977 goedgekeurd. De veiligheidsnorm voor het plan werd overgenomen uit het Deltaplan en moest er voor zorgen dat het Zeescheldebekken beschermd zou worden tegen overstromingen vanuit de Noordzee met een kans op voorkomen van 1/10.000 per jaar. Om dit doel te bereiken waren drie maatregelen bedacht:

1. Verhoging en verzwaring van de dijken in het Zeescheldebekken over een lengte van 512 km. De dijken zouden moeten worden verhoogd tot het zogenaamde Sigmapeil. Dit begint bij de grens op 11m TAW en loopt na de grens terug tot ongeveer 8m TAW waar de dijkhoogtes worden beperkt door praktische begrenzing van steden en dorpen.
2. De aanleg van 13 gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's). Dit zijn onbebouwde gebieden langs de Zeeschelde die gecontroleerd onder water kunnen worden gezet. Op deze manier kan de hoogwatergolf worden afgezwakt.



Figuur 3.12: Principe werking van een gecontroleerd overstromingsgebied (GOG). [L.20]

3. De bouw van een stormvloedkering te Oosterweel (dit is bij de haven van Antwerpen) welke de Zeeschelde kan afsluiten tijdens zware stormen.

Momenteel zijn ruim 400 km van de geplande 512 km aan dijken versterkt tot de gewenste hoogte. Van de geplande 13 GOG's zijn er 12 gerealiseerd met een totale oppervlakte van 533 ha. Aan het laatste geplande GOG wordt nog gewerkt, deze heeft een oppervlakte van ongeveer 600 ha. De stormvloedkering is nooit gebouwd. Na een studie waaruit zou blijken dat de kosten van zo een kering niet opwegen tegen de voordelen besloot de minister van Openbare Werken in 1985 de bouw van de stormvloedkering voor onbepaalde tijd uit te stellen.

Wanneer de werkzaamheden aan het laatste GOG zijn afgerond is het gebied beveiligd tegen overstromingen met een kans van 1/350 per jaar. Dit voldoet lang niet aan de gestelde eisen in het Sigmaplan voor overstromingen met de kans op voorkomen van 1/10000 per jaar en ook niet aan de kans van 1/4000 per jaar die voor de Westerschelde geldt. Daarnaast zijn in de afgelopen 25 jaar de gebieden langs de Zeeschelde steeds meer volgebouwd met woningen en industrie. Een overstroming levert nu veel meer schade op dan toen. Ook zijn de inzichten in het hoogwater de laatste jaren veranderd. Het oorspronkelijke Sigmaplan voldoet dus niet en is aan vernieuwing toe.

#### **3.4.2 Geactualiseerde Sigmaplan**

De afgelopen jaren is de Vlaamse 'Administratie Waterwegen en Zeewezen' (AWZ) bezig met de actualisatie van het Sigmaplan. Overleg met Nederland is bij zo een grootschalig plan van belang, daarom is het belangrijk dat dit plan past binnen de Langetermijnvisie Schelde-estuarium.

De procedure rondom dit plan is al in een vergevorderd stadium en op 22 juli 2005 heeft de Vlaamse regering een voorstel voor het geactualiseerde Sigmaplan goedgekeurd. Hierin wordt als meest geschikte oplossing een combinatie van de aanleg van overstromingsgebieden en lokale dijkverhogingen voorgesteld. Meer over de procedures en uitkomsten rond het geactualiseerde Sigmaplan is terug te vinden in bijlage 3.

De verschillende oplossingen die voor het geactualiseerde Sigmaplan zijn bedacht zullen in het volgende hoofdstuk worden meegenomen.

## H4 Oplossingen Westerschelde

In het vorige hoofdstuk is de situatie rondom de Westerschelde beschreven en is duidelijk geworden dat het Belgische deel langs het estuarium op dit moment niet goed genoeg beschermd is tegen stormvloed. Verder is gebleken dat de haven van Antwerpen belangrijk is voor de werkgelegenheid en de economie. De toegankelijkheid van Antwerpen voor de (zee)scheepvaart speelt dan ook een grote rol bij het zoeken naar oplossingen voor dit probleem. Naast de rol als belangrijke vaarroute heeft de Westerschelde ook een belangrijke natuurlijke waarde als leefgebied voor uiteenlopende flora en fauna.

In dit hoofdstuk zullen enkele oplossingen voor dit probleem worden voorgesteld. Sommige van deze oplossingen worden ook beschreven in de voorstellen voor de actualisatie van het Sigmoplan. De laatste twee zijn hier echter niet in opgenomen.

De volgende zeven oplossingen worden achtereenvolgens behandeld:

1. Het nul-alternatief
2. Dijkverhogingen
3. Overloopgebieden
4. Overschelde
5. Stormvloedkering
6. Verbreding kustgebied
7. Westerschelde afdammen tot een zoetwatermeer

Om de verschillende alternatieven met elkaar te kunnen vergelijken zullen voor elke oplossing de volgende drie aspecten worden meegenomen:

- Invloed op de economie:
  - Toegankelijkheid van schepen voor de havens (met name Antwerpen) en de mogelijkheden voor grotere schepen in de toekomst.
  - Eventuele invloed op de arbeidsmarkt
- Invloed op natuurlijke waarden van de Westerschelde en het hieraan grenzende gebied:
  - Invloed op estuarium
  - Visuele invloeden (hoge dijken, technische constructies)
- Effectiviteit/ veiligheid van de oplossing

Aan het einde van het hoofdstuk zal een afweging worden gemaakt welke oplossing het beste past bij de Westerschelde en wordt gekeken hoe de oplossing van een stormvloedkering zich verhoudt tot de andere oplossingen.

#### 4.1 Het nul-alternatief

Dit alternatief is de situatie zoals die nu is of in de nabije toekomst zal zijn en waarbij verder geen ingrijpende veranderingen worden doorgevoerd. De Westerschelde zal een open zeearm blijven met achterin gelegen de haven van Antwerpen. De geplande verdieping van de Westerschelde wordt hierin nog niet meegenomen, wel de werkzaamheden van het Sigmaplan die al in uitvoering zijn.

- Op dit moment hebben schepen tot een diepgang van 11,6 meter toegang tot Antwerpen onafhankelijk van het getij. De maximale diepgang voor schepen die Antwerpen in een getij willen bereiken is 14,5 meter. Hiermee zal de haven achterblijven bij andere grote havens in West-Europa welke al een grotere diepgang hebben, zoals Rotterdam en Amsterdam met respectievelijk 20 en 16,5 meter. De maximale diepgang van containerschepen op dit moment is ongeveer 15 meter. Veel grotere schepen zijn reeds in aanbouw. De haven van Antwerpen zelf heeft weinig mogelijkheden meer tot uitbreiden. Nu al dringt de industrie van de haven zich op aan de omliggende dorpjes.
- Het principe van het estuarium zal behouden blijven, maar zal in de loop van de jaren wellicht minder waardevol worden. Met de stijging van de waterspiegel zullen de schorren en platen steeds meer onder water komen te staan.
- Wanneer de werkzaamheden van het Sigmaplan uitgevoerd zijn zoals die nu gepland zijn is het land in België langs de Schelde beschermd tegen stormvloeden met een kans op voorkomen van 1/350 per jaar. De kans op overstromen zal in de jaren hierna alleen maar weer toenemen wanneer de zeespiegel stijgt.

#### 4.2 Dijkverhogingen

Dit is de meest traditionele oplossing tegen stormvloeden. Bij dijkverhogingen kan de gehele dijk worden uitgebreid, deze wordt dan meestal landinwaarts ook verbreed, of er wordt gekozen voor een verhoging op de bestaande dijk. Dit kan een muurtje of een beweegbare kering zijn.



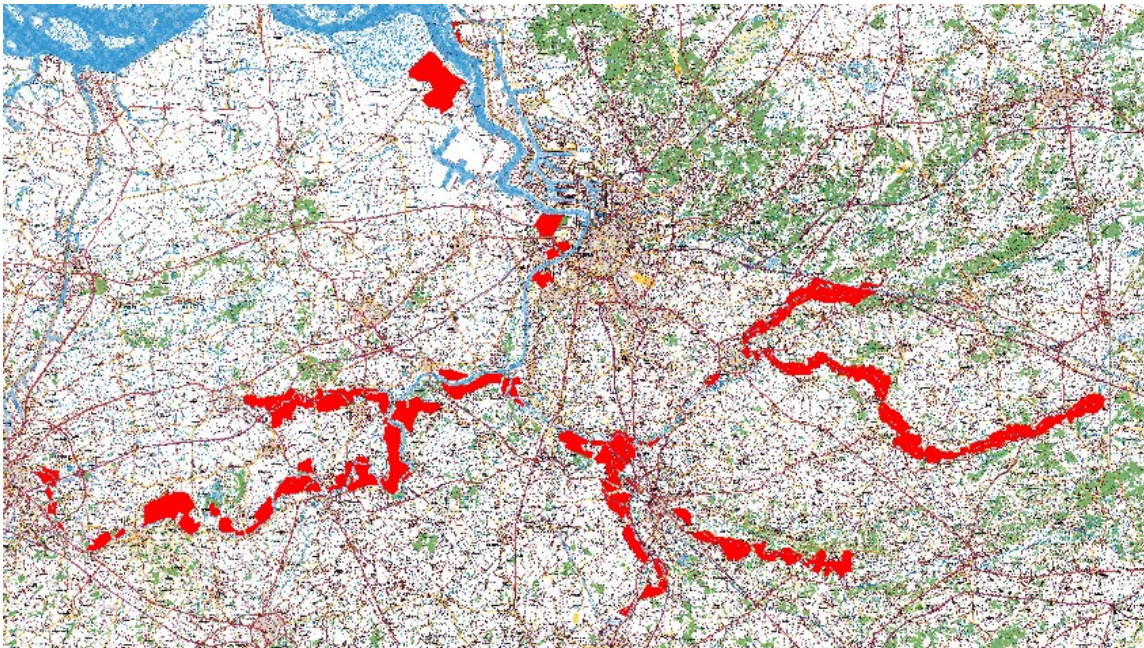
*Figuur 4.1: Dijkverzwaring heeft ook landinwaarts meestal gevolgen [L.20]*

- Voor de scheepvaart zal er weinig veranderen ten opzichte van de huidige situatie.
- Dijkverhogingen hebben een nadelig effect omdat dit ruimte kost. Meestal wordt de dijk landinwaarts uitgebreid, maar hier is niet altijd ruimte voor. Bebouwing of infrastructuur kan in dit geval de beperkende factor zijn, maar het kan ook het natuurlijke landschap beïnvloeden. Ophoging van de dijk heeft een negatief effect op de beleving van de bewoners en gebruikers van het gebied.
- Hoewel geen gesloten kust wordt gerealiseerd is dijkverhoging wel een effectieve bescherming van het land. Uit de analyses van het Sigmaplan blijkt dat verhogingen van de keringen reëel zijn tot een overstromingskans van ongeveer 1/2500 per jaar. Hiervoor zijn extra dijkverhogingen van gemiddeld 1 meter nodig over een lengte van ongeveer 340 kilometer.

### 4.3 Overloopgebieden

Met overloopgebieden wordt de waterstand verlaagd tijdens hoogwater door een deel van het water af te voeren. Hiervoor zijn stukken land langs de rivier aangewezen die mogen onderlopen. Er kan hierbij onderscheid gemaakt worden tussen het gebruiken van deze gebieden bij extreem hoogwater of als verbreding van de rivier waarbij het land bij elk hoogwater overstroomt.

- Voor de scheepvaart maakt het gebruik van overloopgebieden niet veel uit. Voor boeren van wie het land gebruikt wordt als overloopgebied zal het land minder waard worden. Dit is overigens sterk afhankelijk van de overstromingsfrequentie.
- Wanneer een stuk land dagelijks gebruikt wordt als overloopgebied kan zich hier vegetatie ontwikkelen die een positieve bijdrage levert aan de natuurlijke waarde van het gebied. Wanneer het land zijn oorspronkelijke functie behoudt, maar wel bij bepaalde waterstanden onderwater wordt gezet om het overvloedige water af te voeren, kan dit negatieve effecten opleveren. Dit kan bijvoorbeeld door (vervuild) slib dat achterblijft na een overstroming.
- Om van overloopgebieden echt een effectieve oplossing te maken is heel veel land nodig. Om het land te beschermen tegen waterstanden met een kans op voorkomen van 1/1000 per jaar is een gebied nodig van ongeveer 1800 hectare. Daarnaast zijn bij deze oplossing altijd nog dijkverhogingen nodig over een lengte van 180 kilometer. Voor een kleinere overstromingskans van 1/4000 per jaar is ongeveer 2800 hectare nodig met nog eens 220 kilometer dijkverhogingen. Het inrichten van dit land als overstromingsgebied leidt bovendien lokaal tot verzet. Daarbij komt dat stormvloedeaften vaak uit meerdere hoogwaters bestaan. Na een eerste hoogwater wordt het risico op overstroomaften verhoogd omdat de overloopgebieden al in gebruik zijn. Bij verruiming van het estuarium zal op den duur het getij makkelijker het estuarium in- en uit kunnen stromen.



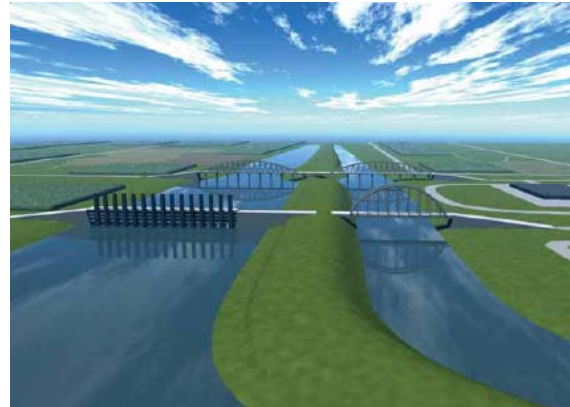
*Figuur 4.2: Overzicht van het Belgische deel van de Schelde. In rood zijn hier potentiële overloopgebieden aangegeven. [www.resource.be, powerpointpresentatie informatieavonden]*

#### 4.4 Overschelde

De Overschelde is een kanaal dat de Westerschelde met de Oosterschelde verbindt. Bij stormvloedden zouden de waterstanden op de Westerschelde en op de Zeeschelde verlaagd kunnen worden door water naar de Oosterschelde te laten stromen.



Figuur 4.3: De Overschelde is een verbindingkanaal tussen de Wester- en de Oosterschelde



Figuur 4.4: Impressie Overschelde [L.20]

- De Overschelde wordt alleen gebruikt bij extreme gevallen en zal geen extra mogelijkheden bieden voor de scheepvaart.
- De aanleg van het kanaal gaat door een natuurgebied heen. Dit gebied moet gecompenseerd worden.
- Er kan tijdens een stormvloed een waterstandsverlaging worden gerealiseerd op de Westerschelde van 40-50 cm. Hiermee wordt de kans op overstroming ongeveer 1/1000 per jaar. Toch wordt deze oplossing niet gezien als een volwaardige oplossing van het probleem. Het kanaal dat nodig is moet in korte tijd een grote hoeveelheid water afvoeren, ongeveer  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . De geschatte afmetingen van het kanaal met een lengte van 4,2 kilometer bedragen een breedte van ongeveer 1.000 meter en een diepte van maximaal 8 meter. Daarnaast moeten ook in België nog dijken worden verhoogd over een lengte van 130 kilometer en waarschijnlijk ook langs de Oosterschelde. In de kosten-batenanalyse die voor het Sigma-plan is uitgevoerd werd berekend dat de geïnvesteerde kosten nooit zouden kunnen worden terugverdiend.

#### 4.5 Stormvloedkering

Een stormvloedkering stroomafwaarts van Antwerpen zou het land goed kunnen beschermen tegen stormvloedden. Deze kering kan in normale omstandigheden schepen en getij doorlaten, maar bij extreme waterstanden kan de kering gesloten worden om het water buiten te houden.

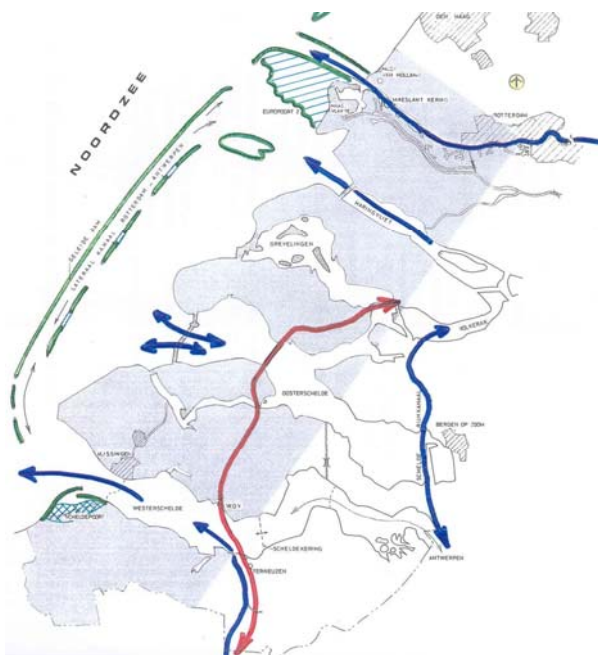
- Bij een goede dimensionering van de stormvloedkering ondervindt de scheepvaart geen hinder van de kering tijdens de doorvaart. Alleen wanneer de kering gesloten wordt is scheepvaart naar Antwerpen niet mogelijk. Dit geldt in extreme omstandigheden wanneer de scheepvaart al gehinderd wordt en bijvoorbeeld een keer per jaar wanneer de kering wordt getest. Een stormvloedkering legt een bepaalde beperking op aan de diepgang van de schepen waardoor de vaargeul van de Westerschelde in de toekomst niet meer onbeperkt kan worden verdiept. Die mogelijkheid was er echter al niet meer vanwege bestaande tunnels.
- Het getij blijft behouden en het estuarium blijft bewaard. Uit de MER die in het kader van het Sigma-plan is uitgevoerd blijkt dat de stormvloedkering de kleinste impact heeft op mens en milieu. Dit komt omdat de kering de kleinste ingreep is waarbij niet veel dijkverhogingen nodig zijn.

- De stormvloedkering is een van de meest effectieve oplossingen om het land te beschermen tegen stormvloed. Met deze oplossing kan een veiligheidsniveau behaald worden waarbij de overstromingskans kleiner is dan 1/10000 per jaar. Stroomafwaarts van de kering kan een waterstandverhoging ontstaan ten gevolge van opstuwing. Hoe groot dit effect is en over welke lengte er dijkverhogingen zouden moeten worden uitgevoerd hangt helemaal af van de locatie van de kering. In het Sigma-plan wordt een locatie vlak voor Antwerpen voorgesteld, maar een andere mogelijkheid is bij de monding van de Westerschelde.

#### 4.6 Verbreding kustgebied

Deze oplossing wordt beschreven in 'plan Boorsma' [L.4]. Hierin wordt de mogelijkheid genoemd om de huidige kust richting Noordzee uit te breiden met een eilanden-rij. Op deze manier wordt een breed waddegebied gecreëerd dat extra bescherming kan bieden tegen stormvloed. Om te voorkomen dat het estuarium steeds weer verdiept en verbreed moet worden voor grote zeeschepen die door dit gebied naar Antwerpen moeten varen is een diepzeehaven gepland voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen.

- De positie van een zeehaven achter in een kombergingsgebied is niet logisch. De mogelijkheden om te groeien worden hier beperkt en grotere schepen kunnen steeds moeilijker de haven bereiken. Deze mogelijkheden zijn er wel wanneer een havenlocatie aan zee wordt gebouwd en ook de grootste schepen kunnen dan producten leveren aan de havengebieden van Antwerpen. Dit lijkt voor Nederland nadelig omdat de haven van Antwerpen hiermee een grotere concurrent van Rotterdam zou kunnen worden. Toch hoeft dit niet het geval te zijn. Antwerpen heeft duidelijk eigen kwaliteiten zoals een grote chemische industrie en ook een ander achterland. Samenwerking tussen deze twee grote havens en de kleinere havens in dit gebied kan er voor zorgen dat internationaal gezien een sterkere positie kan worden ingenomen. Internationaal gezien lijkt samenwerking tussen Antwerpen en Rotterdam ook vanuit geografisch oogpunt volkomen logisch. Een nadeel van een Belgische diepzeehaven voor de kust van Nederland is dat sommige goederen extra moeten worden overgeladen. Ook zal er een verschuiving in de arbeidsmarkt plaats vinden vanuit het dicht bevolkte Antwerpen naar de kust.



Figuur 4.5: Uitbreiding van het kustgebied, deel van 'Plan Boorsma' [L.4]



- Wanneer er voor de Westerschelde een waddengebied ligt vormt dit een bescherming tegen stormvloed en voor het land langs de zeearm. Het natuurlijke systeem van een estuarium blijft wel bestaan, maar verplaatst meer de Noordzee in. Het getij dringt dus minder ver de Westerschelde in, waardoor hier de extreme waterstanden afnemen. Omdat de haven voor de grote schepen aan zee ligt zijn onnatuurlijke verdiepingen dus niet, of veel minder, nodig in dit natuurlijke systeem. Dit is een duurzame oplossing.
- Hoewel voor de vroegere estuaria van Zeeland al op natuurlijke wijze zandbanken ontstaan, is het kunstmatig creëren van een waddengebied een dure oplossing en een grootschalige ingreep. Dit geldt ook voor de bouw van een diepzeehaven voor de kust zoals de Europoort. De aanleg van de haven en een kunstmatig waddengebied zal ook veel tijd kosten. Het zal lang duren voor zich een nieuw evenwicht instelt in zo een gebied. Maar ook dan nog zijn onderhoudswerkzaamheden nodig. De oplossing levert geen gesloten kust op en de zekerheid op bescherming tegen stormvloed is moeilijk te bepalen, ook omdat het een tijd duurt voordat het gebied stabiel is. Met de bouw van een diepzee haven voor de kust neemt ook het gebied dat tegen stormvloed moet worden beschermd weer toe. Het is dus wel een natuurlijke en duurzame bescherming, maar het past niet helemaal in de lijn van het verkorten van de kustlijn.

#### 4.7 Westerschelde afdammen tot zoetwatermeer

Zoals met meer delen van Nederland in het verleden is gebeurd kan ook de Westerschelde door middel van een dam worden afgesloten. Achter de dam zou dan een zoetwatermeer gecreëerd worden waarvan het waterpeil op een constant, redelijk hoog, niveau gehouden kan worden.

- Met behulp van grote sluisen in de dam kunnen schepen toegang behouden tot de havens. Natuurlijk zullen de sluisen een obstakel vormen voor de scheepvaart, maar de vaart van en naar de havens zal hierna vlotter kunnen verlopen vanwege het constant hoge waterpeil. Zonder verdere verdiepingen van de Westerschelde zou dan getij-onafhankelijke vaart mogelijk moeten zijn voor schepen met een diepgang van bijvoorbeeld 14,5 meter (dit is nu alleen mogelijk tijdens vloed). Doordat de stroomsnelheden zullen verminderen zal meer rivierslib gaan afzinken en blijft baggeren in de toekomst noodzakelijk om de scheepvaart niet te belemmeren.
- Wanneer er geen getijwerking meer is en een hoge waterstand wordt vastgehouden zullen schorren en platen onder water komen te staan. Hiervoor in de plaats zal dan een stilstaand zoetwatersysteem komen waarin in de loop van de tijd andere planten en dieren zich zullen vestigen. Ook dit kan een zeer aantrekkelijk natuurlijk systeem zijn. Op deze manier zou een soortgelijke situatie ontstaan als bij de Haringvliet. Hier worden echter ook weer plannen gemaakt om de sluisen open te zetten en getij toe te laten in het gebied. Een estuarium systeem wordt namelijk over het algemeen toch meer gewaardeerd en er wordt ook internationaal geprobeerd deze systemen te beschermen. Tegen deze opvatting ingaan zal dan ook ongetwijfeld tot veel weerstand leiden.
- Deze oplossing is voldoende effectief tegen stormvloed omdat een gesloten kustlijn wordt gecreëerd. Wanneer de dam in de monding van de Westerschelde wordt gebouwd heeft deze een lengte van ongeveer vier tot zes kilometer. Er kan met deze oplossing een hoog veiligheidsniveau worden bereikt waarbij de kans op overstroming ten gevolge van stormvloed 1/4000 per jaar of kleiner is.

#### **4.8 Afweging**

De oplossingen van dijkverhoging, overloopgebieden, Overschelde en een stormvloedkering worden ook behandeld in de MER en de kosten-batenanalyse van het Sigmaplan. Uit de kosten-batenanalyse komt de oplossing van overloopgebieden in combinatie met dijkverhogingen als beste naar voren. Uit de MER blijkt dat de stormvloedkering het minst belastend is voor mens en milieu. In beide rapporten wordt de oplossing van de Overschelde afgeschreven. Ook in dit rapport wordt de Overschelde niet gezien als volwaardige oplossing voor het probleem.

De meest ideale oplossing is diegene waarbij het natuurlijke estuarium behouden kan blijven, of zelfs kan worden uitgebreid, en waarbij ook uitbreiding van de haven van Antwerpen met grotere zeeschepen mogelijk is. Dit is het geval bij 'Verbreiding kustgebied' waarbij de kust wordt verbreed de Noordzee in en er een diepzeehaven voor de kust komt om Antwerpen te bereiken. Door het gedeeltelijk verplaatsen van de havenactiviteiten neemt de druk op de Westerschelde van de scheepvaart af en worden er meer mogelijkheden voor de haven van Antwerpen gecreëerd. Door de verbreding van de kuststrook wordt er echt meer ruimte voor water gecreëerd. Dit in tegenstelling tot het aanwijzen van overloopgebieden in het ingepolderde land. Hier wordt met veel moeite ook geprobeerd ruimte voor het water te creëren, maar dit gaat ten koste van de lokale bevolking en hun land. Daarnaast ontstaat hiermee het risico dat, wanneer een deel van het estuarium breder wordt gemaakt, in de loop van de tijd het hele estuarium breder wordt en het getij meer invloed krijgt waardoor de kans op overstromingen alleen maar toeneemt.

De beschreven oplossing van 'plan Boorsma' met de uitbreiding van de Nederlandse kust richting de Noordzee is wellicht de meest ideale en de meest duurzame oplossing. Vanuit de huidige situatie is een gesloten kust, zoals dat bij de andere zeearmen en de kust tot aan Den Helder ook is, waarschijnlijk de meest effectieve oplossing. Het beschikbare land wordt op die manier optimaal gebruikt en direct beschermd. Deze situatie wordt het best bereikt met een dam of een beweegbare stormvloedkering. De oplossing van de dam met scheepssluzen en de Westerschelde als zoetwatermeer is gezien de waardering voor estuaria niet realistisch. Dit is een herhaling van stappen wanneer gekeken wordt naar de Haringvliet. De oplossing van de stormvloedkering daarentegen is wel zeer geschikt voor de Westerschelde, ook wanneer gekeken wordt naar soortgelijke situaties in Nederland, maar vooral in het buitenland. De impact op het estuarium is gering en er zijn naast de gering weinig aanvullende aanpassingen nodig. De situatie met betrekking tot de haven van Antwerpen verandert met deze oplossing niet.

#### **4.9 Keuze oplossing**

Van de hiervoor beschreven oplossingen zijn ook nog verschillende combinaties mogelijk. De combinatie van een diepzeehaven voor de kust van Nederland in combinatie met een stormvloedkering is waarschijnlijk de meest geschikte oplossing voor de Westerschelde. Deze combinatie tussen stormvloedkering en diepzeehaven wordt ook beschreven in 'plan Boorsma'. Hiermee wordt het land effectief beschermd, maar wordt ook de Westerschelde ontlast. Op deze manier hoeven er in de toekomst geen of minder onnatuurlijke verdiepingen te worden doorgevoerd. Ook de situatie van de haven van Antwerpen wordt verbeterd.

De oplossing met een stormvloedkering, al dan niet gecombineerd met een diepzeehaven, wordt gezien als meest effectieve oplossing. De vloedstroom kan worden tegengehouden wanneer dit nodig is om het achterland te beschermen zonder dat andere functies in normale omstandigheden worden beperkt. Het veiligheidsniveau dat met deze oplossing kan worden bereikt is hoog en de impact op de omgeving is juist klein in vergelijking met de andere oplossingen. Het is goed om deze oplossing voor de Westerschelde nader te bekijken en daarom zal de stormvloedkering verder worden uitgewerkt.

## H5 Uitwerking oplossing stormvloedkering

Hoewel in het voorgaande deel is geconcludeerd dat het een goed idee is om de haven van Antwerpen wellicht te verplaatsen naar een diepzee haven voor de kust, wordt er in de uitwerking vanuit gegaan dat ook in de toekomst grote containerschepen Antwerpen kunnen bereiken. Dit is omdat in een later stadium van het onderzoek nader ingegaan zal worden op de gevolgen van schaalvergroting bij keerdeuren van stormvloedkeringen. Voor een stormvloedkering in combinatie met een diepzeehaven is de hier volgende uitwerking dus minder efficiënt.

Bij het ontwerpen van een primaire waterkering in Nederland moet onder andere worden uitgegaan van de Wet op Waterkeren. Hierin wordt voor het ontwerp van waterkeringen verwezen naar de Leidraden die zijn opgesteld door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). Voor het ontwerp van een stormvloedkering geldt de algemene Leidraad 'Grondslagen voor Waterkeren' waarin een algemene visie wordt beschreven over waterkeringen in Nederland en het ontwerpen en beheren van deze keringen. Meer specifiek is de Leidraad Kunstwerken waarin voor verschillende typen kunstwerken richtlijnen worden gegeven voor ontwerp, uitvoering en beheer.

In het begin van het ontwerp voor de stormvloedkering zal de totale kering worden beschouwd waarvoor een indeling wordt gemaakt en enkele globale afmetingen worden bepaald. Hierna zal specifiek worden ingegaan op de scheepvaartdoorgangen van de stormvloedkering.

Om de oplossing verder in te kaderen zal in dit hoofdstuk eerst de locatiekeuze plaatsvinden voor de stormvloedkering.

### 5.1 Locatiekeuze Stormvloedkering Westerschelde

Bij de keuze voor een locatie van de stormvloedkering wordt uitgegaan van drie locaties welke zijn verdeeld over het estuarium. De drie gekozen locaties zijn hieronder beschreven:

1. In de monding van de Westerschelde ten westen van Vlissingen. Deze locatie wordt beschreven in een rapport van Ingenieursbureau Boorsma [L.4].
2. In het midden van de Westerschelde, ongeveer op de lijn Ossenisse-Hoedekenskerke. Deze locatie wordt beschreven in een rapport van Ingenieursbureau Boorsma [L.5].
3. In het begin van de Zeeschelde, bij Oosterweel, iets stroomafwaarts van Antwerpen. Deze locatie wordt beschreven in het Sigmaplan [L.15].



Figuur 5.1: Onderzochte locaties voor stormvloedkering [Ingetekend op kaart van proses.n]

In het onderstaande schema worden enkele punten vergeleken die belangrijk zijn bij de locatiekeuze van een stormvloedkering:

<p>Invloed op waterstand in gesloten toestand en belasting van constructie</p>	<p>Een gesloten stormvloedkering zal bij locatie 3 waarschijnlijk het grootste waterstandverschil moeten keren omdat daar ook nu de hoogste waterstand bij vloed optreedt. Bovendien zal het water in het estuarium extra worden opgestuwd wanneer de getijstroom plotseling wordt gestopt. In de berekening van de MKBA voor het Sigmaplan staat dat de waterstand bij Oosterweel (locatie 3) 36 centimeter zal worden verhoogd. Hier zal de belasting door golfslag echter weer kleiner zijn dan in de monding van het estuarium. De waterstand stroomopwaarts zal in de loop van de tijd ook op locatie 3 het snelste stijgen omdat hier de minste ruimte is om de rivierafvoer op te vangen. Bij locatie 1 kan hiervoor de hele Westerschelde worden gebruikt. Voordeel hiervan is dat het gebied stroomopwaarts van de kering dan minder kans loopt op overstromingen.</p>
<p>Invloed op getij in open toestand</p>	<p>Voor elke locatie geldt dat de stormvloedkering het doorstroomprofiel iets zal verkleinen. Omdat de kering bij locatie 1 het langst is zal hier ook het doorstroomprofiel het meest veranderen en bij locatie 3 zal dit verschil het kleinste zijn. De verkleining van het doorstroomprofiel heeft invloed op het getij. De invloed van het getij zal afnemen op de Westerschelde en dit is vooral het geval bij de stormvloedkering op locatie 1.</p>
<p>Stroomsnelheden door de kering in open toestand</p>	<p>In de huidige situatie zijn de stroomsnelheden in de monding het grootst. Op locatie 2 zijn deze nog van dezelfde orde, bij locatie 3 zijn de stroomsnelheden lager. Bij elke locatie zal het doorstroomprofiel van het estuarium iets worden verkleind wanneer hier een stormvloedkering wordt gebouwd. Hierdoor zal de stroomsnelheid door de kering iets hoger worden dan in de huidige situatie. Dit verschil zal bij locatie 3 minimaal zijn omdat de stroomsnelheid hier al laag is en het profiel nauwelijks wordt verkleind. Bij locatie 1 zal het profiel het meeste worden verkleind en zal de stroomsnelheid het meest toenemen.</p>
<p>Invloed op sedimenttransport</p>	<p>Door hogere stroomsnelheden ter plaatse van de kering zal er uitschuring ontstaan. Omdat achter de kering in het estuarium gemiddeld het getij minder extreem zal zijn en de stroomsnelheden hier zullen afnemen, kan het sediment zich hier gaan afzetten waardoor het estuarium iets zal verzanden. Dit effect geldt vooral voor locatie 1 en minder voor locatie 3.</p>
<p>Invloed op natuurwaarden</p>	<p>Het estuarium kan lokaal uitschuren en in totaliteit iets verzanden. Dit hoeft voor de natuurwaarde van de Westerschelde geen negatief effect te zijn na de onnatuurlijke verdiepingen die de afgelopen jaren zijn uitgevoerd. Bij locatie 1 en 2 zou de kering over ondiepe gebieden lopen die zijn aangewezen voor natuurbehoud en waterstaatsdoeleinden. Bij locatie 2 betreft het ook platen die droogvallen. Dit zou locatie 3 iets aantrekkelijker maken. Voor locatie 3 zijn echter kilometers meer dijkverhogingen nodig. Dit drukt ook op de natuurwaarden en heeft een groter negatief effect op de beleving.</p>
<p>Invloed translatiegolf</p>	<p>Wanneer de kering wordt geopend bij een waterstandsverschil ontstaat er een translatie golf. Wanneer deze in de monding ontstaat kan deze in het estuarium versterkt worden. Wanneer deze bij Antwerpen ontstaat zal het oorspronkelijke waterstandsverschil wellicht groter zijn, maar verwacht wordt dat deze niet meer zal worden versterkt. Wanneer de kering goed is ontworpen en het openen en sluiten van de kering gecontroleerd gebeurt, hoeft een translatiegolf geen probleem te zijn.</p>

Invloed op scheepvaart	De scheepvaart kan worden gehinderd bij de bouw. Dit zal vooral gelden voor locatie 3 waar de minste ruimte is vlak voor de haven. Bij de doorvaart zouden er lokaal hogere stroomsnelheden kunnen voorkomen en kunnen de afmetingen een belemmering vormen. Er wordt echter vanuit gegaan dat de kering goed ontworpen is en geen problemen oplevert voor de scheepvaart. Dit zou ook geen onderscheid opleveren tussen de verschillende locaties.
Invloed op andere havens aan de Westerschelde	Invloed op andere havens is het kleinst voor locatie 3 en 2. Alleen bij locatie 1 worden de aanvoerroutes van Vlissingen mogelijk iets omgeleid. Dit effect zal echter niet groot zijn.
Inpasbaarheid	De ruimte bij locatie 3 is vrij beperkt. Toegangswegen en een bouwplaats aan de oever zijn hier minder makkelijk in te passen dan bij de andere twee locaties. Van locatie 2 is bekend dat hier vrij veel kabels en leidingen lopen. Vlak bij locatie 1 loopt in ieder geval 1 grote kabel over de zeebodem. Wat er onder locatie 3 door loopt is niet bekend. De bebouwingen op de oevers zijn bij locatie 1 en 2 minimaal en vormen geen belemmering bij de uitvoering.
Lijn met deltaplan	Eigenlijk is alleen locatie 1 in lijn met de overige werken van het Deltaplan en levert de gewenste situatie van een gesloten kustlijn op.
Kosten	Duidelijk is dat de kosten sterk afhankelijk zijn van de lengte van de kering. De geschatte lengtes zijn af te lezen van de locatiekaarten in bijlage 4. Locatie 1 is ongeveer 5750m, locatie 2 is 4300m en locatie 3 is 700m. Locatie 3 is duidelijk de goedkoopste optie. Toch zijn er ook nog andere factoren die kosten met zich meebrengen. Bij de bouw van de kering is er bij locatie 3 vlak voor de haven van Antwerpen de minste ruimte en zal de scheepvaart hier de meeste hinder ondervinden tijdens de bouw. Ook moeten de keringen stroomafwaarts van de stormvloedkering worden opgehoogd, dit betekent meer ophogingen voor locatie 3. Uit de MKBA van het Sigmaplan blijkt dat voor locatie 3 over een lengte van 113 km de dijken met gemiddeld 24 cm moeten worden opgehoogd. Voor locatie 2 is dit ongeveer de helft en voor locatie 1 zijn vrijwel geen aanvullende dijkverhogingen nodig.

Samenvattend kan worden opgemerkt dat een stormvloedkering op locatie 3 de minste invloed heeft op het estuarium. Alleen in gesloten toestand wordt de waterstand in de Westerschelde extra opgehoogd, wat ook meteen een van de grootste nadelen is. Hierdoor zijn aanvullende dijkverhogingen nodig. Dijkverhogingen zijn een extra kostenpost en hebben een negatief effect op de natuurwaarden. De inpassing van de kering op de locatie zal hier de meeste moeite kosten omdat er weinig ruimte in de haven is. De scheepvaart zal hier bij de bouw dan ook de meeste hinder ondervinden. Ondanks de extra dijkverhogingen zal deze locatie toch de minste kosten meebrengen omdat de kering het kortste is van de drie opties.

Naarmate de stormvloedkering meer richting de monding van de Westerschelde wordt gesitueerd zal de invloed op het estuarium toenemen. Dit heeft als grote voordelen dat het estuarium en het aanliggende land dus ook steeds meer wordt beschermd en er minder dijkverhogingen nodig zijn. Doordat het doorstroomprofiel iets wordt verkleind zijn er ook nog andere invloeden te verwachten. Het getij in het estuarium wordt in open toestand iets afgezwakt. Het estuarium zal mogelijk iets verzanden en juist in de buurt van de stormvloedkering gaan uitschuren tengevolge van lokale hogere stroomsnelheden. Deze invloeden zijn voor locatie 1 groter dan voor locatie 2 omdat bij locatie 1 het doorstroomprofiel het meeste zal worden aangepast. Dit is omdat de totale kering hier het langst is. Deze locatie zal hierdoor ook de meeste kosten meebrengen. Afgezien van de verwachting dat de invloeden op het estuarium in open toestand niet groot zullen zijn, hoeven de effecten ook niet altijd negatief te zijn.

Om een optimale locatiekeuze te maken zouden de precieze gevolgen voor de waterstanden en stroomsnelheden moeten worden benaderd in een simulatiemodel voor de Westerschelde. Dat is hier niet gedaan en de locatie die wordt gekozen hoeft dan ook niet de meest optimale te zijn.

Er wordt gekozen voor locatie 1. Hoewel deze locatie waarschijnlijk de meeste kosten met zich brengt wordt het van grotere waarde geacht dat het overstromingsrisico in de rest van de Westerschelde niet wordt vergroot. Deze oplossing zorgt juist voor de optimale afsluiting van het achterland in het geval van een stormvloed en realiseert de optimale situatie van een gesloten kustlijn. Ook stroomopwaarts van de kering is bij deze locatie het minste risico voor overstrooming bij een grote rivierafvoer van de Schelde. De locatie heeft verder weinig invloed op de natuurwaarden en de ruimte voor uitvoering en bouw is aanwezig. Daarnaast is deze locatie mooi te combineren met de gekozen oplossing van een diepzeehaven voor de kust zoals ook beschreven wordt in het plan van Ingeniebureau Boorsma [L.4]

## H6 Programma van Eisen en Randvoorwaarden

Hieronder staan de functies van de stormvloedkering in de Westerschelde beschreven:

- Water keren tijdens stormvloed
- Scheepvaart doorlaten onder normale omstandigheden
- Water doorlaten, zowel het getij als de rivierafvoer
- Doorlaten van vaste materialen zoals sediment, ijs en eventueel afval
- Behouden van Landschap, Natuur en Cultuur (LNC-waarden)

Het is gunstig wanneer een kering kan worden gecombineerd met andere functies zoals vervoer of recreatie. Dit is ook van belang in verband met politieke besluitvorming over de keuze voor een stormvloedkering. In dit ontwerp wordt echter niet verder ingegaan op deze combinatie van functies.

In het Functioneel PvE worden de eisen die deze functies aan een stormvloedkering stellen beschreven. De technische eisen worden in het Technisch PvE beschreven. In de daaropvolgende paragraaf staan de randvoorwaarden vermeld zoals die van buitenaf worden opgelegd. Deze zijn onafhankelijk van de gekozen oplossing.

### 6.1 Functioneel PvE

#### *Water keren*

- Ten tijde van stormvloed moet de kering een hoogwaterpeil en golfaanval vanaf de Noordzee met een kans op voorkomen volgens de geldende norm, zoals beschreven in de Wet op de Waterkering, kunnen keren. Hierdoor moet voorkomen worden dat de waterstand achter de kering hoger komt te staan dan de maximaal toegestane waterstand om zo het land langs de Westerschelde en de Zeeschelde achter de kering te beschermen tegen overstromen.
- De kering wordt gesloten bij bedreigende stormvloeden en zal dan een relatief hoog buitenwaterpeil moeten keren tegen een laag binnenwaterpeil.
- In principe wordt de kering weer geopend wanneer het buitenwaterpeil gelijk is aan het binnenwaterpeil en nog afneemt in de tijd.
- Er kan besloten worden om bij stormvloeden die bestaan uit meerdere hoogwaterpieken de kering gesloten te houden. Dit zal een situatie opleveren met een relatief laag buitenwaterpeil en een hoger binnenwaterpeil. Om deze reden moet de constructie tweezijdig het water kunnen keren. Voor de maximale aaneengesloten sluitingsduur van de kering wordt een periode van 48 uur gesteld.
- In gesloten toestand is lekken door de kering (piping, overslag) in bepaalde mate toegestaan omdat de Westerschelde achter de kering een komberging heeft waarin een bepaalde hoeveelheid water kan worden opgevangen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat ook neerslag en de afvoer van de Schelde invloed hebben op het waterpeil achter de kering. Belangrijk is dat de maximale waterstand achter de kering niet wordt overschreden. In de Leidraad Kunstwerken [L.17] staat hierover: Gedurende de hele planperiode moet voor het gesloten kunstwerk de kans op overschrijding van het toelaatbare instromende volume buitenwater beneden de normfrequentie blijven.

#### *Scheepvaart doorlaten onder normale omstandigheden*

- De constructie moet onder normale omstandigheden (dit betekent géén stormvloed en de kering is open) de scheepvaart doorlaten en zo min mogelijk hinder opleveren voor de scheepvaart.
- In de kering moeten minimaal twee doorvaartopeningen komen voor de zeeschepen. Een in de noordelijke hoofdvaargeul en een in de zuidelijke hoofdvaargeul. In elke hoofdvaargeul moeten twee gemiddelde zeeschepen elkaar kunnen passeren.
- In de zuidelijke hoofdvaargeul moet de afmeting van een doorgang zodanig groot zijn dat de volgende scheepscombinaties de kering zonder belemmeringen kunnen passeren, ook tijdens laagwater:
  - Een maatgevend containerschip moet op eigen kracht in een richting kunnen doorvaren.
  - Twee middelgrote containerschepen moeten elkaar op eigen kracht in tegengestelde richting kunnen passeren.
- In de toekomst (loop van de planperiode) moeten eventueel ook nog grotere schepen worden toegelaten. Deze schepen hoeven dan niet meer ongehinderd Antwerpen te kunnen bereiken, maar alleen tijdens hoogwater of moeten door de kering worden geloodst.
- De scheepvaart moet op duidelijke wijze door de kering worden geleid zodat aanvaringen met de constructie en andere schepen zoveel mogelijk worden voorkomen.

#### *Water doorlaten*

- De kering zal in normale omstandigheden het water doorlaten om de Westerschelde toegankelijk te houden voor het getij van de Noordzee en de Schelde te kunnen blijven afvoeren naar de Noordzee.
- De stroomsnelheden mogen in normale omstandigheden niet veel hoger worden dan de huidige 2 m/s. Bij het openen en sluiten van de kering kunnen wel hogere stroomsnelheden voorkomen. Toch mogen deze ook niet zo hoog worden dat de fundering van de kering in gevaar kan komen door erosie.

#### *Doorlaten van vaste materialen*

- Tijdens normale omstandigheden, dit betekent geen stormvloed en de kering is open, moet de kering vaste materialen zoals ijs, vuil en sediment doorlaten. Wanneer deze materialen niet vrij door kunnen stromen, maar zich ophopen bij de kering, kan hinder ontstaan voor de andere functies.

#### *Behouden LNC-waarden*

- De kering moet zo worden ingepast in de omgeving dat hierdoor zo min mogelijk negatieve effecten ontstaan.
- Eventuele negatieve effecten voor de omgeving moeten zoveel mogelijk worden gecompenseerd of gemitigeerd.
- De kering moet een voldoende nat oppervlak hebben zodat het getij en de morfologie op de Westerschelde in normale omstandigheden zo min mogelijk worden aangetast. De natuurlijke situatie van het estuarium zoals die nu bestaat moet zoveel mogelijk behouden blijven.
- De verschillende vissoorten (voornamelijk tong, garnaal, kokkels, paling en schol), moeten in normale omstandigheden de kering zonder belemmering kunnen passeren. De kering mag de bewegingsvrijheid en de leefomgeving van de vissoorten niet zodanig aanpassen dat dit invloed heeft op de grootte en de samenstelling van de verschillende vissoorten.



## 6.2 Technisch PvE

### Constructieve onderdelen

- De constructie zal bestaan uit verschillende vaste en beweegbare onderdelen om de hierboven beschreven functies te vervullen.
- Naast de bovenbenoemde onderdelen zouden in de constructie onderdelen kunnen worden opgenomen om energie op te wekken bij een waterstandsverschil over de kering en kunnen pompen worden opgenomen om een waterstandsverschil over de kering te verkleinen. Dit wordt in deze situatie echter niet nuttig gevonden.
- Er hoeven in de constructie ook geen onderdelen te worden opgenomen om in de toekomst eventueel een verkeersfunctie over de kering te laten lopen.
- Om het getij en de morfologie op de Westerschelde zo min mogelijk te veranderen mogen de vaste constructieve onderdelen tijdens de gemiddelde waterstand maximaal 20% van het bestaande dwarsprofiel innemen.
- Er zal over een bepaalde lengte bij de doorstroomopeningen bodembescherming opgenomen moeten worden om de fundering van de constructie te beschermen.
- De beweegbare delen moeten in staat zijn om onder een waterstandsverschil de kering te openen en af te sluiten.
- De beweegbare delen moeten het water tweezijdig kunnen keren.
- Om het in- en uitstromende debiet zo nauwkeurig mogelijk te kunnen regelen moeten de beweegbare deuren ook halfopen kunnen staan.
- De beweegbare delen moeten in korte tijd de openingen in de kering kunnen afsluiten, maar ook weer snel kunnen openen. Als maximale tijd wordt hiervoor 2 uur aangehouden. Dit is de tijd die een hoogwatergolf ongeveer nodig heeft om Antwerpen te bereiken. Beter is het wanneer de kering sneller kan worden gesloten. Bij het snel openen en sluiten van een kering moet wel rekening worden gehouden met het ontstaan van een translatiegolf.

### Scheepvaartdoorgangen

- Het maatgevende containerschip voor de doorvaartopeningen is een schip met een maximale capaciteit van 9000 TEU (17/18 containers breed). De afmetingen van zo een schip, een gemiddeld containerschip en een toekomstig containerschip zijn opgenomen in onderstaande tabel.

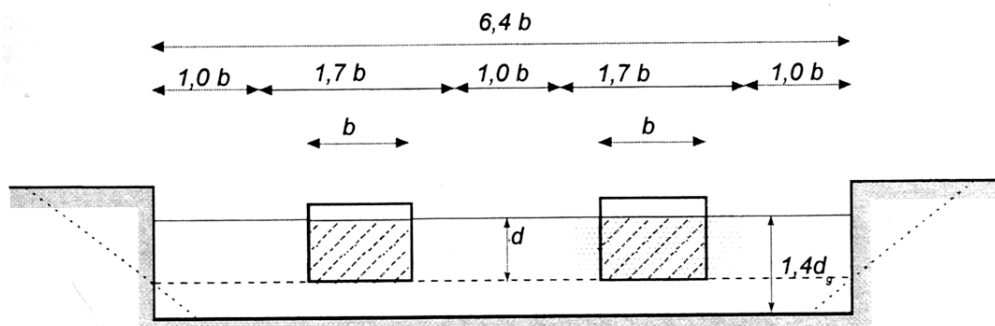
Scheepsoort	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepte [m]	Hoogte [m]	TEU
Maatgevend containerschip	355	42,6	14,5	onbeperkt	9000
Gemiddeld containerschip	120	20	8	onbeperkt	1500
Toekomstige containerschepen*	382	54,2	13,5	onbeperkt	>13500

Tabel 6.1: Overzicht van de verschillende containerschepen

\*Zie artikel Hyundai in bijlage 5

- Voor het maatgevende containerschip is volgens de Richtlijnen Vaarwegen een vaarstrook nodig van 1,4 keer de breedte van het schip. Daarnaast moet aan beide zijden een veiligheidsstrook van 1 keer de breedte worden aangehouden. De totaal benodigde breedte is in dit geval:  $3,4 \times 42,6[m] = 145 [m]$ . Voor de benodigde waterdiepte moet minimaal 1,4 keer de diepgang van het schip worden aangehouden. Dit betekent:  $1,4 \times 14,5 [m] = 20,3 [m]$ .
- Voor een gemiddeld containerschip gelden bij doorvaart in één richting de volgende maten:  
De benodigde breedte is minimaal  $3,4 \times 20[m] = 68[m]$ ,  
De benodigde waterdiepte is minimaal  $1,4 \times 8[m] = 11,2 [m]$ .

- Voor de combinatie van twee gemiddelde containerschepen die elkaar in tegengestelde richting moeten passeren gelden de Richtlijnen Vaarwegen voor de zeevaart zoals die hieronder in de figuur staan weergegeven.



Figuur ? : Richtlijnen voor minimum dwarsprofiel voor de zeescheepvaart [Dictaat Inleiding Waterbouwkunde, blz. 4-29]

De totaal benodigde breedte is in dit geval:  $6,4 \times 20 \text{ [m]} = 128 \text{ [m]}$

De minimaal benodigde waterdiepte is in dit geval:  $1,4 \times 8 \text{ [m]} = 11,2 \text{ [m]}$

- De doorvaarthoogte van de doorvaartopeningen voor zeeschepen moet onbeperkt zijn.

#### Belastingen

- Alle belastingen die op de kering werken worden afgedragen naar de ondergrond.
- De te keren waterstanden en de optredende golfbelasting zijn afhankelijk van de hydraulische randvoorwaarden (zie volgende paragraaf). Deze moeten worden omgerekend naar ontwerpwaterstanden door de planperiode in rekening te nemen. Dit betekent dat rekening gehouden moet worden met de volgende effecten:
  - Hoogwaterstijging, inclusief NAP-daling in de planperiode
  - een toeslag voor buistoten en bui-oscillaties
  - Golfoverslaghoogte
  - Lokale bodemdaling
  - Zettingen
- Voor de minimale waterstand voor de kering tijdens een stormvloed wordt uitgegaan van een de waterstand met een kans op voorkomen van 1/100 per jaar.
- Voor de waterstanden achter de kering geldt dat deze maximaal de waterstand is waar het achterland in België nu tegen is beschermd. Dit is de waterstand met een kans op voorkomen van 1/350 per jaar. Hierbij moet rekening worden gehouden dat de waterstand achter de kering ook wordt bepaald door neerslag, afvoer van de Schelde en lekkage door de gesloten kering. De stijging van het waterpeil achter de kering gedurende de sluitingsperiode is dan voornamelijk afhankelijk van de komberging achter de kering. Voor de minimale waterstand achter de kering wordt het grenspeil aangehouden waarbij de kering gesloten wordt. Dit is de waterstand met een kans op voorkomen van 1/2 per jaar.

### *Betrouwbaarheid*

- De te ontwerpen constructie moet een betrouwbare constructie zijn.
- De bovengenoemde functies moeten tijdens de gehele planperiode van 200 jaar gewaarborgd worden.
- Zakkingen moeten tijdens de planperiode beperkt blijven in verband met het functioneren van de beweegbare delen.
- Wanneer één onderdeel van de constructie bezwijkt mag niet meteen de hele constructie bezwijken.
- Wanneer de kering na hoogwater niet meer open gaat, moet de kering in staat zijn ook het negatieve waterstandverschil te keren.
- De beweegbare onderdelen van de kering worden aangestuurd door een automatisch besturingssysteem wat de waterstanden en weersvoorspellingen gebruikt bij het beoordelen van de situatie.
- De sluitings- en openingsprocedure moet, afgezien van eventuele sluitingen tijdens stormvloeden, ook regelmatig getest worden.

*De volgende twee eisen komen uit de Leidraad Kunstwerken [L. 17]:*

- De kans dat het kunstwerk niet sluit en het waterpeil van het buitenwater hoger komt dan het open keerpeil van de constructie moet kleiner zijn dan  $0,1 \cdot \text{normfrequentie}$ .
- Bij het niet overschrijden van de normomstandigheden mag de kans dat het kunstwerk constructief bezwijkt niet groter zijn dan  $0,01 \cdot \text{normfrequentie}$ .

### *Bouw en onderhoud*

- De bouw moet zo min mogelijk hinder opleveren voor de scheepvaart.
- Van belang is dat de bouwperiode zo kort mogelijk wordt gehouden.
- Zo veel mogelijk onderdelen moeten geprefabriceerd worden om op de bouwplaats in elkaar gezet te worden.
- De bouwplaats moet goed toegankelijk zijn om al het benodigde materiaal en materieel aan te voeren, zowel over land als over water.
- Uit het oogpunt van de lange gebruikperiode moet de kering duurzaam worden ontworpen en goed te onderhouden zijn. Beweegbare delen moeten zoveel mogelijk kunnen worden geïnspecteerd en worden onderhouden in droge omstandigheden. Beweegbare delen moeten kunnen worden vervangen, vaste onderdelen moeten in principe kunnen blijven staan en eventueel gerepareerd kunnen worden.

### 6.3 Randvoorwaarden

#### Topografische randvoorwaarden

- De locatie van de kering is zoals aangegeven op de plattegrond in bijlage 4 [B4.1]. De kering sluit aan beide zijden op het land aan waar niet veel bebouwing is.
- Het bodemprofiel ter plaatse van de kering is zoals aangegeven in bijlage 6.

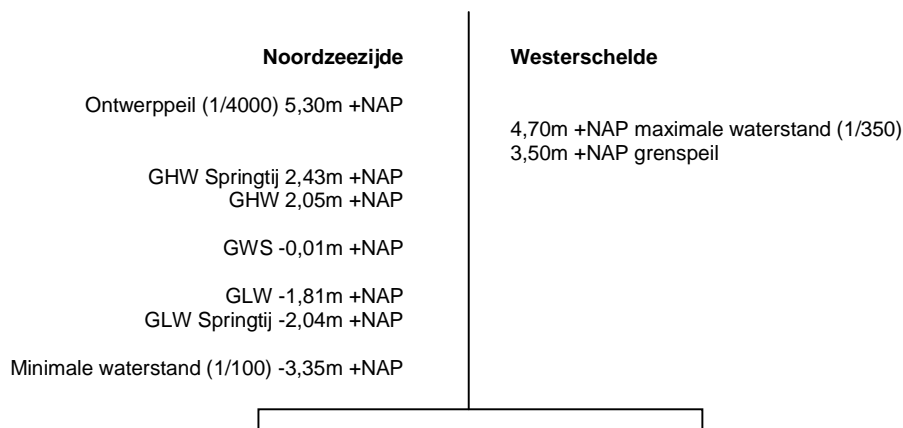
#### Hydraulische randvoorwaarden

- De normfrequentie is vastgelegd in de Wet op de Waterkering en deze is 1/4000 per jaar voor het gebied rond de Westerschelde.
- Uit de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 [L. volgen de volgende waarden voor de locatie van de kering:

	Toetspeil 2006 [m +NAP]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]
Locatie Noord	5,20	3,02	12
Locatie Zuid	5,20	3,60	12

Het verschil in golfhoogten komt door de oriëntatie van de kust ten opzichte van de inkomende golven.

- Het ontwerppeil voor de omgeving van Vlissingen is een waterpeil van 5,30m +NAP bij een normfrequentie van 1/4000.
- Het minimale waterpeil bij een stormvloed is -3,35m +NAP met een kans op voorkomen van 1/100 per jaar.
- Het grenspeil met een overschrijdingskans van 1/2 per jaar is 3,50m +NAP.
- De maximale waterstand op de Westerschelde is 4,70m +NAP met een overschrijdingskans van 1/350 per jaar.
- Een overzicht van de verschillende waterstanden anno 2005 is in de onderstaande figuur te zien.



- De overwegende stroomrichting is Oost vóór hoogwater en West na hoogwater bij Vlissingen. Alleen bij het vaste land wijkt de stroomrichting iets af richting Zuid (vóór hoogwater) of Noord (na hoogwater).
- De oppervlakte van de Westerschelde die wordt gebruikt voor komberging is 47000 ha (=4,7\*10<sup>9</sup> m<sup>2</sup>).
- De extreme afvoer voor de Schelde is een afvoer van 500 m<sup>3</sup>/s.

#### Grondmechanische randvoorwaarden

- Er wordt uitgegaan van een zandlaag vanaf -30m +NAP (conusweerstand = 20MPa, wrijvingsgetal=4%)

## H7 Schetsontwerpen stormvloedkering

In deze fase wordt er, uitgaande van de functies, eisen en randvoorwaarden die er aan de constructie zijn gesteld, een of meerder schetsontwerpen gemaakt. Hieruit zal een keuze volgen voor het ontwerp dat in de volgende fase verder zal worden uitgewerkt.

### 7.1 Ontwerpmethode

Voor de ontwerpen van een stormvloedkering in de Westerschelde wordt uitgegaan van de "traditionele" ontwerpmethode. Hierbij wordt uitgegaan van oplossingen die in het verleden al zijn toegepast in soortgelijke situaties en wordt er gekeken of die oplossingen ook geschikt zijn voor de huidige situatie. In dit geval kan er worden gekeken naar de oplossingen van stormvloedkeringen die beschreven zijn in het vooronderzoek (zie bijlage 2). Hieruit kunnen twee oplossingen worden gehaald die geschikt zouden zijn voor de Westerschelde:

- Rising sectordeuren voor de scheepvaart doorgangen, zoals die ook bij de Theems en de Eems zijn toegepast. Voor de overige openingen kunnen verticale hefschuiven worden toegepast zoals dit ook bij de Oosterschelde en de Eems is gedaan.
- Horizontale sectordeuren voor de scheepvaart, zoals deze ook zijn toegepast in de Finse Golf bij St. Petersburg en in de Nieuwe Waterweg. Voor de overige openingen kunnen verticale hefschuiven worden toegepast zoals dit ook bij de Oosterschelde en de Eems is gedaan.

Deze beide oplossingen voldoen aan de eisen, ze kunnen onder andere het water in twee richtingen keren en maken grote scheepvaart doorgangen mogelijk met onbeperkte hoogte. Dit geldt niet voor de oplossing met de flapgates zoals die gekozen is in Venetië. Hier heeft de scheepvaart wel alle mogelijkheden, maar kan het water maar in één richting worden gekeerd met een beperkt hoogteverschil. De oplossing zoals die in de Cardiff Bay is toegepast geeft een te beperkte doorgang voor de scheepvaart op de Westerschelde.

### 7.2 Keuze verticale hefschuif

Voor de delen in de kering die geen scheepvaart hoeven door te laten, maar wel water moeten doorlaten in gewone toestand en water moeten keren tijdens stormvloeden, wordt gekozen voor verticale hefschuiven. Er is al veel ervaring met deze constructie omdat dit soort schuiven al veelvuldig zijn toegepast in de waterbouwkunde, zoals ook bij de Eemskering (figuur 7.1) en de Oosterscheldekering. Dit is efficiënt voor de productie, maar ook gunstig voor de betrouwbaarheid van de schuiven. De schuiven kunnen wat lengte en hoogte betreft wat van elkaar verschillen zodat het bodemprofiel van de Westerschelde goed gevolgd kan worden en niet veel hoeft te verschillen van de huidige situatie. Een overspanning van ongeveer 40 meter per schuif is hierbij goed haalbaar en dit is ook nog een efficiënte afmeting voor dit soort constructies. Onderhoud aan de schuiven is goed mogelijk in geopende toestand.



Figuur 7.1: Verticale hefschuif in de Eemskering. [www.ems-sperrwerk.de/grafiken]

### 7.3 Vergelijking rising sectordeur en horizontale sectordeur

De horizontale sectordeur is toegepast in de Maeslantkering (zie figuur 7.3). Ook het ontwerp voor de kering in de Finse Golf bij St. Petersburg heeft dit soort deuren opgenomen voor een grote scheepvaartopening. De rising sectordeuren zijn al succesvol toegepast in de Theemskering en ook in de Eemskering (zie figuur 7.2). Hieronder zullen enkele positieve en negatieve punten van beide deuren worden besproken en met elkaar worden vergeleken. Uiteindelijk wordt een keuze gemaakt tussen de beide oplossingen.

#### *Sluitingsprocedure*

De sluitingsprocedure duurt bij de horizontale sectordeuren veel langer. Het invaren en afzinken van de grote vakwerkarmen duurt bij de Maeslantkering 2 uur. Het dichtdraaien van de rising sectordeur in de Eemskering duurt slechts 30 minuten.

#### *Constructieafmetingen*

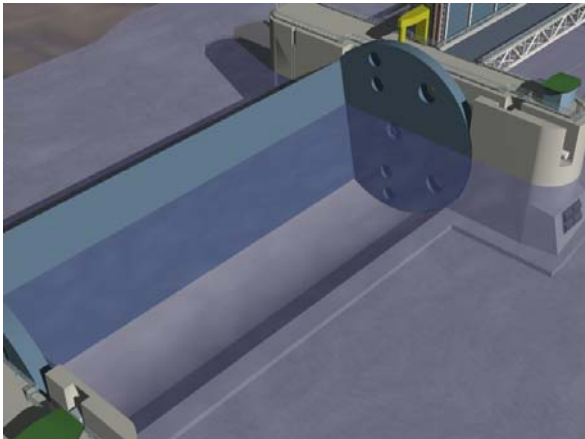
De armen van de horizontale sectordeur zijn enorme constructies. Doordat deze in het horizontale vlak bewegen en aan de buitenkant worden geborgen nemen de deuren veel ruimte in beslag. Dit heeft ook invloed op het natte doorstroombroefiel van de totale kering wat hierdoor kleiner zal worden. De rising sectordeur is in dit opzicht efficiënter doordat de deur in de diepte wordt opgeborgen. Nadeel hiervan is dat er een grotere bouwdiepte van de constructie.

#### *Lekkage*

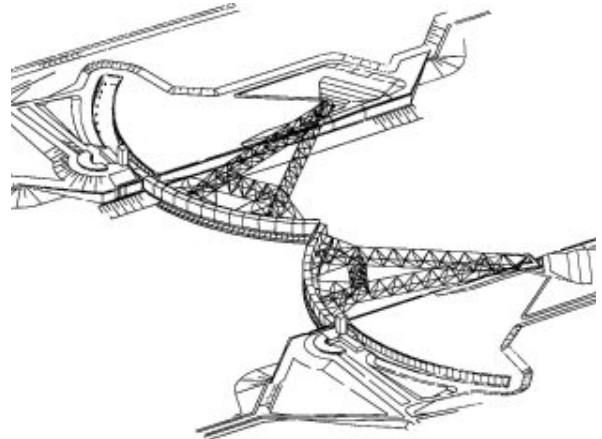
Doordat de horizontale sectordeuren niet helemaal stabiel liggen in de stroming is er een ruimte tussen de twee deuren nodig (ongeveer 1,5 meter) om botsingen en schade te voorkomen. Hierdoor ontstaat een lekkage door de kering. Deze lekkage hoeft geen problemen tot gevolg te hebben, maar feit is wel dat de rising sectordeur stabielere is en minder lekkage heeft.

#### *Onderhoud*

Beide deuren kunnen in droge omstandigheden worden onderhouden en worden gerepareerd. Voor de rising sectordeur levert dit wel hinder op voor de scheepvaart en voor de horizontale sectordeur niet.



Figuur 7.2: Rising sectordeur, toegepast in de Eemskering [www.ems-sperrwerk.de/grafiken]

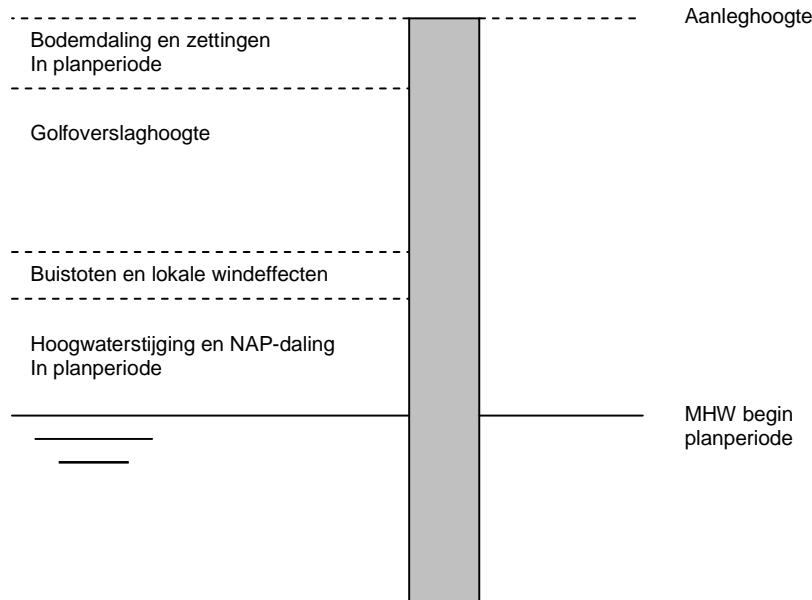


Figuur 7.3: Horizontale sectordeur, toegepast in de Maeslantkering. [Rijkswaterstaat, www.deltawerken.com]

De rising sectordeuren hebben zich al in meerdere stormvloeden bewezen, terwijl de horizontale sectordeuren alleen nog maar als test zijn gesloten. De afmetingen van de bestaande rising sectordeuren zijn echter maar 60 meter en dit is veel minder dan voor de Westerschelde is geëist. Met de horizontale sectordeuren zijn al veel grotere overspanningen gerealiseerd. Omdat wordt verwacht dat de rising sectordeuren ook voor grotere overspanningen kunnen worden toegepast en de principeoplossing beter bij de Westerschelde past, wordt de oplossing met de rising sectordeur gekozen om uit te werken. In de verdere uitwerking van het ontwerp zal vooral worden ingegaan op de rising sectordeur en de dimensionering hiervan.



De berekening van de aanleghoogte bestaat uit de volgende bijdragen:



- De maatgevende hoogwaterstand (MHW) aan het begin van de planperiode. Dit is het ontwerppeil anno 2005 volgens de norm: 5,30m +NAP.
- De hoogwaterstijging, inclusief NAP-daling. Hiervoor geldt de richtlijn voor lange termijn projecten uit de 3<sup>e</sup> kustnota: 60 cm/eeuw.
- Een toeslag voor buistoten en bui-oscillaties en eventueel lokale opwaaiing. Er wordt vanuit gegaan dat de bijdragen van buistoten en bui-oscillaties in de waterstandstatistiek zijn verwerkt. Bij deze statistiek staat wel vermeld dat er lokaal door windeffecten waterstandverschillen van enkele decimeters kunnen optreden. Voor deze bijdrage wordt 0,2 meter aangehouden.
- Bodemdaling en zettingen in de planperiode. Deze bijdrage wordt gesteld op 0,3 meter gedurende de planperiode.
- De golfoverslaghoogte. Deze hoogte bepaald hoeveel water er over de kering slaat tijdens een storm. De berekening hiervan staat hieronder uitgewerkt. De bijdrage hiervan is 2,77 meter.

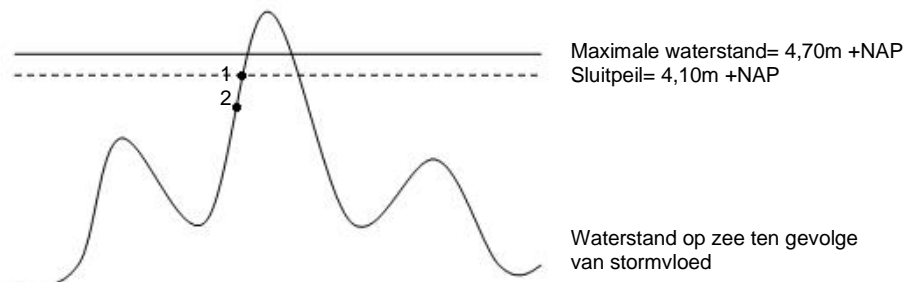
### 8.1.1 Berekening golfoverslaghoogte

Bij de berekening van de golfoverslaghoogte wordt er verder nog uitgegaan van de volgende gegevens:

- De planperiode voor de kering is 200 jaar.
- De significante golfhoogte ( $H_s$ ) is 3,60m, hierbij is er vanuit gegaan dat deze gedurende de planperiode gelijk blijft.
- De maximaal toegestane waterstand op de Westerschelde is het maximale peil dat, na voltooiing van de huidige werkzaamheden, op dit moment ook geldt: 4,70m +NAP.
- De oppervlakte van de Westerschelde welke voor berging wordt gebruikt is  $4,7 \cdot 10^8 \text{ m}^2$ .
- De maximale afvoer van de Schelde is  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- De sluitingsfrequentie halverwege de planperiode is 0,5 keer per jaar.
- Het sluitpeil van de kering is 4,10 meter en is bepaald door de sluitfrequentie van 0,5 per jaar halverwege de planperiode. Dit is het grenspeil. Anno 2005 is deze voor de Westerschelde 3,50 m. Bij een zeespiegelstijging van 0,6 m per eeuw betekent dat het sluitpeil halverwege de planperiode 4,10 m is. In de eerste helft zal de kering minder vaak hoeven te sluiten dan de gestelde sluitingsfrequentie, in de tweede helft juist vaker.



Voor de berekening van de golfoverslaghoogte worden twee scenario's bekeken:



Figuur 8.2: Sluitingsmomenten voor de twee beschouwde scenario's

- De kering reageert niet op het waarschuwingssysteem en wordt pas (handmatig) gesloten bij sluitpeil (dit is het peil waarbij de kering moet zijn gesloten, 4,10m +NAP). In de 30 min van sluiting stijgt het waterpeil op de Westerschelde nog 0,5 meter. De kering wordt na een stormperiode van 6 uur weer geopend en de waterstand op de Westerschelde daalt weer. In 6 uur is er bij een maximale Schelde afvoer een waterstandverhoging van 2,5 cm. Er is nu nog een buffer van 7,5 cm tot de maximale waterstand van 4,70m. Deze buffer wordt gebruikt voor het water dat over de kering slaat. Tijdens de stormperiode van 6 uur is er een debiet over de kering toegestaan van 0,28 m<sup>3</sup>/s per meter kering.

De golfoverslaghoogte wordt berekend met de volgende formule:

$$h_{kr} = -\frac{1}{3} \gamma_{\beta} \gamma_n H_s \ln \left[ q / (0,13 \sqrt{g H_s^3}) \right]$$

Met hierin:	$\gamma_{\beta}$	Invloedsfactor scheve golfival= 1
	$\gamma_n$	Invloedsfactor neusconstructie= 1
	$H_s$	Significante golfhoogte= 3,6 m
	$q$	Toegestane debiet per meter kering= 0,28 m <sup>3</sup> /s (zie bijlage 7)
	$g$	Zwaartekracht versnelling= 9,81 m/s <sup>2</sup>

Invullen van bovenstaande gegevens geeft een golfoverslaghoogte van 2,77 meter.

- De kering wordt op tijd gesloten. Dit is bij een waterstand van ongeveer 3,60m +NAP, waarbij de verwachting is dat de waterstand nog zal stijgen boven de 4,10m +NAP. Toch zal de waterstand nog 0,1 meter stijgen boven het sluitpeil. De kering gaat na de eerste stormperiode echter niet meer open en blijft de maximale duur van 48 uur gesloten. In deze periode stijgt de waterstand door de Schelde afvoer 0,2 meter. Er is nog een buffer van 0,3 meter over. Tijdens de sluitingsperiode van 48 uur wordt de kering maximaal de helft van de tijd zwaar belast en mag er een debiet van 0,28 m<sup>3</sup>/s per meter kering over heen slaan (zie bijlage 7). Dit is hetzelfde als in de eerste situatie en de golfoverslaghoogte is dan ook hetzelfde als in het eerste geval: 2,77 meter.

De totale aanleghoogte van de kering wordt naast de golfoverslaghoogte bepaald door de volgende bijdragen: 5,30 + 2\*0,60 + 0,20 + 0,30 + 2,77 = 9,87m +NAP.

De aanleghoogte wordt afgerond op 10m +NAP. Dit is iets lager dan de zeeweringen aan weerszijden van de kering (bij Vlissingen en Breskens). Maar bij de stormvloedkering is het dan ook toegestaan dat er water overheen slaat. Bij de andere zeeweringen is dit niet toegestaan omdat hierdoor de kans op bezwijken enorm toeneemt.

## 8.2 Indeling kering

De belangrijkste afmetingen van de verschillende onderdelen worden in deze paragraaf bepaald. Aan het eind zal een de indeling van de kering in een totaaloverzicht worden gegeven.

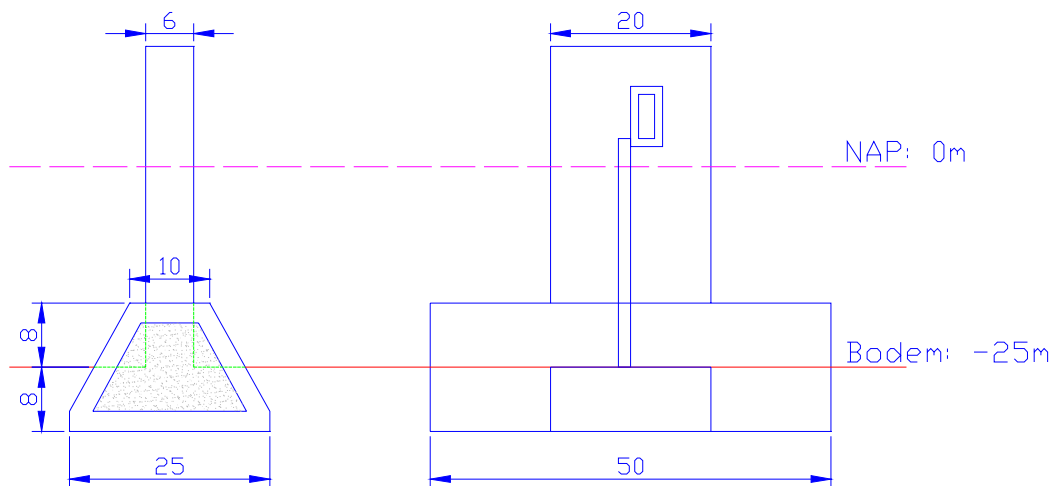
### 8.2.1 Scheepvaartopeningen

Voor de indeling van de kering is uitgegaan van twee doorvaartopeningen van 70 meter breed met de drempel op -15m +NAP in de Noordelijke vaarroute. Schepen met een breedte tot 20 meter moeten hier zonder enige hinder te ondervinden van de kering doorheen kunnen varen. Bredere schepen met een diepgang tot ongeveer 10 meter kunnen hier ook nog doorheen tijdens laag- en hoogwater, maar moeten wellicht vaart minderen. Anders kunnen deze en grotere schepen gebruik maken van de hoofdvaartopening in de zuidelijke vaarroute met een breedte van 145 meter en de drempel op -25m +NAP. Hiernaast ligt nog een opening die gelijk is aan die van de noordelijke vaarroute om de maten hetzelfde te houden (makkelijker produceren). In de planperiode is het te verwachten dat er nog grotere schepen gebouwd gaan worden Deze schepen kunnen dan niet meer zelfstandig of ongehinderd Antwerpen bereiken. Zij moeten geloodst worden of kunnen alleen bij hoogwater naar Antwerpen varen.

### 8.2.2 Hefschuiven

De rest van de kering bestaat uit beweegbare hefschuiven. Voor de schuiven is uitgegaan van een overspanning van 40 meter. Dit is ook ongeveer toegepast in de Oosterschelde en is dus een veilige keuze. Wellicht kan deze keuze nog geoptimaliseerd worden (misschien is een overspanning van 60 meter, zoals in de Eems is toegepast, kosten-technisch aantrekkelijker). Een kleinere overspanning van bijvoorbeeld 30 meter is waarschijnlijk niet geschikt omdat dit meer pijlers oplevert en het doorstroombrofiel dan meer wordt aangetast.

Voor de globale dimensies van de pijlers van de schuiven is uitgegaan van de situatie in de Oosterschelde: grondverbeteringen en fundering op staal. Voor de breedte van de pijlers is uitgegaan van 6 meter (zie figuur 8.3).



Figuur 8.3: Dwarsdoorsnede en zijaanzicht van de pijlers voor de hefschuiven met de globale afmetingen.

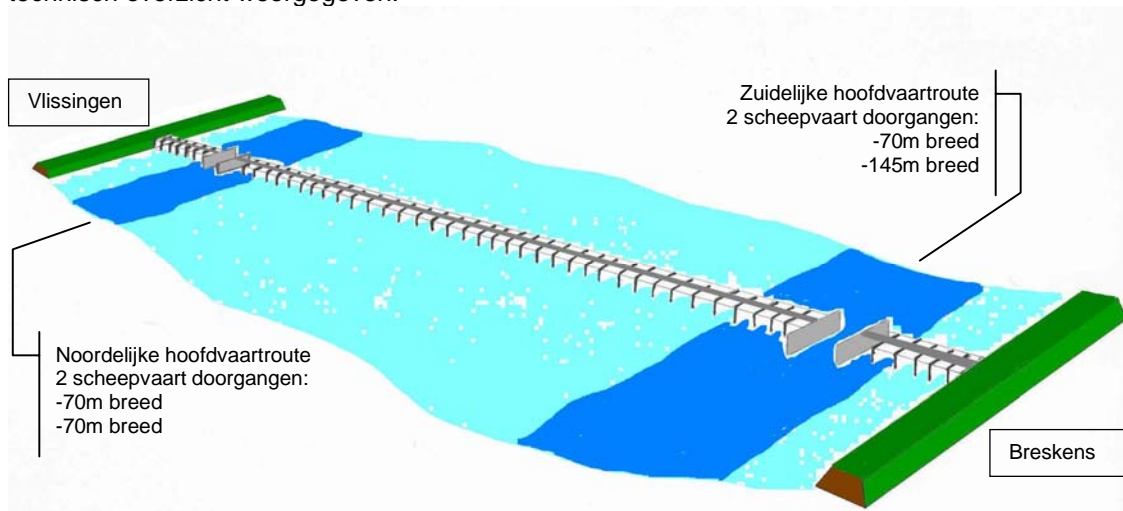
De pijlers en afmetingen zijn gecontroleerd op afschuiven en kantelen, zie berekeningen in de bijlagen. Hierbij is de maximale spanning die onder de pijlers mag optreden gelijk aan  $500 \text{ kN/m}^2$ . De optredende spanningen zijn niet groter dan  $400 \text{ kN/m}^2$ .

De drempelhoogtes van de schuiven zijn per 5 meter verschillend en volgen zoveel mogelijk het bestaande bodemprofiel. Het profiel kan beter gevolgd worden, maar dan komen er heel veel verschillende pijlers en dat is niet handig bij de productie. De aansluiting tussen de schuiven en de beide landhoofden verloopt via een dichte dam.

Bij een pijlerbreedte van 6 meter en een overspanning van de schuiven van 40 meter wordt de hart-op-hart afstand tussen de pijlers 46 meter. Wanneer de scheepvaartdoorgangen en de aansluitingen naar het land worden afgetrokken van de totale lengte van de kering zijn er 109 schuiven nodig.

### 8.2.3 Totaaloverzicht indeling kering

Een totaaloverzicht van de indeling van de kering met de verschillende schuiven en scheepvaartdoorgangen is hieronder te zien. Op de volgende pagina staat in figuur 8.5 een technisch overzicht weergegeven.



Figuur 8.4: Totaaloverzicht van de indeling van de stormvloekering

In het Programma van Eisen was gesteld dat de vaste constructieve onderdelen tijdens de gemiddelde waterstand het natte profiel met maximaal 20% zouden mogen inperken.

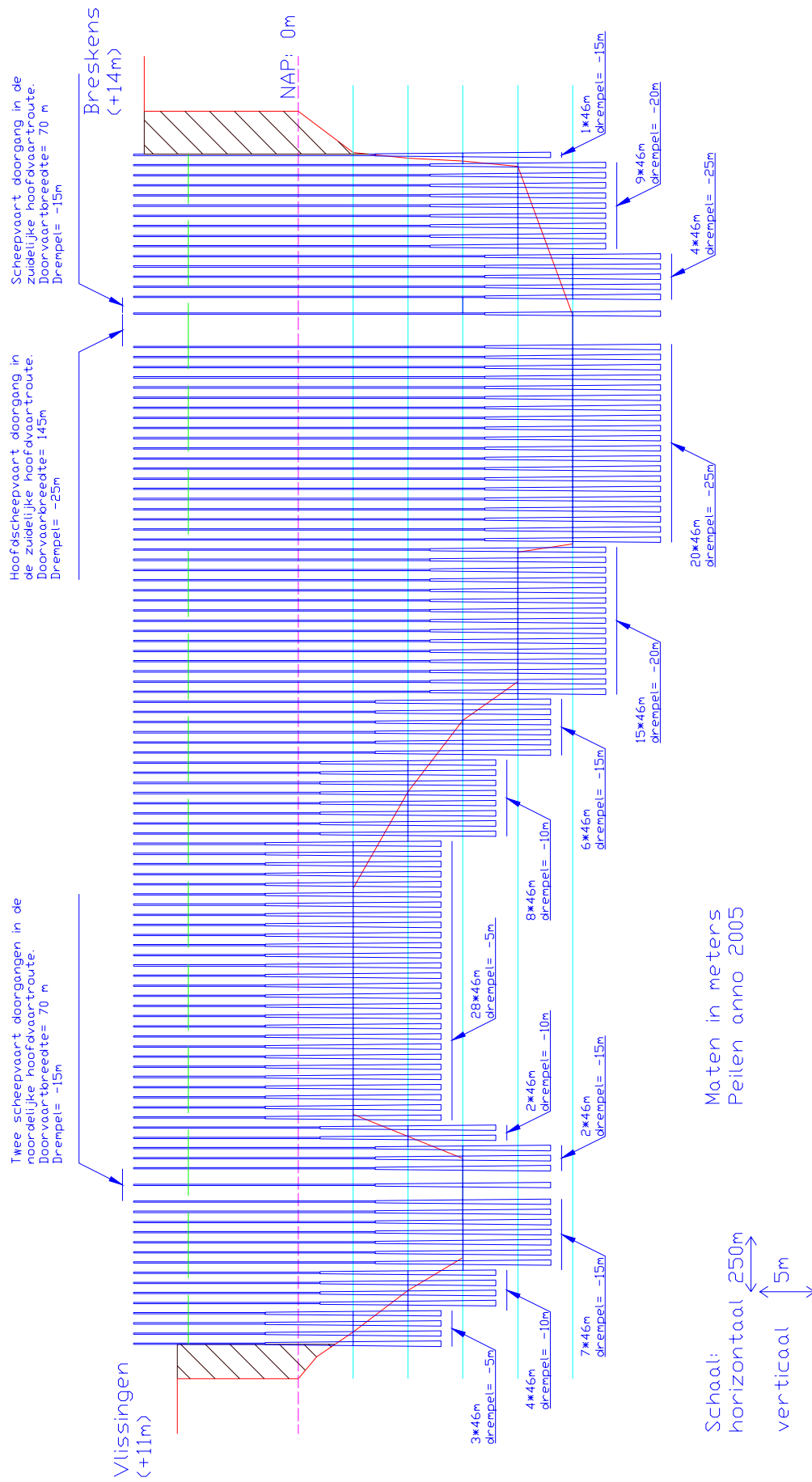
Het natte profiel voor de aanleg van de kering heeft een oppervlak van 80.000 m<sup>2</sup>. De aarden aansluiting met de pijlers nemen in het doorstroomprofiel een oppervlak in van ongeveer 15.000 m<sup>2</sup>.

$$\text{Afname nat profiel} = \frac{15000\text{m}^2}{80000\text{m}^2} \times 100\% = 18,75\%$$

Dit is minder dan 20% en de indeling zoals die nu gemaakt is voldoet dus aan de gestelde eis.

Het zou kunnen blijken dat het natte profiel met bijvoorbeeld 30% zou kunnen worden ingeperkt voordat het getij te veel wordt beïnvloed. In dat geval zou bijvoorbeeld de Nolleplaat, dit is het minst diepe gedeelte van het doorstroomprofiel, kunnen worden afgedamd. In plaats van de hier voorziene 22 pijlers met hefschuiven zou een aarden dam op dit gedeelte voor een permanente afsluiting zorgen. Dit is ook bij de Oosterschelde gedaan en scheelt in de kosten en de uitvoering.

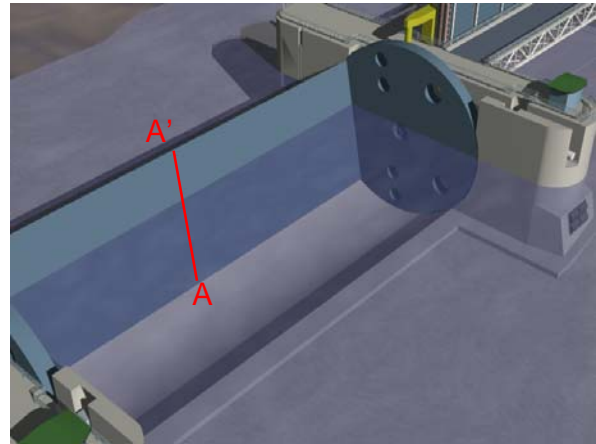
De constructieve onderdelen nemen in dat geval ongeveer 20.000 m<sup>2</sup> in van het oorspronkelijke doorstroomprofiel. Dit is een inperking van 25% en de verwachting is dat dit mogelijk is. Onderzoek met behulp van stroommodellen zou dit moeten uitwijzen.



41 *Figuur 8.5: indeling van de kering weergegeven in een technisch overzicht met hierin de maten en de drempelpelen.*

## H9 Uitwerking hoofdscheepvaartopening

Het meest bijzondere en daarmee meest uitdagende onderdeel van de gehele stormvloedkering is de hoofdscheepvaartopening. Hoewel het ontwerp van een draaiende sectordeur al eerder is toegepast in stormvloedkeringen in de Theems en de Eems is de overspanning meer dan twee keer zo groot als de bestaande uitvoeringen, 145 meter tegenover 65 meter. Ook de waterdiepte en daarmee de hoogte van de kerende deur is ongeveer twee maal zo groot. Bij het ontwerp van de hoofdscheepvaartopening zal vooral worden gekeken naar de stalen sectordeur.



Figuur 9.1: Principeschets van de sectordeur

### 9.1 Onderzoeksvragen

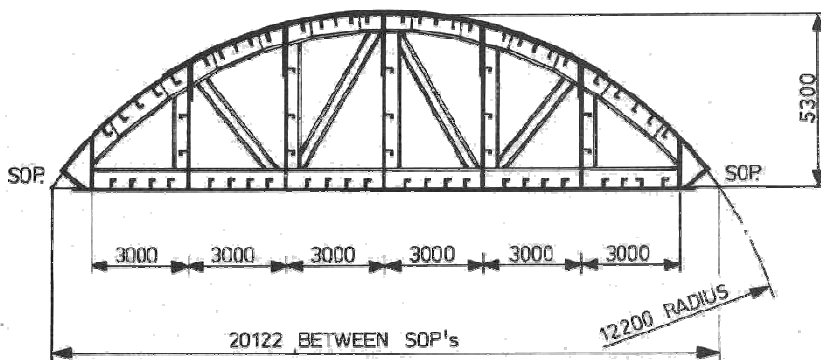
De belangrijkste onderzoeksvragen bij het ontwerp van deze sectordeur en de schaalvergroting van het ontwerp zijn hieronder geformuleerd.

- Welke gevolgen heeft de schaalvergroting op het draagsysteem van de sectordeur en hoe verandert de dimensionering van de deur?
- Wat zijn de gevolgen voor de uitvoering van de sectordeur?

Om het ontwerp met de huidige uitvoeringen te kunnen vergelijken wordt hieronder in het kort aangegeven wat de kenmerken zijn van de sectordeuren in de Theems en de Eems.

#### *Krachtafdacht*

Binnen in de sectordeur lopen over de hele lengte van de deur verstijfde plaatliggers. Deze liggers staan op een onderlinge afstand van ongeveer 3 meter van elkaar en verschillen in hoogte. Dwars op de lengterichting van deze liggers wordt de deur om de paar meter ondersteund door tussenschotten. Deze kunnen uit platen bestaan of uit vakwerken. Deze tussenschotten verzorgen de stijfheid en stabiliteit van de deur. De krachten worden in de lengterichting afgedragen naar de opleggingen door middel van de plaatliggers die samenwerken met de schil van de deur. De schil van de deur bestaat uit een beplating die over de plaatliggers en de tussenschotten loopt. Aan de ene zijde is deze beplating vlak, aan de andere zijde gekromd. De beplating heeft een dikte van maximaal 40 millimeter bij de Theemskering en 90 millimeter bij de Eemskering.



Figuur 9.2: Doorsnede van sectordeur over A-A' met hierin verticaal de verstijfde plaatliggers [L.30]

### *Uitvoering*

Bij beide projecten zijn eerst de schijven die de oplegging vormen voor de deur met een ponton naar de pijlers gebracht waar ze met de as aan de pijlers zijn bevestigd. Bij de Eemskering is de deur in een geheel op deze schijven gehesen met behulp een kraan op een ponton. Bij de Thames Barrier is de deur ook in een geheel naar de bouwplaats gebracht, maar hier werd de deur op een ponton in de juiste positie gebracht waarna het geheel langzaam op de schijven werd neergelaten. Op de bouwplaats zijn de uiteindelijke bevestigingen gerealiseerd.

### **9.2 Verwachtingen**

De overspanning van het huidige ontwerp is meer dan twee keer zo groot als de huidige uitvoeringen. Bij gelijk blijvende belasting zal bijvoorbeeld het moment kwadratisch met de lengte toenemen en al vier keer zo groot worden. Er wordt daarom verwacht dat de dimensies en hierdoor ook het gewicht van de deur enorm zullen toenemen. Doordat het gewicht van de deur veel groter zal worden kan het zijn dat de deur niet in één geheel geplaatst kan worden, maar dat dit in delen moet gebeuren.

## H10 Constructief ontwerp sectordeur

In dit hoofdstuk zal voor de stalen sectordeur van de hoofdscheepvaartopening eerst de exacte geometrische vorm worden vastgesteld. Hierna zal deze deur worden geschematiseerd tot een mechanicamodel en zal bepaald worden welke belastingen hierop werken. Wanneer ook het materiaal van de constructie is vastgesteld kan in het volgende hoofdstuk verder worden gegaan met het dimensioneren van de constructie.

### 10.1 Geometrie

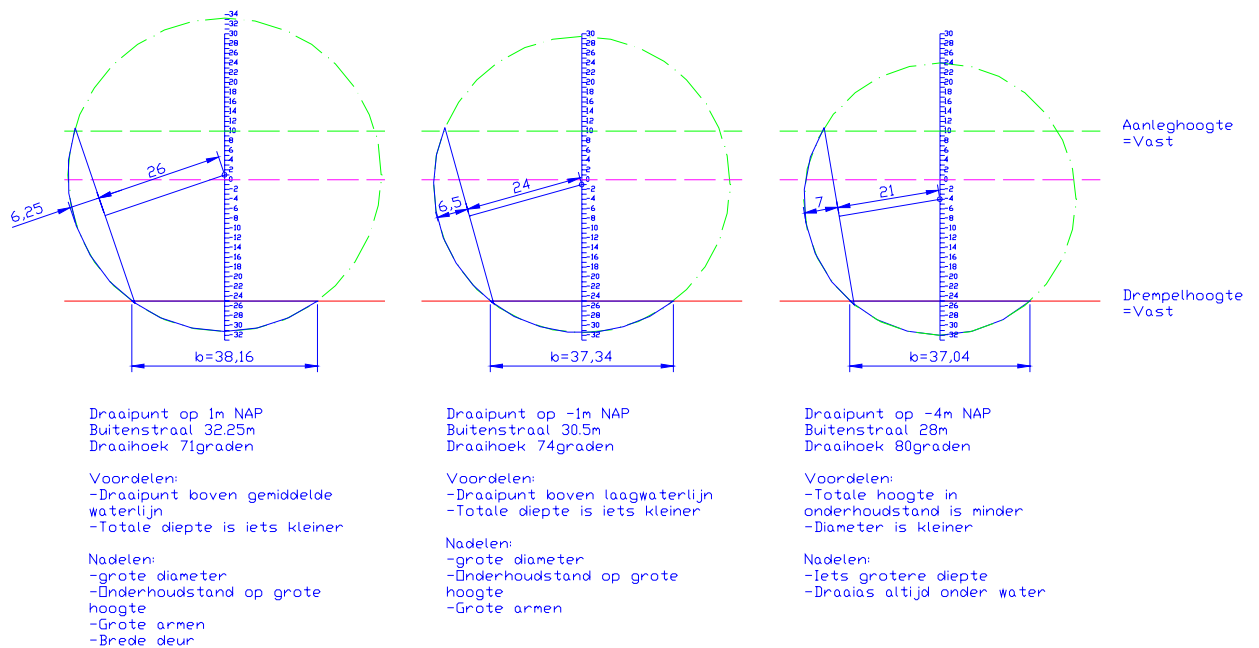
De oplossing van de sectordeur waarvoor is gekozen heeft de vorm van een gedeeltelijke cilinder. Aan een zijde is de deur bol en volgt hierbij de straal van de cilinder, aan de andere zijde is de deur vlak. De deur is aan de uiteinden opgelegd op een schijf. Deze schijf vormt samen met de deur de volledige cilindrische vorm. In het middelpunt van de schijven aan weerszijde van de deur zit de draai-as. De schijven kunnen, samen met de deur, om deze as een volledig ronde draaibeweging maken doordat de buitenzijde van de deur dezelfde straal heeft. Omdat de andere zijde vlak is kan de deur in een drempel op de bodem van de deur worden gedraaid en vormt de drempel toch één geheel zonder niveauverschil.

Binnen dit algemene principe zijn er oneindig veel mogelijkheden voor de uiteindelijke geometrie. Er kan namelijk met een aantal parameters gevarieerd worden, zoals de straal, de hoogte en breedte van de deur en de positie van het draaipunt. Hieronder zal in een aantal stappen worden uitgelegd wat de invloeden van de parameters zijn en hoe tot de uiteindelijke vorm is gekomen.

Er zijn twee punten die vastliggen, namelijk de drempel op -25m +NAP en de aanleghoogte van de kering op 10m +NAP. De sectordeur moet hier tussen passen en dit verschil volledig afsluiten.

#### Stap1

Het draaipunt van de deur wordt gevarieerd, de breedte (b) van de deur wordt hierbij zo gekozen dat de deur precies afsluit. Dit is te zien in onderstaande figuur.

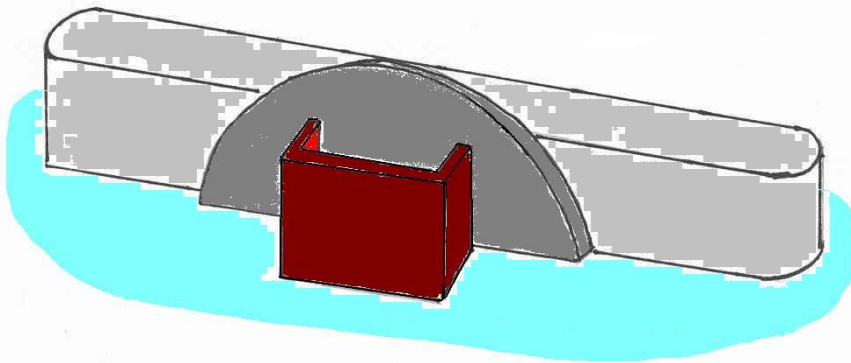


Figuur 10.1: Variatie van diameter bij stap 1 van de geometriebepaling met de voor- en nadelen

Links in figuur 10.1 is het draaipunt hoog gelegd en naar rechts toe ligt het draaipunt steeds lager, oftewel de straal wordt steeds verkleind. Het gevolg hiervan op de andere variabelen is als volgt:

- Hoogte van de deur: deze neemt toe wat als gevolg heeft dat de bouwdiepte iets groter wordt.
- Breedte van de deur: deze neemt iets af
- Hoekverdraaiing: deze neemt toe waarbij de deur rechts bijna verticaal staat.

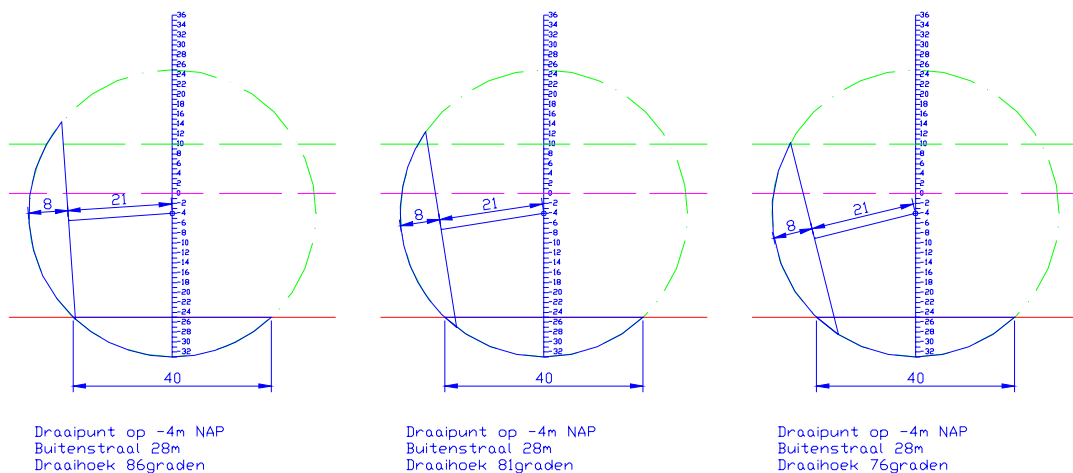
Er wordt gekozen voor het draaipunt op -4m +NAP. Het enige echte nadeel hierbij is dat het draaipunt zich continue onder water bevindt. Groot voordeel is dat de schijven aan de zijkant waar de deur is opgelegd minder groot worden omdat de buitenstraal van de constructie kleiner is en dat de totale hoogte van de constructie minder groot is. Het nadeel van het draaipunt onder water is niet heel groot en kan redelijk gemakkelijk worden opgelost. Het draaipunt moet in alle gevallen bestand zijn tegen water en waterdicht zijn en dat is in deze uitvoering dus niet anders. Inspectie en onderhoud zouden uitgevoerd kunnen worden met een hulpconstructie die over het draaipunt heen wordt gezet en wordt droog gepompt. Hierna kan inspectie en eventueel onderhoud alsnog droog plaatsvinden.



Figuur 10.2: Door een hulpconstructie kan de draaias droog geïnspecteerd worden.

## Stap 2

Nu wordt de hoogte van de deur constant gehouden. Hierbij is een hoogte aangehouden van tweemaal de toegepaste hoogte bij de sectordeur in de Eems. De maximale hoogte van de deur bedraagt dan 8 meter. Hiermee is de inwendige hefboomarm groter dan in de eerste stap en zal een buigend moment eenvoudiger kunnen worden opgenomen. De afmetingen van de constructie staan met deze keuze vast. Er kan alleen nog gevarieerd worden met de draaihoek. Dit is hieronder weergegeven:

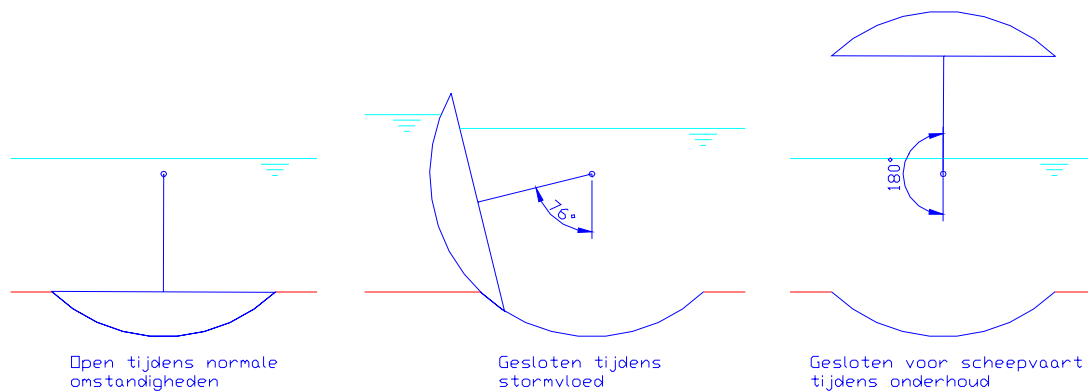


Figuur 10.3: Variatie van draaihoek in stap 2 van de geometriebepaling.



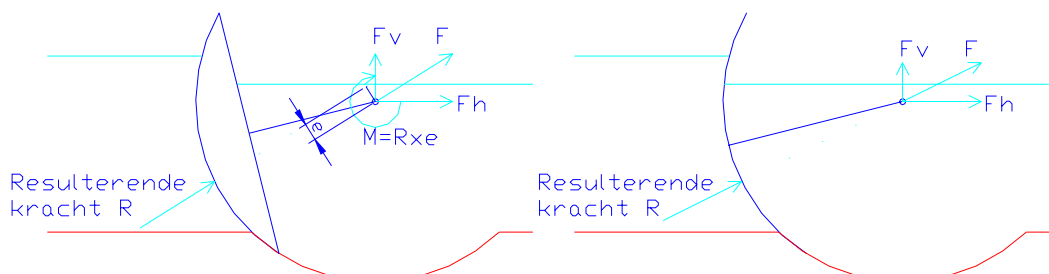
In de linker figuur van 10.3 is de kerende hoogte groter dan benodigd en sluit de deur nauwelijks de drempel af. De deur staat bijna verticaal en wanneer de deur in gebruikstoestand wat begint te bewegen kan dit versterkt worden doordat er een stroom onder de deur door ontstaat. Dit systeem is instabiel en er kan resonantie ontstaan. Om deze reden is voor de rechter oplossing gekozen waarbij de kans op dit fenomeen het kleinst is en ook nog de vereiste kerende hoogte wordt gehaald.

De oriëntatie van de kring is nog van belang. De bolle kant zal in stormvloedstand richting de Noordzee worden gedraaid en de vlakke achterkant zal dus de zijde van de Westerschelde zijn. Dit is het minst belastende voor de kring omdat de golfbelasting nu op de bolle zijde plaatsvindt. Aan de vlakke zijde zou een golf zich meer kunnen insluiten waardoor de golfklap meer belasting geeft op de deur. Daarnaast richten bij de bolle zijde alle waterdrukken zich richting het draaipunt van de kring wat voordeliger is bij de krachtafdracht. De hoek waarover de deur nu wordt gedraaid tijdens een stormvloed is 76 graden. Voor onderhoud kan de deur doorgedraaid worden naar 180 graden zodat deze in droge omstandigheden geïnspecteerd kan worden.



Figuur 10.4: Overzicht van de verschillende standen voor de stormvloedkering.

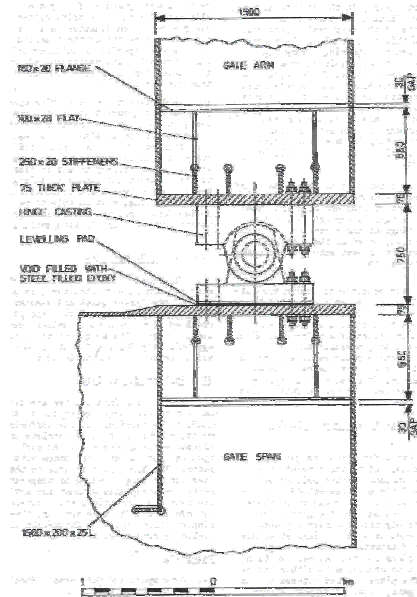
Hieronder is voor de volledigheid de werking van de geometrie voor belastingafdracht uitgelegd voor zowel een gesloten sectordeur (deur is hol van binnen en kan gevuld worden met lucht of water) als een open sectordeur (deur heeft alleen bolle buitenbeplating en geen vlakke zijde). Bij een open sectordeur gaat de resulterende kracht van de belasting door het middelpunt van de cirkel en worden dus direct via de as overgebracht naar de pijler. Bij een gesloten sectordeur loopt deze resulterende kracht niet precies door het middelpunt van de cirkel doordat de waterdrukken op de vlakke achterwand niet radiaal zijn gericht. Een gesloten sectordeur die gedeeltelijk met ballastwater is gevuld is wel weer te vergelijken met de werking van een open sectordeur. Zie de figuur hieronder.



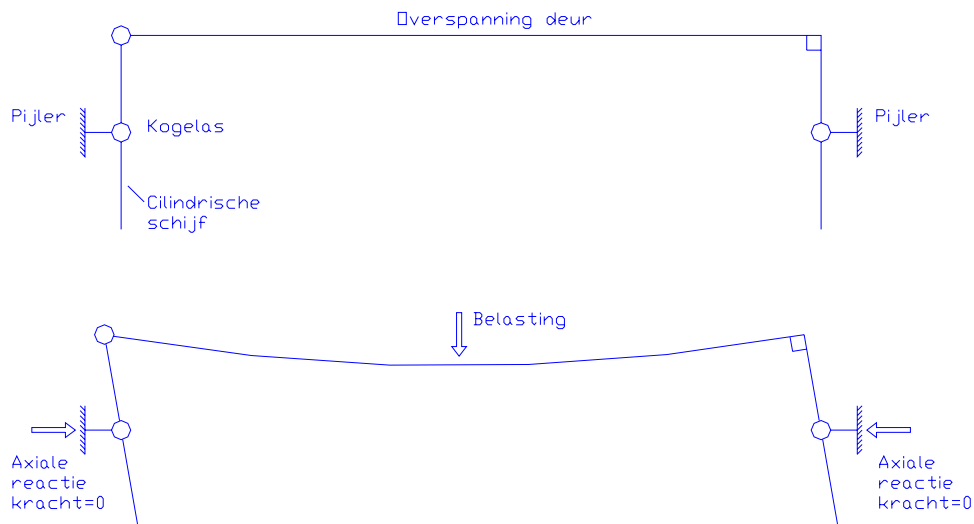
Figuur 10.5: Links een gesloten sectordeur waarbij de resulterende kracht niet door het draaipunt gaat. Rechts een open sectordeur waarbij wel alle krachten door het draaipunt lopen.

## 10.2 Mechanica schematisering

De deur is een ligger die aan beide uiteinden is opgelegd op de cilindrische schijven. Deze schijven dragen de belasting af naar de pijler via een as in het midden van de schijf. De schijven zijn door middel van een bolscharnier met de as verbonden. Op deze manier kunnen de schijven niet alleen om de as draaien, maar ook in beperkte mate uit hun vlak bewegen. Om in dit systeem enige vorm van stabiliteit te verkrijgen wordt de verbinding tussen de deur en de schijf aan één zijde momentvast uitgevoerd. Dit is in de figuur 10.7 te zien. Aan de andere zijde wordt de verbinding tussen de deur en de schijf scharnierend uitgevoerd. De uitvoering hiervan is ook werkelijk een scharnier zoals hiernaast is te zien.

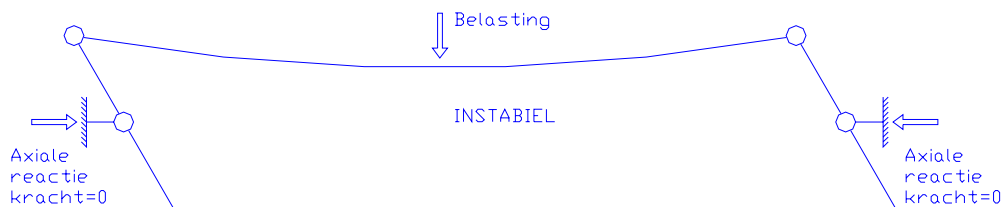


Figuur 10.6: Detail van een scharnierende verbinding tussen de deur en de schijven zoals uitgevoerd bij de Thames Barrier [L.30]



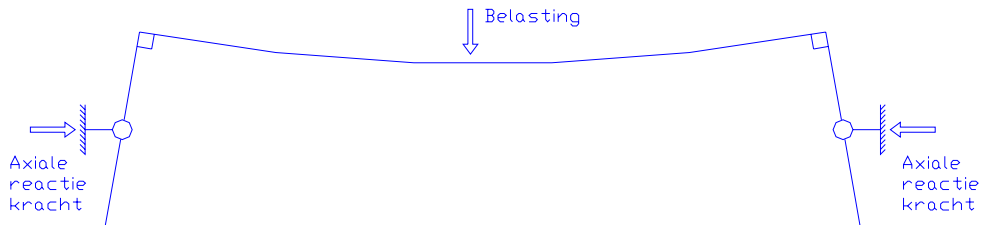
Figuur: 10.7 Schematisatie van de gehele sectordeur

Door de momentvaste verbinding beschikt het systeem dus over de benodigde stabiliteit. Wanneer dit niet wordt gedaan, maar beide opleggingen van de deur scharnierend worden uitgevoerd, ontstaat er een instabiel systeem dat direct zal bezwijken bij belasting (figuur 10.8).



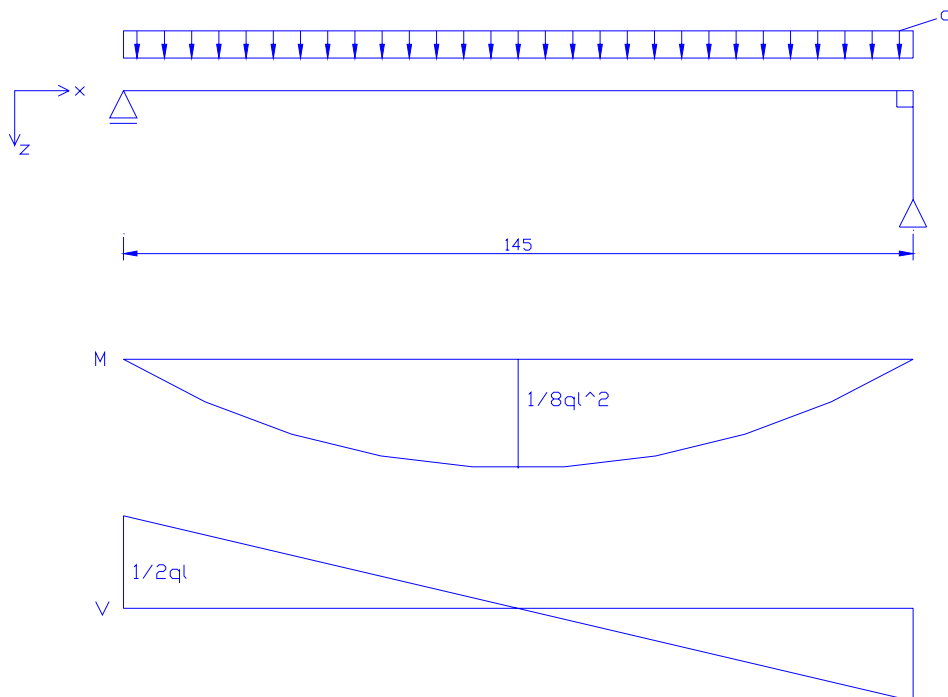
Figuur 10.8: Schematisatie van de gehele sectordeur, twee scharnierende opleggingen bij de deur maken het systeem instabiel.

Er zou ook gekozen kunnen worden voor twee momentvaste verbindingen met de deur waardoor de vormvastheid van het systeem verder wordt vergroot. In dit geval zouden er echter bij belasting axiale krachten in de assen ontstaan. Bij een scharnierende verbinding aan één zijde is dit niet het geval (zie figuur 10.9). Hieronder is het systeem van de sectordeur geschematiseerd met twee momentvaste verbindingen.



Figuur 10.9: Schematisatie van de gehele sectordeur, twee momentvaste verbindingen van de deur veroorzaken axiale krachten in de assen.

De schematisering van figuur 10.7 is gebruikt om het mechanicschema op te stellen waarmee de eerste handberekeningen zijn uitgevoerd. De belasting wordt hier in de z-richting aangegeven en in de y-richting constant verondersteld. In werkelijkheid varieert de belasting in de y-richting. Hierbij wijst de z-richting naar het middelpunt van de cirkel en staat loodrecht op de x-as welke in de lengterichting van de deur loopt. De y-richting loopt parallel aan de breedte van de deur en staat loodrecht op de x- en de y-richting.



Figuur 10.10: Mechanicschema van de sectordeur, met daaronder de eerste orde momenten- en dwarskrachtenlijn van de overspannende deur. Ten gevolge van tweede orde effecten zal er in werkelijkheid bij vervorming wel een moment optreden ter plaatse van de momentvaste verbinding en in de betreffende schijf waar deze mee is verbonden.

### 10.3 Belastingen

Er zijn verschillende belastingen die op de sectordeur kunnen werken. Hierin kan een onderscheid worden gemaakt in permanente, veranderlijke en bijzondere belastingen. De belastingen die op de sectordeur kunnen werken zijn hieronder opgesomd:

#### *Permanente belastingen*

- Eigen gewicht constructie
- Ballastwater

#### *Veranderlijke belastingen*

- Drukverschillen ten gevolge van waterstanden
- Drukverschillen ten gevolge van windgolven
- Stroming langs de constructie, dit kan eventueel trillingen veroorzaken
- Temperatuurbelasting
- Winddrukken

#### *Bijzondere belastingen*

- Aanvaring
- Aardbeving
- Explosie
- IJs

Van de bovenstaande belastingen wordt in eerste instantie aangenomen dat de bijzondere belastingen een zodanige kleine kans op voorkomen hebben dat hiermee geen rekening gehouden hoeft te worden bij de constructieve controle. Van de veranderlijke belastingen wordt de belasting door temperatuursverschillen verwaarloosd omdat de constructie in de lengterichting vrij kan vervormen.

De constructie moet op de volgende grenstoestanden worden gecontroleerd:

1. Sterkte
2. Stijfheid
3. Vermoeiing
4. Trillingen

Hiervoor gelden drie belastingsituaties welke in 10.3.2 worden beschreven. Op het vermoeiingsgedrag van de constructie zal niet verder worden ingegaan omdat deze grenstoestand niet maatgevend zal zijn. De reden hiervoor wordt hieronder toegelicht.

#### **10.3.1 Ontwerp met betrekking tot vermoeiingssterkte**

Bij het ontwerp van een staalconstructie speelt naast statische sterkte ook de vermoeiingssterkte een rol. Vooral bij een constructie sterk onderhevig aan veel voorkomende wisselende belasting, zoals bruggen met verkeersbelasting, kan het zo zijn dat het ontwerp volledig hierdoor wordt gedecteerd. Voor de constructie als beschouwd binnen dit afstudeeronderzoek zijn in relatie tot de vermoeiingssterkte de volgende punten relevant:

- De constructie is onderhevig aan een grote spanningsrange. Immers op het moment dat de constructie geen water keert is alleen het belastinggeval eigengewicht van toepassing. De spanning veroorzaakt door eigengewicht is gering. Wanneer de constructie operationeel is ontstaan hoge spanningen als gevolg van waterdruk. Deze laatste spanning is te beschouwen als een spanningsrimpel die groot is.
- Ondanks de ontwerplevensduur van 200 jaar zal de spanningsrimpel zoals toegelicht hiervoor slechts, naar verwachting, 100 maal zijn. Er wordt namelijk uitgegaan van een gemiddelde sluitingsfrequentie van  $\frac{1}{2}$  per jaar.
- De constructie is opgebouwd uit verschillende soorten van gelaste verbindingen waarvan verschillende sterk vermoeiingsgevoelig zijn.
- De constructie is opgebouwd uit dikke tot zeer dikke plaalementen.

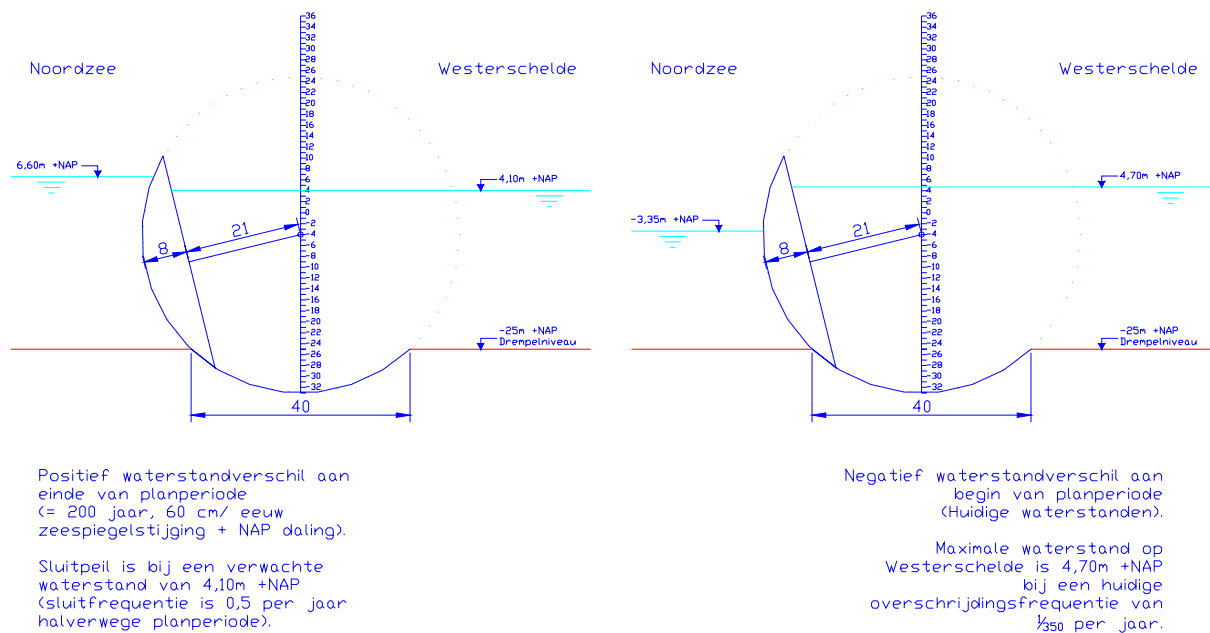
- De constructie verkeert in een maritiem milieu.
- De gelaste verbindingen zijn inspecteerbaar.
- De consequentie van falen als gevolg van onvoldoende vermoeiingssterkte is niet acceptabel.

De lezer zou op grond van voorgaande punten verwachten dat de constructie ook beoordeeld moet worden op vermoeiingssterkte. Echter, er is een punt vermeld die alle overige punten irrelevant laat zijn. Bij het aantal wisselingen van 100 is namelijk niet langer sprake van op vermoeiing belast zijn. Een uitzondering hierop zou kunnen zijn dat de spanningsrimpel zo hoog is dat gesproken moet worden over 'low cycle fatigue' in plaats van 'high cycle fatigue'. Gelet op de geometrie van de gelaste verbindingen mag direct worden gesteld dat de nominale spanning maal de spanningsconcentratiefactor ruimschoots blijft in de range van high cycle fatigue. De spanningsconcentratiefactor in deze betreft het meenemen van de geometrie van de gelaste verbinding. De geometrie kent vaak een niet uniforme stijfheidsverdeling waardoor lokaal spanningspieken optreden.

### 10.3.2 Belastingssituaties

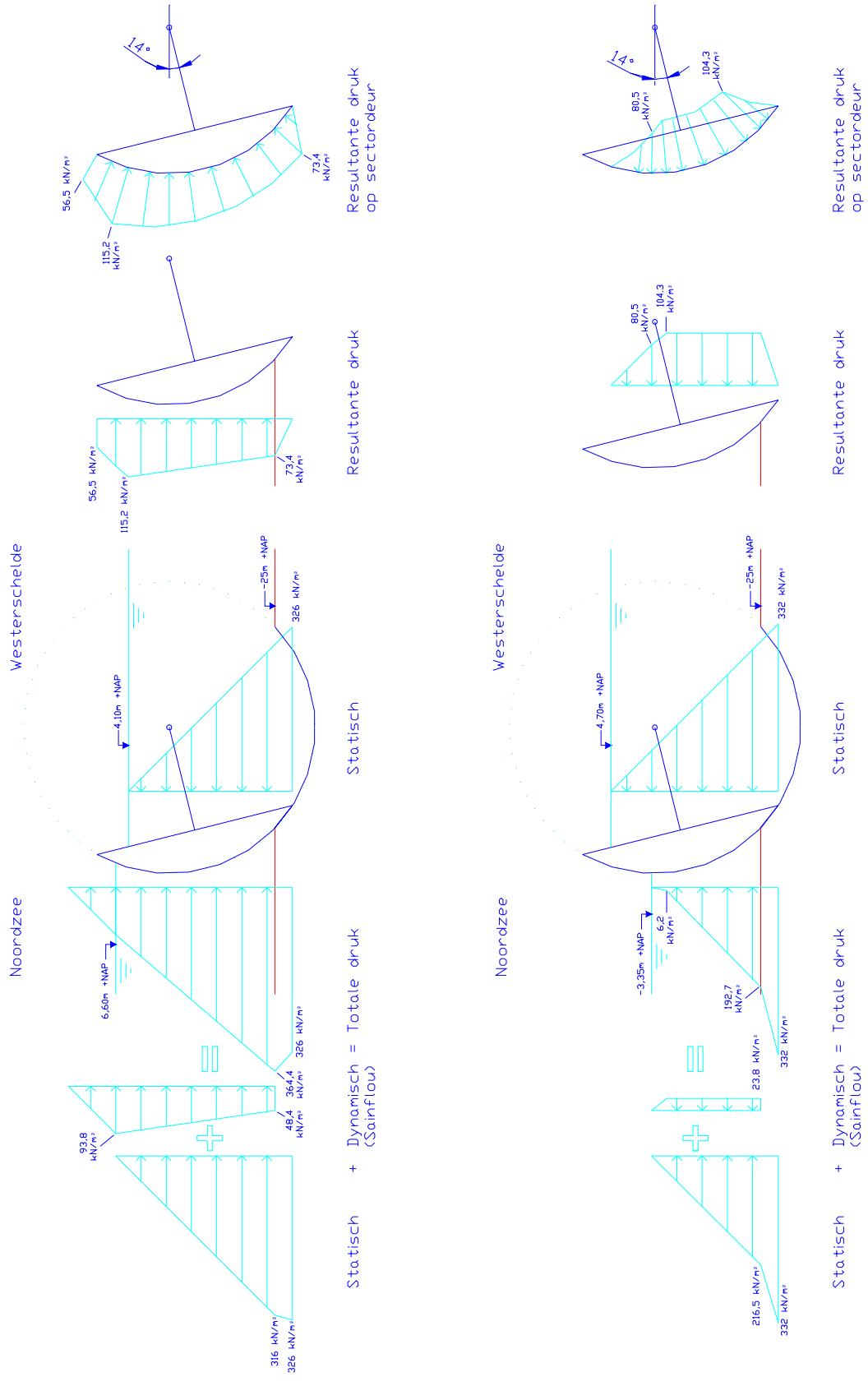
Voor de sectordeur wordt gekeken naar de volgende drie belastingssituaties:

1. Tijdens stormvloedstand aan het einde van de planperiode waarbij de waterstand aan de Noordzee zijde maximaal is en op de Westerschelde minimaal.
2. Bij een negatief waterstandsverschil waarbij de waterstand aan de Noordzee zijde minimaal is en op de Westerschelde juist maximaal.
3. De belastingen tijdens de bouwphase. In de bouwphase moet de deur voornamelijk eigengewicht kunnen dragen.



Figuur 10.11: Links belastingssituatie 1 en rechts belastingssituatie 2.

In het tweede geval staat er het grootste waterstandsverschil over de kering, maar is de golfbelasting veel kleiner verondersteld. Voor het eerste geval geldt de golfbelasting tijdens stormvloed omstandigheden en ontstaan hieruit de hoogste belastingen. De golfbelastingen zijn berekend aan de hand van de significante golfhoogte via de rekenmethode van Sainflou (zie bijlage 9). Er wordt vanuit gegaan dat de deur over de volledige lengte wordt belast door een golf. Een overzicht van de belastingen uit de waterdrukken is op de volgende bladzijde te zien.



Figuur 10.12: Boven de belastingen ten gevolge van de waterdrukken in stormvloedstand  
 Onder de belastingen ten gevolge van de waterdrukken bij negatief waterstandverschil

### 10.3.3 Belastingfactoren

Voor de controle van de constructie op sterkte en stabiliteit moeten de rekenwaardes van de belastingen worden genomen. Hiervoor geldt:

$$F_d = \gamma F_{rep}$$

Met:  $F_d$ = Rekenwaarde van de belasting  
 $\gamma$ = Belastingfactor  
 $F_{rep}$ = Representatieve waarde van de belasting

De belastingfactoren voor de verschillende belastingen zijn terug te vinden in tabel 10.1 van de Leidraad Kunstwerken [L.17]. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen dominante belasting en combinatie belastingen. Bij combinaties van belastingen hoeft namelijk niet voor elke belasting de meest ongunstige waarde te worden aangehouden. In dat geval kan voor één belasting de meest ongunstige waarde aan worden gehouden (dominante waarde) en voor de overige optredende belastingen een minder ongunstige representatieve waarde worden gebruikt (combinatiewaarde). Voor waterstanden en windgolven moet wel altijd de dominante waarde worden genomen. De belangrijkste belastingfactoren uit de tabel die ook vaak voor de berekeningen zijn toegepast worden hieronder opgesomd:

- Eigengewicht van de constructie is enige belasting:  $\gamma=1,35$
- Permanente belasting in combinatie met andere belasting:  $\gamma= 1,2$
- Permanente belasting in combinatie met andere belasting, maar ontlastend: 0,9
- Waterdrukken en windgolven:  $\gamma= 1,25$  (bij gebruik van deze waarde hoeft geen correctie op de materiaalfactoren toegepast te worden, deze is al in de factor 1,25 verwerkt)

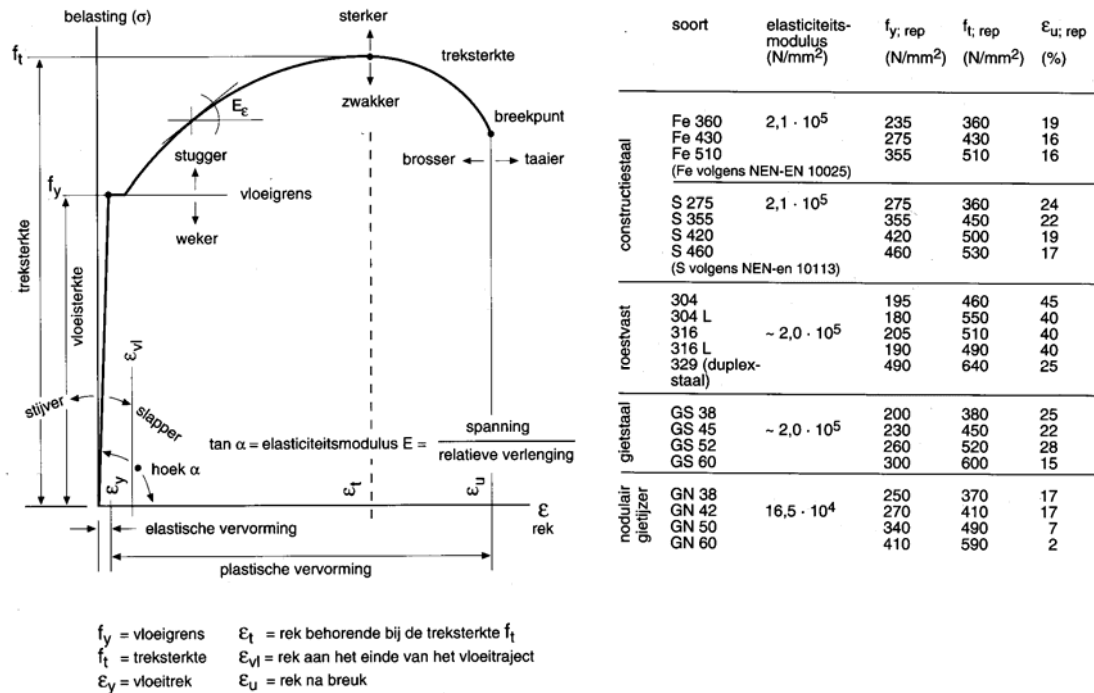
Belasting	Rekenwaarde dominante belasting	Rekenwaarde combinatiebelasting	Opmerking
PERMANENT: eigen gewicht gronddruk grondwaterdruk	(1,35 of 1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$ (1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$ (1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$	(1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$ (1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$ (1,2 of 1,0 of 0,9) $F_{rep}$	conform TGB conform TGB conform TGB
VERANDERLIJK: drukverschillen t.g.v. - waterstanden - windgolven stroming scheepsgolven scheepsstroming troskrachten windbelasting temperatuur verkeersbelasting	1,25 $F_{norm}^{1), 2)}$ 1,25 $F_{norm}$ 1,3 $F_{50}^{3)}$ 1,3 $F_{max}$ 1,3 $F_{max}$ 1,3 $F_{max}$ 1,5 $F_{extreem}$ 1,5 $F_{extreem}$ 1,5 $F_{rep}$	1,25 $F_{10}$ 1,25 $F_{10}$ 1,3 $F_1$ 1,3 $F_{max}$ 1,3 $F_{max}$ 1,3 $F_{max}$ 1,5 $\psi F_{extreem} (\psi = 0,2)$ 1,5 $F_{momentaan}$ 1,5 $F_{rep}$	conform TGB conform TGB
BIJZONDER: aanvaring aardbeving explosie ijs stroming (niet sluiten) vandalisme/sabotage	$F_{nominaal}$ n.v.t. $F_{nominaal}$ $F_{CUR166}$ $F_{norm}^{3)}$ -	0 0 0 0 0 -	
$F_{rep}$ = representatieve waarde van de belasting $F_{norm}$ = representatieve waarde van de belasting voor variabele belastingen met een herhalingsstijd van 1/norm frequentie $F_n$ = representatieve waarde van de belasting voor variabele belastingen met een herhalingsstijd van n jaar $F_{max}$ = maximale waarde voor de representatieve belasting uitgaande van de maatgevende scheepsklasse $F_{extreem}$ = extreme waarde voor de representatieve belasting conform NEN 6702 $F_{momentaan}$ = momentane waarde voor de representatieve belasting conform NEN 6702 $F_{nominaal}$ = nominaal waarde van de bijzondere belasting			

Tabel 10.1: Rekenwaarde belastingen [L.17]

## 10.4 Materiaalkeuze

Staal is verkrijgbaar in vele soorten en kwaliteiten. Belangrijke eigenschappen voor de keuze van het staal is dat het staal voldoende sterk is, maar ook taai zodat de constructie voldoende kan vervormen. Het staal moet voldoende homogeen zijn zodat er in het staal geen hoge spanningsconcentraties ontstaan. Hiernaast moet het goed te bewerken zijn, het moet gelast kunnen worden en vervormbaar zijn. Voor waterkeringen komen twee soorten staal in aanmerking, namelijk constructiestaal en roestvast staal. Constructiestaal wordt het meeste gebruikt in de bouw voor draagconstructies. Er is veel ervaring met constructiestaal en het staal heeft goede eigenschappen. Nadeel van constructiestaal is dat het gevoelig is voor corroderen. Het zal daardoor duurder zijn in onderhoudskosten. Roestvast staal is gelegeerd met bijvoorbeeld chroom en vormt in dat geval bij corrosie een ondoordringbare laag chroomoxyde op de constructie. De onderhoudskosten voor roestvast staal zijn dan wel lager in vergelijking met constructiestaal, maar hier tegenover staat dat de aankoopkosten weer hoger zijn. Een ander nadeel is dat de sterkte over het algemeen minder hoog is, afgezien van Duplexstaal wat wel een hoge sterkte heeft.

Hieronder zijn de algemene en enkele specifieke mechanische eigenschappen van staal neergezet.



Figuur 10.13: Links de algemene mechanische eigenschappen van staal in een grafiek uitgezet, Rechts enkele specifieke getalwaarden [L.23].

Er is gekozen om voor de draagconstructie van de sectordeur hogesterkte staal toe te passen. Dit is ook toegepast bij de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg. Er wordt gekozen voor S460. Bij deze soort staal is het wel wat moeilijker om een homogene doorsnede te verkrijgen, maar dit hoeft geen bezwaar op te leveren.

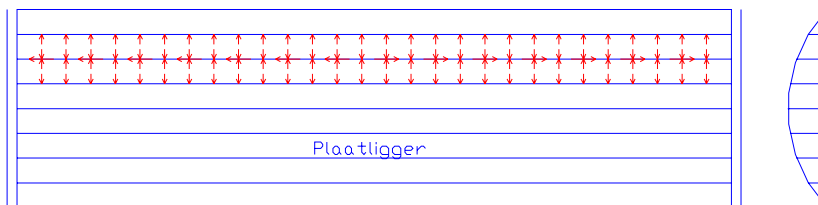
De rekenwaarde van de vloei-grens voor S460 is 460 N/mm<sup>2</sup>. Volgens de norm 6770 mag hier alleen gebruik van worden gemaakt indien de berekeningen extra getoetst worden. In verband met de grote plaatdikten die zullen worden toegepast wordt de rekenwaarde gereduceerd. Voor de maximaal toegestane spanning zal worden uitgegaan van 0,9 x 460 = 414 N/mm<sup>2</sup>.



## H11 Dimensionering van de stalen sectordeur

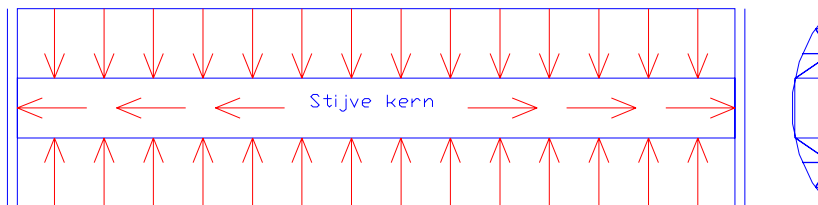
In dit hoofdstuk zullen eerst met de hand de dimensies van de zwaarst belaste doorsnede bepaald worden. Er zullen twee alternatieven voor het draagsysteem worden uitgewerkt.

1. Plaatligger, hierbij worden de waterdrukken van een relatief kleine breedte over de plaatliggers verdeelt en in de lengterichting afgevoerd.



Figuur 11.1: Gekeken in de z-richting, krachtsafdracht via plaatliggers

2. Stijve kern, hierbij bevindt zich in het midden van de deur een stijve kern waar eerst alle krachten naar toe geleid worden. Daarna voert deze de krachten in de lengterichting af.

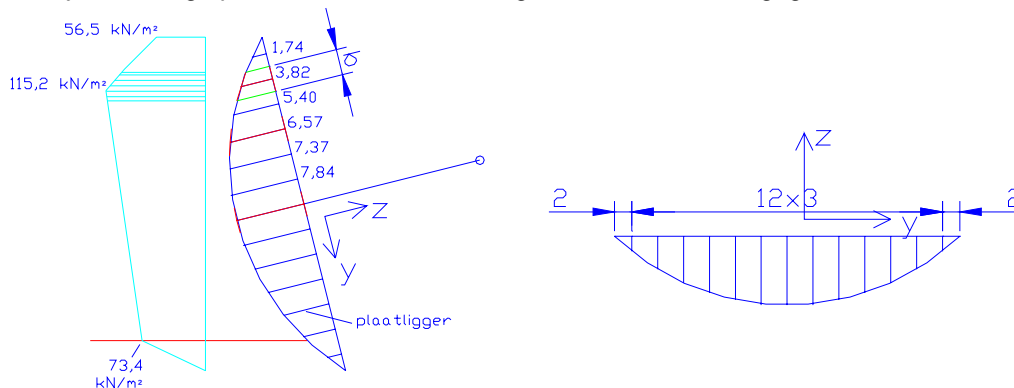


Figuur 11.2: Gekeken in de z-richting, krachtsafdracht via stijve kern

Wanneer hiervoor een bevredigende oplossing is gevonden zal de constructie in het elementenprogramma STAADpro worden gemodelleerd om de optredende spanningen te controleren en de constructie te optimaliseren.

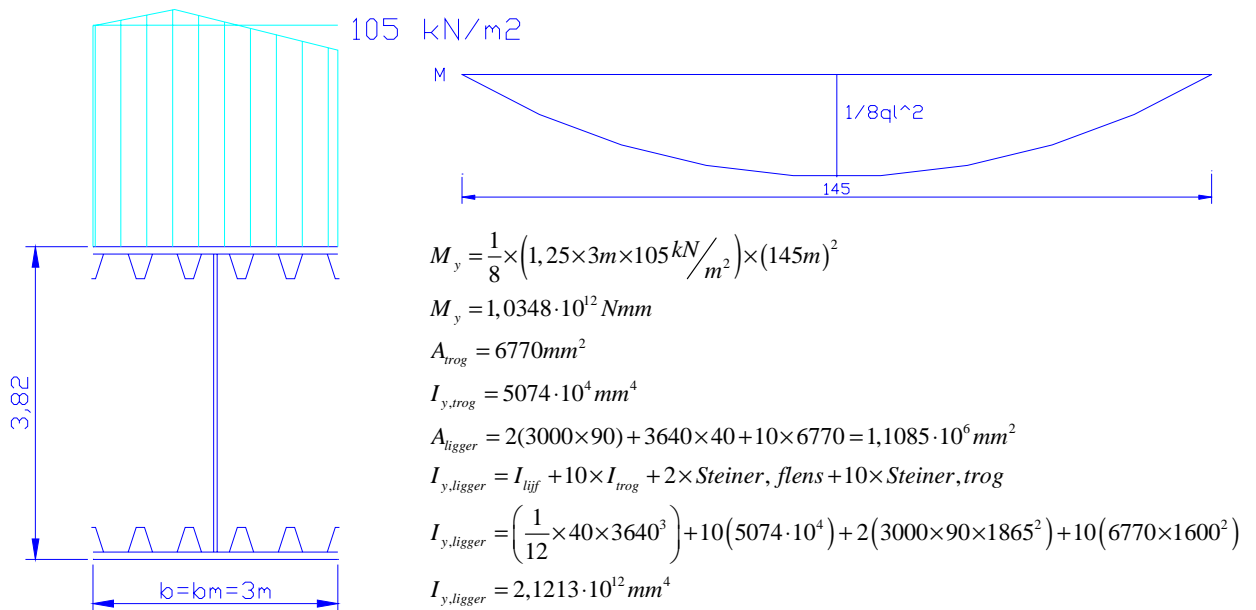
### 11.1 Plaatligger

Voor het draagsysteem van de sectordeur wordt in eerste instantie hetzelfde aangenomen als ook in de sectordeuren van de Theems en de Eems is toegepast. In de deur lopen in de lengterichting verstijfde plaatliggers die in samenwerking met de beplating aan de buitenkant van de deur via buiging de krachten naar de opleggingen afdragen. De plaatliggers zijn op een onderlinge afstand van 3 meter gezet waarbij de hoogte van de plaatliggers onderling verschilt. Om de dikte van de plaatliggers en de beplating te bepalen wordt aangenomen dat elke ligger een deeltje belasting opneemt, zoals ook in de figuur hieronder is aangegeven.



Figuur 11.3: Belastingverdeling over de plaatliggers, met de verdeling van de plaatliggers over de deur

Elke plaatligger kan zo apart als ligger worden beschouwd waar een belasting op staat. Deze belasting wordt omgerekend naar een lijnlast en dit geeft een maximaal moment in de ligger. Voor de ligger kan ook een buigstijfheid worden uitgerekend. De langsverstijvingen op de beplating dragen hier ook in belangrijke mate aan bij. Als langsverstijving zijn trogprofielen gekozen met een onderlinge afstand van 600mm. De ligger heeft een breedte van 3 meter. Doordat de lengte zoveel groter is dan de breedte ( $L/b > 5$ ) kan de gehele breedte van de ligger ook worden beschouwd als meewerkende breedte ( $b_m$ ). Voor de plaatdikte wordt de maximale toegepaste dikte van de Eemskering toegepast: 90 mm, voor de dikte van het lijf 40 mm.



Figuur 11.4: Plaatligger met gemiddelde belasting, verstijvingen in de langsrichting dmv trogprofielen. Rechts de berekening van het maximale moment en het traagheidsmoment van de ligger.

Voor de maximaal optredende spanningen ten gevolge van buiging geldt:

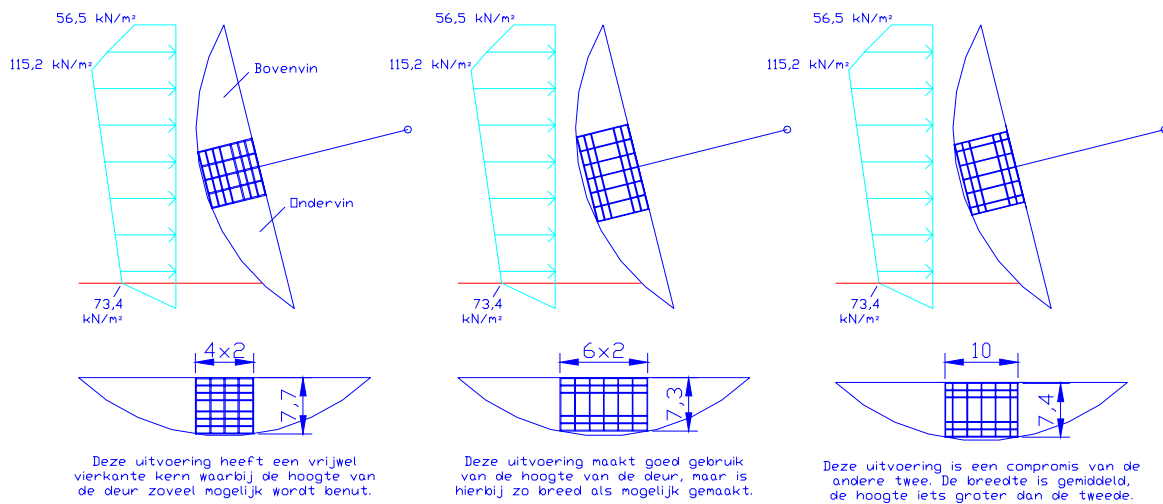
$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_y}{I_y} e = \frac{1,0348 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}}{2,1213 \cdot 10^{12} \text{ mm}^4} \times 1910 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 893 \text{ N/mm}^2 \neq OK$$

Deze spanning is veel groter dan de maximaal toelaatbare spanning ( $414 \text{ N/mm}^2$ ) en dan is alleen nog maar gekeken naar buiging. Dat de spanningen zo groot zijn komt voornamelijk doordat de belastingen groot zijn, ook aan de randen van de deur (voornamelijk voor  $y > 15m$ ) waar de constructiehoogte beperkt is. Nu is het goed voor te stellen dat in werkelijkheid de hoge liggers in het midden met een grotere buigstijfheid ook meer belasting naar zich toe trekken en dat op deze manier de belasting iets gunstiger wordt verdeelt. Toch kan dit maar in beperkte mate meehelpen aan de oplossing van het probleem. Ook het verkleinen van de onderlinge afstanden van de plaatliggers is bekeken, maar dit is geen effectieve maatregel omdat de breedte al volledig bijdraagt aan de buigstijfheid en het lijf van de ligger een beperkte invloed hierop heeft. Het is wel effectief om het materiaal aan de buitenkant van de doorsnede te vermeerderen. In dat geval zouden echter plaatdiktes groter dan 150mm toegepast moeten worden en dit is niet uitvoerbaar omdat deze platen ook nog gekromd moeten kunnen worden. Kortom, het draagsysteem zoals dat nu is toegepast lijkt in deze situatie niet geschikt.

## 11.2 Stijve kern

Omdat de plaatliggers geen bevredigend resultaat opleveren is er gezocht naar een andere manier om de belastingen af te dragen. Uitgangspunt hierbij is dat zoveel mogelijk gebruik gemaakt moet worden van de constructiehoogte in het midden van de sectordeur. Daarnaast moet er voldoende materiaal in worden verwerkt om de spanningen niet te groot te laten worden. Daarom is bedacht om een stijve kern in het midden van de sectordeur toe te passen. De zijkanten van de sectordeur zijn dan eigenlijk uitkragingen net als bij een brug met een kokerligger. Omdat de belastingen op beide zijden van de sectordeur niet even groot zijn kan er ook nog torsie optreden in de koker, maar door de stijve vorm is dit goed op te nemen. De beplating aan de buitenkant kan dunner worden uitgevoerd omdat niet het moment uit de volledige lengte van de deur hierin hoeft te worden opgenomen, maar alleen de belasting naar de tussenschotten moet worden afgedragen. Deze tussenschotten zullen op een afstand van ongeveer 3-5 meter van elkaar staan. Voor de invulling van de stijve kern is naar de volgende uitvoeringen gekeken. Zie onderstaande figuur.



Figuur 11.5: Aantal mogelijke invullingen voor een stijve kern in het midden van de sectordeur

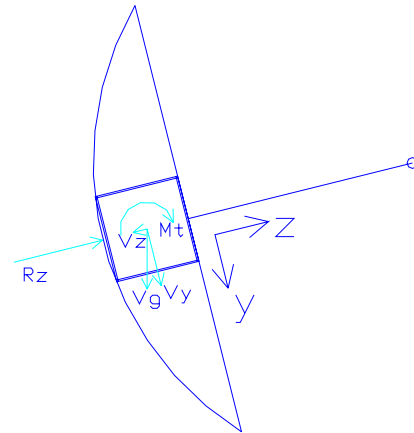
De platen parallel aan de y-richting zullen hierna de flenzen van de koker worden genoemd, deze zullen waarschijnlijk de grootste dikte hebben omdat het buigend moment van de belasting voornamelijk om deze as werkt. Deze platen hebben een onderlinge afstand van minimaal 1 meter omdat minder niet of moeilijk uitvoerbaar is. De platen parallel aan de z-richting zullen hierna de lijven van de koker worden genoemd en zullen vooral de dwarskracht in de z-richting op moeten nemen.

Voor de eerste belastingsituatie (grootste totale belasting) en de tweede belastingsituatie (grootste torsiemoment) zijn de optredende spanningen in de koker berekend. Dit is gedaan in een Excel-file. Voordeel hiervan is dat eenvoudig gevarieerd kan worden met de plaatdiktes en gekeken kan worden wat de effecten zijn voor de spanningen. Voor deze berekeningen zijn twee aannamen gedaan:

- De belasting uit de waterdrukken is volledig in de z-richting aangenomen.
- Het eigengewicht van de kering (zit voornamelijk in de kern) is meegenomen in de berekening, hiervoor is 13.000 ton aangehouden. Dit gewicht heeft zowel een component in de y- als in de z-richting.

Een overzicht van de werkende belastingen per meter van de sectordeur is hieronder te zien.

Rz= resulterende belasting uit waterdrukken  
 $Rz = 1,25 \times 3125 = 4000 \text{ kN/m}$   
 Mt= Torsiemoment door asymmetrische belasting  
 $Mt = 16230 \text{ kNm/m}$   
 Vg= eigengewicht constructie  
 $Vg = 897 \text{ kN/m}$   
 Vz= eigengewicht in z-richting (positief werkend)  
 $Vz = 0,9 \times 217 = 195 \text{ kN/m}$   
 Vy= eigengewicht in y-richting (negatief werkend)  
 $Vy = 1,2 \times 869 = 1043 \text{ kN/m}$



In de verdere berekeningen zal worden gewerkt met:  
 $q_z = 4000 - 195 = 3805 \text{ kN/m}$   
 $q_y = 1043 \text{ kN/m}$   
 $M_x = 16230 \text{ kNm/m}$

Een uitdraai van de Excel-file met hierin de berekende spanningen is in bijlage 10 te vinden. Hieronder in tabel 11.1 is een overzicht van de belangrijkste gegevens samengevat:

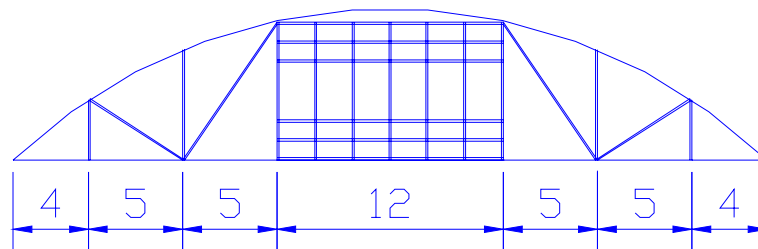
Uitvoering:	Hoogste spanning belastinggeval 1	Hoogste spanning belastinggeval 2	Grootst toegepaste plaatdikte
Koker 1	420 N/mm <sup>2</sup>	412 N/mm <sup>2</sup>	150 mm
Koker 2	398 N/mm <sup>2</sup>	390 N/mm <sup>2</sup>	120 mm
Koker 3	392 N/mm <sup>2</sup>	384 N/mm <sup>2</sup>	130 mm

Tabel 11.1: Belangrijkste gegevens uit ontwerpberekeningen uitgevoerd m.b.v. Excel.

Koker 1 voldoet niet omdat de optredende spanningen hoger zijn dan de maximaal toegestane spanning van 414 N/mm<sup>2</sup>. Kiezen voor een nog grotere plaatdikte is geen optie.

Koker 1 en 2 voldoen beide en verschillen ook niet veel van elkaar wat betreft de optredende spanningen. Er wordt gekozen om de uitvoering van koker 2 verder uit te werken omdat bij deze optie de plaatdiktes minder groot zijn.

Voor dit ontwerp zijn vervolgens enkele andere dimensies bepaald, zoals de langsverstijvingen van de huidbeplating en de liggerprofielen van de tussenschotten welke als een vakwerk uitgevoerd zullen worden. Hierbij is uitgegaan van tussenschotten op een afstand van 5 meter van elkaar.



De lijven van de kern hebben een dikte van 110mm  
 De flenzen van de kern hebben een dikte van 120mm  
 Huidbeplating heeft een dikte van 20mm  
 Langsverstijvingen (voor de huidbeplating) als trogprofielen 300/10  
 Tussenschot vakwerk uitgevoerd in HD 400x237

Figuur 11.6: Indeling van de sectordeur met de dimensies van de belangrijkste onderdelen.

## H12 Controle met behulp van STAADpro

Het ontwerp dat in het voorgaande deel met de hand is opgesteld wordt hier ingevoerd in het elementenprogramma STAADpro. Dit programma maakt het mogelijk om een ruimtelijk ontwerp te modelleren met behulp van liggers, platen en ruimtelijke objecten. Er wordt eerst een korte uitleg gegeven hoe de modellering bij dit programma werkt. Wanneer het model is ingevoerd kan het belast worden en kan de constructie worden doorgerekend. De uitkomsten hiervan worden gecontroleerd voor de eerder beschreven grenstoestanden:

1. Sterkte
2. Stijfheid
4. Trillingen

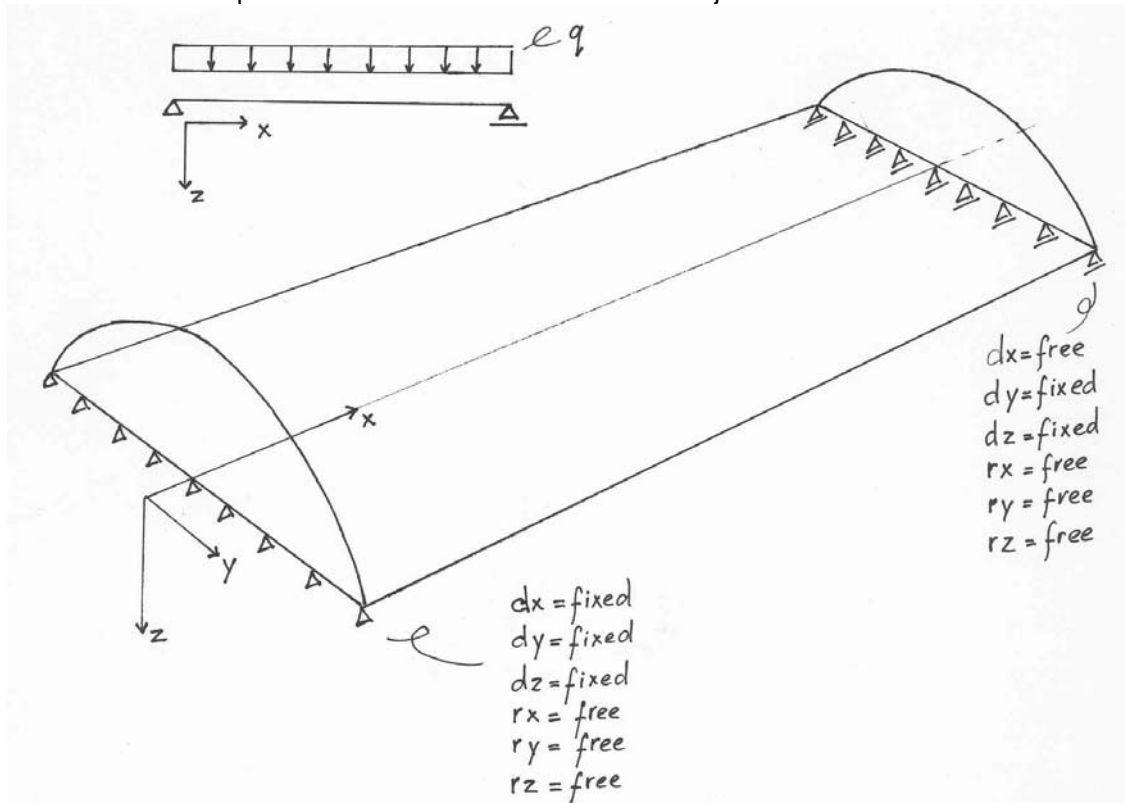
Na het bekijken van de uitkomsten zal in twee stappen worden geprobeerd het ontwerp te verbeteren.

### 12.1 Invoer ontwerp in STAADpro

Hieronder wordt in enkele stappen uitgelegd hoe de sectordeur is gemodelleerd en ingevoerd in het programma STAADpro.

#### 12.1.1 Randvoorwaarden opstellen

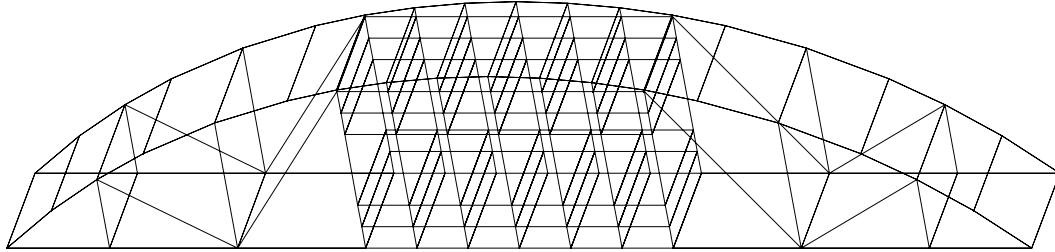
Allereerst is het mechanica schema waarmee de handberekeningen zijn gemaakt omgezet naar de randvoorwaarden voor de 3D modellering. De handschets hiervan is in figuur 12.1 te zien. In het 3D model zijn de opleggingen om de y-as nog steeds scharnierend, maar om de x-as kunnen deze een moment opnemen. Dit is zoals het ook in de werkelijkheid is.



Figuur 12.1: Randvoorwaarden voor de 3D modellering

### 12.1.2 Invoer geometrie

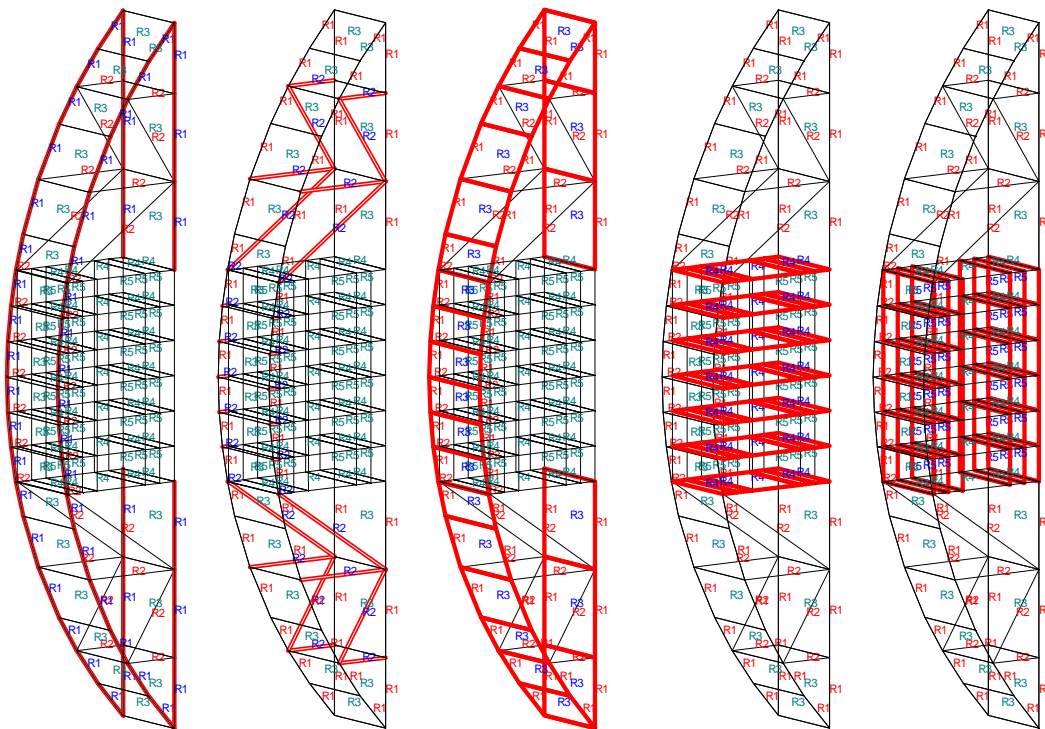
Hierna is eerst een deelelement met een lengte in de x-richting van 5 meter volledig opgesteld. Dit element is hieronder te zien in figuur 12.2.



Figuur 12.2: Element in STAADpro opgebouwd uit liggers en platen

### 12.1.3 Invoer profieieigenschappen

Daarna zijn van het element voor de verschillende onderdelen de profielgrootheden ingevuld en zijn de verschillende plaatdiktes aangegeven. De onderverdeling is te zien in figuur 12.3. Hierbij zijn de langsverstijvers van de huidbeplating, trogprofielen, in de modellering meegenomen via een omgeslagen equivalente plaatdikte.



Figuur 12.3: Verdeling eigenschappen verschillende onderdelen, van links naar rechts in rood aangegeven: Randliggers uitkraging, vakwerk uitkraging, huidbeplating, kernbeplating z, kernbeplating y

#### 12.1.4 Aanbrengen belasting

Nadat de eigenschappen van de verschillende constructiedelen zijn aangegeven wordt er een belasting aangebracht. In de figuur hieronder zijn de waterdrukken ten gevolge van belastingsituatie 1 ingevoerd zoals deze in hoofdstuk 10 zijn bepaald. Doordat de cirkelvorm is opgesteld uit lijn-elementen ziet deze belastingverdeling er een beetje hoekig uit, maar voor de modellering maakt dit niet uit.

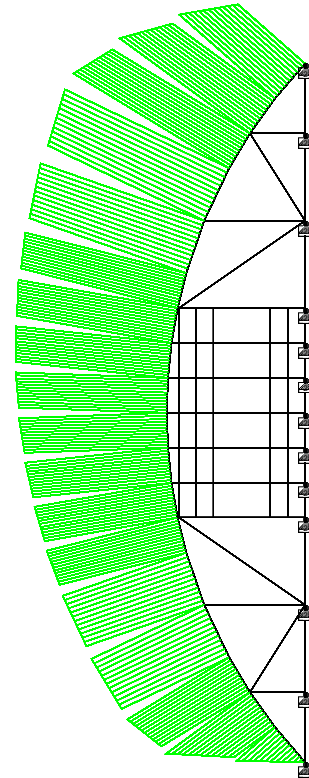
Het eigengewicht kan door het programma zelf worden meegenomen in de berekening. Dit moet wel in de juiste verhoudingen over de y- en z-richting worden verdeeld. Dit kan door handmatig een factor mee te geven voor het gewicht in de z- en de y-richting:

$$z = -\cos(76^\circ) = -0,24$$

$$y = \sin(76^\circ) = 0,97$$

In totaal zijn er 4 belastingsgevallen ingevoerd:

1. Stormvloed, belasting uit waterdrukken ten gevolge van de stormvloed
2. y-eigen, belasting in y-richting tengevolge van eigengewicht
3. z-eigen, belasting in z-richting tengevolge van eigengewicht
4. Combinatie, hierin zijn de drie bovengenoemde gevallen meegenomen met de volgende belastingfactoren:  
Stormvloed x 1,25  
y-eigen x 1,2  
z-eigen x 0,9

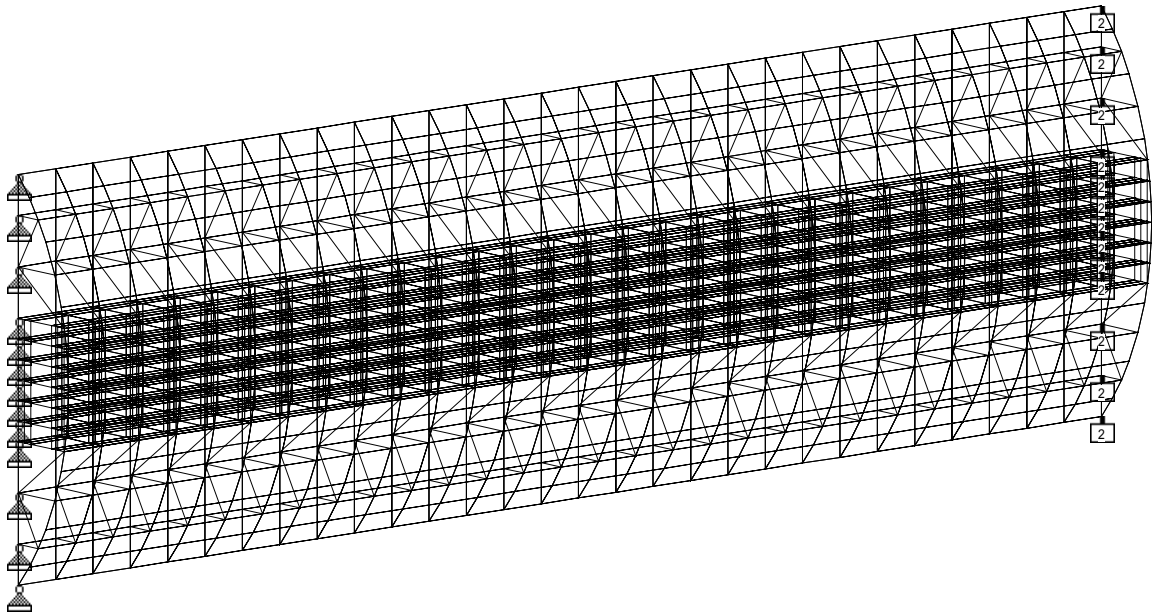


Figuur 12.4: Uitwendige belastingen ten gevolge van de waterdrukken. Een zijaanzicht, gekeken in de x-richting.

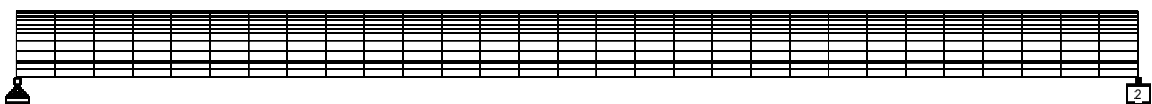
### 12.1.5 Aanbrengen randvoorwaarden

Nadat het element compleet is kan deze worden vermenigvuldigd in de x-richting zodat de complete sectordeur is gemodelleerd. Hierbij moet er op gelet worden dat het totaal aantal knooppunten niet wordt overschreden omdat er anders geen berekeningen met het model kunnen worden uitgevoerd. In dat geval zou het model grover gemaakt moeten worden of voor de helft moeten worden gemodelleerd. In dit geval ging het goed en kan de gehele constructie worden ingevoerd.

Wanneer de gehele constructie is ingevoerd kunnen de randvoorwaarden worden aangebracht. De gehele figuur ziet er dan als volgt uit.



Figuur 12.5: Totaal overzicht in 3D van de gemodelleerde constructie met de opleggingen.



Figuur 12.6: Een zijaanzicht in de y-richting waarin de opleggingen duidelijk zijn aangegeven.

Voor het model zoals gegeven in figuur 12.5 bedraagt het aantal knooppunten 1950. Het totaal aantal elementen dat is toegepast bedraagt 3925. Hiervan zijn er 1170 liggerelementen en 2755 vierknoops plaalementen.

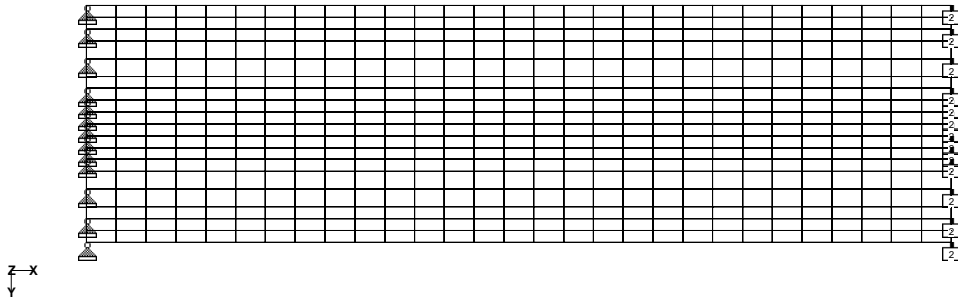


## 12.2 Resultaten van eerste invoer

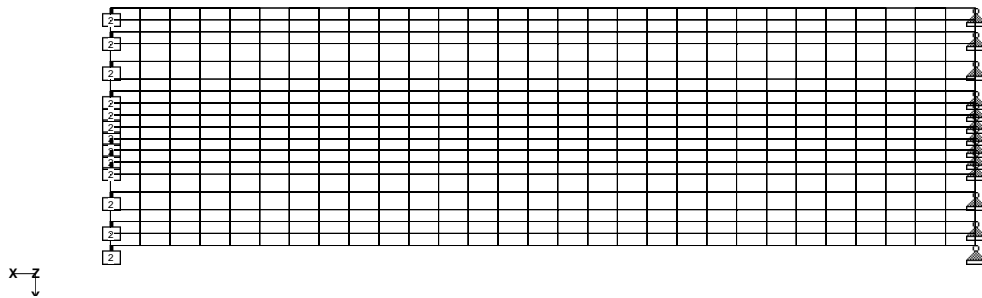
Als eerste invoer zijn de berekende dimensies uit de handberekeningen ingevoerd voor de hele constructie en is de doorsnede van de constructie ook over de hele lengte gelijk. Het ingevoerde model is gecontroleerd op belastingsituatie 1: stormvloed. Dit is de maatgevende belasting.

Hieronder zullen de verschillende controles worden uitgevoerd voor sterkte, stijfheid en trillingen. Hier zullen in verschillende aanzichten de resultaten uit het programma worden bekeken. Ter oriëntatie is hier een overzicht gegeven van de verschillende aanzichten met de bijbehorende assenstelsels.

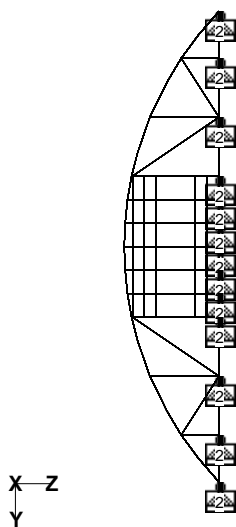
Vooraanzicht (bolle zijde):



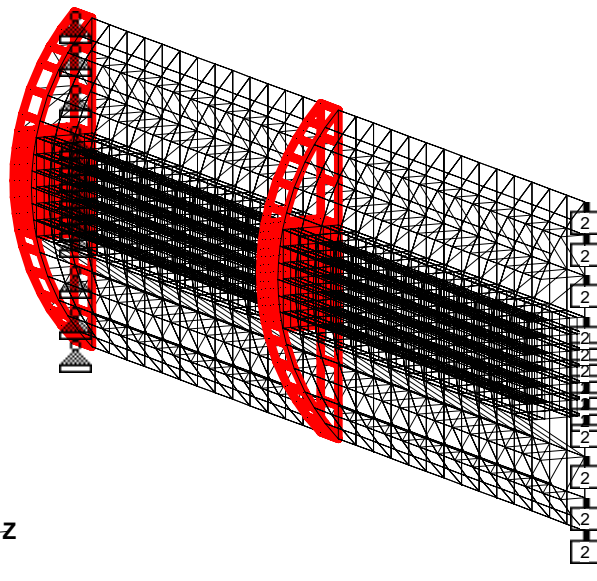
Achteraanzicht (vlakke zijde):



Zijaanzicht:

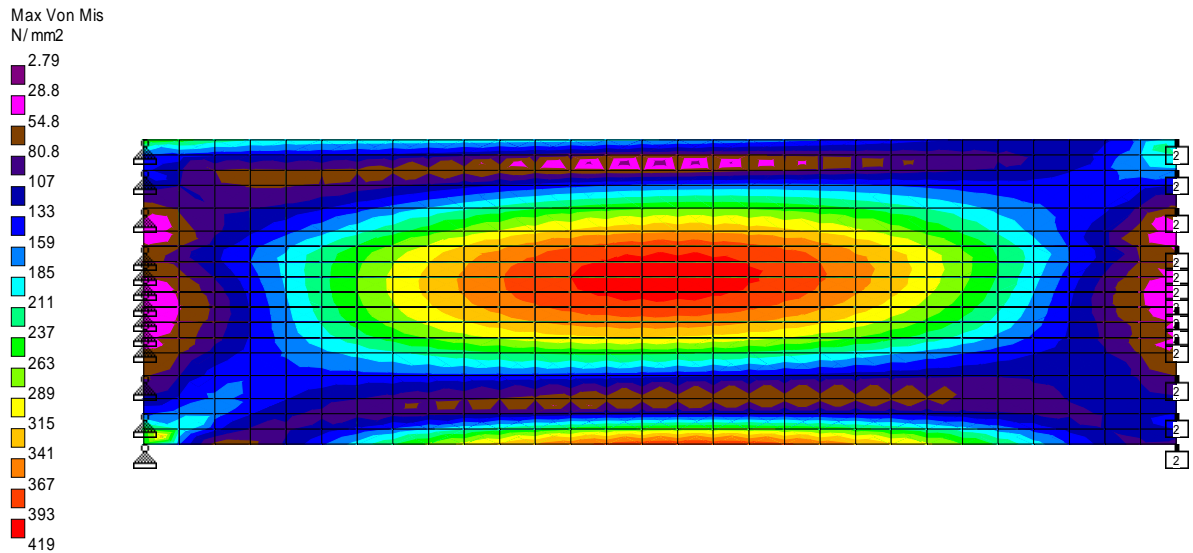


3D-aanzicht met de bekeken elementen:

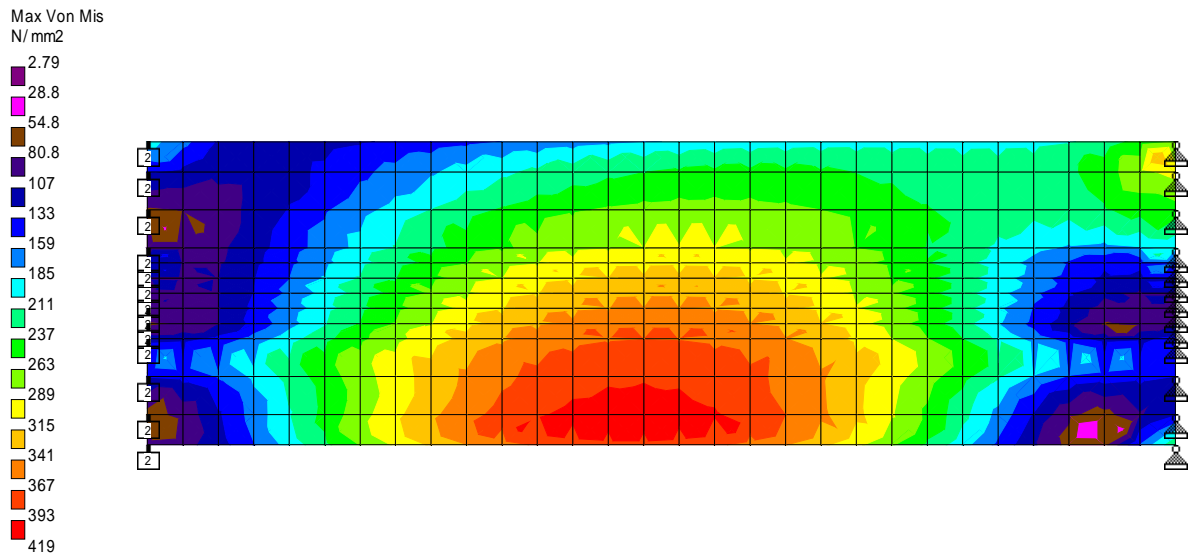


### 12.2.1 Controle op sterkte

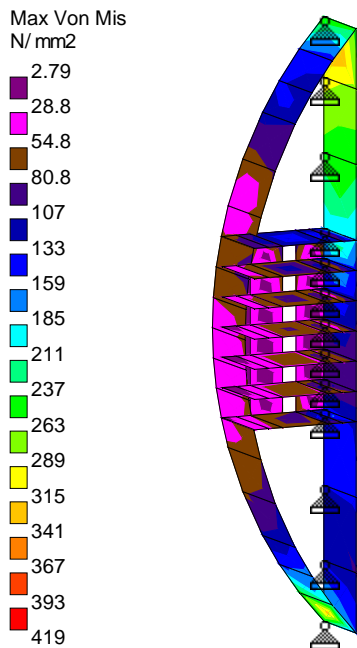
In de controle op sterkte zal er voornamelijk worden gekeken naar de spanningen die optreden in de platen van de kern en de platen van de huidbeplating. Hierbij zal worden gekeken naar de hoofdspanningen volgens Von Mises. Het belastinggeval waar hiernaar gekeken wordt is geval 4: combinatie. Hieronder staan de spanningsverdelingen weergegeven voor dit belastinggeval. Om een indruk te krijgen hoe de bijdragen van het eigengewicht en de stormvloedbelasting zijn in dit totaal kan worden gekeken naar het totaaloverzicht in bijlage 11.



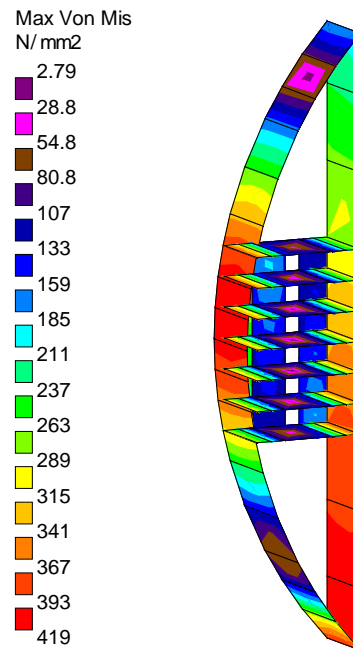
Figuur 12.7: Vooraanzicht, plaatspanningen ten gevolge van belastinggeval 4:combinatie



Figuur 12.8: Vooraanzicht, plaatspanningen ten gevolge van belastinggeval 4:combinatie



Figuur 12.9: 3D-aanzicht van element bij de oplegging



Figuur 12.10: 3D-aanzicht van element uit het midden

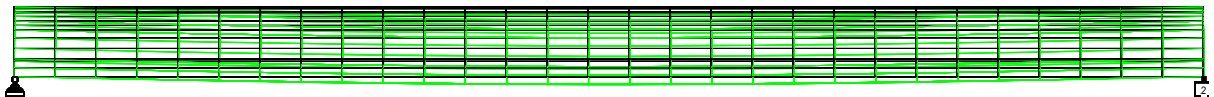
Snel is te zien dat de ingevoerde constructie niet voldoet. De optredende spanningen zijn groter dan de maximaal toegestane spanning van  $414 \text{ N/mm}^2$ . Wanneer verder naar de verdeling van de spanningen wordt gekeken is het volgende op te merken:

- De maximale spanning in de kern was vooraf berekend op  $398 \text{ N/mm}^2$ . Uit de berekening van STAADpro volgt een spanning van de zelfde orde grootte. In de kern is de spanning net iets kleiner (namelijk  $384 \text{ N/mm}^2$ ) terwijl de spanning in de huidbeplating buiten de kern net iets groter is ( $408 \text{ N/mm}^2$ ). Dat de spanning in de huidbeplating groter is komt doordat het materiaal hier nog iets verder buiten de neutrale lijn ligt. De bijdrage van de huidbeplating in het traagheidsmoment was echter ook niet meegenomen bij de handberekeningen. Dit heft elkaar ongeveer op.
- In de handberekeningen was er van uitgegaan dat de buitenste delen van de lijven een belangrijke bijdrage zouden leveren bij de opname van buiging om de y-as, dit blijkt te zijn zoals voorspeld (gezien de gele uiteinden van de flenzen in figuur 12.10).
- De binnenste delen van de lijven zijn vrijwel neutraal en kunnen duidelijk kleiner worden gedimensioneerd. Zij werken niet in die mate mee bij de opname van buiging om de z-as als gedacht.
- De hoogste spanningen treden op in de huidbeplating van de ondervin welke ontstaan als gevolg van buiging om de y-as (ten gevolge van stormvloedbelasting) in combinatie met buiging om de z-as (ten gevolge van eigengewicht).

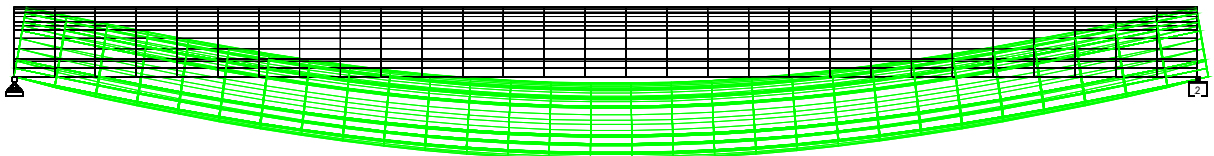
### 12.2.2 Controle op stijfheid

De controle op stijfheid van de constructie vindt plaats door de vervormingen van de constructie ten gevolge van veranderlijke belasting in de gebruikstoestand te controleren (belastingfactor =1).

Hiervoor worden de verplaatsingen ten gevolge van belastinggeval 1, stormvloed, in beschouwing genomen. De maximale verplaatsingen in de x- en de y-richting zijn ongeveer dezelfde orde van grootte. Deze bedragen, indien de constructie door de golfbelasting statisch wordt belast, respectievelijk 149mm en 24mm. De doorbuiging in de z-richting, dit is richting het draaipunt van de deur, is van een geheel andere orde en bedraagt maximaal 945mm. Deze verplaatsing treedt op in het midden van de deur zoals in de figuur hieronder is weergegeven.



Figuur 12.11: De vervormingen van de ligger in de z-richting in de juiste verhouding weergegeven



Figuur 12.12: De vervormingen van de ligger in de z-richting vergroot weergegeven (x10)

Eisen met betrekking tot de stijfheid van dit soort constructies zijn niet eenduidig te geven. In principe komt een dergelijke eis voort uit de consequentie van een vervorming op zijn omgeving of uit bijkomende spanningen, te zien als tweede-orde effect.

Gekeken naar de hier beschouwde constructie zou voor het eerste punt gesteld kunnen worden dat de hoekverdraaiing bij de opleggingen niet te groot mag zijn. Verder is van belang dat de uitwijking van de deur ter plaatse van de drempel niet te groot wordt. Omdat hier de drukken erg groot zijn kan er niet alleen lekkage ontstaan onder de deur door, maar kan deze sterke stroming problemen geven voor de drempel, de bodembescherming en het trillingsgedrag van de deur. De maximale uitwijking van de deur ter hoogte van de drempel is 865mm.

Voor het tweede punt is een belangrijk gegeven dat de constructie niet op normaalkracht (druk) wordt belast. Dit betekent dat een geometrische niet lineariteit heeft weinig gevolgen.

Dit alles zou ervoor kunnen pleiten om een eventuele stijfheidseis ruim in te schatten. Een maximale doorbuigingseis zoals die bij bruggen wordt gehanteerd is dat de constructie (in

gebruikstoestand) niet meer vervormt dan  $\delta_{\max} \leq \frac{\ell}{500} = 290\text{mm}$ .

De hierboven beschreven constructie voldoet hier lang niet aan, waarbij moet gezegd worden dat de bovenstaande eis niet hard te stellen is. Feit blijft dat de vervormingen erg groot zijn.

Een ander aspect dat van belang is bij vervormingen is de combinatie met trillingen. Hierbij gaat het om de eigenfrequentie van de constructie in relatie tot het belastingsspectrum. Dit zal in de volgende paragraaf worden behandeld bij de controle op trillingen.

### 12.2.3 Controle Trillingen

Als gevolg van de belastingen en dan voornamelijk de golfbelasting gaat de constructie vervormen. Deze vervormingen hebben een uitwijking die met de tijd varieert en dit is onder andere afhankelijk van de golfperiode. Wanneer de uitwijkingen worden versterkt door de golfbelasting zou dit schadelijk kunnen zijn. Of er daadwerkelijk schadelijke trillingen kunnen ontstaan hangt vooral af van de eigenfrequentie van de deur. Wanneer de eigenfrequentie voldoende buiten het spectrum ligt van de golfbelasting hoeft hierdoor geen schade te ontstaan.

Het programma STAADpro kan eenvoudig de eigenfrequenties van de constructie berekenen. Hierbij wordt uitgegaan van één belastinggeval en de hierbij horende verplaatsingsrichting. Om te bekijken hoe het programma werkt met de eigenfrequenties en hoe nauwkeurig dit gebeurt is eerst een proefopstelling ingevoerd en getest. De conclusies hiervan waren dat de benadering nauwkeuriger werd wanneer er meer knooppunten in het model waren opgenomen. De eerste orde benadering gaf geen andere resultaten dan de P-delta benadering of de niet-lineaire benadering.

De eerste drie eigenfrequenties voor belastinggevallen 1 (stormvloed) en 3 (z-eigen) zijn bepaald omdat de stormvloedbelasting de belangrijkste belasting is en omdat de z-richting de belangrijkste verplaatsingsrichting is. De uitkomsten staan in het overzicht hieronder:

Eigenfrequentie in de z-richting:

Orde van frequentie (n)	Eigenfrequentie (Hz)	Periode (s)
1	1.998	0.50062
2	7.559	0.13229
3	8.723	0.11464

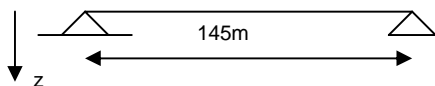
Eigenfrequentie in de stormvloed-richting:

Orde van frequentie (n)	Eigenfrequentie (Hz)	Periode (s)
1	0.592	1.69029
2	1.537	0.65073
3	2.007	0.49827

In beide gevallen zijn de eigenfrequenties hoog genoeg en liggen niet in de buurt van de golfbelasting ( $T=12s$ ,  $f=0,0833Hz$ ). Hierdoor hoeft niet verwacht te worden dat de vervormingen van de constructie nog eens worden versterkt door trillingen ten gevolge van de golfbelasting.

Bij de stormvloed-richting liggen de frequenties dichter op elkaar omdat hier naast verplaatsing in de z-richting ook de verplaatsing in de y-richting meewerkt en er rekening moet worden gehouden met frequenties ten gevolge van torsie.

Om de uitkomsten van de eigenfrequentie te controleren wordt gekeken naar het eenvoudige geval van alleen belasting in de z-richting (wat ook hoofdzakelijk zo is).



Voor een buigingsligger geldt dan voor de eigenfrequentie van orde 'n' de volgende formule:

$$f(n) = \frac{n^2 \pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, \infty)$$

De buigstijfheid van de constructie is bepaald aan de hand van de doorbuiging, via het vergeet-me-nietje wat in dit geval geldt:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}$$

Hieruit volgt voor de buigstijfheid:

$$EI = 2,252 \cdot 10^{19} \text{ Nmm}^2 = 2,252 \cdot 10^{13} \text{ Nm}^2$$

De massa van de constructie per meter is 31300 kg/m.  
Invullen levert:

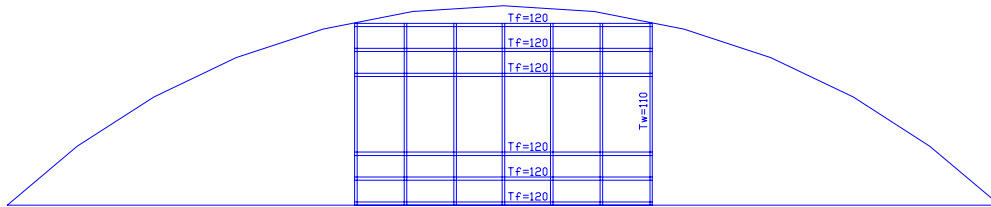
$$f(1) = \frac{1^2 \pi}{2 \cdot 145^2} \sqrt{\frac{2,252 \cdot 10^{13}}{31300}} = 2,00 \text{ Hz}$$

Dit komt heel goed overeen met de berekening van het programma (1,998 Hz). Overigens zal de werkelijke eigenfrequentie van de constructie in het water iets lager zijn omdat rekening moet worden gehouden met de toegevoegde watermassa.

De eerste eigenfrequentie van de Thames Barrier constructie, waarbij de belangrijkste vervormingen ook in de z-richting zijn, is 1,45Hz. Ook dit komt redelijk in de buurt van de 2 Hz zoals dit berekend is voor deze constructie in de z-richting.

#### 12.2.4 Conclusies na uitkomsten eerste invoer

De maatgevende doorsnede zoals die van te voren in de handberekeningen is bepaald is voor de gehele constructie toegepast.



Figuur 12.13: Overzicht van de ingevoerde plaatdiktes van de hoofddragconstructie.

Het totale gewicht van de constructie bedraagt ongeveer 18.900 ton.

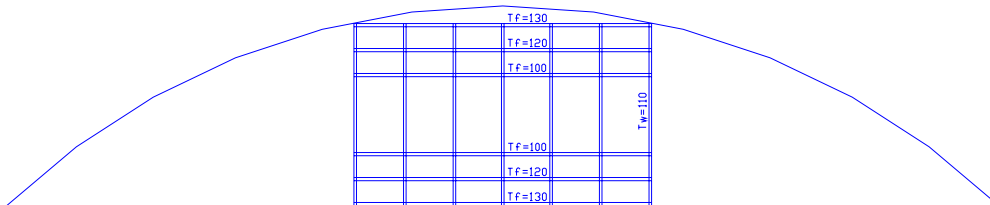
De constructie voldoet niet op sterkte aan de gestelde eis omdat de optredende spanningen groter zijn dan de maximaal toelaatbare spanning van 414 N/mm<sup>2</sup>. De spanningsverdeling in de kern is wel als verwacht, alleen de grootste spanning treedt op in de huidbeplating van de ondervin (y=20m).

Voor de stijfheid is er niet een vaste eis waaraan de constructie kan worden getoetst. Wel is te zeggen dat de optredende verplaatsingen bij belasten groot zijn en dat deze eigenlijk buiten het toelaatbare gebied vallen. Gunstig gegeven hierbij is wel dat de eigenfrequentie van de constructie vrij hoog is en dat er hiervoor geen problemen zijn te verwachten door de golfbelasting.

Er zal nu in twee stappen worden geprobeerd om het ontwerp te verbeteren. Hierbij ligt de nadruk op het verlagen van de maximale spanning en het reduceren van het totale gewicht van de constructie. De verbeteringen worden gezocht in het optimaliseren van de hoofddragconstructie. In de eerste stap zal hiervoor de ingevoerde doorsnede worden verbeterd. In de tweede stap zal de constructie in de lengterichting worden aangepast aan de momentenlijn.

### 12.3 Tweede invoer, eerste stap optimalisatie

Bij de handberekeningen zijn alle flenzen en lijven van de stijve kern even dik uitgevoerd. Bij het opnemen van buiging is het echter efficiënter om het materiaal zoveel mogelijk buiten de neutrale lijn van de constructie te brengen en hiermee het traagheidsmoment te vergroten. Bij de buiging om de y-as nemen de flenzen van de kern deze buiging op. Over de gehele lengte van de deur worden deze flenzen aangepast. De buitenste flenzen worden iets dikker gemaakt (van 120mm naar 130mm) en de binnenste flenzen worden dunner gemaakt (van 120mm naar 100mm).

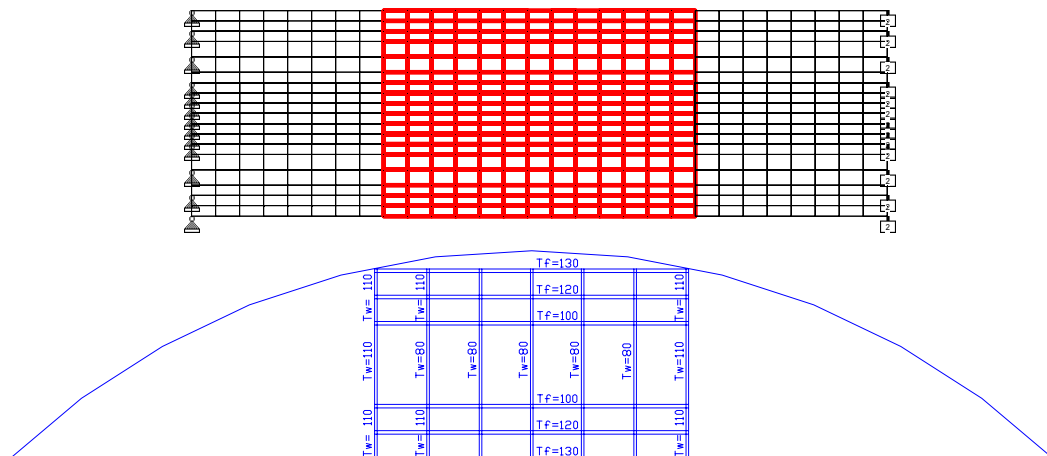


Figuur 12.14: Overzicht van de ingevoerde plaatdiktes van de hoofddragconstructie.

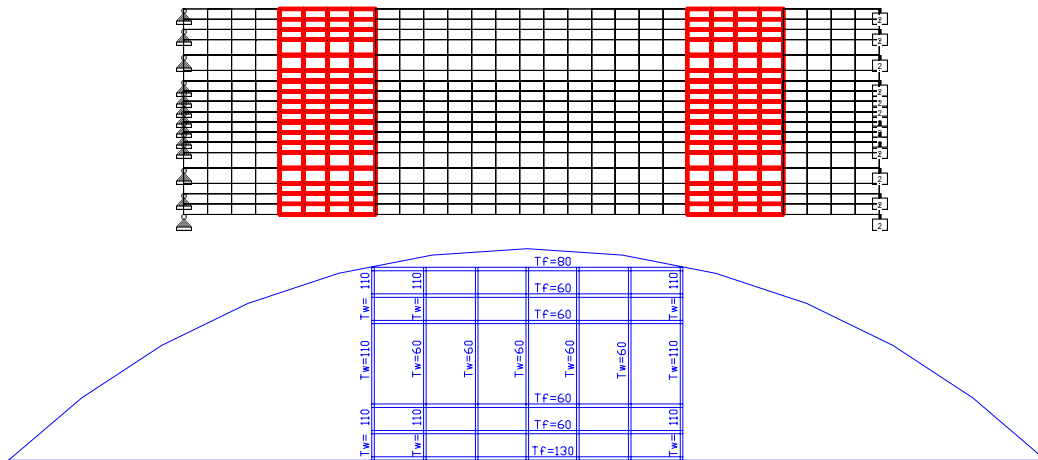
Er wordt dus iets minder materiaal gebruikt en verschoven naar de rand van de constructie, waardoor de buigstijfheid niet afneemt. Doordat het materiaal beter is verdeeld worden de maximale spanningen in de constructie ook kleiner. De maximaal optredende spanningen liggen met  $413 \text{ N/mm}^2$  nu net onder de maximaal toegestane spanning van  $414 \text{ N/mm}^2$ . Het gewicht is met ongeveer 300 ton afgenomen. Dit is niet echt veel, maar omdat het gewicht afneemt en tegelijkertijd de spanningen afnemen is dit een positieve ingreep.

### 12.4 Derde invoer, tweede stap optimalisatie

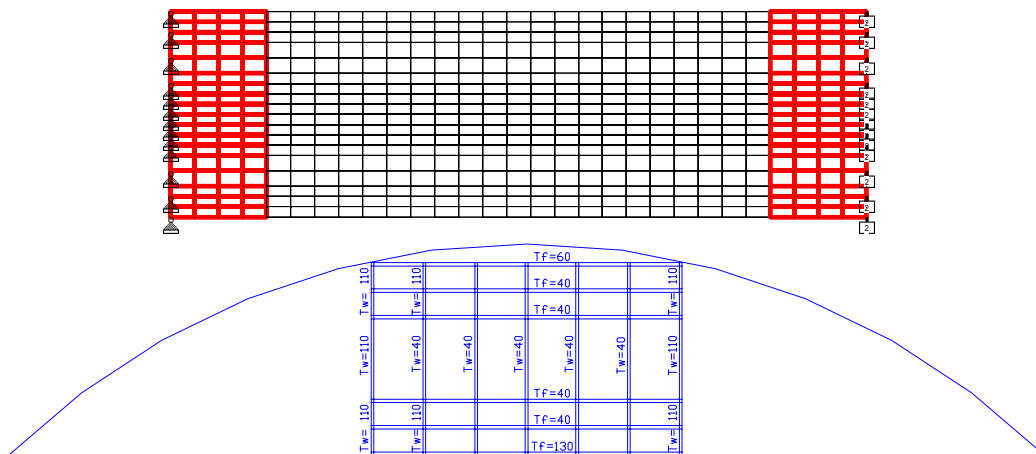
In de tweede stap van de optimalisatie is in de lengterichting het draagsysteem van de constructie gevarieerd. Dit is in drie gedeelten gebeurd. Een overzicht van de variatie over de lengte van de deur is hieronder gegeven waarbij ook weer de gekozen plaatdiktes zijn aangegeven.



Figuur 12.15: Overzicht van de plaatdiktes in het middendeel van de deur.



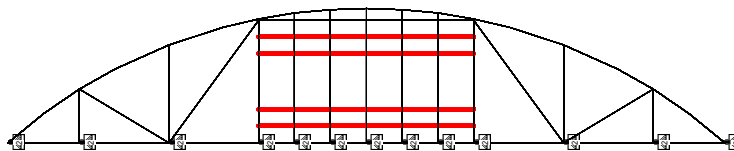
Figuur 12.16: Overzicht van de plaatdiktes in de tussendelen van de deur.



Figuur 12.17: Overzicht van de plaatdiktes in de einddelen van de deur.

### 12.4.1 Aanpassingen flenzen

In het middendeel zijn de flensdiktes niet veranderd. Het middendeel bestaat uit de elementen waarin de spanningen na de eerste invoer groter waren dan ongeveer  $300\text{N/mm}^2$ . In de tussendelen en de einddelen zijn de flenzen minder dik uitgevoerd en daar is vooral op de binnenste flenzen bespaard (zie figuur 12.18). Hierbij moet worden opgemerkt dat de flenzen aan de vlakke zijde iets dikker zijn gehouden dan aan de bolle zijde omdat de invloed van de flenzen aan de vlakke zijde groter is. Deze vormen namelijk ook de opleggingen aan de uiteinden en hebben vooral een grote bijdrage bij het opnemen van eigengewicht in de y-richting. De buitenste flens aan de vlakke zijde is daarom zelfs over de volledige lengte op maximale dikte gehouden.

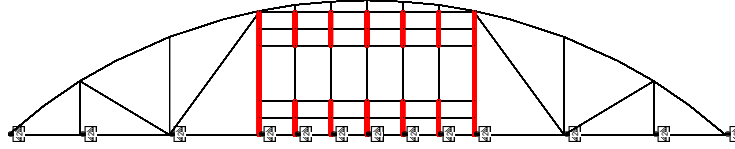


Figuur 12.18: Vooral de binnenste flenzen zijn naar de uiteinden van de deur toe minder dik uitgevoerd.



### 12.4.2 Aanpassingen lijven

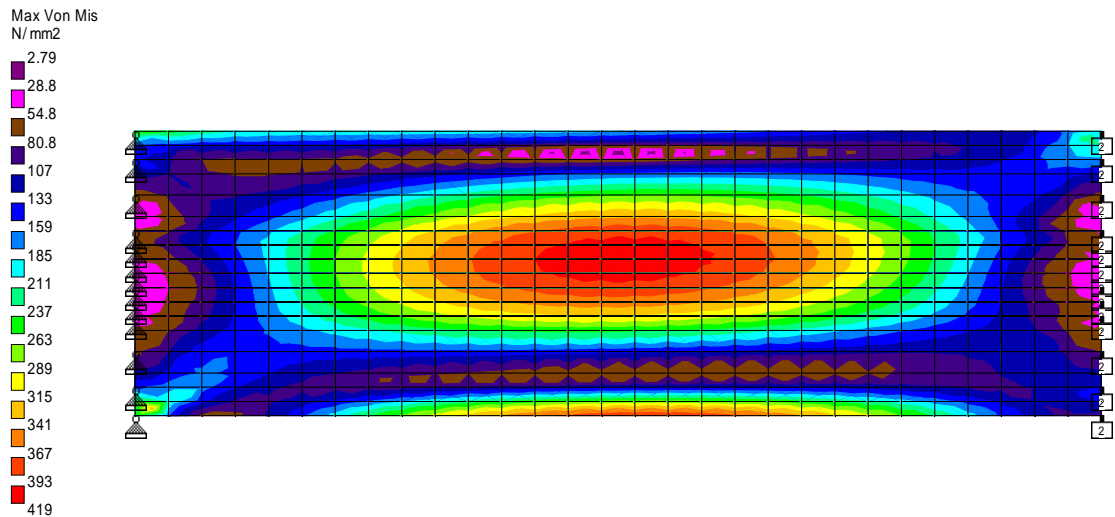
De buitenste lijven van de kern en de uiteinden van de lijven hebben een grote bijdrage aan het opnemen van buiging om de z-as dan wel de y-as. Deze dikten zijn niet aangepast. De middendelen van de lijven die vrijwel neutraal waren zijn over de hele lengte dunner uitgevoerd.



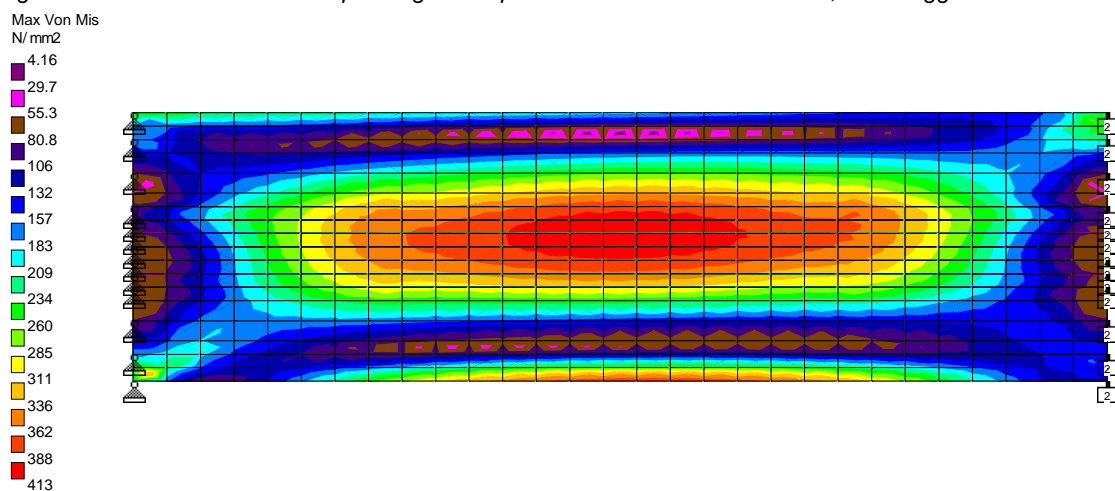
Figuur 12.19: Vooral de buitenste lijven en de uiteinden van de lijven nemen de momenten op.

### 12.4.3 Resultaten tweede stap optimalisatie

De maximale spanning in de constructie ten opzichte van de vorige stap is niet veranderd en voldoet nog steeds aan de maximaal toegestane spanning. Het spanningsverloop in de deur is wel iets veranderd. De einddelen van de deur maken nu iets efficiënter gebruik van het materiaal. Dit is te zien wanneer het spanningsverloop wordt vergeleken met de eerste invoer (zie ook bijlage 12 voor het totale overzicht).



Figuur 12.20: Overzicht van het spanningsverloop in de deur na de eerste invoer, belastinggeval 4



Figuur 12.21: Overzicht van het spanningsverloop in de deur na de derde invoer, belastinggeval 4

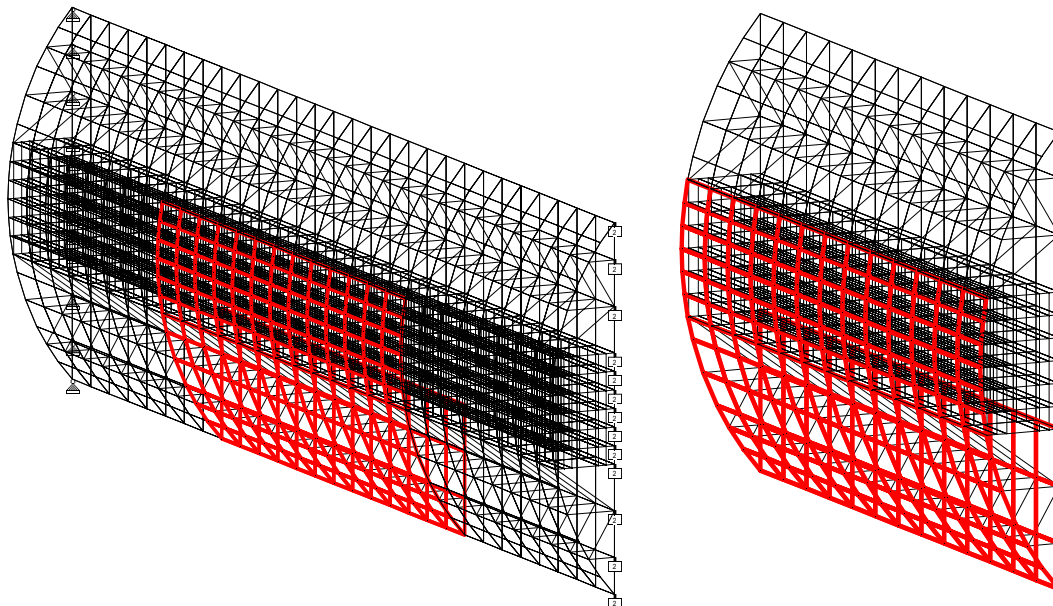
De doorbuiging en de eigenfrequentie van de constructie zijn nauwelijks veranderd. Wel is er ongeveer 3000 ton aan gewicht bespaard. Dit is dus een positieve ingreep geweest.

## 12.5 Conclusies resultaten STAADpro

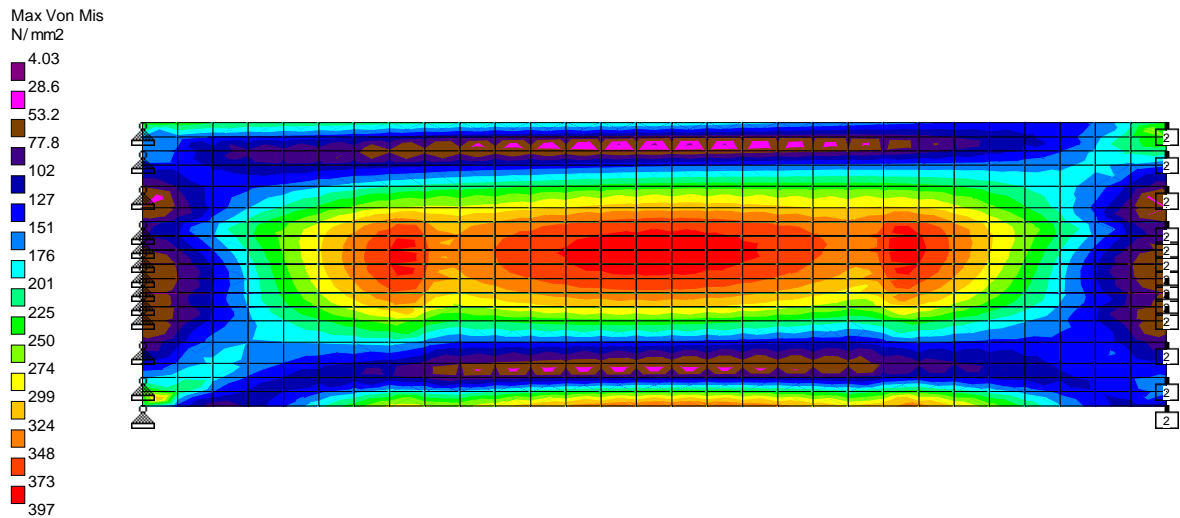
Er is gezocht naar aanpassingen in de hoofddraagconstructie om het spanningsverloop in de constructie beter te krijgen en het gewicht van de constructie te reduceren door efficiënter om te gaan met materiaal. Dit is in twee redelijk grove stappen gebeurd waarbij het gewicht met 3300 ton is gereduceerd tot 15630 ton. De verwachting is dat de constructie nog beter kan worden aangepast aan de momentenlijn waardoor er gewicht bespaard kan worden zonder dat de spanningen hoeven toe te nemen. Naast de sterkte is bij deze constructie ook de stijfheid van groot belang. In de optimalisatie van de constructie is hier niet op ingegaan. Toch zou dit maatgevend kunnen zijn voor het uiteindelijke ontwerp van de sectordeur. Daarom wordt hier in paragraaf 12.5.2 op terug gekomen.

### 12.5.1 Conclusies sterkte constructie

Het spanningverloop in de hoofddraagconstructie was voornamelijk zoals dit vooraf berekend was. De maximale spanningen treden echter op in de huidbeplating. Naast verbeteringen in de hoofddraagconstructie kan ook op andere manieren het spanningsverloop in de constructie worden geoptimaliseerd. Zo zou in het middendeel van de deur plaatselijk de huidbeplating aangepast kunnen worden. Hieronder is voor het aangegeven deel de huidbeplating met 10mm verdikt.



*Figuur 12.22: Overzicht van de constructie met hierin aangegeven over welk deel de huidbeplating is verdikt. Dit deel is rechts nogmaals uitgelicht.*



Figuur 12.23: Vooraanzicht, spanningsverloop in de constructie bij gedeeltelijke verdikking van de huidbeplating.

De spanningen zijn duidelijk afgenomen tot maximaal  $397 \text{ N/mm}^2$ . Het verloop van de spanningen in de constructie is ook veranderd want er is duidelijk een sprong te zien bij de overgang van plaatdikte. Gunstig is dat bij deze ingreep de verplaatsingen weer iets zijn afgenomen, maar het gewicht is weer iets toegenomen.

Er is bij de verschillende optimalisatie stappen niet gekeken naar de uitkragende draagconstructie. De spanningen hierin zijn in grootte ongeveer gelijk met de handberekeningen en voldoen. Nergens worden de spanningen hoger dan  $300 \text{ N/mm}^2$ . Alleen bij de opleggingen moeten de liggers in het vakwerk worden herzien. Hier treden hoge spanningen op omdat een moment om de x-as moet worden opgenomen.

Wat sterkte betreft voldoet de constructie. Feit is wel dat de spanningen in de constructie erg hoog zijn en er met grote plaatdiktes moet worden gewerkt. Wanneer hierbij in ogenschouw wordt genomen dat de constructie in hogesterkte staal wordt uigevoerd, dan is duidelijk dat deze constructie erg zwaar wordt belast. Dit blijkt ook uit de vervormingen die bij deze belasting optreden. Hierop zal verder worden ingegaan in de volgende paragraaf.

### 12.5.2 Conclusies stijfheid constructie

De vervormingen waren na de eerste invoer al groot,  $945 \text{ mm}$  in het midden van de deur, en deze zijn gedurende de optimalisatie van de deur niet echt veranderd. Er is na onderzoek met enkele simulaties gebleken dat de golfbelasting de grootste bijdrage levert aan deze vervorming. Wanneer namelijk wordt uitgegaan van enkel het waterstandverschil over de deur, dan is de doorbuiging maximaal  $260 \text{ mm}$ . Belangrijk hierbij te noemen is dat bij de golfbelasting is uitgegaan van een vrij grote waterstandverhoging en een golfbelasting die over de gehele deur optreedt. Dit is redelijk conservatief en hier ligt een mogelijkheid voor een nadere beschouwing. Welke verplaatsingen ten gevolge van de golfbelasting werkelijk optreden hangt ook af van de eigenfrequentie van de deur in relatie tot het belastingspectrum. Deze is ook tijdens de optimalisaties niet echt veranderd en geeft geen reden om aan te nemen dat de vervormingen nog eens worden versterkt door trillingen ten gevolge van de golfbelasting.

Zoals eerder aangegeven is er niet een vaste eis voor dit soort constructies ten aanzien van vervormingen, maar moet worden gekeken naar de invloed op de omgeving. De belangrijkste randvoorwaarde hierbij is de drempel. In stormvloedstand kan hier in het midden van de deur een gat ontstaan van maximaal 865mm tussen de drempel en de deur. Hier kan onder grote druk water onder de deur door stromen. Dit kan een aantal gevolgen hebben:

- Er ontstaat lekkage onder de deur door. Dit hoeft geen probleem te zijn omdat de sectordeur maar een klein deel is van de totale kering. Het debiet zal klein zijn in vergelijking met golfoverslag over de gehele kering en zodanig geen invloed hebben op het bergende vermogen van de Westerschelde.
- De sterke straal die onder de deur door stroomt kan gevolgen hebben op de drempel en de bodembescherming. Dit is echter niet te verwachten omdat deze ontworpen zullen worden op de eis dat de deur onder verval kan openen. Hierbij kunnen ook hoge stroomsnelheden ontstaan waartegen de bodem beschermd moet zijn.
- De sterke stroming onder de deur door kan de deur dynamisch gaan belasten waardoor extra trillingen ontstaan die in het ergste geval tot bezwijken kunnen leiden. Dit zal een punt zijn dat nader onderzocht moet worden.

Uit voorbeelden van andere keringen blijkt dat een stroming door of onder de constructie niet altijd een probleem hoeft te zijn. Zo zit er tussen de twee sectordeuren van de Maeslantkering in Rotterdam een gat van 1,5 meter breed over de hele hoogte. Bij de vizierschuivenstuw Hagestein ontstaan door onderstroom ook openingen tot 80 centimeter. Toch zal dit punt van stroming onder de constructie verder onderzocht moeten worden. De nadruk zal hierbij dan moeten liggen op de dynamische invloed op de constructie omdat dit echt tot problemen kan leiden.

Hoewel de golfbelasting kleiner is bij negatief verval kunnen hier ook verplaatsingen optreden van meer dan 800mm. Dit komt omdat hierbij het waterstandverschil groter is. Deze verplaatsing in de andere richting zorgt ervoor dat de deur op de drempel gaat drukken. Door deze belasting uit de deur op de drempel kan de drempel gaan verzakken. Dit zou als gevolg kunnen hebben dat de deur niet meer in de drempel kan worden geborgen.

Hoewel er nog een aantal aspecten nader moeten worden beschouwd kan worden gesteld dat de huidige constructie niet voldoet ten aanzien van stijfheid. Hiervoor kunnen een aantal oplossingen worden aangedragen:

- De gevolgen van de vervormingen kunnen worden verholpen. Zo kan er worden gekozen om een opening tussen deur en drempel af te dichten met een opblaasbare constructie in de drempel. Dit zijn echter lapmiddelen en leveren geen echte oplossing van het probleem.
- Er kan worden geprobeerd de huidige constructie stijver te maken zodat de vervormingen minder groot worden. Er is in verschillende simulaties geprobeerd de huidbeplating en de kernplaten dikker uit te voeren zodat de constructie stijver wordt. Dit geeft echter geen bevredigende oplossing omdat de platen al dik waren uitgevoerd, het eigengewicht weer enorm toeneemt en de verplaatsingen nog steeds groot blijven. Een andere oplossing om de huidige constructie stijver te maken is door de constructiehoogte te vergroten. Hiermee zal de breedte van de deur ook groter worden wat minder efficiënt is en het gewicht zal ook weer fors toenemen.
- Een andere mogelijkheid is om naar een ander draagsysteem te kijken dat beter voldoet aan de eisen van stijfheid. Wellicht kan er in de lengterichting worden gewerkt met een boogconstructie zodat de draagconstructie op normaalkracht wordt belast in plaats van buiging. De vraag is of dit nog past binnen de principe oplossing van de sectordeur.

## H13 Uitvoering sectordeur

Zowel de lengte, de breedte als de hoogte van de sectordeur zijn toegenomen bij dit ontwerp in vergelijking met bestaande sectordeuren. Dit heeft tot gevolg dat het eigengewicht van de sectordeur ook fors is toegenomen. Het totale gewicht van de deur is ongeveer 15000 ton. Dit kan worden vergeleken met bijvoorbeeld de Eemskering welke 850 ton weegt. De sectordeur van de Westerschelde is 2 keer zo lang, twee keer zo hoog en 2 keer zo breed. Omdat de lengte een kwadratisch effect heeft betekent dit een factor 16 voor het eigengewicht van de kering:  $16 \times 850 \text{ ton} = 13600 \text{ ton}$ . Dit ligt in dezelfde orde van grootte.

Doordat het eigengewicht zo groot is kan de deur niet door een kraan op een ponton in een keer op de juiste plaats worden gehesen. Het maximaal te verplaatsen gewicht is op deze manier ongeveer 2500 ton. Gespecialiseerde schepen, zoals bijvoorbeeld voor de Oosterschelde kering zijn gebruikt, kunnen meer belasting tillen tot ongeveer 10.000 ton. Deze schepen zijn echter niet zomaar geschikt voor het hijsen van de sectordeur. In dit hoofdstuk wordt daarom gekeken wat er voor mogelijkheden zijn voor de bouw van de sectordeur.

Hieronder zijn enkele uitgangspunten voor de uitvoering opgesteld waarna enkele bouwmethoden worden besproken.

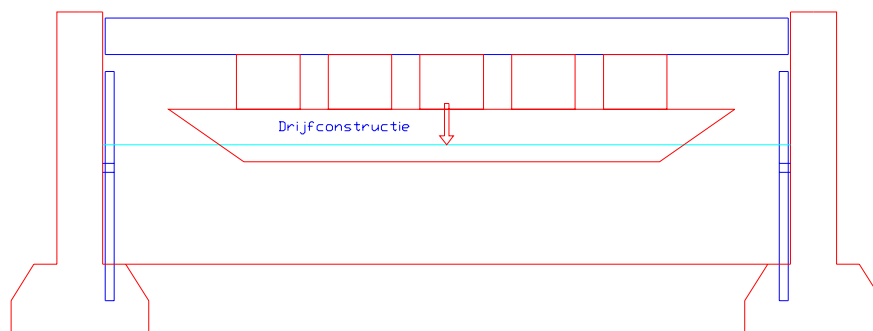
Uitgangspunten:

- De scheepsdoorgangen moeten eerst worden gebouwd en daarna de rest van de kering. Anders wordt de scheepvaart te veel gehinderd.
- De pijlers van de scheepsdoorgangen worden eerst gebouwd. Hier worden de draaischijven aangehangen.
- Het totale gewicht van de deur is 15000 ton. Dit is exclusief de draaiende schijven aan de pijlers waarop de deur is opgelegd.
- Het maximale gewicht dat uit het water getild kan worden is 2500 ton.
- De bouwafwijkingen moeten zo klein mogelijk worden gehouden in verband met de geometrie van de deur en de drempel waar de deur in moet passen.

Er zijn vier bouwmethoden bedacht. Deze worden hieronder beschreven met de voor- en nadelen.

### 13.1 Bouwmethode 1: Eén geheel op pontons

Bij deze methode wordt de deur op een drijfconstructie naar de bouwplaats gevaren. Bij hoogwater wordt de constructie tussen de pijlers gevaren en wordt de deur neergelaten op de schijven. Dit kan door de drijfconstructie te verzwaren, waardoor het geheel zakt. Mogelijk kan hierbij ook gebruik worden gemaakt van grote krikken. Wanneer de deur op de schijven rust kan de drijfconstructie worden weggevoerd.



Figuur 13.1: Overzicht van bouwmethode 1, deur op ponton zoals ook bij de Thames Barrier is toegepast

Voordelen:

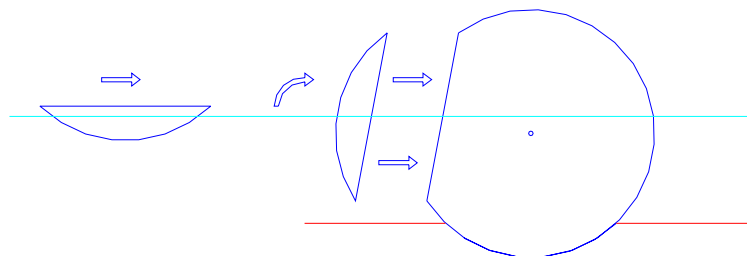
- De deur kan optimaal worden vervaardigd in goede omstandigheden en de afwijkingen van de deur zelf zijn zo klein mogelijk.
- De plaatsing kan heel snel verlopen en er zijn ter plekke geen langdurige werkzaamheden nodig.

Nadelen:

- De deur moet ongeveer 10 meter boven het water worden ingevaren om over de schijven heen te passen. Door het grote gewicht van de deur op deze hoogte moet er een zeer grote drijfconstructie worden gebruikt om dit geheel stabiel te houden.
- Het zal niet makkelijk zijn om een bestaande constructie te vinden die geschikt is als drijfconstructie of om de drijfconstructie een andere functie te geven.

### 13.2 Bouwmethode 2: Eén geheel als schip

De gehele deur wordt in een werkplaats aan het water gebouwd zoals een schip. De deur wordt hierna naar de kering gevaren. Ter plaatse wordt de deur gekanteld (hierbij kan één gedeelte van de deur gevuld worden met ballastwater) en wordt de deur tegen de schijven aangevaren. Hierna moet de deur aan de schijven worden bevestigd (pinnen).



Figuur 13.2: Overzicht van bouwmethode 2, deur als een schip

Voordelen:

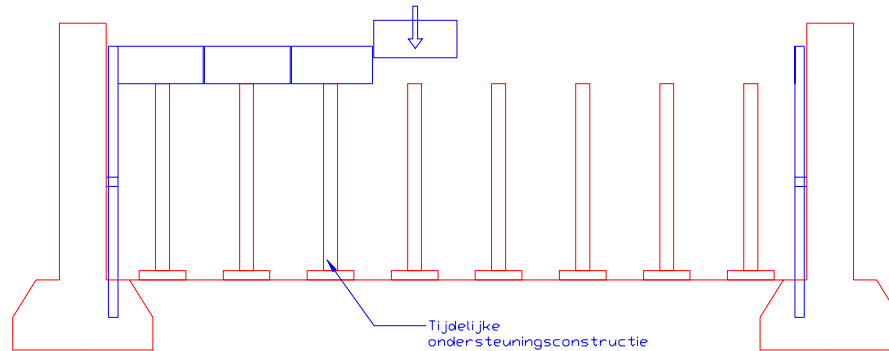
- De deur kan optimaal worden vervaardigd in goede omstandigheden en de afwijkingen van de deur zelf zijn zo klein als mogelijk.
- De plaatsing kan heel snel verlopen en er zijn ter plekke geen langdurige werkzaamheden nodig.
- Er wordt optimaal gebruik gemaakt van de eigenschappen van de deur en de kering en er worden verder geen dure hulpconstructies gebruikt.

Nadelen:

- Het kantelen zou een probleem kunnen zijn wanneer de deur niet stabiel gehouden kan worden.
- De bevestiging aan de schijven moet in een keer goed gaan en goed aansluiten op de schijven. Dit zal gedeeltelijk onder water moeten gebeuren en bij hele rustige weersomstandigheden.
- De eerste bevestiging aan de schijven zal cruciaal zijn bij deze methode, de uitvoering van dit detail zal zeer moeilijk te realiseren zijn en is erg kostbaar.

### 13.3 Bouwmethode 3: Opgedeeld in lengterichting

De deur wordt in acht delen van iets minder dan 2000 ton naar de kering gebracht. Hier worden de delen een voor een op een tijdelijke ondersteuningsconstructie geplaatst. De delen moeten op de bouwplaats aan elkaar worden gelast en aan de draaischijven worden bevestigd.



Figuur 13.3: Overzicht van bouwmethode 3, delen met ondersteuningsconstructie

Voordelen:

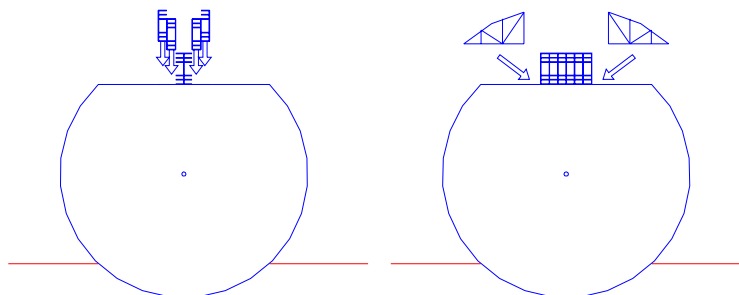
- Deze methode is zeker uitvoerbaar.

Nadelen:

- Er is een tijdelijke ondersteuningsconstructie nodig wat zorgt voor hogere kosten voor de uitvoering. Hierdoor kan mogelijk ook de drempel van de deur pas later worden aangebracht wat lastiger zal gaan wanneer de deur de doorvaart belemmert.
- Het aan elkaar lassen van de delen op de bouwplaats is lastig omdat dit onder geconditioneerde omstandigheden moet gebeuren om een goede kwaliteit van de lassen te garanderen. Daarnaast is het een heel precies pas- en meetwerk om de deur goed te stellen en een rechte deur te krijgen.

### 13.4 Bouwmethode 4: Opgedeeld in kern en uitkragingen

Eerst wordt de kern van de deur in verschillende delen over de gehele overspanning aangebracht, als een ligger. Deze delen wegen minder dan 2500 ton en kunnen naar de bouwplaats worden gevaren en hier door een kraan op een ponton op de juiste plaats worden neergelegd. Wanneer de kern in elkaar is gelast worden hieraan de uitkragingen opgehangen en als laatste worden de dekplaten die de huid van de deur vormen aangebracht.



Figuur 13.4: Overzicht van bouwmethode 4, delen in kern en uitkragingen

Voordelen:

- Er zijn geen dure hulpconstructies nodig bij deze methode.

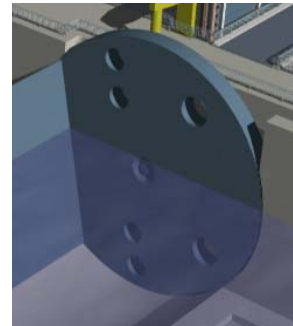
Nadelen:

- Er moet veel gelast worden op de bouwplaats. De delen van de kern worden aan elkaar gelast wanneer deze doorgebogen zijn. Dit is lastig lassen wanneer er verschillen zijn in de mate van doorbuigen tussen de verschillende delen van de kern en er ontstaat een initiële uitwijking die ongunstig werkt in de belastingsfase.

### 13.5 Conclusie:

Methode 1 en 2 zijn te prefereren boven methode 3 en 4 omdat voor de laatste twee erg veel laswerk op de bouwplaats zelf nodig is. Dit laswerk moet plaatsvinden onder geconditioneerde omstandigheden. Het materiaal zal voorverwarmd moeten worden en bij de grote plaatdiktes kost dit erg veel tijd en energie. Bovengenoemde omstandigheden zijn buiten moeilijk te realiseren wat een negatieve invloed kan hebben op de kwaliteit van de verbindingen en ook grotere afwijkingen tot gevolg kan hebben.

Methode 2 is erg kritisch bij het plaatsen en de kans op schade is hierbij redelijk groot. Daarbij geldt dat bij de eerste bevestiging aan de schijven de deur steunt op twee kleine punten terwijl normaal de oplegging over de volledige breedte loopt. Verder kunnen de schijven van de sectordeur niet geborgen zijn in de pijlers omdat anders de deur te breed zou zijn om deze in de opening te varen. De schijven zouden dan buiten de pijlers moeten uitsteken waardoor deze kwetsbaarder zijn en een grotere excentriciteit hebben ten opzichte van de pijler. Dit is nadelig voor de krachtsoverdracht.



*Figuur 13.5: Bij de Eemskering ligt de schijf geborgen in de pijler.*

Methode 1 is betrouwbaarder dan methode 2 ook al moet de deur ver boven het water worden geheven. Hier kan de schijf ook in de pijler worden geborgen wanneer de pijler niet te hoog is. In dat geval gaat de deur over de pijler heen op de schijf. Een groot nadeel is dat een drijfconstructie moet worden bedacht die stabiel genoeg is om de deur te dragen. Dit is een kostbare oplossing, maar is wel de enige manier om de deur in goede staat op de juiste plek te krijgen.



## H14 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal antwoord worden gegeven op de vraagstellingen zoals die in de inleiding van dit rapport zijn geformuleerd. In hoofdstuk negen zijn hierbij nog enkele onderzoeksvragen gespecificeerd bij het ontwerp van de sectordeur. Deze zullen hier ook worden beantwoord. Naar aanleiding van deze conclusies worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

### 14.1 Conclusies

Hieronder zullen de gestelde vragen puntsgewijs worden behandeld.

- *Is een stormvloedkering een geschikte oplossing voor de situatie van de Westerschelde?*

Een stormvloedkering wordt gezien als een geschikte oplossing voor de situatie van de Westerschelde. De volgende punten spelen hierbij een rol:

- Het is de meest effectieve maatregel omdat de vloedstroom van zee volledig kan worden afgesloten en hiermee het achterland het best beveiligd kan worden tegen stormvloeden. Daarnaast kan de scheepvaart toegang blijven houden tot de haven van Antwerpen en kunnen de natuurlijke waarden van het estuarium blijven behouden.
- Een stormvloedkering heeft in vergelijking met andere oplossingen weinig invloed op het ruimtegebruik van de omgeving. Uit het MER-onderzoek dat voor het Sigmaplan is uitgevoerd blijkt dan ook dat deze oplossing de minste impact heeft op mens en milieu.
- De oplossing kan goed worden gecombineerd met andere oplossingen zoals een diepzeehaven voor de kust van Nederland. Hiermee zou de haven van Antwerpen zich kunnen blijven ontwikkelen en wordt de Westerschelde als vaarroute minder belast. Voor een stormvloedkering zouden de doorvaartopeningen dan minder groot hoeven worden gedimensioneerd.
- Een stormvloedkering in de Westerschelde past goed in de lijn van de geschiedenis en in het beleid dat met het Deltaplan is ingezet. De kustlijn van Nederland zou hiermee gesloten kunnen worden.

- *Is de sectordeur zoals voorgesteld in het plan van ir. K. Boorsma een geschikte oplossing voor het afsluiten van de doorvaartopening?*

Het principe van de sectordeur zoals voorgesteld is een geschikte oplossing voor afsluiting van de doorvaartopeningen. De volgende punten spelen hierbij een rol:

- De kering kan tweezijdig waterkeren.
- De doorvaarthoogte voor scheepvaart is onbeperkt.
- Doordat de deur in de drempel wordt geborgen levert deze verder weinig hinder op. Ook het stroomprofiel wordt op deze manier zo min mogelijk ingeperkt.
- Het principe van de deur is reeds met succes toegepast in vergelijkbare situaties.

- *De grootste overspanning die tot nu toe met de voorgestelde sectordeur is afgesloten bedraagt ongeveer 60 meter. In het plan van ir. K. Boorsma wordt een overspanning van 100 tot 150 meter voorgesteld. Wat zijn de gevolgen van deze schaalvergroting?*

In het onderzoek is een ontwerp gemaakt voor een sectordeur met een overspanning van 145 meter. Dit is meer dan twee keer zo groot als de bestaande uitvoeringen. Ook de waterhoogte die gekeerd moet worden is bijna twee keer groter dan tot nu toe is toegepast. Dit heeft grote gevolgen voor de afmetingen en het gewicht van de deur. Vooral het vergroten van de overspanning speelt hierin een belangrijke rol omdat dit effect kwadratisch doorwerkt in de momentenlijn en nog meer in de vervormingen.

Bij het ontwerp van de sectordeur met grote overspanning zijn de volgende specifieke vragen gesteld ten aanzien van de gevolgen van schaalvergroting:

- *Welke gevolgen heeft de schaalvergroting op het draagsysteem van de sectordeur en hoe verandert de dimensionering van de deur?*

In de bestaande toepassingen van de sectordeur zijn plaatliggers in de lengterichting van de constructie toegepast waarbij de huidbeplating de rol van flens vervult. De plaatliggers worden op buiging belast. Zoals gezegd heeft vergroten van de overspanning een kwadratisch effect op de momentenlijn. Toepassing van hetzelfde draagsysteem levert bij het beschouwde ontwerp met een overspanning van 145 meter te hoge spanningen op of ontoelaatbare plaatdiktes. Toepassing van het bestaande draagsysteem met plaatliggers is niet geschikt.

Er is in het ontwerp onderzocht of een ander draagsysteem wel voldoet in dit geval. Hierbij is uitgegaan van een stijve kern in het midden van de deur welke wordt belast op buiging en torsie. Bij toepassing van dit systeem kan wel worden voldaan aan de eisen ten aanzien van sterkte. Ook hier wordt echter de grens van het toelaatbare benaderd omdat met hoge spanningen en plaatdiktes in de kern tot 130mm wordt gewerkt. Het blijkt bovendien dat de doorbuiging erg groot wordt. Ook dit draagsysteem heeft dus beperkingen. De vraag is of er een ander draagsysteem kan worden bedacht voor deze overspanning dat beter voldoet en waarbij het principe van de sectordeur blijft bestaan.

- *Wat zijn de gevolgen voor de uitvoering van de sectordeur?*

Door het grote gewicht van de deur kan deze niet meer met een kraan uit het water worden gehesen en worden gepositioneerd zoals dit in de Eems is gedaan. Een oplossing zou kunnen zijn de deur in delen naar de bouwplaats te vervoeren en hier aan elkaar te lassen. Probleem hierbij is dat er met grote plaatdikten wordt gewerkt in hoge sterkte staal en het lassen hiervan op de bouwplaats bewerkelijk is en gevolgen kan hebben voor de kwaliteit. Dit is niet wenselijk en een oplossing waarbij de deur in één geheel wordt aangevoerd is dus te prefereren. Meest ideaal in dit geval is de methode zoals deze ook voor de Thames Barrier is toegepast. Hierbij werd de deur aangeleverd op een drijfconstructie en tot boven de opleggingen gevaren. Het geheel kan dan zakken waarna de drijfconstructie wordt weggevaren. Nadeel bij deze oplossing is dat de drijfconstructie erg groot moet zijn om het systeem stabiel te houden.

## 14.2 Aanbevelingen

Van het onderzoek naar de stormvloedkering in zijn geheel en de scheepvaartdoorgang in het bijzonder is er een aantal zaken dat verbeterd kan worden of verder moet worden uitgezocht. Hieronder staan hiervoor de aanbevelingen.

Voor de stormvloedkering in geheel:

- Er is bij het ontwerp van de stormvloedkering in dit onderzoek alleen gekeken naar de functies van water keren, water doorlaten en scheepvaart doorlaten. Het is goed mogelijk om de kering te combineren met andere functies zoals een oeververbinding voor verkeer of met recreatie. Een combinatie van meerdere functies zou de keuze voor een stormvloedkering in politiek aantrekkelijker maken.
- De locatiekeuze is in dit onderzoek vrij grof uitgevoerd. Een betere locatiekeuze zou gemaakt kunnen worden wanneer met bijvoorbeeld een stroommodel wordt gekeken wat de invloed is van de kering op het stroombeeld bij de kering en in welke mate het getij op de Westerschelde wordt beïnvloed.
- Met behulp van een stroommodel zou ook de indeling van de kering kunnen worden geoptimaliseerd. Bij het ontwerp van de kering is er van uitgegaan dat niet meer dan 20% van het bestaande natte profiel mag worden ingenomen. Deze eis is gesteld om het getij op de Westerschelde niet teveel te beperken. Bij nader onderzoek zou kunnen blijken dat dit meer kan zijn. In dat geval kan een gedeelte van de kering permanent worden gesloten wat gunstig is voor de kosten en de uitvoering.
- Voor de overspanning van de hefschuiven is de breedte van de oosterscheldekering overgenomen. Het is goed mogelijk dat met de huidige technieken een grotere overspanning efficiënter is.

Voor de hoofdscheepvaartdoorgang:

- De grootte van de overspanning heeft een grote invloed op de constructie van de deur. Voor de breedte van de scheepvaartopening is uitgegaan van de Richtlijnen Vaarwegen voor kanaalpannen. De breedte van de doorvaartopening van een stormvloedkering kan waarschijnlijk wel minder groot worden genomen zonder de scheepvaart te hinderen.
- De golfbelasting heeft een groot aandeel in de vervormingen. Het is van belang om de belasting hieruit op de deur nader te beschouwen. Dit kan met een nauwkeuriger model en door na te gaan of de golf daadwerkelijk over de hele lengte van de deur zal optreden of over slechts een deel hiervan. Wellicht is het ook mogelijk om de golfbelasting op de deur te reduceren. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door in de deur aan de bovenkant gaten aan te brengen. Hierdoor wordt het overslagdebiet wel weer vergroot.
- Bij grote vervormingen kan een stroming onder de deur door ontstaan die de deur dynamisch kan belasten. Deze belasting en de gevolgen voor de deur moeten nader onderzocht worden omdat dit soort trillingen in het ergste geval kunnen leiden tot bezwijken van de deur.
- In dit onderzoek is vooral gekeken naar de constructie van de deur. Bij het ontwerp en de beschouwing van de gevolgen bij schaalvergroting van het ontwerp is het ook van belang om de volgende onderdelen te controleren voor de gehele sectordeur:
  - De bewegingswerken
  - De draaias
  - De dynamica van de deur om de as bij golfbelasting
- Er moet gekeken worden naar een draagsysteem voor de deur dat beter voldoet aan de eisen, voornamelijk ten aanzien van stijfheid. Hierbij kan gedacht worden aan een lenslijger welke in twee richtingen is gekromd. Hierdoor kan de draagconstructie op normaalkracht worden belast in plaats van buiging. De vraag is of dit nog past binnen de principe oplossing van de sectordeur.

## Literatuur

- L.1 Agema, J.F., *30 jaar ontwikkeling in de ontwerpcriteria voor zeewaterkeringen en waterbouwkundige constructies*, Cement 1982 nr. 11, blz. 685-693, ISSN 0008-8811
- L.2 Balkema, A.A., *Design plan Oosterschelde Storm-surge barrier ;Overall design and design philosophy*, Uitgave voor Rijkswaterstaat, Rotterdam 1994, ISBN 90-5410-107-5
- L.3 Bezemer, M.; Engels, J., *In Nederland houden de dijken het wel*, Wetternijs februari 2005, blz. 10-11
- L.4 Boorsma, K., *Plan Boorsma*, projectnummer 96078-KB/MB, augustus 1998
- L.5 Boorsma, K., *Studie-essay Westerschelde-estuarium*, projectnummer 03582, maart 2004
- L.6 Bosch, A., *Twee eeuwen Rijkswaterstaat*, blz. 169-178, Europese Bibliotheek, Zaltbommel 1998, ISBN 90-288-6518-7
- L.7 Burt, N.; Rees, A., *Guidelines for the assessment and planning of estuarine barrages*, Thomas Telford, London 2001, ISBN 0-7277-2863-6
- L.8 *Changing estuaries, changing views*, uitgave van Erasmus University Rotterdam en Radboud University Nijmegen, Nijmegen 2004
- L.9 CUR-publicatie 212 '50 jaar na Stormvloed 1953', uitgave voor waterbouwdag 2003, CUR, Gouda 2003, ISBN 90-3760-272-x
- L.10 Dufour, F.C., *Grondwater in Nederland*, Delft 1998, ISBN 90-6743-536-8
- L.11 Flaming, I., *Hoogwater 50 jaar na de watersnoodramp*, uitgave van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Kosmos-Z&K Uitgevers (Utrecht/ Antwerpen), Den Haag 2003, ISBN 90-21539-65-9
- L.12 *Getijtafels voor Nederland 2005*, uitgave van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Sdu Uitgeverij, Den Haag 2004, ISBN 90-12-10514-5
- L.13 *Hydraulische randvoorwaarden 2001: voor het toetsen van primaire waterkeringen*, uitgave van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Delft 2001
- L.14 *Is Vlaanderen de volgende keer aan de beurt?*, De Water oktober 2002, blz. 6-7
- L.15 *Kennisgeving: Milieueffectrapportage voor het Sigmaplan*, uitgave van AWZ, september 2003
- L.16 Kramer de, J., *Waterbeweging in de Westerschelde*, Middelburg 2002, ISBN 90-77079-08-4
- L.17 *Leidraad Kunstwerken*, uitgave van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Delft 2003
- L.18 Lewin, J., *Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets: Second Edition*, Thomas Telford, London 2001, ISBN 0-7277-2990-x
- L.19 *Maatschappelijke Kosten Batenanalyse voor de actualisatie van het Sigmaplan (MKBA)*, uitgave van AWZ afdeling Zeeschelde
- L.20 *Milieueffectrapportage voor de actualisatie van het Sigmaplan (MER)*, uitgave van AWZ afdeling Zeeschelde
- L.21 *Naar een nieuw Sigmaplan*, uitgave van AWZ afdeling Zeeschelde
- L.22 Novak, P., *Hydraulic structures; Third edition*, Spon, London 2001, ISBN 0-415-25070-6
- L.23 *Overspannend staal deel1: Basisboek*, Staalbouwkundig genootschap, Rotterdam 2004, ISBN 90-72830-45-8
- L.24 *Schelde moet dieper, veiliger en natuurlijker*, De Water januari 2005, blz. 12-13
- L.25 *Scheldeatlas; een beeld van een estuarium*, uitgave van het Schelde InformatieCentrum, LnO Uitgeverij (Zierikzee), november 1999, ISBN 90-369-3434-6
- L.26 *Scheldenieuwsbrief*, vier jaarlijkse uitgave van het Schelde Informatiecentrum
- L.27 Schultz, E., *Waterbeheer; sturingsvariabele voor het milieu in Laag Nederland*, Cement 2000 nr. 7, blz. 13-16,
- L.28 *Sluitstuk van de Deltawerken; Stormvloedkering Nieuwe Waterweg*, uitgave van Bouwkombinatie Maeslant Kering en Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Den Haag 1997
- L.29 *Stroomatlas HP15; Oosterschelde en Westerschelde*, uitgave van de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine, 's-Gravenhage 1992
- L.30 *Thames Barrier Design*, The Institution of Civil Engineers, London 1978, ISBN 0-7277-0057-x

- L.31 Ven, G.P. van de, *Leefbaar Laagland; geschiedenis van de waterbeheersing en landaanwinning in Nederland*, Uitgeverij Matrijs, Utrecht 1993, ISBN 90-5345-031-9
- L.32 *Vlaanderen veilig*, De Ingenieur maart 2003, blz. 32-34
- L.33 *Waterwijzer 2002-2003*, uitgave van ministerie van Verkeer en Waterstaat, november 2002
- L.34 *Zeescheldebekken: een blik op het verleden*, uitgave van AWZ, september 2002

#### **Internet**

- I.1 [www.actuelewaterdata.nl/](http://www.actuelewaterdata.nl/)
- I.2 [www.delta2003.nl](http://www.delta2003.nl)
- I.3 [www.delta-wateren.nl](http://www.delta-wateren.nl)
- I.4 [www.emssperrwerk.de](http://www.emssperrwerk.de)
- I.5 [www.getij.nl](http://www.getij.nl)
- I.6 [www.portofantwerp.be](http://www.portofantwerp.be)
- I.7 [www.proses.nl](http://www.proses.nl)
- I.8 [www.scheldemonitor.org](http://www.scheldemonitor.org)
- I.9 [www.scheldenet.nl](http://www.scheldenet.nl)
- I.10 [www.sigmaplan.be](http://www.sigmaplan.be)
- I.11 [www.watermarkt.nl](http://www.watermarkt.nl)
- I.12 [www.waternormalen.nl](http://www.waternormalen.nl)

#### **Kaartmateriaal**

- K.1 ANWB Topografische atlas, Zeeland schaal 1:25.000, ANWB bv, Den Haag, 2004, ISBN 90 18018457
- K.2 Antwerpen-Schoten schaal 1:20.000 (Nationaal geografisch instituut, 1996)

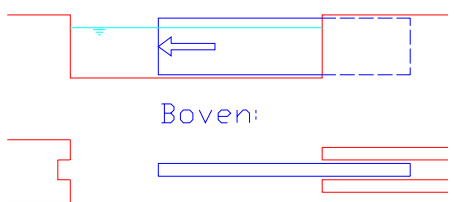
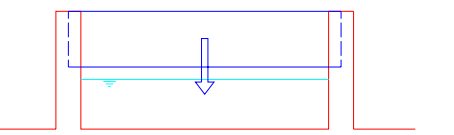
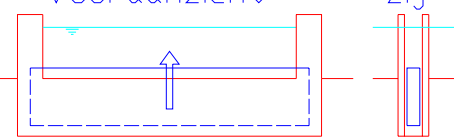
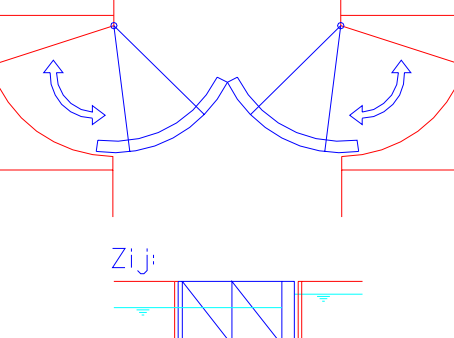
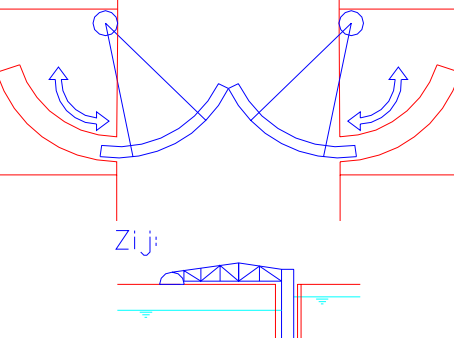
#### **Software**

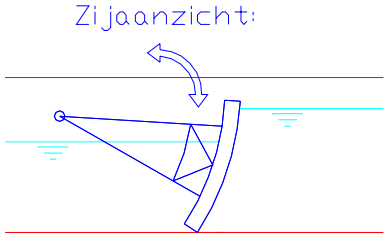
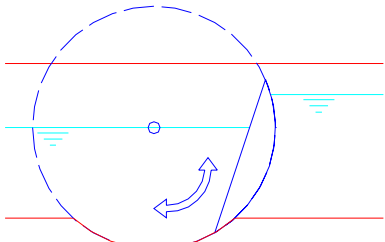
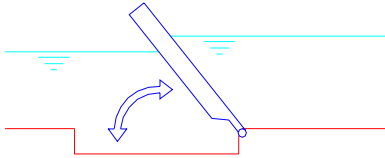
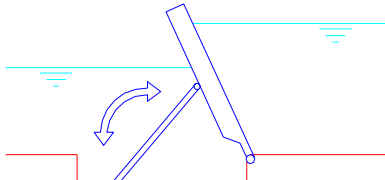
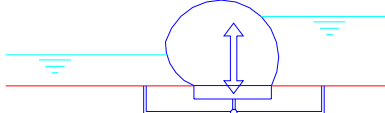
- STAAPpro 2000, licentie TUDelft

## Bijlagen

## Bijlage 1 Overzicht verschillende soorten stormvloedkeringen

In het kader van het vooronderzoek is een overzicht gemaakt van verschillende soorten stormvloedkeringen en zijn de specifieke voor- en nadelen hiervan beschreven.

Soort kering	Voordelen	Nadelen
<p>Horizontale roldeur</p> <p>Vooraanzicht:</p>  <p>Boven:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbepaalde doorvaarthoogte</li> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Grote overspanning is mogelijk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Veel ruimte nodig aan een zijde</li> <li>-Openen en sluiten onder verval is lastig</li> <li>-Relatief dure constructie</li> </ul>
<p>Verticale hefdeur</p> <p>Vooraanzicht:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Weinig ruimte nodig</li> <li>-Onder verval openen</li> <li>-Kan in nood gesloten worden dmv zwaartekracht</li> <li>-Onderhoud is eenvoudig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Beperkte doorvaarthoogte</li> <li>-Grote constructiehoogte</li> <li>-Grote overspanning is moeilijk</li> </ul>
<p>Verticale zakdeur</p> <p>Vooraanzicht:</p>  <p>Zij:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbepaalde doorvaarthoogte</li> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Weinig ruimte nodig</li> <li>-Onder verval openen</li> <li>-Kleine constructiehoogte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Diepe en dure constructie</li> <li>-Onderhoud is lastig</li> <li>-Grote overspanning is moeilijk</li> </ul>
<p>Horizontale sectordeuren, verticaal scharnier</p> <p>Bovenaanzicht:</p>  <p>Zij:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbepaalde doorvaarthoogte</li> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Onder verval openen</li> <li>-Kleine constructiehoogte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Veel ruimte aan weerszijden van de doorgang benodigd</li> </ul>
<p>Horizontale sectordeuren, bolscharnier</p> <p>Bovenaanzicht:</p>  <p>Zij:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbepaalde doorvaarthoogte</li> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Onder verval openen</li> <li>-Kleine constructiehoogte</li> <li>-Onderhoud is goed mogelijk wanneer parkeerdokken worden droog gepompt</li> <li>-Grote overspanningen gerealiseerd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Veel ruimte aan weerszijden van de doorgang benodigd</li> <li>-Drijvende deuren kunnen minder stabiel worden</li> <li>-Nog niet echt bewezen tijdens stormvloed</li> </ul>

Soort kering	Voordelen	Nadelen
Segmentdeuren Zijaanzicht: 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Onderhoud is eenvoudig</li> <li>-Resulterende kracht gaat door het scharnier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Beperkte doorvaarthoogte</li> </ul>
Rising sector gates Zijaanzicht: 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbeperkte doorvaarthoogte</li> <li>-Tweezijdig keren</li> <li>-Afhankelijk van de mate waarin de deur met ballastwater is gevuld gaat de resulterende kracht door het scharnier</li> <li>-Weinig visuele hinder</li> <li>-Is al succesvol toegepast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grote bouwdiepte</li> <li>-Onderhoud is lastig</li> <li>-Slib in drempel</li> </ul>
Bottom hinged Buoyant gates Zijaanzicht: 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbeperkte doorvaarthoogte</li> <li>-Geen pijlers nodig</li> <li>-Geen visuele hinder</li> <li>-Geen complex bewegingsmechanisme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kan slechts beperkt waterstandverschil keren</li> <li>-Moeten voor onderhoud worden verwisseld</li> <li>-Deuren bewegen onder golfbelasting onafhankelijk van elkaar → lekkage</li> </ul>
Klepstuw Zijaanzicht: 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbeperkte doorvaarthoogte</li> <li>-Geen pijlers nodig</li> <li>-Geen visuele hinder</li> <li>-Het waterstandverschil dat is te keren en de stabiliteit van de deur zijn groter dan de variant hierboven</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onderhoud is lastig</li> <li>-Bewegingsmechanisme onder water</li> </ul>
Balgstuw Zijaanzicht: 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Onbeperkte doorvaarthoogte</li> <li>-Geen pijlers nodig</li> <li>-Geen visuele hinder</li> <li>-Relatief goedkope oplossing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kan slechts beperkt waterstandverschil keren</li> <li>-Duurzaamheid en betrouwbaarheid onbekend</li> <li>-Bij grote constructies gevoelig voor scheurvorming</li> </ul>



## **Bijlage 2 Beschrijving verschillende stormvloedkeringen**

In het kader van het vooronderzoek is een overzicht gemaakt van enkele grote stormvloedkeringen in het binnen- en buitenland. De onderstaande keringen worden hierbij behandeld.

- Oosterscheldekering
- Maeslantkering
- Theemskering
- Eemskering
- Kering St. Petersburg
- Kering Venetië
- Kering Cardiff Bay
- Kering bij New Orleans (deze beschrijving is gemaakt in het vooronderzoek voordat de ramp in New Orleans, september 2005, heeft plaatsgevonden)

Per kering worden enkele vaste punten beschreven:

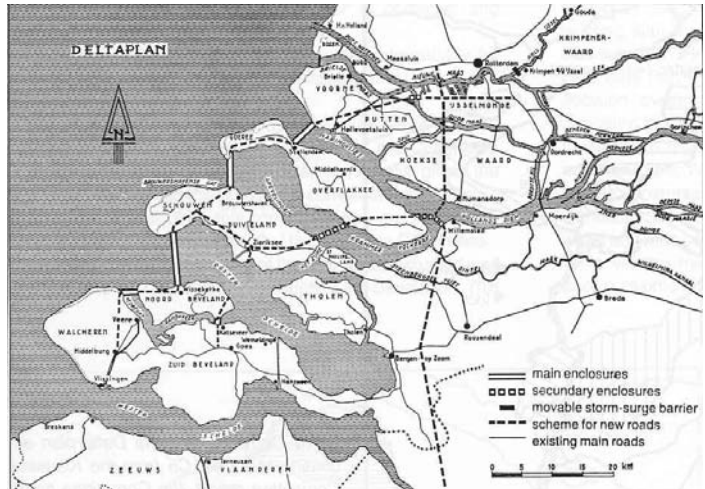
- Een situatiebeschrijving waarin wordt beschreven waar de kering ligt en welk probleem hieraan ten grondslag ligt.
- Een beschrijving van de gekozen oplossing en waarom er voor die oplossing is gekozen.
- Enkele technische specificaties van een detail uit de kering.

Aan het eind van deze bijlage is een overzicht gegeven van de bronnenlijst welke is gebruikt voor de beschrijving van de kering.

## B2.1 Oosterscheldekering

### Situatiebeschrijving

Na de watersnoodramp van 1953 werd door de regering actie ondernomen om te voorkomen dat zulke overstromingen zich in de toekomst weer zouden voordoen in het zuidelijke deel van Nederland. Een commissie werkte het plan uit om alle zeearmen in dit deel van Nederland af te sluiten van de zee: het Deltaplan. Alleen de Westerschelde en de Nieuwe Waterweg zouden openblijven voor de scheepvaart. Het grootste werk binnen dit plan zou de afsluiting zijn van de Oosterschelde. Het Deltaplan was een erg vooruitstrevend plan waarmee men nog niet al te veel ervaring had. Sommige technieken moesten nog ontwikkeld worden op het moment dat al met de bouw was gestart. Daarom werd eerst begonnen met de kleinere afsluitingen zodat de ervaring die hiermee werd opgedaan gebruikt kon worden bij de grotere afsluitingen. In 1967 was men begonnen met het opspuiten van de werkeilanden voor de bouw van een permanente dam toen de discussie over de toekomst van de Oosterschelde losbrak. De bevolking kreeg in die tijd meer belangstelling voor milieu en het behoud van landschappen en wilde het estuarium met het getij behouden. Zo ontstond een tweestrijd tussen milieuorganisaties en vissers die de Oosterschelde wilden openhouden en de voorstanders van de afsluiting. Uiteindelijk is de stormvloedkering als compromis gekozen. In 1986 is de kering afgebouwd.



Figuur B2.1: Oorspronkelijke Deltaplan met een volledige afsluiting van de Oosterschelde [Design Plan, blz.7]

### De oplossing

De totale kering over de Oosterschelde is drie kilometer lang. In het midden van de kering liggen de werkeilanden Neeltje Jans en Noordland. Deze vormen het dichte gedeelte van de kering. Het gedeelte van de kering dat kan worden opengezet bestaat uit 65 betonnen pijlers met hiertussen 62 stalen schuiven. Dat er gekozen is voor verticale schuiven heeft te maken met het feit dat men hiermee de meeste ervaring had. Deze afsluitmethode wordt steeds herhaald en zo kan de kering worden uitgebouwd. Dit maakt het mogelijk om een grote afsluiting te realiseren. De stalen schuiven hoeven alleen maar zo ver open gezet te worden dat het getij kan doordringen in de Oosterschelde. Doorgang voor scheepvaart verschaffen is hier geen belangrijke functie.

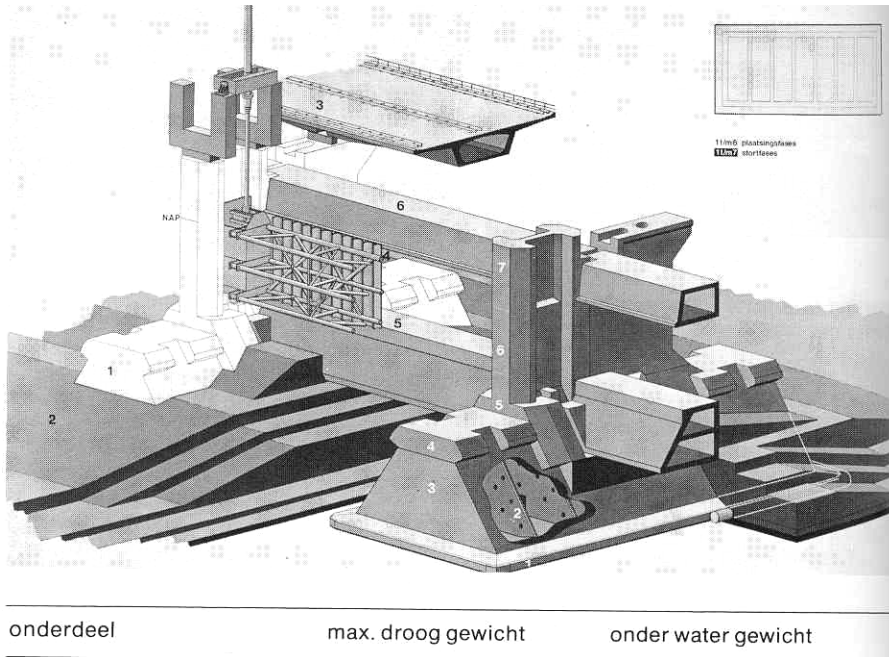


Figuur B2.2: Overzicht van de Oosterscheldekering [www.delta2003.nl]

Omdat niet de hele Oosterschelde is opengelaten wordt het getij wat afgezwakt. Daarom zijn de Philipsdam en de Oesterdam gebouwd om de oppervlakte van de Oosterschelde te verkleinen. Op deze manier moet de gewenste getijwerking behouden blijven. Toch wordt in 'Hoogwater' [B2.9] gesteld dat dit effect niet groot genoeg is. De kering zorgt ervoor dat er minder water de Oosterschelde in- en uitstroomt, hierdoor nemen de stroomsnelheden af en slibben de geulen langzaam vol met zand van de schorren die juist behouden moesten worden. Om dit tegen te gaan zouden de pijlers bijvoorbeeld gestroomlijnd moeten worden of zou een groter gedeelte van de kering doorlaatbaar gemaakt moeten worden.

### Detail: de pijlers

In de figuur hieronder zijn de verschillende onderdelen van de kering weergegeven. Met de zwarte cijfertjes is de volgorde van plaatsing van de verschillende onderdelen aangegeven. Met de witte cijfertjes zijn de verschillende stortfasen van de pijler aangegeven.

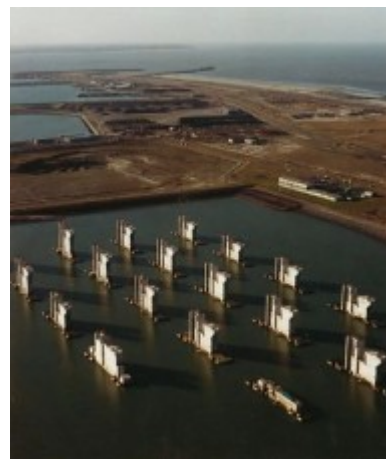


onderdeel	max. droog gewicht	onder water gewicht
– landhoofdningen	230 ton	
1. pijlers	18 000 ton	9 500 ton
2. drempel	–	
3. verkeerskoker en hamerstukken	1 200 / 1 600 ton en 250 ton	
4. schuiven	600 ton	
5. dorpelbalken	2 800 ton	1 500 ton
6. bovenbalken	1 200 ton	

Figuur B2.3: Onderdelen Oosterscheldekering [Cement 1982, nr. 11, blz. 702]

De pijlers zijn gigantische betonnen bouwwerken (met een gewicht van maximaal 18.000 ton en een hoogte van meer dan 38 meter) die in een keer op de plaats van bestemming werden afgezonken. Belangrijk was dus dat de fundering in orde was, omdat een kleine scheefstand tot grote afwijkingen kon leiden. Het eerste idee was om de pijlers op putten te funderen, maar dit werd te riskant geacht. Daarom zijn grondverbeteringen en funderingsmatten met bodembescherming aangebracht waarna de pijlers op staal zijn gefundeerd.

De pijlers werden in vier bouwdokken gefabriceerd met een gemiddelde bouwtijd van anderhalf jaar. Wanneer alle pijlers in een bouwdok gereed waren kon het dok vol water gezet worden en de pijlers, met behulp van het speciaal voor dit project gebouwde schip de Ostrea, worden uitgevaren. De Ostrea kon dankzij de U-vorm en het grote hefvermogen van 10.000 ton de pijlers iets van de bodem lichten en naar de juiste plek varen. Daar kon de pijler met behulp van een ponton heel precies op de funderingsmatten worden neergelaten. Om de stabiliteit te verhogen werden de holle pijlers met zand gevuld en omstort met stortsteen. Wanneer de pijlers goed stonden konden de andere onderdelen worden aangebracht.



Figuur B2.4: Bouwdokken [Rijkswaterstaat, [www.deltawerken.com](http://www.deltawerken.com)]

## B2.2 Maeslantkering

### Situatiebeschrijving

Met de opening van de stormvloedkering in de Oosterschelde was het oorspronkelijke Deltaplan in 1986 eigenlijk afgerond. De regering startte echter direct een onderzoek naar de mogelijkheden voor een stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. In het oorspronkelijke plan was in de Nieuwe Waterweg geen kering opgenomen om Rotterdam toegankelijk te houden voor zeeschepen. Om Zuid-Holland te beschermen was daarom over vele kilometers een dijkversterking gepland. Omdat deze versterkingen de nodige ruimte vereisten leidde dit tot vele protesten. Uit de studie naar de stormvloedkering bleek bovendien dat een stormvloedkering niet alleen voor het milieu en de cultuur een betere oplossing zou zijn. Ook wat betreft kosten en veiligheid blijkt deze optie aantrekkelijker. Daarnaast is een stormvloedkering sneller te realiseren dan de dijkversterkingen. In 1987 besluit de regering tot aanbesteding van dit project. Belangrijke randvoorwaarde hierbij is natuurlijk dat de scheepvaart zo min mogelijk gehinderd moet worden. De doorvaarthoogte moet onbeperkt zijn en de doorvaartopening moet zo min mogelijk worden verkleind. Uiteindelijk mag Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK) in 1991 beginnen met de bouw, in 1997 wordt de kering geopend. Samen met een kleine stormvloedkering in het Hartelkanaal, de Hartelkering, en een kering door het Europoortgebied, de Europoortkering, beschermt de Maeslantkering nu de Rotterdamse haven en het achterland tegen stormvloeden.



Figuur B2.5: De Maeslantkering, de Hartelkering en de Europoortkering beschermen Rotterdam [www.keringhuis.nl]

### De oplossing

Als oplossing voor de stormvloedkering is gekozen voor twee grote sectordeuren. Deze twee deuren liggen bij normale omstandigheden droog opgeborgen in de parkeerdokken. Wanneer dit nodig is kunnen de twee deuren in de 360 meter brede rivier worden gevaren en deze in een keer afsluiten (zie figuur hieronder).



Figuur B2.6: De Maeslantkering sluit de Nieuwe Waterweg af, ook de parkeerdokken zijn goed te zien. [Rijkswaterstaat - Adviesdienst Geo-Informatie en ICT (AGI), www.deltawerken.com]

Deze oplossing heeft als voordeel dat in de kering geopende stand de scheepvaart niet echt hindert. In de parkeerdokken zijn de sectordeuren ook goed beschermd en relatief eenvoudig te inspecteren. Om de kering te sluiten worden de parkeerdokken vol water gezet en dan drijven de holle deuren op. De deuren kunnen dan vrij eenvoudig in de Nieuwe Waterweg worden gevaren. Wanneer deze op de juiste plaats liggen kunnen de deuren worden afgezonken op de drempel door ze met water te vullen. Het drijven van de deuren heeft ook als voordeel dat de parkeerdokken veel minder diep hoeven te liggen dan de rivierbodem. Verder geeft eventuele slibvorming op de drempel geen problemen bij het afsluiten. Wanneer de deuren worden afgezonken neemt de stroomsnelheid toe en spoelt het slib weg. De hoge snelheid onder de deuren kan echter ook problemen opleveren bij het afzinken. Er ontstaat een zuigende werking die de deuren naar beneden trekt. Hierdoor kunnen de deuren, vooral in combinatie met elkaar, gaan deinen. Een ander nadeel van de kering is dat de hydraulische krachten allemaal worden afgedragen via een punt, namelijk het bolscharnier. De detaillering van het bolscharnier en niet te grote afwijkingen bij de productie zijn dan heel belangrijk. Ook de fundering van het bolscharnier is belangrijk en levert met een eigengewicht van 52000 ton grote afmetingen op.

#### **Detail: de vakwerkarmen**

Alle onderdelen van de sectordeuren hebben gigantische afmetingen. De cirkelvormige kerende wand is 210 meter lang en 22 meter hoog. Het bolscharnier is met 10 meter diameter doorsnede de grootste van de wereld en weegt 680 ton.

Maar de grootste onderdelen en misschien ook wel de belangrijkste zijn de vakwerkarmen die de kerende wand verbinden met het bolscharnier. De vakwerkarmen hebben een lengte van 237 meter en werken als een ligger op twee steunpunten. De armen zijn opgebouwd uit drie buisprofielen als hoofdliggers met een diameter van 1,80 meter en een wanddikte variërend van 60 tot 90 millimeter. Deze hoofdliggers zijn onderling verbonden door buisprofielen met een diameter van maximaal 0,80 meter en een wanddikte tot 30 millimeter. Belangrijk bij de armen is dat de hartlijn precies door het midden van het bolscharnier loopt en loodrecht staat op de kerende wand. Afwijkingen kunnen leiden tot een buigend moment in de vakwerken zodat de armen kunnen bezwijken.



*Figuur B2.7: De vakwerkarmen met de hoofdliggers en diagonalen [library.thinkquest.org]*

De vakwerkarmen werden op de bouwplaats in elkaar gelast. De hoofdliggers werden in delen van 60 meter lang aangevoerd en werden geplaatst op tijdelijke ondersteuning. Deze ondersteuning waren buispalen die 26 meter de grond in waren geheid omdat anders de ondersteuning zouden kunnen wegzakken. Op de hoofdliggers werd een frame aangebracht waarop de derde hoofdligger kon worden bevestigd waarna de diagonalen er tussen gelast konden worden. Dit lassen was een belangrijke klus en gebeurde onder geconditioneerde omstandigheden.

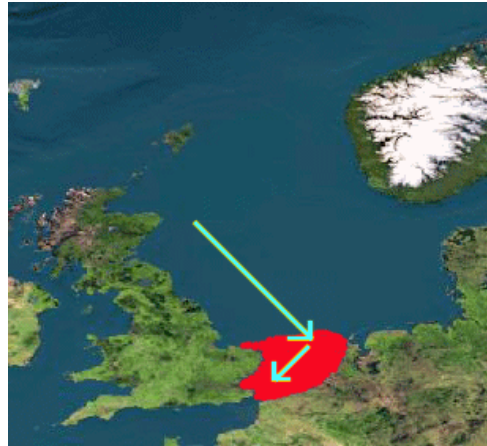
Nadat de vakwerken in elkaar gezet waren, zijn deze aangesloten op het bolscharnier. Eerst moesten de zakkingen van het bolscharnier en zijn fundering zijn uitgewerkt. Dan konden de vakwerken met grote boutverbindingen precies op het midden van de bol worden aangesloten. De aansluiting op de kerende wand was nog gecompliceerder. De vakwerkarmen konden niet bewegen op de ondersteuning, dus moest de wand er precies goed voor gehangen worden. Dit werd gedaan door de parkeerdokken te vullen met water en de deur te laten drijven. De kerende wand vervormde echter in drijvende positie. Deze vervormingen waren van te voren berekend en met ballastwater en enkele lieren kon de deur in de goede positie worden gebracht zodat deze kon worden vastgelast aan de vakwerkarmen.

Een aardig detail van de vakwerkarmen is dat in de onderste hoofdliggers rooster zijn toegepast zodat de buizen zich met water kunnen vullen wanneer de deur wordt afgezonken. Hierdoor wordt het opdrijvende vermogen verkleind.

## B2.3 Theemskering

### Situatiebeschrijving

Voor het estuarium van de Theems geldt ongeveer dezelfde situatie als voor de estuaria in Zeeland. Een laag drukgebied op de Atlantische oceaan kan een waterstandverhoging veroorzaken. Wanneer zo een depressie richting de Britse eilanden beweegt de Noordzee in kan deze waterstandverhoging worden versterkt doordat de Noordzee steeds ondieper en smaller wordt. In combinatie met een springgetij en harde wind kan dit voor hele hoge waterstanden zorgen in het Theems estuarium. In 1928 zorgde zo een stormvloed ervoor dat het centrum van Londen onder water kwam te staan. In 1953 bereikte de overstromingen niet het centrum van Londen, maar kwamen wel andere grote delen langs de Theems onder water te staan. Naar aanleiding van deze ramp is de Britse regering begonnen met het onderzoeken van de risico's en het vinden van een oplossing om Londen te beschermen tegen stormvloeden. In 1972 is er besloten tot de bouw van een stormvloedkering. De kering is na acht jaar bouwen opgeleverd in 1982 en is in 1984 officieel geopend.



*Figuur B2.8: Animatie over opstuwung van het water in de Noordzee [www.onwijsnat53.nl]*

### De oplossing

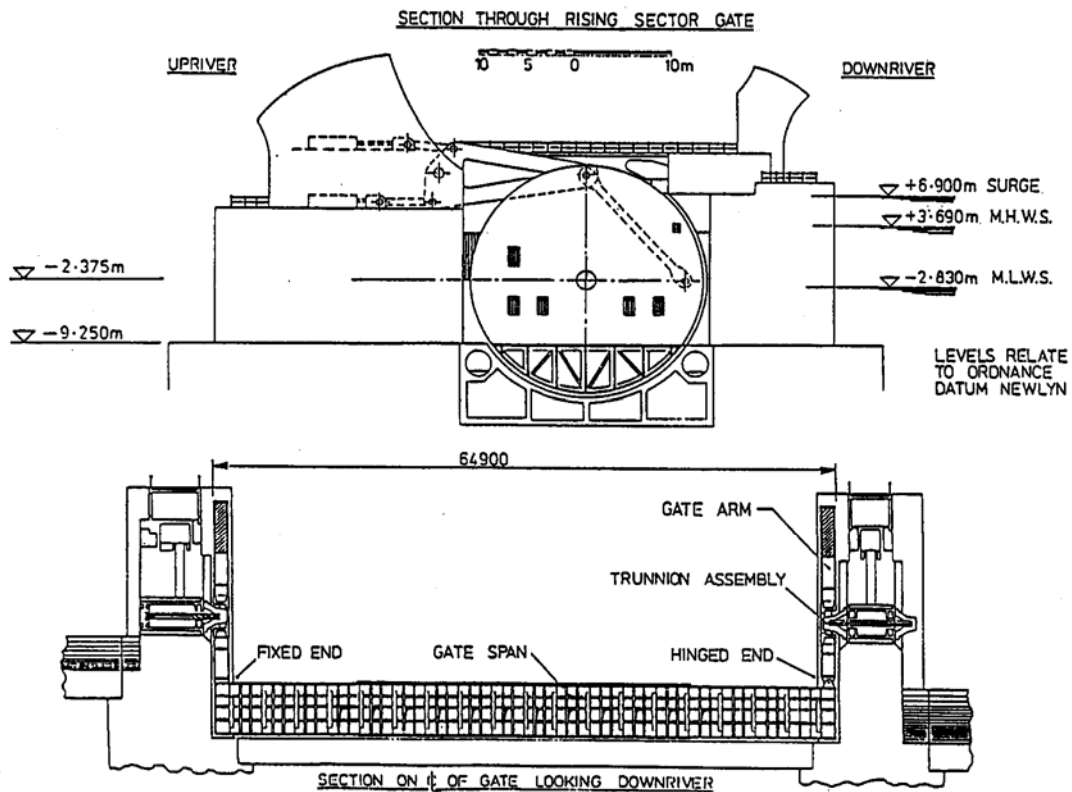
Voor de verdediging van Londen tegen hoogwater op de Theems werd gezocht naar een oplossing waarbij de verdedigingswerken langs de rivier niet allemaal verhoogd zouden moeten worden. Het zicht op de Theems moest ongehinderd blijven. Ook de scheepvaart op de Theems moest vrijwel ongehinderd plaats kunnen vinden. Hiervoor werd een beweegbare kering bedacht bij Woolwich Reach in combinatie met enkele andere keringen. Daarnaast werden de verdedigingswerken langs de Theems op enkele cruciale plaatsen wel verhoogd. Voor de kering bij Woolwich werd een nieuwe deur ontwikkeld: een hefbaar sectordeur. Deze cilindervormige deur ligt normaalgesproken opgeborgen in de betonnen drempel en kan in de opening worden gedraaid. Voordeel van het opbergen in de drempel is de onbeperkte doorvaarthoogte. De totale breedte van de kering is 520 meter. Hierin zijn vier grote doorvaartopeningen van 61 meter en twee kleinere van 31,5 meter breed opgenomen. Deze worden allemaal afgesloten door zo een hefbaar sectordeur. Daarnaast zijn er nog vier openingen van 31 meter breed die kunnen worden afgesloten met segmentdeuren.



*Figuur B2.9: Overzicht van de Theemskering [icold-cigb.net]*

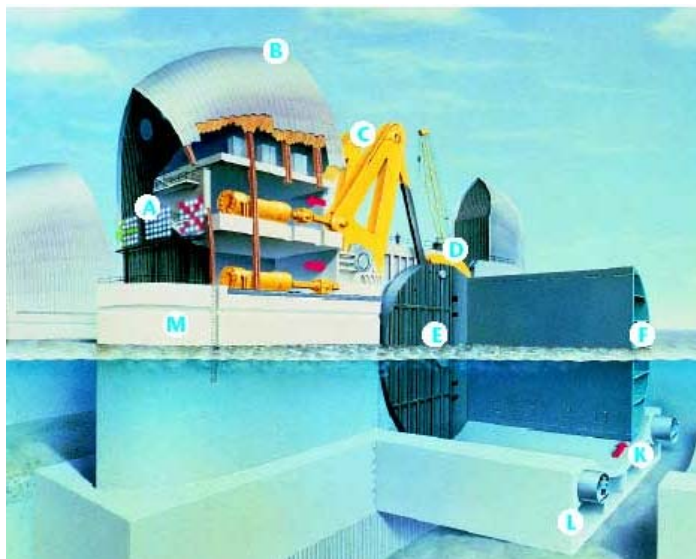
**Detail: de sectordeuren**

Hieronder zijn twee doorsneden te zien van de sectordeuren die zijn ontwikkeld voor de Theems kering.



Figuur B2.10: Twee dwarsdoorsneden over de sectordeuren van de Theems kering [Final design of Thames Barrier gate structures, Clark and Tappin, 1977]

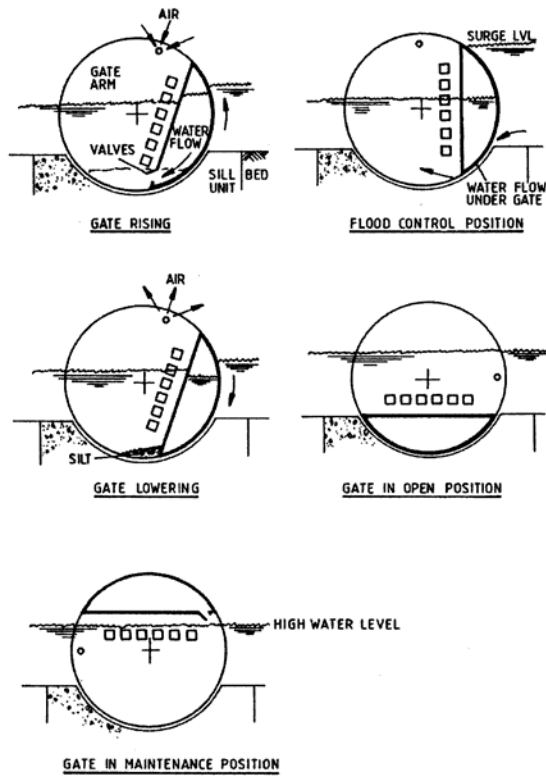
De armen van de deur bestaan uit twee cilindrische schijven aan de zijkant van de deur. Deze schijven hebben een doorsnee van 24 meter en zijn 1,5 meter dik. In deze armen zijn contragewichten opgenomen en holle ruimten die met lucht of water gevuld kunnen worden. Elk van de armen weegt 1100 ton en wordt met hydraulische armen, die op de tussenliggende pijlers staan, om een as heen gedraaid. Een overzicht van de onderdelen is hieronder schematisch weergegeven.



- A: Navigatie voor schepen
- B: Machines
- C: Hydraulische armen
- D: Schuif en sluit systeem
- E: Arm aan as
- F: Holle deur

Figuur B2.11: Overzicht van de onderdelen van de Theems kering [www.thamesbarrierpark.org.uk]

De deur zelf bestaat uit een deel van de cilinder en heeft een vlakke achterkant. Aan de ene kant is de deur stijf met de arm verbonden, aan de andere kant is er een scharnierende verbinding. De deur is 20 meter hoog en 5,3 meter dik en weegt in totaal 1500 ton. De holle ruimten binnenin de deur kunnen al dan niet met water worden gevuld om het openen en sluiten van de deur te vergemakkelijken. Dit principe staat ook weergegeven in onderstaande figuur.



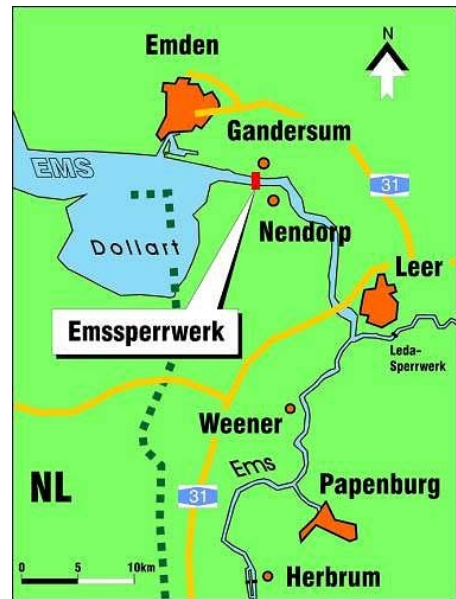
Figuur B2.12: Openen en sluiten van de kering  
 [The Thames Barrier: the background and basic engineering requirements, D. Ayres, 1983]



## B2.4 Eemskering

### Situatiebeschrijving

De rivier de Eems loopt door Duitsland en stroomt bij de Dollard de Nederlandse grens over. Een stormvloed in januari 1994 zorgde voor waterstanden in het Duitse deel van de Eems die tot dan toe niet waren waargenomen terwijl de waterstanden in het Nederlandse deel niet hoger waren dan tijdens eerdere stormvloeden. Onderzoek naar aanleiding van dit verschijnsel gaf aan dat de dijken langs de Eems in Duitsland zeker verhoogd zouden moeten worden als er geen kering in de Eems zou worden gebouwd. Naar aanleiding van dit onderzoek besloot de Duitse regering in juli 1997 tot de bouw van een kering bij Gandersum. Voor dit besluit was ook nog een ander aspect van belang, de kering zou een tweede functie gaan vervullen. Door de kering als stuw te gebruiken zou de grote Meyer-scheepswerf te Papenburg, stroomopwaarts van de kering, in de toekomst grotere cruiseschepen kunnen bouwen en naar zee kunnen laten afvaren. Dit zou een grote zekerheid betekenen voor de toekomst van de scheepswerf en daarmee ook een belangrijke bijdrage leveren aan de economie van de regio. Eind 2002 is de stormvloedkering in bedrijf genomen.



Figuur B2.13: Locatie Eemskering  
[[www.ems-sperrwerk.de](http://www.ems-sperrwerk.de)]

### De oplossing

Belangrijk voor het ontwerp van de kering is dat zowel een stormvloed vanuit zee moet worden gekeerd als dat het bovenstroomse waterpeil moet kunnen worden opgestuwd. Hiervoor moet de kering in twee richtingen kunnen keren en onder verval geopend kunnen worden. Daarnaast is de doorgang voor de scheepvaart erg belangrijk. Er moet hierbij niet alleen rekening worden gehouden met de binnenvaart die op de Eems plaatsvindt, maar ook met de grote cruiseschepen die een grote doorvaarthoogte vereisen. Deze eisen hebben geleid tot onderstaande indeling van de kering.



Figuur B2.14: Overzicht Eemskering bij Gandersum [www.ems-sperrwerk.de]

De totale breedte van de kering is 476 meter. Hierin bevinden zich vijf verticale schuiven van meer dan 50 meter. Er zijn daarnaast twee scheepvaartdoorgangen opgenomen. Een doorgang is uitsluitend voor de binnenvaart bestemd. Deze opening heeft een breedte van 50 meter en een maximale doorvaarthoogte van 5,25 meter. De kering bestaat uit een segmentdeur die normaal omhoog gedraaid is en bij gebruik in de stroming gedraaid kan worden.

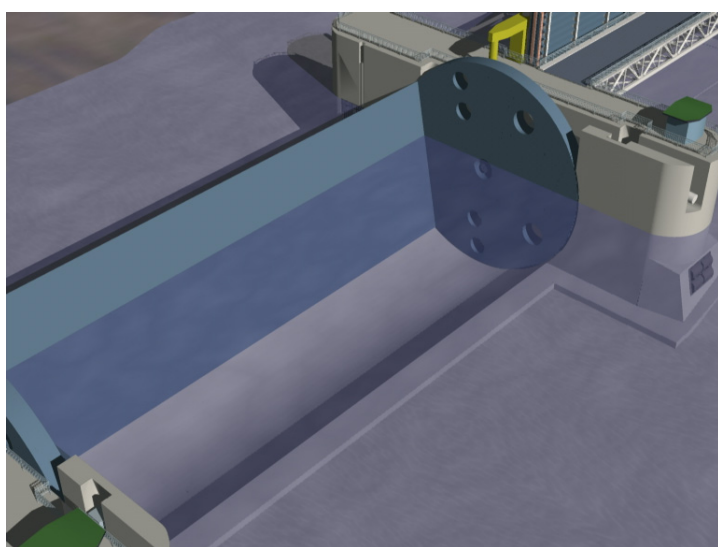
Daarnaast is een doorgang voor zeeschepen. Deze opening heeft een breedte van 60 meter en een onbeperkte doorvaarthoogte. De kering bestaat uit een cilindervormig draaisegment, afgeleid van de stormvloedkering in de Theems. Tijdens normale omstandigheden ligt het segment opgeborgen in de drempel. Wanneer deze een kwartslag wordt gedraaid kan de opening worden afgesloten. Wanneer het segment verder omhoog wordt gedraaid kan onderhoud aan de deur worden gepleegd.



*Figuur B2.15: Cruiseschip wordt door de hoofdscheepvaartopening van de Eemskering geloodst [www.modernoptic.de].*

#### **Detail: het draaisegment**

Ter vergelijking met de deur van de Theemskering (die 20 jaar eerder werd gebouwd) is hier naar het draaisegment in de hoofdscheepvaartopening van de Eems gekeken. Hieronder is een artist-impression te zien van deze opening. De segmentdeur bestaat uit een deel van een cilinder. De hoogte van de deur is 17,90 meter en in het midden 4 meter dik. Het totale gewicht bedraagt ongeveer 850 ton. Hoewel deze deur iets minder hoog en dik is dan die van de Theemskering is er een groot verschil in gewicht. De deur is aan beide zijden verbonden met cilindervormige schijven. De schijven hebben een diameter van 24 meter, een dikte van 1,46 meter en wegen elk 270 ton. Ook hier zijn de afmetingen gelijk aan die van de Theemskering, maar is er ook een groot verschil in gewicht. Hier zou dit kunnen komen doordat er bijvoorbeeld minder contragewicht in de deur is opgenomen. Aan de ene zijde is de deur buigstijf aan de cilinderschijf verbonden. Aan de andere kant is er een scharnierende verbinding gemaakt om grote axiale krachten op de assen te voorkomen. Deze assen in het midden van de schijven moeten wel de reactiekrachten van de deur afvoeren naar de pijlers.

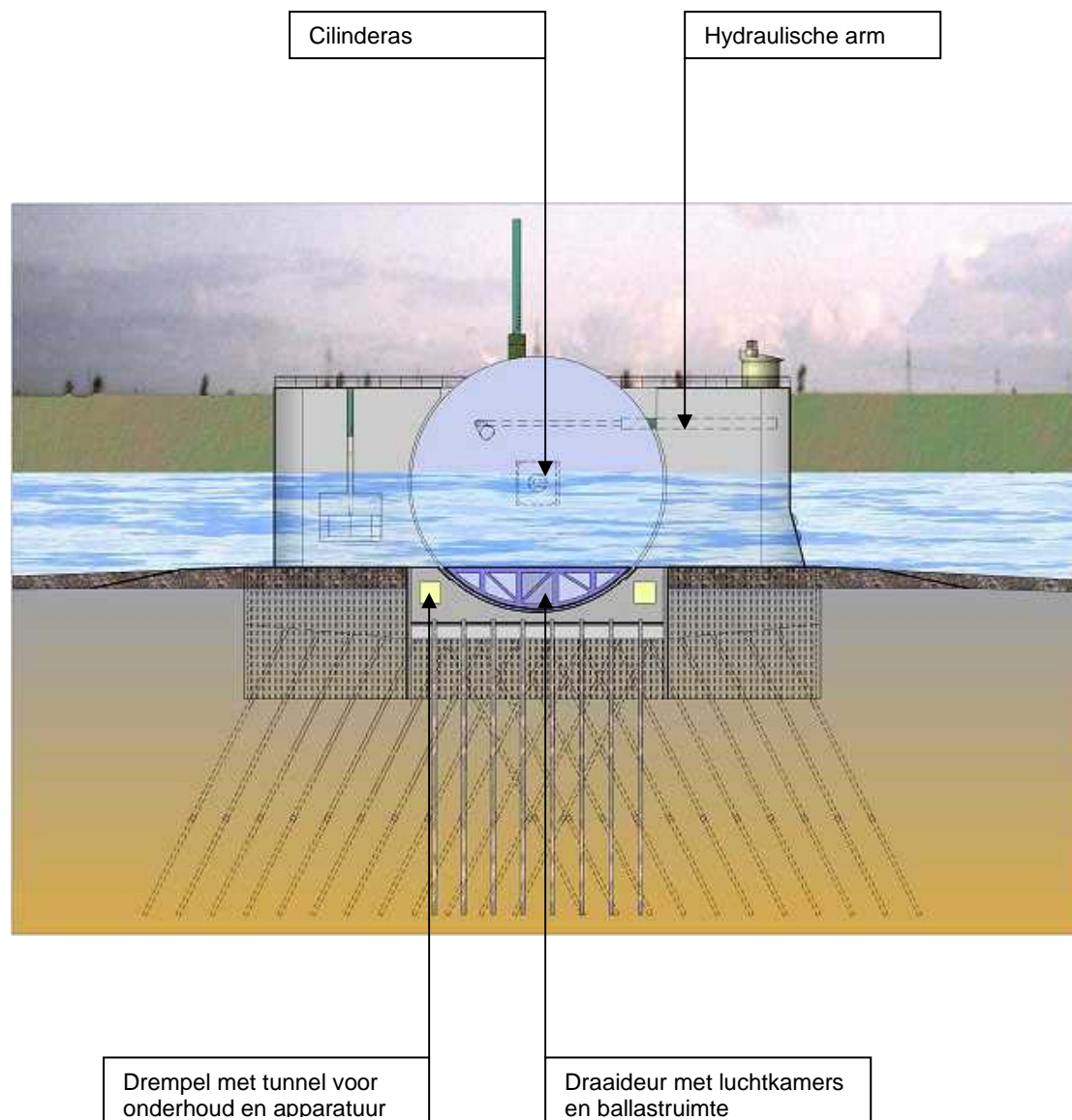


*Figuur B2.16: Artist-impression van de hoofdscheepvaartopening [www.ems-sperrwerk.de]*

De deur wordt met behulp van hydraulische armen in positie gedraaid. Hierbij kunnen ballastruimten in de deur en in de schijven aan de zijkant al dan niet met water worden gevuld. Er zijn in principe vier werkstanden:

- 0,0° Helemaal open voor scheepvaart (zoals hieronder aangegeven)
- 64,24° Stand om te stuwen
- 84,18° Stand tegen stormvloed
- 180° Stand voor onderhoud

In Stormvloedstand moet de kering een waterpeil van NN +6,45 meter kunnen keren (NN= Normal Null). De drempel ligt op een niveau van NN -9 meter. Bij de maximale stuwwaterstand van NN +2,70 meter kunnen schepen met een maximale diepgang van 8,50 meter nu passeren. De maximale diepgang van de schepen wordt echter niet door het drempelniveau bepaald, maar door obstakels stroomopwaarts.



Figuur B2.17: Doorsnede van hoofdscheepvaartopening [www.ems-sperrwerk.de]

## B2.5 Kering St. Petersburg

### Situatiebeschrijving

De Russische stad St. Petersburg ligt in de delta van de Neva rivier ten oosten van de Finse Golf. Al sinds de oprichting in 1703 heeft de stad vaak te maken gehad met grote overstromingen. Hoewel de invloed van het getij niet merkbaar is in de Finse golf wordt het water soms meer dan 4 meter hoger opgestuwd. Westerstormen die over de Finse Golf trekken stuwen het water op en zorgen voor de stijging van het waterpeil in de Neva Baai (het oostelijke deel van de Finse Golf).

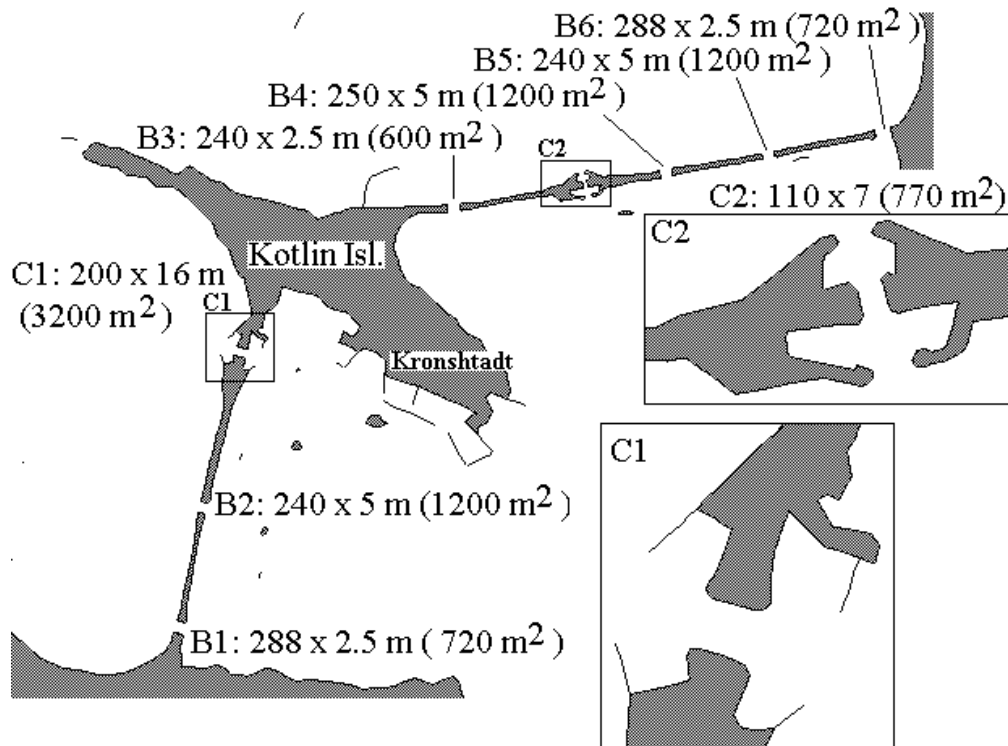


Figuur B2.18: St. Petersburg ligt in de delta van de Neva rivier. In de Neva baai wordt een kering gebouwd om de stad te beschermen tegen stormvloeden. [www.halcrow.com]

Al in 1923 waren er plannen voor een dam om de stad te beschermen tegen de stormvloeden. Pas na een zware storm in 1955 werd weer begonnen met de uitwerking van de plannen voor een stormvloedkering. In 1966 werd besloten voor een 23 km lange kering die loopt over het eiland Kotlin, ongeveer 25 km ten westen van St. Petersburg. In 1979 werd begonnen met de bouw van de kering, maar in 1987 werd de bouw stilgelegd toen de kering voor nog maar tweederde was afgebouwd. Oorzaak hiervan was de slechte financiële toestand en de zorg om de verslechterde waterkwaliteit in de Neva Baai. Onderzoek van Russische en internationale instituten toonden aan dat de nieuwe kering echter niet de oorzaak was van de vervuiling. Er kon toen in principe weer worden begonnen met de bouw, maar de instabiele economische en politieke situatie van het land zorgden ervoor dat er niks gebeurde. In 1992 was er echt de wil om het project af te maken en Rusland riep de hulp in van de European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) om te sponsoren. De EBRD was hiertoe bereid, maar stelde enkele eisen. Zo werd er een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (door een combinatie van Royal Haskoning, Delft Hydraulics en Ecorys) waarin werd gekeken naar technische haalbaarheid, milieueffect en een kostenanalyse. Daarnaast moest het project internationaal worden aanbesteed. Uiteindelijk is het contract aangeboden aan een consortium van Nederlandse (DHV), Noorse (Norplan), Engelse (Halcrom) en Russische bedrijven. Royal Haskoning heeft de technische begeleiding over het project en schat in dat de bouw in 2008 zal worden afgerond.

### De oplossing

Het Russische ontwerp voor de enorme kering is redelijk vooruitstrevend, zeker wanneer men bedenkt dat het van meer dan 30 jaar terug dateert. Er zijn in de kering zes sluiscomplexen opgenomen (B1 t/m B6 in figuur B2.19) en twee doorvaartopeningen voor de scheepvaart (C1 en C2). In de sluiscomplexen zijn in totaal 64 radiaaldeuren van 24 meter breed opgenomen. Er zijn twee uitvoeringen van deze radiaaldeuren gebruikt, een met een hoogte van 5 meter en een voor ondieper water met een hoogte van 2,5 meter.



Figuur B2.19: Overzicht van de kering bij St. Petersburg  
[Konstantin A. Klevanny, arhipel.hiiumaa.ee]

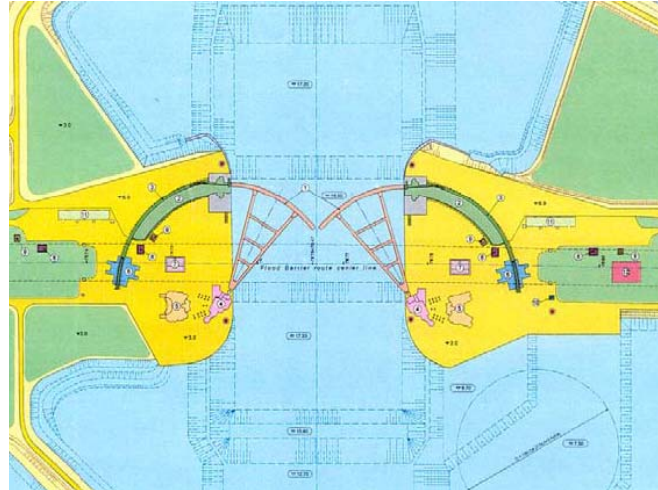
Van de doorvaartopeningen is er een voor de kleinere schepen (C2). Deze opening heeft een breedte van 110 meter en een diepte van 6 meter. De opening kan worden afgesloten met een verticale zakdeur van meer dan 11 meter hoog die tijdens rustig weer is opgeborgen in een betonnen inkassing in de bodem. Dit is een uitzonderlijke oplossing. Het is namelijk niet alleen een hele grote stalen deur waarvoor heel diep (en dus duurder) moet worden gebouwd. Vaak wordt deze oplossing toegepast omdat het als groot voordeel heeft dat een onbeperkte doorvaarthoogte wordt bewerkstelligd. Dit voordeel gaat in dit geval niet op. Over de gehele dam is namelijk een brede snelweg gepland en alleen onder de andere scheepvaartopening is een tunnel gepland. Dus zal de scheepvaartopening voor de kleinere schepen worden beperkt in hoogte door een brug. Een alternatief zou wellicht een horizontale roldeur kunnen zijn.

De andere scheepvaartopening (C1) is voor grote containerschepen die naar de haven van St. Petersburg varen. Deze opening van 200 meter breed en 17 meter diep heeft wel een onbeperkte doorvaarthoogte. Dit wordt mogelijk gemaakt door de horizontale sectordeuren zoals ook toegepast in de Maeslantkering. De deuren zijn tijdens rustig weer aan weerszijden van de opening opgeborgen in een droogdok. Voor een grote storm worden de grote armen in de opening gedreven en afgezonken. Alle krachten op een deur worden naar een bolscharnier afgevoerd. Het totale gewicht van per deur is 4450 ton.

Een extra facet waar bij het ontwerp van de kering rekening mee moest worden gehouden is de hevige kou gedurende het grootste deel van het jaar. Een groot deel van het jaar is de Neva baai bevroren. De constructie is berekend op de krachten die het ijs kan uitoefenen op de kering. Daarnaast moeten extra oplossingen worden bedacht zoals het gebruiken van warm ballastwater in de deuren bijvoorbeeld.

**Detail: de hoofdscheepvaartopening**

Hoewel de afmetingen van de hoofdscheepvaartopening minder groot zijn dan die van de Maeslantkering is het niet gewoon een kleine kopie ervan. Het ontwerp van de kering bij St.Petersburg is al eerder gemaakt en verschilt ook op enkele punten met het ontwerp van de Maeslantkering. De situatie in Rusland verschilt dan ook met die in Nederland. Naast het feit dat er in Rusland geen getij is, ligt de Maeslantkering in een kanaal waar rekening gehouden moet worden met een flinke rivier afvoer. In onderstaande tabel zijn enkele verschillen aangegeven tussen de scheepvaartopening C1 van de kering bij St. Petersburg en de Maeslantkering bij Rotterdam.

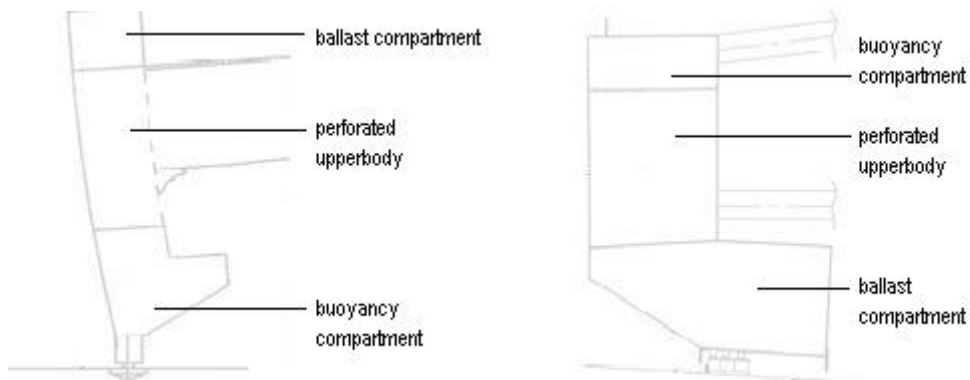


*Figuur B2.20: Overzicht van scheepvaartopening C1 in de kering bij St. Petersburg [D. Peters, Royal Haskoning, presentatie CT5313]*

	<b>Kering C1 St. Petersburg</b>	<b>Maeslantkering Rotterdam</b>
Hydraulische condities	Geen getij Kleine rivier afvoer	Wel getij Significante rivier afvoer
Breedte opening (m)	200	360
Straal armen (m)	130	246
Diepte (m)	16	17
Totaal gewicht (ton)	4450	13300
Ballast systeem deur	Gepompt	Onder zwaartekracht
Verticale landingsnelheid (cm/s)	7	0,2- 0,4
Type bolscharnier	Stalen bal (uit een deel) in bronzen sokkel (drie delen)	Stalen bal (meerdere delen) in stalen sokkel (meer delen)
Diameter bolscharnier (m)	1,5	10
Vershil bal en sokkel (mm)	0,36	20
Resultante kracht Op bolscharnier (MN)	164 (capaciteit)	280

*Tabel B2.1: Verschillen tussen kering C1 (St. Petersburg) en Maeslantkering (Rotterdam) [waarden uit tabel afkomstig uit presentatie D. Peters, Royal Haskoning, voor vak CT5313]*

Een groot verschil is het bolscharnier dat bij de kering C1 uit een stuk bestaat en een veel kleinere diameter heeft. Dit levert een groot voordeel op bij de productie en de uitvoering. Een ander verschil is de vormgeving en indeling van de deur, hieronder is schematisch de onderzijde van de deuren weergegeven.



*Figuur B2.21: Links de deur van kering C1 die op één punt steunt en een doorlopende licht gebolde vorm heeft. Rechts de deur van de Maeslantkering met een gehoekte en bredere onderkant. [D. Peters, Royal Haskoning, presentatie CT5313]*

## B2.6 Kering Venetië: Module Sperimentale Elettromeccanico (MOSE)

### Situatiebeschrijving

Venetië ligt samen met enkele andere historische steden aan een lagune welke aansluit op de Adriatische zee. De verbinding tussen de lagune en de Adriatische zee bestaat uit drie doorgangen. Deze doorgangen zorgen er niet alleen voor dat het getij doordringt in de lagune, maar zijn ook erg belangrijk voor de scheepvaart. Doordat het waterpeil stijgt en Venetië steeds meer zakt wordt de stad steeds vaker getroffen door overstromingen. De afgelopen 100 jaar is het waterpeil met 23 cm gestegen en voor de komende 50 jaar wordt nog zo een stijging verwacht. Na een grote overstroming in 1966 is er begonnen met het vinden van een oplossing voor het probleem. Dit heeft geresulteerd in het project MOSE. De uitvoering hiervan is in 2003 begonnen en zal nog ten minste duren tot het jaar 2011.



*Figuur B2.22: Doorgangen van de lagune bij Venetië [www.salve.it/uk]*

### De oplossing

Venetië heeft in de vorige eeuwen altijd de stad opgehoogd om zich te beschermen tegen het steeds hoger wordende waterpeil. Dit wordt nu niet meer als een goede optie gezien omdat dit grote risico's zou hebben voor de gebouwen, architectuur en het aanzicht van de stad. De gevonden oplossing bestaat uit een combinatie van een aantal maatregelen. Het belangrijkste onderdeel hiervan is een beweegbare stormvloedkering in de doorgangen van de lagune. Daarnaast zullen de lagune banken tussen de openingen worden opgehoogd en zullen ook de straten die het dichtst bij het water liggen en die nu het meest onder water komen te staan worden opgehoogd. Deze maatregelen moeten er voor zorgen dat het waterpeil in de lagune beperkt wordt tot een hoogte van 110 cm boven het lokale referentiepeil en zodoende alle bewoonde plaatsen aan de lagune beschermt tegen hoogwater.

Bij de keuze voor de beweegbare stormvloedkering werd het belangrijk gevonden dat het normale getij ongestoord toegang zou hebben tot de lagune. Daarnaast moet de scheepvaart tijdens normale omstandigheden ongehinderd in en uit kunnen varen. Ook bij extreem hoogwater en stormvloeden, wanneer de stormvloedkering is gesloten, moet de lagune toegankelijk zijn voor scheepvaart. Als uiteindelijke oplossing is een serie van flapgates gekozen die tijdens normale getij omstandigheden op de bodem van de doorgang liggen. Voordeel van deze flapgates is dat een grote opening van een lagune makkelijk kan worden overbrugd door meerdere flapgates naast elkaar te zetten. Daarnaast zijn er geen pijlers nodig die de doorvaart van de schepen verhinderen.

Wanneer er hoge waterstanden worden verwacht (> +110 cm) kunnen de flapgates omhoog komen. Naast deze kering zijn er maatregelen genomen om met schepen de kering te passeren wanneer deze gesloten is. Hieronder is de indeling van de Lido doorgang te zien. De andere doorgangen zijn vergelijkbaar ingedeeld, alleen zonder eiland in het midden van de doorgang.

- 1) Haven met sluis
- 2) Kering met 20 gates (Lido- Treporti)
- 3) Kunstmatig eiland
- 4) Kering met 21 gates (Lido- S. Nicolo)
- 5) Noordelijke jetty
- 6) Zuidelijke jetty
- 7) Breakwater

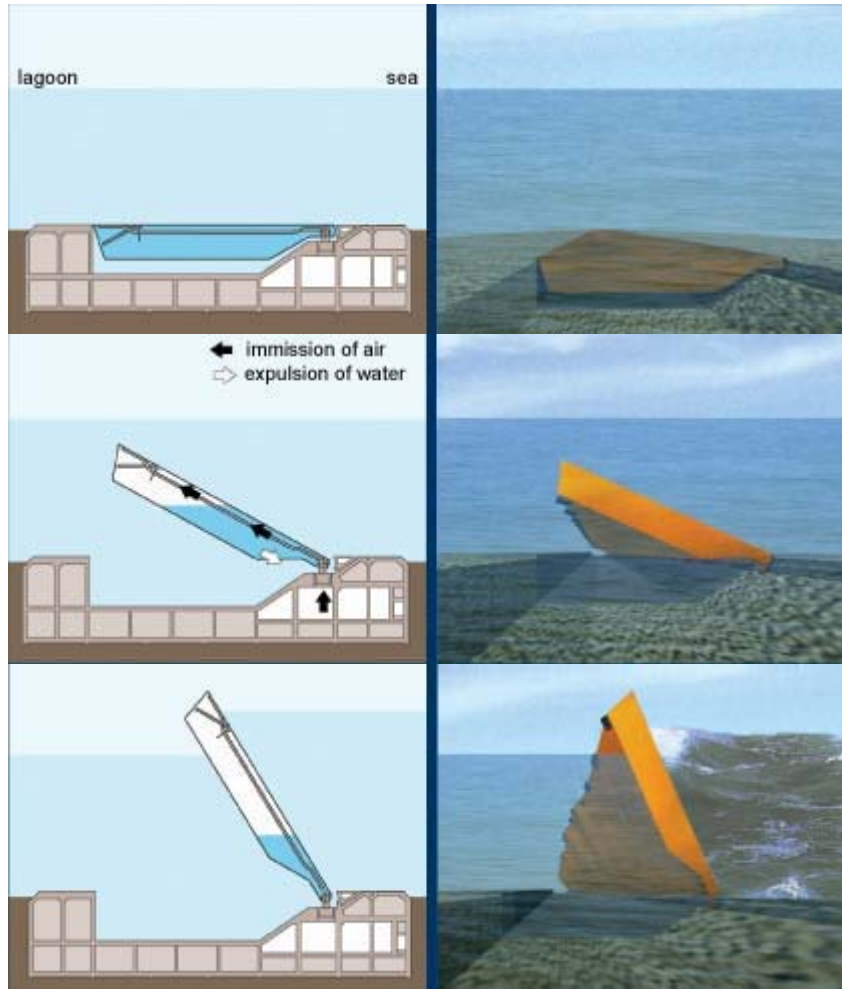


*Figuur B2.23: Overzicht Lido doorgang*  
[[www.salve.it/uk](http://www.salve.it/uk)]



### Detail: de flapgates

In totaal zullen 78 flapgates in de drie doorgangen van de lagune worden geplaatst. De breedte van elke deur 20 meter. De hoogte varieert met de diepte van de doorgang en is maximaal 29,6 meter. De maximale dikte van de holle metalen deuren is 5 meter. Elke deur is met twee scharnieren verbonden aan de drempel waarin de deuren zijn opgeborgen bij normaal getij. Deze drempel bestaat uit geprefabriceerde caissons die in de bodem zijn ingegraven. In deze drempel zijn ook tunnels voor onderhoud opgenomen en de machines. De werking van de deuren zal aan de hand van het onderstaande plaatje worden uitgelegd.



Figuur B2.24 : Opening van de deuren in de MOSE-kering bij Venetië. [www.salve.it/uk]

De met water gevulde deuren liggen in de drempel opgeborgen totdat de voorspelling komt dat het waterpeil in de lagune hoger zal komen dan de gestelde waarde van +110 cm. Via een systeem dat in de drempel zit verborgen wordt er lucht onder hoge druk in de deuren gepompt. Hierbij wordt het water uit de deur gedrukt en komt de deur langzaam vanuit de drempel omhoog gedreven. Zo ontstaat een kering die een waterstandverschil van 2 meter tussen de lagune en de zee moet kunnen weerstaan. De hele openingsprocedure duurt 30 minuten. In de helft van die tijd kunnen de deuren weer worden opgeborgen. Om te zorgen dat de drempel vrij is van zand wanneer de deuren weer worden neergelaten, is een systeem opgenomen in de drempel. Dit systeem bestaat uit pijpen die met waterspuiten zorgen voor turbulentie zodat het losgewoelde slib kan worden opgezogen.

De gekozen oplossing lijkt gevoelig voor golfslag en het doorgeven hiervan naar de lagune. Maar als wordt gekeken hoe klein de doorgangen zijn in vergelijking met de lagune dan zal dit vrij snel dissiperen. Daarnaast is de kering uitgebreid getest. Delft Hydraulic Laboratory en het Massachusetts Institute of Technology hebben de kering in modelvorm getest. Ook is er in de Lido-doorgang een enkele deur op ware grootte getest. Op de site van MOSE wordt gesteld dat de hydrodynamica van de kering juist heel effectief is.

## B2.7 Kering Cardiff Bay

### Situatiebeschrijving

Cardiff ligt in Zuid-Wales aan het Severn estuarium. In dit estuarium heerst het tweede grootste getijverschil in de wereld van bijna 14 meter. Dit grote getijverschil zorgde er voor dat de havens van Cardiff dagelijks droog vielen en er geen scheepvaart mogelijk was. In het begin van de twintigste eeuw werden deze havens vooral gebruikt voor de export van kolen en toen was Cardiff een rijke stad. Langzaam aan is deze handel verdwenen en werd Cardiff steeds minder aantrekkelijk. Eind jaren tachtig is men begonnen met de vernieuwing van de baai van Cardiff. De industrie maakte plaats voor luxe huizen en jachten. Een belangrijk onderdeel voor deze vernieuwing was de aanleg van een kering in de baai van Cardiff, welke werd afgebouwd in 1999. De kering scheidt de estuaria van de rivieren Taff en Ely van het Severn estuarium en creëert zo een zoetwater meer van ongeveer 200 hectare. Nu het waterpeil constant hoog gehouden kan worden is de baai erg aantrekkelijk voor recreatieve doeleinden en dit maakt ook de nieuwe waterkant erg gewild. De kering is ontworpen als een stormvloedkering en vervult ook die functie. Het houdt namelijk de hoge getijden buiten de baai en voorkomt ook dat hoge afvoeren van de rivieren voor een te hoge waterstand zorgen. Deze stormvloedkering vervult dus eigenlijk twee hoofdfuncties waarvan het creëren van een recreatief meer de belangrijkste is. Dit is redelijk uniek.



*Figuur B2.25: De droogevallen baai bij Cardiff [www.urban75.org]*

### De oplossing

De kering is in totaal 1100 meter lang en bestaat uit verschillende onderdelen. Belangrijk voor al deze onderdelen is dat ze hun functie in twee richtingen kunnen vervullen aangezien het waterpeil van het meer zowel hoger als lager dan het zeeniveau kan zijn. Het waterpeil van het meer wordt op +4,50 m gehouden ten opzichte van het referentiepeil. Het gemiddelde hoog- en laagwater aan de zee kant varieert tussen +5,90m en -5,40 m.



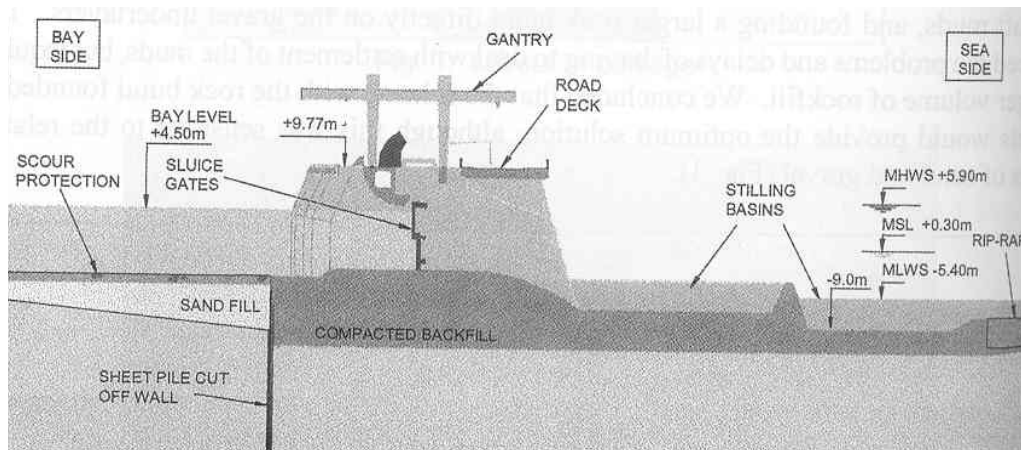
*Figuur B2.26: Kering bij Cardiff [www.deme.be]*

Het grootste deel van de kering bestaat uit een dam van 800 meter lang die is opgebouwd uit zand en gesteente met een basis van 100 meter breed. Een sluis met vijf verticale hefdeuren van 9 meter breed en 7,5 meter hoog kan met een capaciteit van 2300 m<sup>3</sup>/s ervoor zorgen dat de rivierafvoeren van de Taff en de Ely worden afgevoerd. Naast de sluisen is de grootste vistrap van Europa in de kering opgenomen.

Om de baai goed bereikbaar te houden voor scheepvaart van zee zijn er drie sluisen voor de scheepvaart gebouwd. Deze worden afgesloten door hydraulische sectordeuren. Er is een speciaal vulsysteem toegepast om de sluisen te vullen. Dit wordt niet gedaan door de deuren langzaam te openen, omdat dit teveel turbulentie geeft bij grote waterstandverschillen, maar via een leidingensysteem wordt het water via de bodem ingelaten. Daarnaast wordt het zoute schutwater zoveel mogelijk opgevangen en hergebruikt voor de andere sluisen om het binnendringen van zout zo veel mogelijk te voorkomen. Over elke schutsluis loopt een bascule brug omdat er over de hele kering ook nog een weg loopt. Voor de sluisen ligt een haven die wordt afgeschermd van de zee door twee golfbrekers. Deze golfbrekers zijn opgebouwd uit caissons van twintig meter hoog.

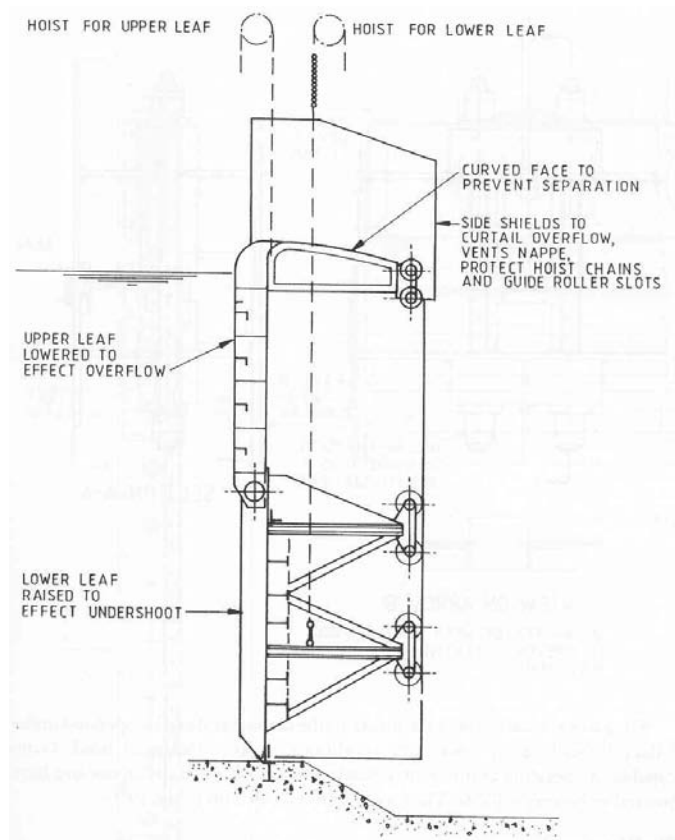
### Detail: de sluisdeuren

Het sluisencomplex wordt gebruikt om het waterpeil in de baai te kunnen reguleren en op het voorgeschreven niveau van +4,50 m te houden. Bij hoog tij zullen de deuren volledig gesloten zijn om het zeewater buiten te houden. In die tijd zal het waterpeil in de baai door de afvoer van de twee rivieren wat stijgen. Wanneer het zeeniveau weer daalt, kunnen de sluisdeuren worden geopend om het water van de rivieren af te voeren naar zee. Er zijn perioden dat er zowel een hoge afvoer is vanuit de rivieren als een stormvloed op zee. In het verleden heeft dit in Cardiff tot overstromingen geleid, nu blijft het waterpeil in de baai ongeveer 2 meter lager in dit geval dan zonder de kering. Een volledig geautomatiseerd systeem meet het waterpeil van de baai en regelt de sluisdeuren.



Figuur B2.27: Doorsnede over de sluisen van de kering bij Cardiff [*Cardiff Bay Barrage: Design and Performance*, P. D. Hunter, Coastal Engineering 2002 Vol.2 blz.1966, WS Publishing 2003]

Belangrijk voor de keuze van de sluisdeuren was dat deze heel flexibel in het gebruik moesten zijn. Daarnaast moesten ze in twee richtingen het water kunnen keren en niet te gevoelig zijn voor aanzanding. Er is gekozen voor stalen "double leaf Hooke deuren" van 9 meter breed en 7,5 meter hoog. Voordeel van deze deuren is dat ze niet alleen onderstrooms kunnen afvoeren, maar ook via overstort. Hierdoor kan voorkomen worden dat puin zich opstapelt in de sluisopening. Ook is de turbulente overstort aantrekkelijk voor vissen en zo kan de effectiviteit van de vistrap worden verhoogd. Een afbeelding van deze deur is hiernaast weergegeven.



Figuur B2.28: Het principe van een double leaf Hook deur, niet precies degene die is toegepast in de kering bij Cardiff. [*Hydraulic gates and valves, Jack Lewin*]

## B2.8 Kering New Orleans

### Situatiebeschrijving

De stad New Orleans ligt in het zuiden van de Verenigde Staten in de staat Louisiana. New Orleans ligt ingeklemd tussen de dijken van de Mississippi en het meer Pontchartrain, welke beide direct in verbinding staan met de Golf van Mexico. Dit is een kwetsbare positie voor een stad waarvan het grootste deel onder de zeespiegel ligt en die nog steeds bijna een centimeter per jaar verder daalt. De grootste bedreiging voor de stad zijn de hoge waterstanden die in het meer kunnen ontstaan ten gevolge van een orkaan. Bij een orkaanwind uit het oosten kan een stormvloed ontstaan die het water in het Boume-meer stuwt. Hierdoor kan ook het gemiddelde waterpeil in het Pontchartrain-meer met enkele meters worden verhoogd. Gevaarlijk bij een orkaan is dat de windrichting snel kan draaien, zodat het mogelijk is dat deze vanuit het noorden over het Pontchartrain-meer komt. Omdat het meer heel ondiep is, gemiddeld ongeveer 5 meter diep, kan het water flink worden opgestuwd richting New Orleans.

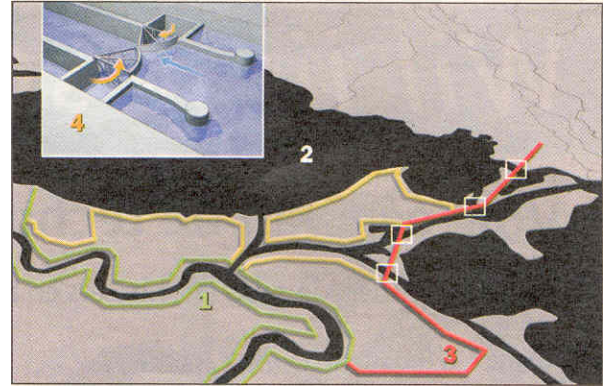
De US Army Corps of Engineers is nu bijna klaar met de bouw van het Hurricane Protection Project. Dit project kost ongeveer 740 miljoen dollar en moet de stad beschermen tegen vloedgolven die bij een orkaan uit de derde categorie kunnen ontstaan. Er wordt nu aan gedacht om een nog hogere waterkering te bouwen die zelfs bescherming moet bieden tegen een orkaan uit de vijfde categorie. Kenmerken van een orkaan uit deze categorie zijn windsnelheden van meer dan 250 km/uur en een vloedgolf van 6 meter of hoger.



Figuur B2.29: Boven is de ligging van de stad New Orleans te zien tussen de Mississippi en het meer. Onder is te zien dat de stad onder het waterpeil van zowel de rivier als het meer ligt.  
[[www.emeraldcoe.com/capturing\\_hurricane\\_wave\\_data.htm](http://www.emeraldcoe.com/capturing_hurricane_wave_data.htm)]

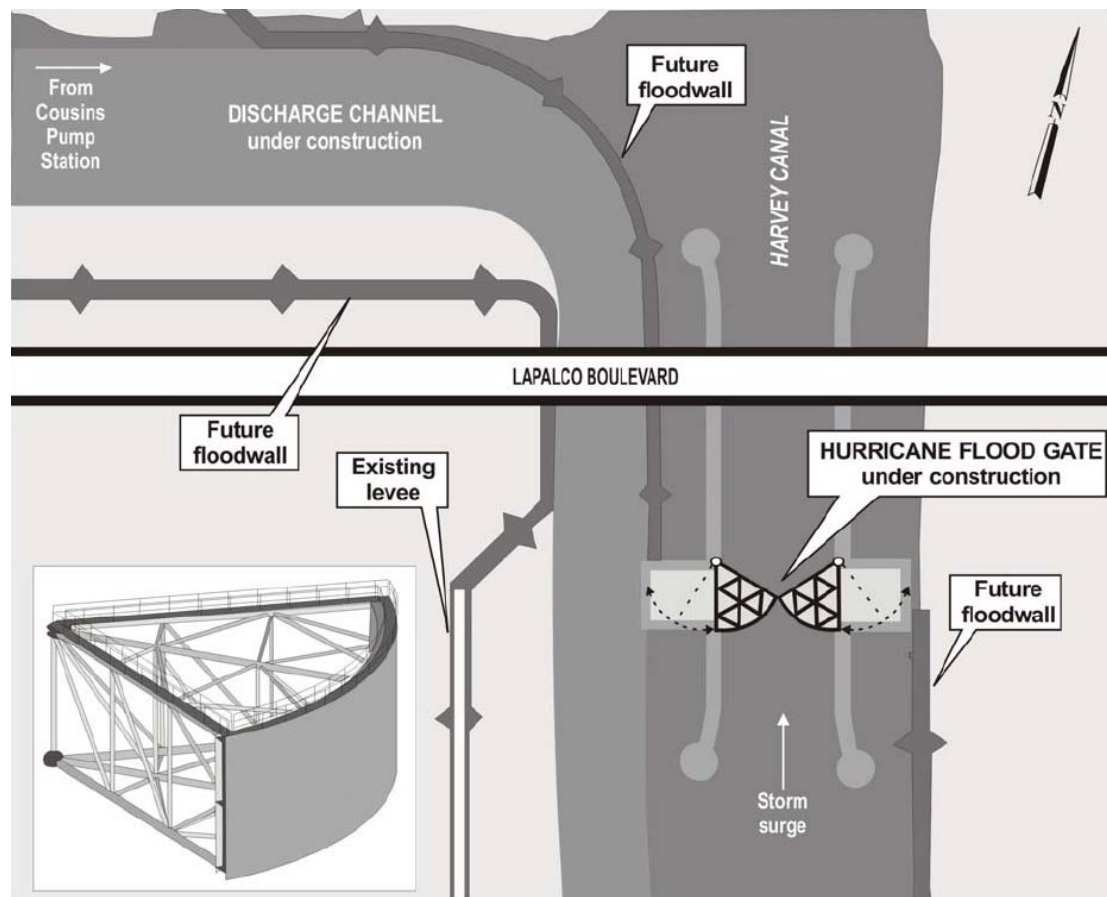
### De oplossing

Om New Orleans te beschermen tegen de stormvloed die kunnen ontstaan bij een orkaan uit de vijfde categorie is een waterkerende muur bedacht die het meer Pontchartrain moet afschermen van het Boume-meer. Deze kering is in de figuur hiernaast in rood aangegeven. Hierdoor kan de gemiddelde waterstand in het Pontchartrain-meer niet zomaar met enkele meters toenemen. De keermuur moet in totaal 13 meter hoog worden en is gemaakt van staal en beton op een aarden wal. Om het meer en enkele kanalen toegankelijk te houden zouden op vier plaatsen stormvloeddeuren in de kering moeten komen (zie inzetje in figuur hiernaast).



Figuur B2.30: In rood is de 13 meter hoge waterkerende muur weergegeven. [Technisch Weekblad, 13 mei 2005]

Als afsluitmiddel zijn twee horizontale sectordeuren gepland. Deze deuren hebben verticale scharnieren en worden in het Hurricane Protection Project ook op andere plaatsen al toegepast zoals in het Harvey Kanaal ten zuiden van New Orleans (zie figuur hieronder).



Figuur B2.31: Sectordeuren in het Harvey Kanaal [www.mvn.usace.army.mil]

## B2.9 Bronnenlijst beschrijving keringen

### Oosterscheldekering:

#### Literatuur

- Design plan Oosterschelde Storm-surge barrier ;Overall design and design philosophy, Uitgave voor Rijkswaterstaat, A.A. Balkema, Rotterdam 1994, ISBN 90-5410-107-5
- Stormvloedkering Oosterschelde, Cement 1982 nr. 11, ISSN 0008-8811
- Van der Ham, W., Heersen en Beheersen; Rijkswaterstaat in de twintigste eeuw, blz. 334-341, Zaltbommel 1999, ISBN 90-288-1525-2
- Flameling, I., Hoogwater 50 jaar na de watersnoodramp, uitgave van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Kosmos-Z&K Uitgevers (Utrecht/ Antwerpen), Den Haag 2003, ISBN 90-21539-65-9

#### Internet

- <http://www.deltawerken.com/Oosterscheldekering/44.html>

### Maeslantkering

#### Literatuur

- Sluitstuk van de Deltawerken; Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, uitgave van Bouwkombinatie Maeslant Kering en Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Den Haag 1997

#### Internet

- <http://www.keringhuis.nl/maeslantkering/>
- <http://www.deltawerken.com/Maeslantkering/55.html>
- [www.onwijsnat53.nl](http://www.onwijsnat53.nl)

### Theemskering:

#### Literatuur

- Thames Barrier Design, The Institution of Civil Engineers, London 1978, ISBN: 0-7277-0057-x
- Lewin. J., Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets: Second Edition, Thomas Telford, London 2001, ISBN: 0-7277-2990-x
- The Thames Barrier: the background and basic engineering requirements, D. Ayres, 1983

#### Internet

- <http://www.thamesbarrierpark.org.uk/thebarrier.htm>
- <http://www.environment-agency.gov.uk>
- <http://www.floodlondon.com/floodtb.htm>
- <http://w3.mech.uwa.edu.au/~kamy/Thames%20Barrier.htm>
- <http://www.glassteelandstone.com/UK/England/London/ThamesBarrier.html>
- <http://www.portcities.org.uk>
- <http://www.esemag.com/0998/barrier.html>

### Eemskering:

#### Literatuur:

- Informatiefolder 'Das Emssperrwerk', uitgave van Niedersächsischer Landsbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz

#### Internet

- <http://www.ems-sperrwerk.de>

### **Kering St. Peterburg:**

#### Literatuur

- Waterkering van 23 km, De Ingenieur november 2004, blz. 25
- Zusje van de Maeslantkering, De Ingenieur december 2002, blz. 38-39,
- Te Slaa, B.; Reeskamp, B., Ook Sint-Petersburg straks 'droge voeten', Land + Water september 2004, blz. 14-15,
- Rauwerdink, A., Veilig slapen in Sint Petersburg, DHVTimes magazine juli 2004
- Van de Crommert, R., Stormvloedkering DHV in Sint Petersburg, Telegraaf september 2004

#### Internet

- <http://www.dhv.nl>
- <http://www.ebrd.org/projects/psd/index.htm>
- [http://www.halcrow.com/latestnews\\_oct03\\_peter.asp](http://www.halcrow.com/latestnews_oct03_peter.asp)
- <http://www.enr.com/projects/international/archives/031124c.asp>
- <http://arhipel.hiiumaa.ee/norfa/abstracts/petersburg/14.html>
- <http://www.ndep.org>

#### Overig

- Presentaties D. Peters en B. te Slaa van Royal Haskoning voor het vak CT5313

### **Kering Venetië:**

#### Literatuur

- Mobiele zeewering, De Ingenieur november 2004, blz. 22
- Lewin, J., Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets: Second Edition, Thomas Telford, London 2001, ISBN: 0-7277-2990-x

#### Internet

- <http://www.salve.it/uk>

### **Kering Cardiff Bay:**

#### Literatuur

- Hunter, P.D., Cardiff Bay Barrage: Design and Performance, Coastal Engineering 2002 Vol.2 blz.1966-1973, WS Publishing 2003
- Smallman, J.V.; Burt, T.N., Cardiff Bay Barrage: Hydraulic studies of sediment transport and waves, Coastal Engineering 2002 Vol.2 blz.1974-1982, WS Publishing 2003
- Burt, N.; Rees, A., Guidelines for the assessment and planning of estuarine barrages, Thomas Telford, London 2001, ISBN 0-7277-2863-6
- Faganello, E., Hydraulic modeling to revise the sluice gate control logic at Cardiff Bay Barrage, PIANC Bulletin 2004 nr. 117, blz. 5-13

#### Internet

- <http://www.cardiffharbour.com>
- <http://www.environment-agency.gov.uk>
- <http://www.concretecentre.com/main.asp?page=633>
- [http://www.deme.be/projects/uk\\_cardiffbay.html](http://www.deme.be/projects/uk_cardiffbay.html)

### **Kering New Orleans:**

#### Internet

- [http://www.lwrri.lsu.edu/downloads/Colten\\_LWRRIFY02-03.pdf](http://www.lwrri.lsu.edu/downloads/Colten_LWRRIFY02-03.pdf)
- [www.lwrri.lsu.edu/1998\\_2002WEB/downloads/hurrrpres.ppt](http://www.lwrri.lsu.edu/1998_2002WEB/downloads/hurrrpres.ppt)
- <http://www.weather.com/newscenter/specialreports/hurricanes/vulnerablecities/neworleans.html>
- <http://www.pubs.asce.org/ceonline/ceonline03/0603feat.html>
- <http://www.csu.edu.au/faculty/sciagr/sst/pers/ksherren/pub/riza.pdf>
- [http://www.emeraldcoe.com/capturing\\_hurricane\\_wave\\_data.htm](http://www.emeraldcoe.com/capturing_hurricane_wave_data.htm)
- [www.mvn.usace.army.mil](http://www.mvn.usace.army.mil)

## **Bijlage 3 Geactualiseerde Sigmaplan**

Hieronder wordt een overzicht gegeven over de procedure die voor de actualisatie van het Sigmaplan is doorlopen. Dit overzicht komt voort uit het vooronderzoek.

De Vlaamse 'Administratie Waterwegen en Zeewezen' (AWZ) probeert in zes stappen tot een nieuw plan te komen dat in overeenstemming is de Langetermijnvisie Schelde-estuarium. De meeste stappen zijn al doorlopen.

### **1. Studie integrale verkenning**

Hiervoor worden gegevens verzameld om verdere studies te kunnen doen en keuzes te onderbouwen. Dit zijn gegevens over de bevolking en de economie, over bodem en waterkwaliteit en over natuurwaarden bijvoorbeeld. Ook worden diverse kaarten gemaakt waarvoor topografische metingen van het hele Zeescheldebekken nodig zijn.

### **2. Modelleren en hydraulica**

De gegevens zijn gebruikt om computermodellen op te stellen en er zijn bijvoorbeeld overstromingskaarten opgesteld. Deze hulpmiddelen kunnen worden gebruikt om effecten van bedachte oplossingen te simuleren.

### **3. Vastleggen van de bouwstenen**

De bouwstenen zijn de mogelijke oplossingen van het Sigmaplan waarvan de haalbaarheid voldoende is aangetoond:

- **Dijkverhogingen**  
Het is belangrijk om te weten welke dijken op Sigmahoogte zijn en welke dijken nog moeten worden verhoogd. In het oorspronkelijke Sigmaplan is uitgegaan van een stormvloedkering, hoever zouden de dijken moeten worden verhoogd als deze er niet is en op welke manieren zou dit gerealiseerd kunnen worden.
- **Stormvloedkering**  
Een stormvloedkering te Oosterweel waarbij is uitgegaan van een horizontale sectordeur zoals de Maeslantkering omdat dit ontwerp wat financiën betreft het meest gunstig uit een studie naar voren was gekomen. Daarnaast is gekeken of in plaats van een grote stormvloedkering te Oosterweel één of twee kleinere keringen op de Rupel of de Dijle en de Nete een mogelijkheid is.
- **Overschelde**  
Dit is een nog aan te leggen breed kanaal tussen de Wester- en Oosterschelde welke tijdens stormvloedomstandigheden snel grote hoeveelheden water kan afvoeren naar de Oosterschelde. Tijdens de storm kan de Oosterschelde een grote hoeveelheid water bergen en zo een waterstandverlaging van 0,5 meter in de Westerschelde kunnen bereiken.
- **GOG's**  
Van 182 Potentiele Overstromingsgebieden (POG's) met een totale oppervlakte van 15.700 ha is gekeken of deze ingericht kunnen worden tot GOG. Sommige van deze gebieden zouden ook ingericht kunnen worden via het concept 'gecontroleerd gereduceerd getij' (GGG's). Deze gebieden stromen bewust twee keer per dag over en kunnen een bijdrage leveren aan de natuurontwikkeling van het gebied.

### **4. Combineren van bouwstenen tot planalternatieven**

De bouwstenen zijn gecombineerd tot acht verschillende alternatieven met verschillende varianten. Hierin zijn drie veiligheidsniveaus onderscheiden: 1/1.000, 1/2.500 en 1/4.000.

### **5. Vergelijken van planalternatieven**

De verschillende planalternatieven worden met elkaar vergeleken op basis van milieu-impact in een milieueffectrapportage (MER) en op kostenefficiëntie in een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA).

### **6. Beslissing Vlaamse regering**

De Vlaamse regering beslist welke alternatieven in het Sigmaplan worden opgenomen om in 2010 met de uitvoering te beginnen.



De rapporten MER en MKBA zijn eind 2004 uitgebracht. In de MER worden onder andere vier oplossingen, met de verschillende bouwstenen als uitgangspunt, vergeleken van hetzelfde veiligheidsniveau (overstromingskans 1/4000 per jaar of kleiner). Hieruit blijkt dat de aanleg van een stormvloedkering de kleinste impact heeft op mens en milieu. Dit komt voornamelijk omdat er bij deze oplossing weinig dijkversterkingen nodig zijn en het profiel van de rivier vrijwel ongewijzigd blijft. Dijkverhogingen worden als negatief beoordeeld. Overloopgebieden kunnen een positieve bijdrage leveren aan de natuurwaarden. Het anders inrichten van gebieden kan lokaal ook negatieve reacties opleveren. Daarnaast kan het laten overstromen van gebieden een negatieve impact opleveren voor het bodem- en oppervlaktewater door de slechte kwaliteit van het slib.

In de MKBA wordt dijkverhoging in combinatie met ruimte voor de rivier voorgesteld als optimale oplossing. De stormvloedkering komt hier minder goed naar voren en de oplossing van de Overschelde wordt in dit rapport eigenlijk afgeschreven omdat de investeringen niet kunnen worden terugverdiend. De vergelijking tussen de stormvloedkering en de combinatie van dijkverhogingen met ruimte voor de rivier lijkt echter niet helemaal eerlijk. De dijkverhogingen worden uitgewerkt voor het veiligheidsniveau van 1/2500 per jaar als overstromingskans. De ruimte voor water oplossing worden uitgewerkt in de vorm van GOG's en GGG's met een overstromingskans van 1/1000 per jaar. Dit is beide beduidend lager dan de kans van 1/4000 per jaar voor de stormvloedkering. Daarnaast zijn de kosten hoger en de baten lager van de stormvloedkering en heeft deze een veel langere terugverdientijd (zie tabel hieronder). Maar wanneer dijkverhoging gecombineerd moet worden met ruimte voor water, de exacte combinatie hiervan is nog niet bekend, zouden de kosten wel eens hoger uit kunnen vallen.

	Stormvloed- kering <sup>(1)</sup>	Overschelde	Dijkverho- ging <sup>(2)</sup>	GOG <sup>(3)</sup> (1800 ha)	GGG <sup>(3)</sup> (1800 ha)
Investeringsbedrag <sup>(4)</sup>	500 - 600	> 1500	239	165	178
Geactualiseerde totale kosten <sup>(5)</sup>	387	1.597	241	140	151
Geactualiseerde veiligheidsbaat tot 2100 <sup>(6)</sup>	727	759	691	648	648
Andere effecten tot 2100		PM*			
scheepvaart	-1				
landbouw				-15	-19
zicht omwonenden				-3	-3
natuur					56**
Totale netto geactualiseerde baten <sup>(7)</sup>	339	-837	451	489	530
Terugverdientijd (jaar) <sup>(8)</sup>	<b>41</b>	<sup>(9)</sup>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>14</b>

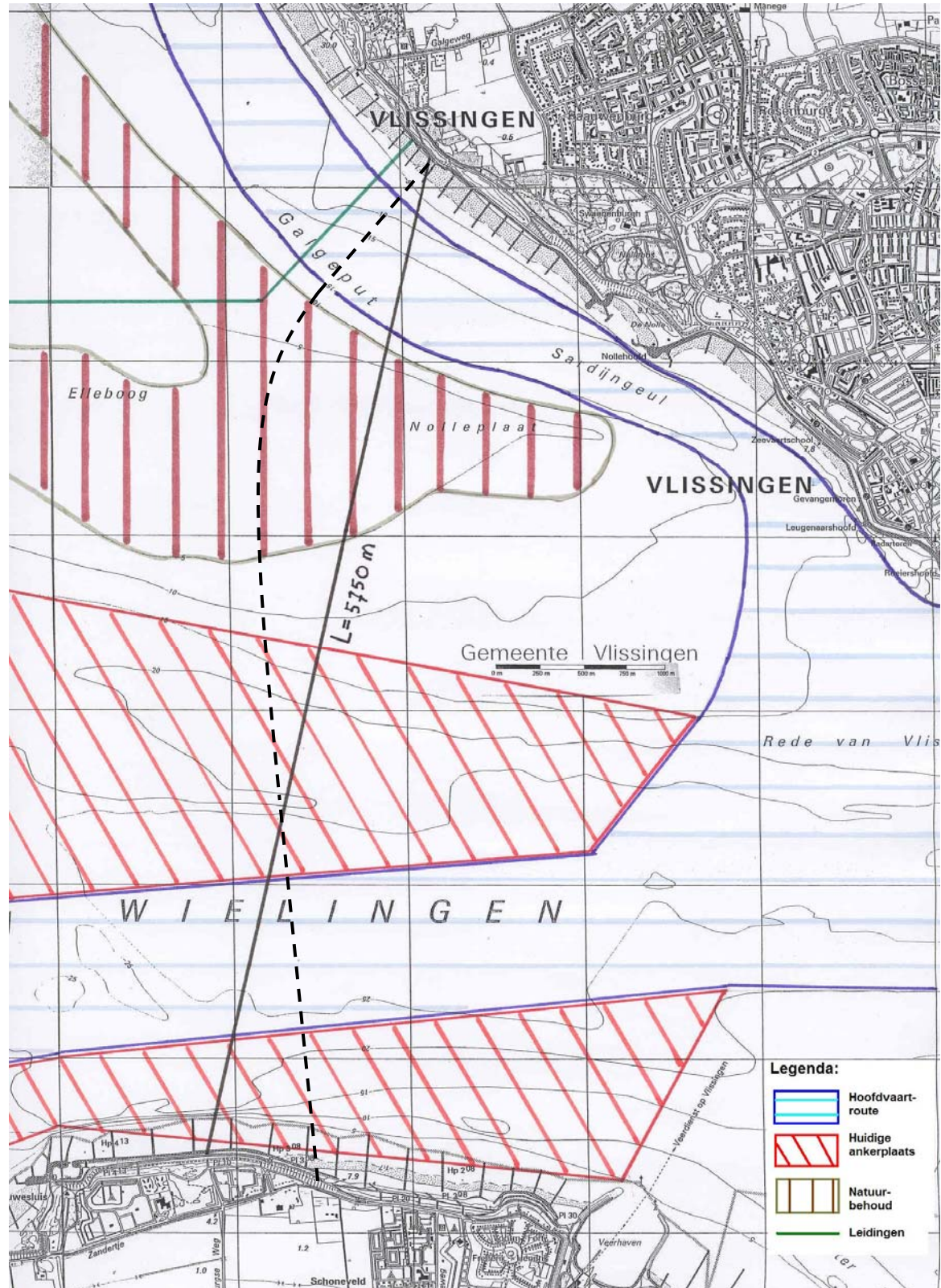
Figuur B3.1: Overzicht van de geactualiseerde kosten en baten in mln. €, en terugverdientijd [MBKA voor de actualisatie van het Sigmoplan, AWZ]

Als meest geschikte oplossing wordt in het geactualiseerde Sigmoplan een combinatie van de aanleg van overstromingsgebieden en lokale dijkverhogingen voorgesteld. Op 22 juli 2005 heeft de Vlaamse regering dit voorstel goedgekeurd. De totale kosten tot 2030 worden op 830 miljoen euro geraamd.

## Bijlage 4 Locatiekaarten

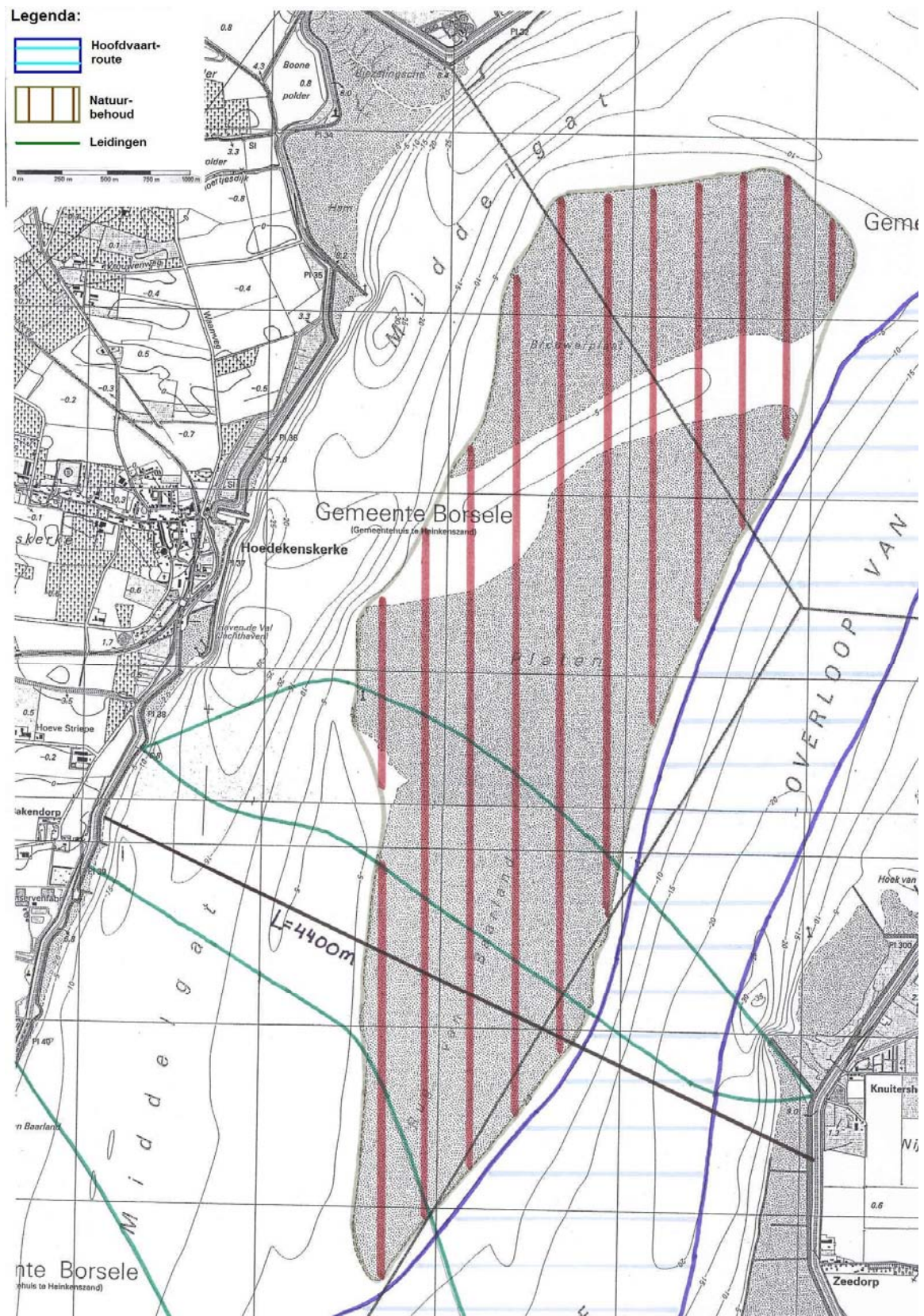
### B4.1 Locatie 1

Stormvloedkering locatie 1, ingetekend op kaart uit ANWB Topografische atlas, Zeeland  
schaal 1:25.000 (ANWB bv, Den Haag, 2004, ISBN 90 18018457)



## B4.2 Locatie 2

Stormvloedkering locatie 2, ingetekend op kaart uit ANWB Topografische atlas, Zeeland schaal 1:25.000 (ANWB bv, Den Haag, 2004, ISBN 90 18018457)



## B4.1 Locatie 3

Stormvloedkering locatie 3, ingetekend op kaart Antwerpen-Schoten schaal 1:20.000 (Nationaal geografisch instituut, 1996)



## Bijlage 5    Artikel Hyundai, toekomstige containerschepen

### **Hyundai klaar voor bouw schepen van 13.560 teu**

**De Zuid-Koreaanse scheepswerf Hyundai Heavy Industries is klaar om containerschepen met een recordcapaciteit van 13.560 teu te bouwen. Deze reuzen zouden 382 meter lang en 54,2 meter breed worden. Omdat de schepen zo breed zijn, zou hun diepgang beperkt blijven tot 13,5 meter.**

De plannen voor het nieuwe scheepstype werden samen met de Duitse classificatiemaatschappij Germanischer Lloyd ontwikkeld. Het nieuwe ontwerp verschilt in meerdere opzichten van de bestaande very large container ships (vlc's). Zo zijn er twee scheepsmotoren van 45.000 kW nodig die elk een schroef aandrijven, om het ultra large container ship (ulc's) een snelheid van 25,5 knopen te geven. Om de stapelruimte bovendeks te optimaliseren, wordt het smalle brughuis op de voorste helft van het schip geplaatst. Achteraan wordt nog wel een rij containers opgeofferd voor de schoorsteen boven de twee scheepsmotoren; het brughuis en de machinekamer worden dus van elkaar gescheiden. Ze nemen echter elk slechts een twintig voets positie in, zodat er geen extra plaatsverlies is ten opzichte van bestaande schepen. Bovendeks worden de containers 21 rijen breed geladen, wat een totale capaciteit van 7.210 teu vertegenwoordigt. Onder de luikhoofden is plaats voor nog eens 6.230 teu.

Publicatiedatum: 3 oktober 2005

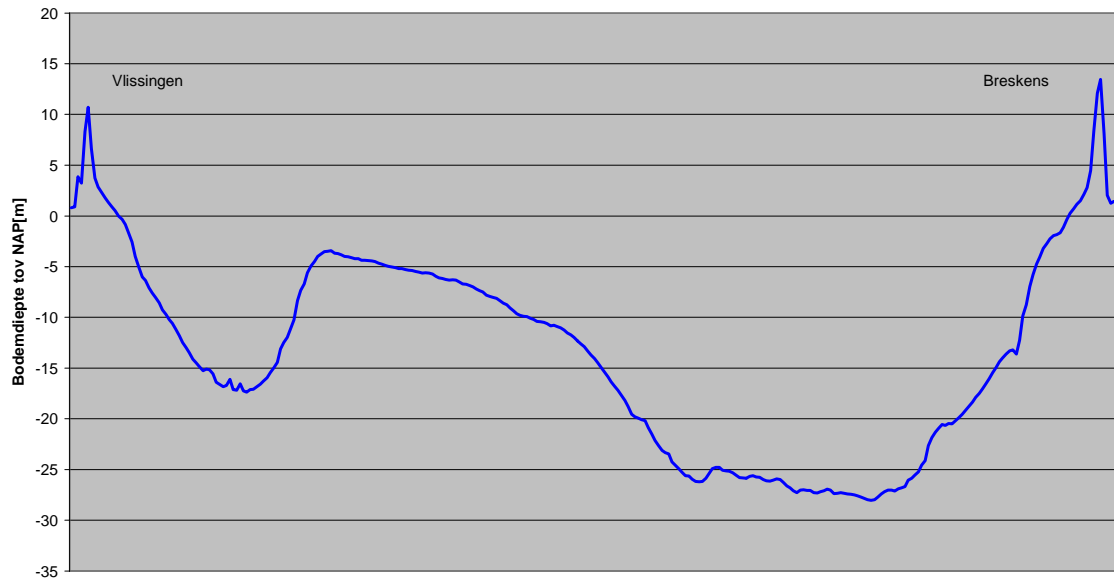
Auteur: Redactie Nieuwsblad Transport

Bron: [www.nieuwsbladtransport.nl](http://www.nieuwsbladtransport.nl)

## Bijlage 6 Gegevens Rijkswaterstaat voor bodemprofiel

Hieronder is een overzicht te zien van de bodemdiepten nabij de gekozen locatie van de kering (RD x-coördinaat 26250), opgesteld uit gegevens van Rijkswaterstaat.

Diepte-profiel Westerschelde  
(RD x-coördinaat 26250)



## Bijlage 7 Bepaling toelaatbaar overslagdebiet

Hieronder zal voor de twee scenario's zoals die in hoofdstuk 8 zijn beschreven het maximaal toelaatbare overslagdebiet worden bepaald. Dit is gedaan aan de hand van de procedure zoals die staat beschreven in de Leidraad Kunstwerken [Leidraad Kunstwerken, TAW, Delft 2003, ISBN 90-369-5544-0]]

Debietbepaling over kering bij scenario 1:

Maximale waterstandverhoging van sluitpeil tot maximale waterstand is:

$$4,70 - 4,10 = 0,60\text{m.}$$

Voor overslag is nog een waterstandsverhoging beschikbaar:

$$0,60 - 0,50 - 0,025 = 0,075\text{m}$$

Beschikbare komberging: oppervlakte x waterstandsverhoging:

$$4,7 \cdot 10^8 \times 0,075 = 3,525 \cdot 10^7 \text{ m}^3$$

Overslagvolume per meter breedte:

$$3,525 \cdot 10^7 / 5750 = 6,13 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{m}$$

Toelaatbaar overslagdebiet: volume/ tijdsduur aanwezige belasting

$$6,13 \cdot 10^3 / (6 \times 3600) = 0,28 \text{ m}^3/\text{s per meter kering}$$

Debietbepaling over kering bij scenario 2:

Maximale waterstandverhoging van sluitpeil tot maximale waterstand is:

$$4,70 - 4,10 = 0,60\text{m.}$$

Voor overslag is nog een waterstandsverhoging beschikbaar:

$$0,60 - 0,10 - 0,20 = 0,30\text{m}$$

Beschikbare komberging: oppervlakte x waterstandsverhoging:

$$4,7 \cdot 10^8 \times 0,30 = 1,41 \cdot 10^8 \text{ m}^3$$

Overslagvolume per meter breedte:

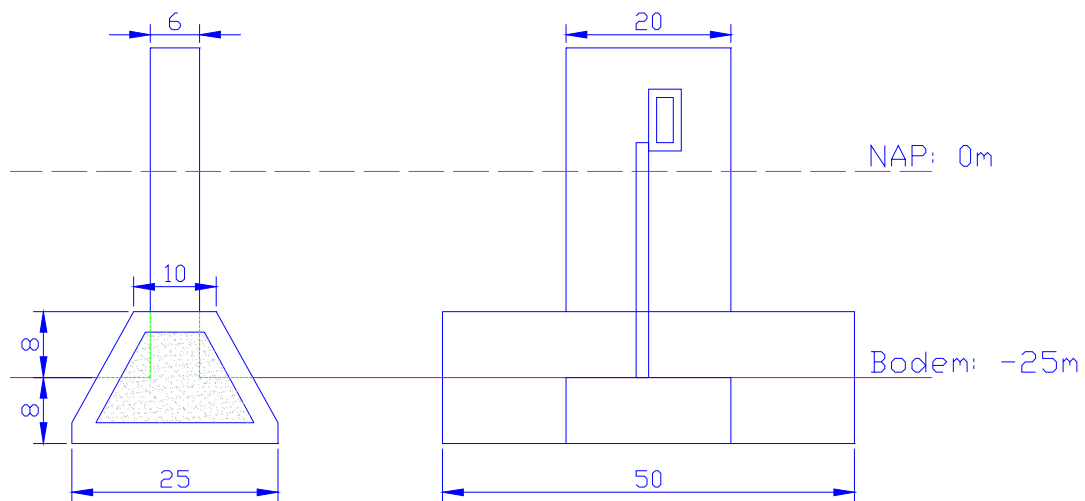
$$1,41 \cdot 10^8 / 5750 = 2,45 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{m}$$

Toelaatbaar overslagdebiet: volume/ tijdsduur aanwezige belasting

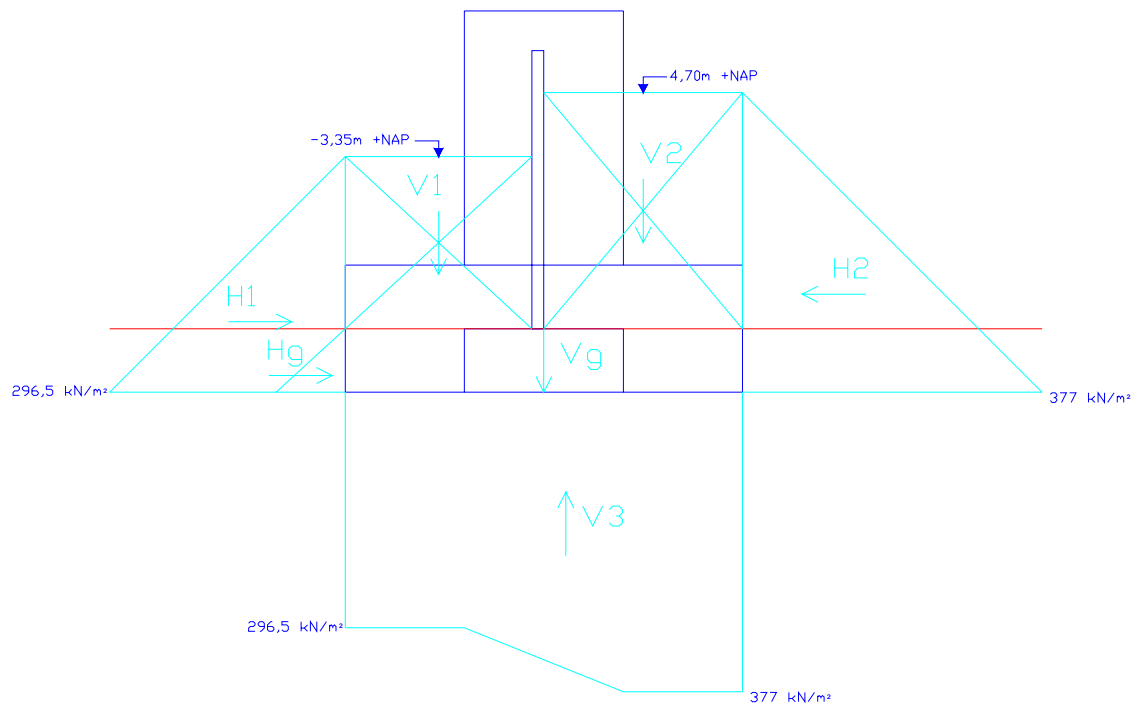
$$2,45 \cdot 10^4 / (24 \times 3600) = 0,28 \text{ m}^3/\text{s per meter kering}$$

## Bijlage 8 Pijlers hefschuiven, berekening stabiliteit

Dimensies van de pijlers van de hefschuiven in het diepste gedeelte van de kering met de bodem op een niveau van -25m +NAP zijn bepaald en hieronder in de figuur weergegeven.



Bij de berekening van de stabiliteit van de pijlers is het grootste waterstandverschil maatgevend. In dit geval is dit bij een negatief waterstandverschil wanneer op de Westerschelde de maximale waterstand van 4,70 meter is bereikt en aan de Noordzee een extreem laagwater optreedt. Waterdrukken ten gevolge van golfslag zijn in dit geval ondergeschikt vanwege de grote massa draagheid van de constructie.





### Afschuiven

$$H_G = \frac{1}{2} \times (3 \times 8 \text{ kN/m}^3 \times 8 \text{ m}) \times 170 \text{ m}^2 = 16320 \text{ kN} \rightarrow$$

$V_G = \text{eigengewicht (heftoren + voet + schijf + bovenbalk)}$

$$V_G = 92160 \text{ kN} + 304500 \text{ kN} + 5000 \text{ kN} + 12000 \text{ kN} = 413600 \text{ kN} \downarrow$$

$$H_1 = \frac{1}{2} \times 296,5 \text{ kN/m}^2 \times 29,65 \text{ m} \times 46 \text{ m} = 202200 \text{ kN} \rightarrow$$

$$H_2 = \frac{1}{2} \times 377 \text{ kN/m}^2 \times 37,70 \text{ m} \times 46 \text{ m} = 326900 \text{ kN} \leftarrow$$

$$V_1 = \frac{296,5 \text{ kN/m}^2 + 136,5 \text{ kN/m}^2}{2} \times 22 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 119100 \text{ kN} \downarrow$$

$$V_2 = \frac{217 \text{ kN/m}^2 + 377 \text{ kN/m}^2}{2} \times 22 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 163400 \text{ kN} \downarrow$$

$$V_3 = \frac{296,5 \text{ kN/m}^2 + 377 \text{ kN/m}^2}{2} \times 20 \text{ m} \times 25 \text{ m} \\ + 296,5 \text{ kN/m}^2 \times 15 \text{ m} \times 25 \text{ m} + 377 \text{ kN/m}^2 \times 15 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 413600 \text{ kN} \uparrow$$

Controle op afschuiven:

$$1,25 \sum H \leq fW + H_G$$

$$f = 0,65$$

met:  $W = 0,9 \sum V$

$$1,25 \times 124700 \text{ kN} \leq 0,65 (0,9 \times 275100 \text{ kN}) + 16320 \text{ kN}$$

$$155900 \text{ kN} \leq 177250 \text{ kN}$$

Dit is OK.

### Kantelen tijdens negatief waterstandsverschil

De resulterende horizontale en verticale krachten worden berekend met de arm tot het draaipunt M van de constructie.

$$\sum H \times e_H = -H_1 \times \frac{1}{3} \times 29,65m + H_2 \times \frac{1}{3} \times 37,70m$$

$$e_H = 16,92m$$

$$\sum V \times e_V = V_1 \times 12,50m - V_2 \times 12,50m + V_3 \times 0,05m$$

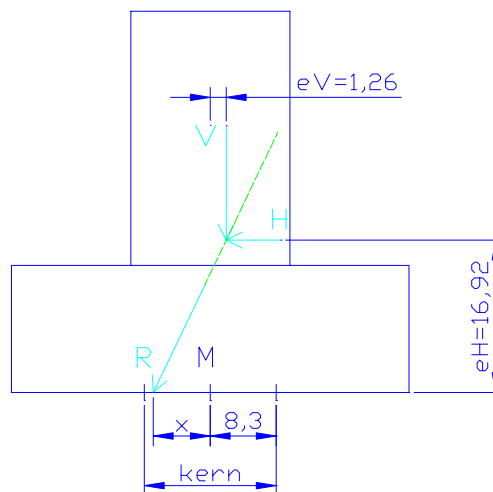
$$e_V = 1,26m$$

De afstand x van resultante kracht R tot het draaipunt M van de constructie is:

$$\sum H \times e_H - \sum V \times e_V = \sum V \times x$$

$$124700kN \times 16,92m - 275100kN \times 1,26m = 275100kN$$

$$x = 6,4m$$



Omdat de resulterende kracht binnen de kern van de constructie (=1/6 van de basis) valt, ontstaan er geen negatieve spanningen onder de constructie en staat alles onder druk. De volgende formule kan nu gebruikt worden om de maximale optredende spanning te berekenen:

$$\sigma_{optr} = \frac{\sum V}{b \times l} - \frac{\sum V \times e_V}{\frac{1}{6} \times b \times l^2} + \frac{\sum H \times e_H}{\frac{1}{6} \times b \times l^2}$$

$$\sigma_{optr} = \frac{275100kN}{25m \times 50m} - \frac{275100kN \times 1,26m}{\frac{1}{6} \times 25m \times (50m)^2} + \frac{124700kN \times 16,92m}{\frac{1}{6} \times 25 \times (50m)^2} = 389kN/m^2$$

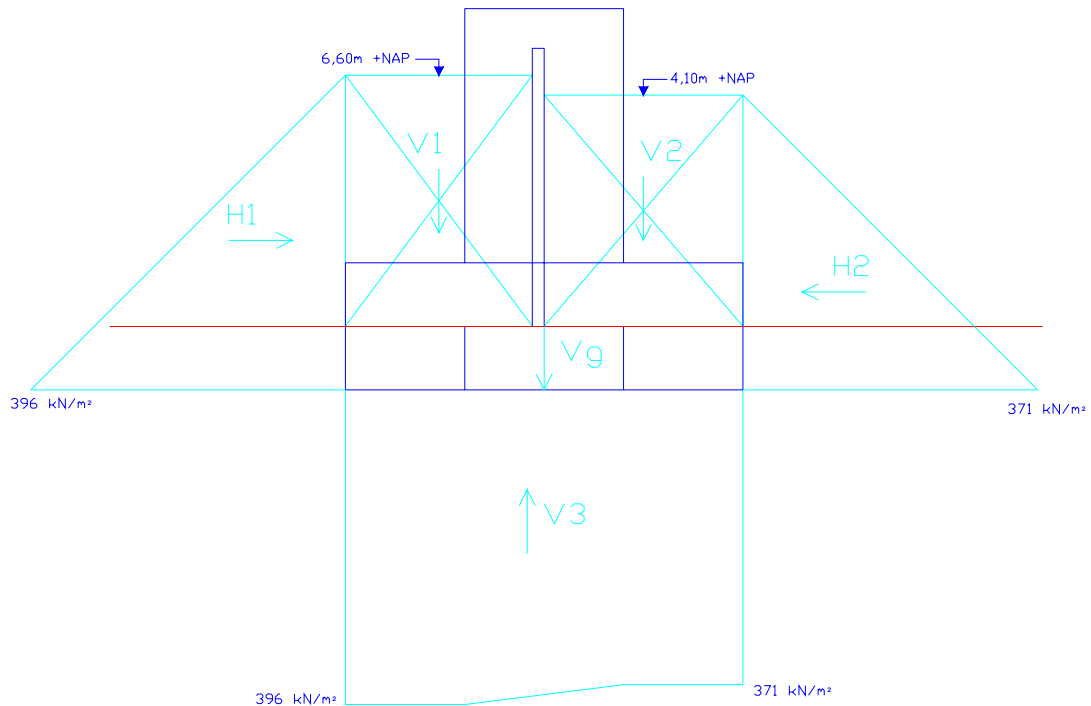
De maximale toegestane spanning is op 500 kN/m<sup>2</sup> gesteld.

$$389kN/m^2 \leq 500kN/m^2$$

Dit is OK.

### Kantelen tijdens de stormvloedstand

De stabiliteit van de constructie wordt voor kantelen ook tijdens de stormvloedstand gecontroleerd omdat de belasting dan hoger aangrijpt en daardoor de arm tot het draaipunt groter is dan voor de vorige situatie.



$$V_G = 413600kN \downarrow$$

$$H_1 = \frac{1}{2} \times 396 \frac{kN}{m^2} \times 39,60m \times 46m = 360700kN \rightarrow$$

$$H_2 = \frac{1}{2} \times 371 \frac{kN}{m^2} \times 37,10m \times 46m = 316600kN \leftarrow$$

$$V_1 = \frac{236 \frac{kN}{m^2} + 396 \frac{kN}{m^2}}{2} \times 22m \times 25m = 173800kN \downarrow$$

$$V_2 = \frac{211 \frac{kN}{m^2} + 371 \frac{kN}{m^2}}{2} \times 22m \times 25m = 160100kN \downarrow$$

$$V_3 = \frac{396 \frac{kN}{m^2} + 371 \frac{kN}{m^2}}{2} \times 20m \times 25m \\ + 396 \frac{kN}{m^2} \times 15m \times 25m + 371 \frac{kN}{m^2} \times 15m \times 25m = 479400kN \uparrow$$

$$\sum H = 44100kN \rightarrow$$

$$\sum V = 268100kN \downarrow$$

De resulterende horizontale en verticale krachten worden berekend met de arm tot het draaipunt M van de constructie.

$$-\sum H \times e_H = -H_1 \times \frac{1}{3} \times 39,60m + H_2 \times \frac{1}{3} \times 37,10m$$

$$e_H = 19,18m$$

$$\sum V \times e_V = V_1 \times 12,50m - V_2 \times 12,50m + V_3 \times 0,02m$$

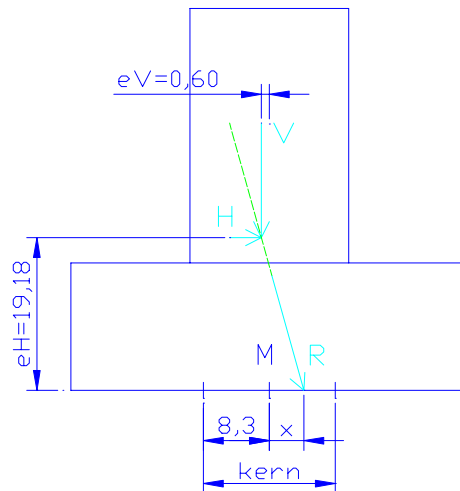
$$e_V = 0,60m$$

De afstand x van resultante kracht R tot het draaipunt M van de constructie is:

$$-\sum H \times e_H + \sum V \times e_V = -\sum V \times x$$

$$-44100kN \times 19,18m + 268100kN \times 0,60m = -268100kN \times x$$

$$x = 2,55m$$



Omdat de resulterende kracht binnen de kern van de constructie (=1/6 van de basis) valt, ontstaan er geen negatieve spanningen onder de constructie en staat alles onder druk. De volgende formule kan nu gebruikt worden om de maximale optredende spanning te berekenen:

$$\sigma_{optr} = \frac{\sum V}{b \times l} - \frac{\sum V \times e_V}{\frac{1}{6} \times b \times l^2} + \frac{\sum H \times e_H}{\frac{1}{6} \times b \times l^2}$$

$$\sigma_{optr} = \frac{268100kN}{25m \times 50m} - \frac{268100kN \times 0,60m}{\frac{1}{6} \times 25m \times (50m)^2} + \frac{44100kN \times 19,18m}{\frac{1}{6} \times 25 \times (50m)^2} = 295 kN/m^2$$

De maximale toegestane spanning is op 500 kN/m<sup>2</sup> gesteld.

$$295 kN/m^2 \leq 500 kN/m^2$$

Dit is OK.

Bij een pijler in een ondiep gedeelte van de Westerschelde is het eigengewicht  $V_G$  kleiner, maar zijn ook de belastingen en de opwaartse druk kleiner. Alle pijlers voldoen wat stabiliteit betreft.

## Bijlage 9 Berekening golfbelasting

Voor de benadering van de drukken die op de constructie ontstaan ten gevolge van de golfbelasting wordt het belastingmodel van Sainflou gebruikt. In de benadering wordt uitgegaan van de tweede golftheorie van Stokes met volledige reflectie. De methode kan worden toegepast bij een verticale constructie en niet-brekende golven. Om dit te controleren moet aan de volgende voorwaarde worden voldaan:

$$0,1 \leq H_s^* \leq 0,35$$

$$\text{met: } H_s^* = H_s / h$$

$$H_s^* = 3,60m / 31,6m = 0,11$$

Aan deze voorwaarde wordt voldaan. Dit betekent dat de golven niet breken op de constructie, maar quasi staande golven zijn. Het model van Sainflou kan dus toegepast worden. Het is enigszins conservatief voor de constructie, maar wel veilig.

Er wordt in het model uitgegaan van een verhoging van de middenwaterstand. Deze verhoging  $\eta_0$  wordt hieronder berekend. Hierin worden de golflengte 'L' en het golfgetal 'k' gebruikt. Deze zijn met behulp van Matlab iteratief bepaald via de volgende formules.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) = 182,5m$$

$$k = \frac{2\pi}{L} = 0,0344$$

Nu kan de waterstandverhoging  $\eta_0$  worden uitgerekend voor belasting tijdens stormvloed:

$$\eta_0 = \frac{1}{2} ka_{kw}^2 \coth(kh)$$

met:  $\eta_0 =$  verhoging middenwaterstand  
 $a_{kw} =$  halve golfhoogte voor de constructie  
bij volledige reflectie gelijk aan  $H_d$   
 $H_d = 2,2 \times H_s = 2,2 \times 3,60m = 7,92m$   
 $k =$  golfgetal = 0,0344  
 $h =$  waterdiepte voor de kering = 31,60m

Invullen van de waarden levert:  $\eta_0=1,3841\text{m}$

Voor de maximale druk bij de middenwaterstand geldt:

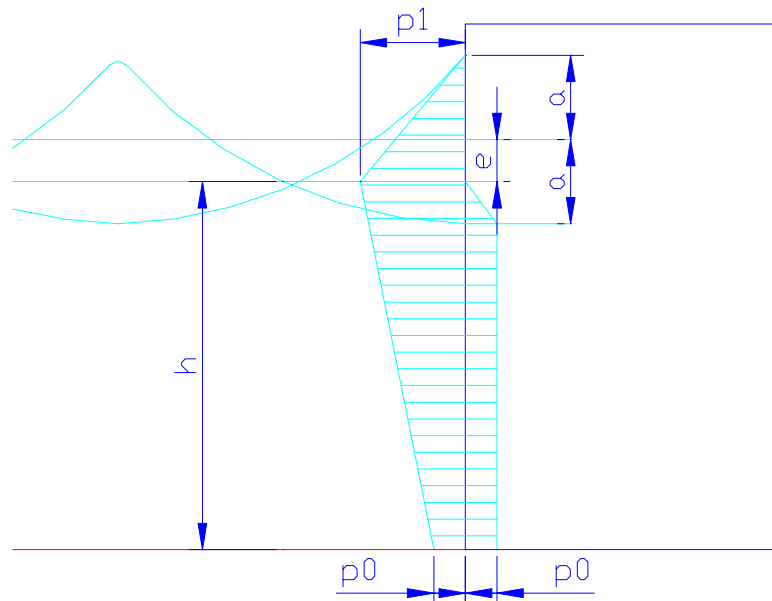
$$p_1 = \rho g (a_{kw} + \eta_0)$$

$$p_1 = 93,8 \text{ kN/m}^2$$

De druk aan de bodem bedraagt:

$$p_0 = \frac{\rho g a_{kw}}{\cosh(kh)}$$

$$p_0 = 48,4 \text{ kN/m}^2$$



Voor de golfbelasting tijdens laagwater geldt een zelfde berekening. Hierbij wordt alleen uitgegaan van een minder hoge golfbelasting. De significante golfhoogte hierbij is die van een gemiddelde storm,  $H_s = 1,5\text{m}$  bij een waterdiepte voor de kering van  $21,65\text{m}$ . In dat geval geldt:

$$\eta_0 = 0,31\text{m}$$

$$p_0 = 23,8 \text{ kN/m}^2$$

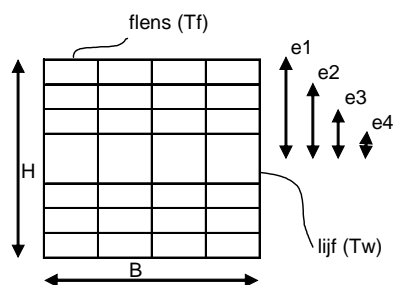
## Bijlage 10 Uitvoer EXCEL-bestanden

Hier volgen de uitkomsten van de ontwerp berekeningen die met behulp van MS Excel zijn uitgevoerd. Achtereenvolgens zullen voor de drie verschillende kokers de berekende spanningen worden getoond voor belastingsituatie 1 (stormvloed) en belastingsituatie 2 (negatief verval).

### B10.1 Koker 1

#### Koker 1

B	8000 mm
H	7700 mm
Tf	150 mm
Tw	150 mm
e1	3775 mm
e2	2775 mm
e3	1775 mm
e4	775 mm



Berekening eigengewicht:	
Staalopp	
MAX	20205000 mm <sup>2</sup>
MIN	10335000 mm <sup>2</sup>
GEM	11322000 mm <sup>2</sup>
Staalvol	
TOT	1,64E+12 mm <sup>3</sup>
Gewicht	
TOT	13134 ton

#### Belasting geval 1: Stormvloed

*In het midden van de overspanning:*

##### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

ly	8,93E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,75E+12 Nmm
Sxx,flens	420,36 N/mm <sup>2</sup>

##### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

lz	3,42E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	320,54 N/mm <sup>2</sup>

*Bij de opleggingen:*

##### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,18E+12 Nmm
Smax	46,48 N/mm <sup>2</sup>

#### Belasting geval 2: Negatief verval

*In het midden van de overspanning:*

##### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

ly	8,93E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,55E+12 Nmm
Sxx,flens	411,81 N/mm <sup>2</sup>

##### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

lz	8,93E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	118,13 N/mm <sup>2</sup>

*Bij de opleggingen:*

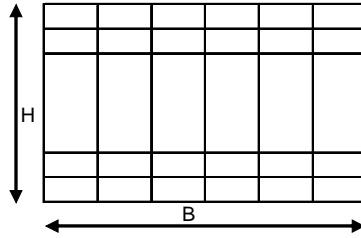
##### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,37E+12 Nmm
Smax	54,17 N/mm <sup>2</sup>

## B10.2 Koker 2

### Koker 2

B	12000 mm
H	7300 mm
Tf	120 mm
Tw	110 mm
e1	3590 mm
e2	2590 mm
e3	1590 mm
e4	0 mm



Berekening eigengewicht:	
Staalopp	
MAX	16781000 mm <sup>2</sup>
MIN	10835000 mm <sup>2</sup>
GEM	11429600 mm <sup>2</sup>
Staalvol	
TOT	1,66E+12 mm <sup>3</sup>
Gewicht	
TOT	13258 ton

### Belasting geval 1: Stormvloed

*In het midden van de overspanning:*

#### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

ly	8,94E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,75E+12 Nmm
Sxx,flens	398,34 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

Iz	6,53E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	251,83 N/mm <sup>2</sup>

*Bij de opleggingen:*

#### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,18E+12 Nmm
Smax	37,74 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in flenzen:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vy	7,56E+07 N	
Sxy,flns	8,75 N/mm <sup>2</sup>	46,49 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vz	2,69E+08 N	
Sxz,lijf	47,86 N/mm <sup>2</sup>	85,60 N/mm <sup>2</sup>

### Belasting geval 2: Negatief verval

*In het midden van de overspanning:*

#### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

ly	8,94E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,55E+12 Nmm
Sxx,flens	390,23 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

Iz	6,53E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	251,83 N/mm <sup>2</sup>

*Bij de opleggingen:*

#### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,37E+12 Nmm
Smax	43,98 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in flenzen:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vy	7,56E+07 N	
Sxy,flns	8,75 N/mm <sup>2</sup>	52,73 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven:

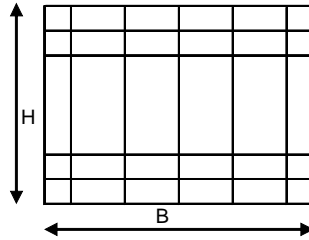
Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vz	2,64E+08 N	
Sxz,lijf	46,89 N/mm <sup>2</sup>	90,87 N/mm <sup>2</sup>



## B10.3 Koker 3

### Koker 3

B	10000 mm
H	7500 mm
Tf	130 mm
Tw	130 mm
e1	3685 mm
e2	2685 mm
e3	1685 mm
e4	0 mm



Berekening eigengewicht:	
Staalopp	
MAX	17145000 mm <sup>2</sup>
MIN	9945000 mm <sup>2</sup>
GEM	10665000 mm <sup>2</sup>
Staalvol	
TOT	1,55E+12 mm <sup>3</sup>
Gewicht	
TOT	12371 ton

### Belasting geval 1: Stormvloed

In het midden van de overspanning:

#### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

lytot	9,33E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,75E+12 Nmm
Sxx,flens	391,89 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

Iz	6,44E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	212,95 N/mm <sup>2</sup>

Bij de opleggingen:

#### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,37E+12 Nmm
Smax	40,14 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in flenzen:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vy	7,56E+07 N	
Sxy,flns	9,69 N/mm <sup>2</sup>	49,83 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vz	2,69E+08 N	
Sxz,lijf	39,42 N/mm <sup>2</sup>	79,56 N/mm <sup>2</sup>

### Belasting geval 2: Negatief verval

In het midden van de overspanning:

#### Maximale spanning in flenzen tgv buigend moment:

lytot	9,33E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	9,55E+12 Nmm
Sxx,flens	383,91 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven tgv buigend moment:

Iz	6,44E+13 mm <sup>4</sup>
Mmax	2,74E+12 Nmm
Sxx,lijf	212,95 N/mm <sup>2</sup>

Bij de opleggingen:

#### Maximale spanning tgv torsie:

Mmax	1,18E+12 Nmm
Smax	34,44 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in flenzen:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vy	7,56E+07 N	
Sxy,flns	9,69 N/mm <sup>2</sup>	44,13 N/mm <sup>2</sup>

#### Maximale spanning in lijven:

Dwarskracht:		Dwarskracht en torsie:
Vz	2,64E+08 N	
Sxz,lijf	38,62 N/mm <sup>2</sup>	73,06 N/mm <sup>2</sup>

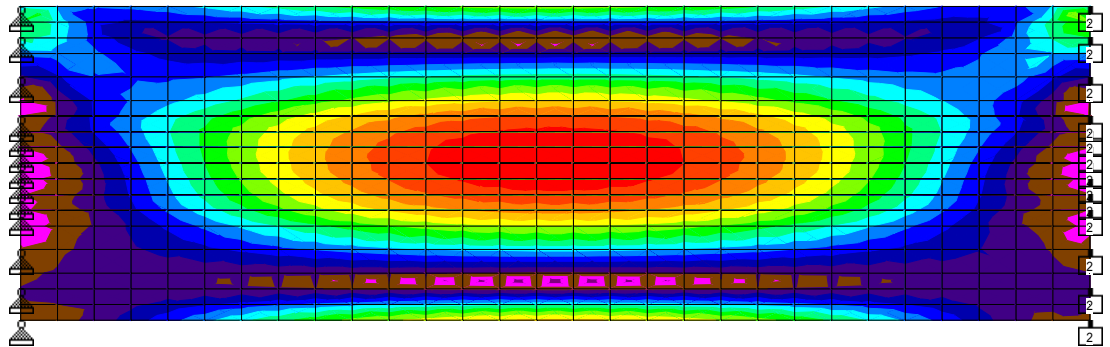
## Bijlage 11 Resultaten plaatsspanningen uit STAADpro, eerste invoer

Hier wordt een overzicht gegeven van de resultaten uit STAADpro waarin de plaatsspanningen zijn weergegeven voor de verschillende belastinggevallen.

### B11.1 Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 1: Stormvloed

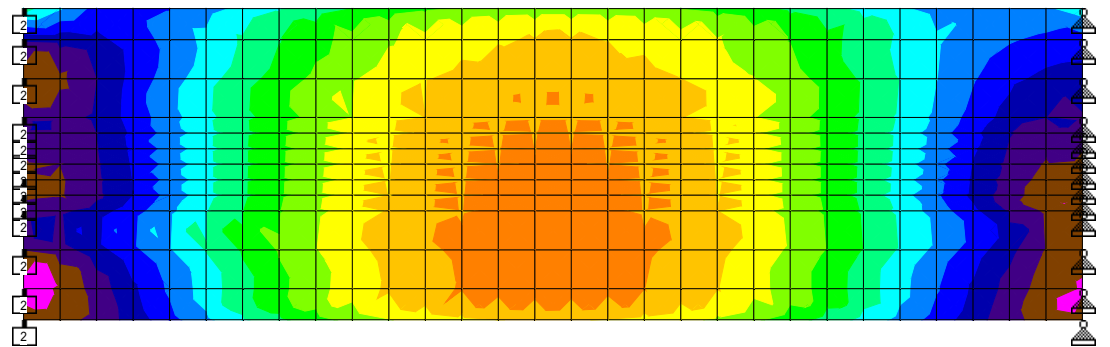
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

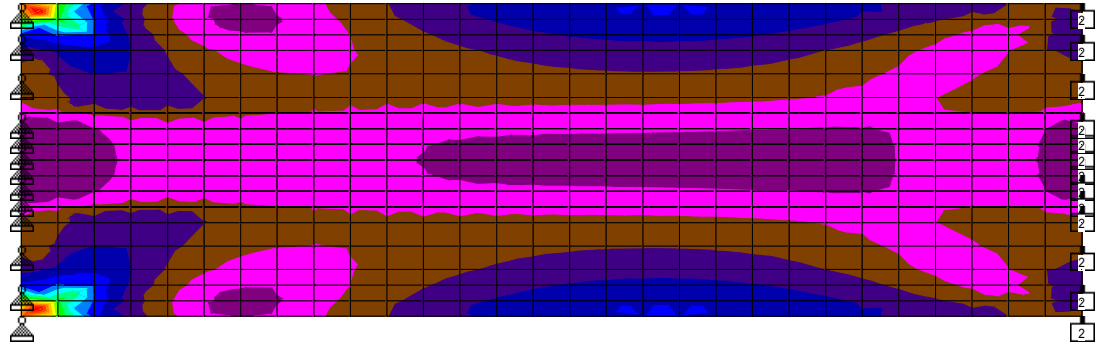
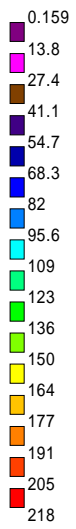


## B11.2

## Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 2: y-eigen:

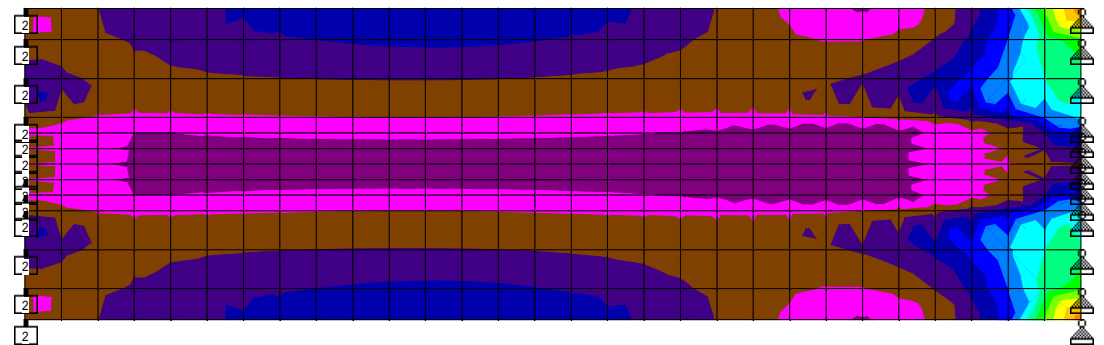
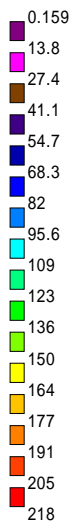
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

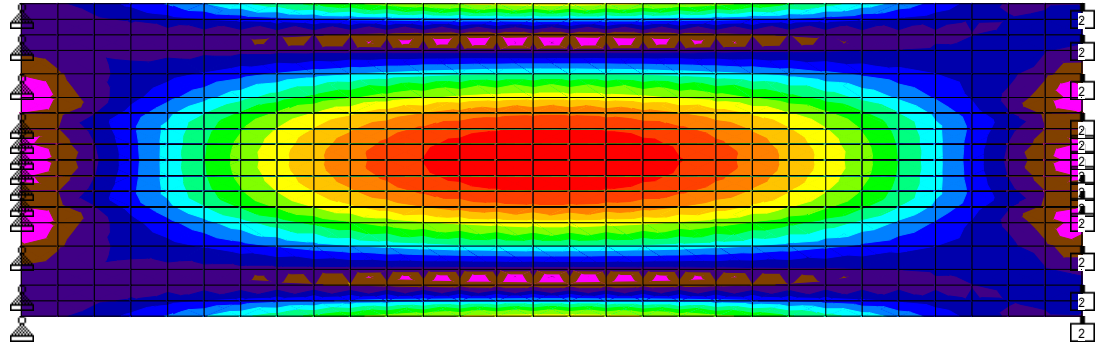
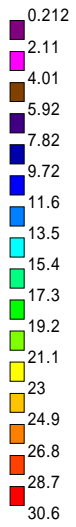


### B11.3

### Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 3: z-eigen:

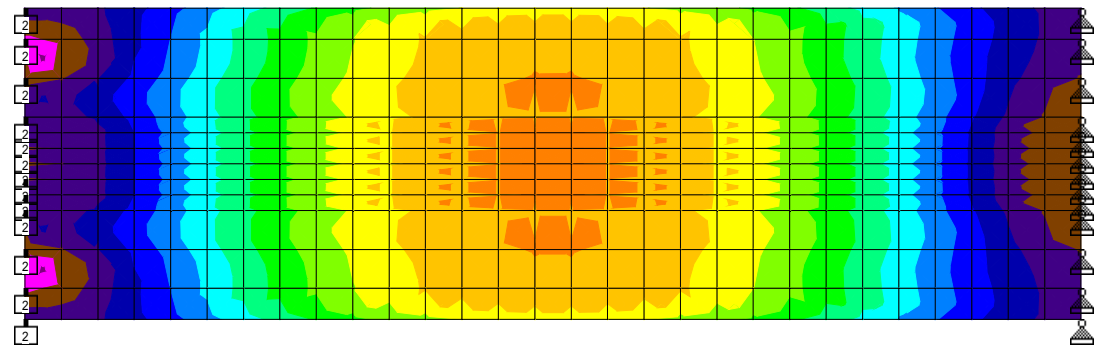
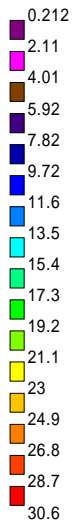
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

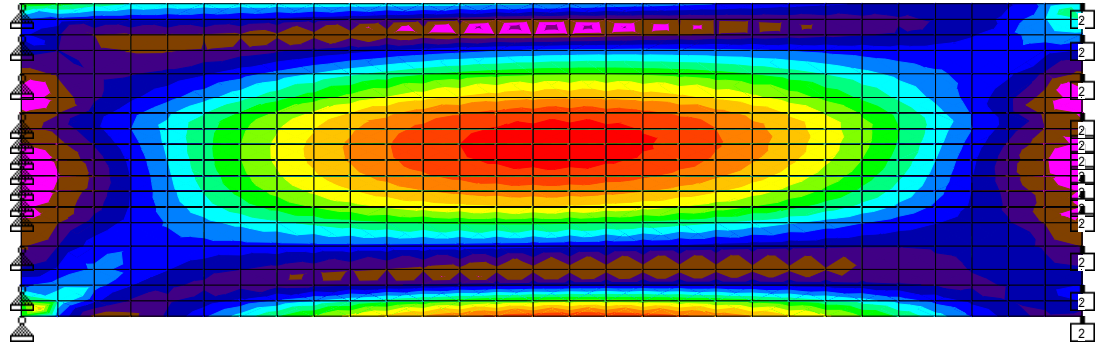


## B11.4

## Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 4: combi:

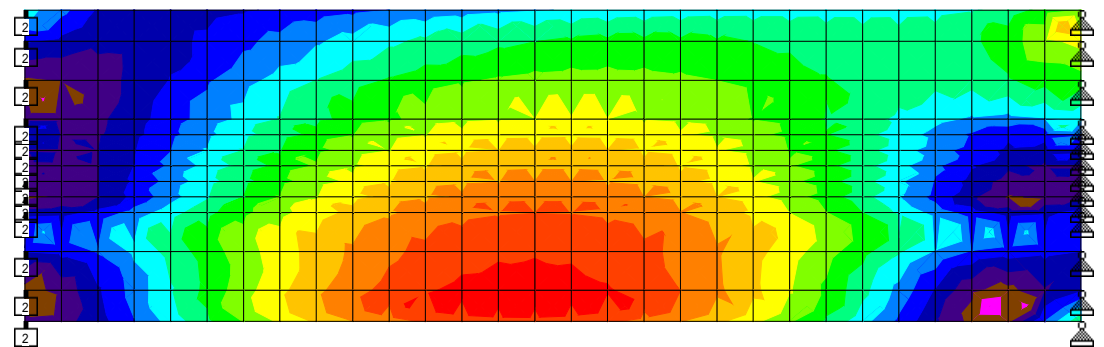
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

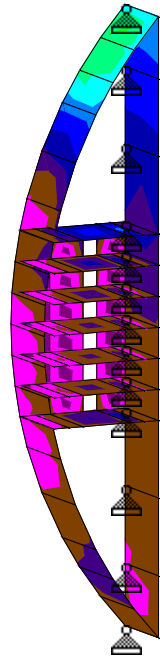
Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



## B11.5

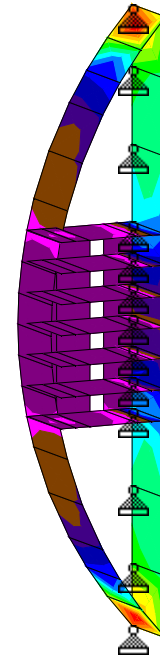
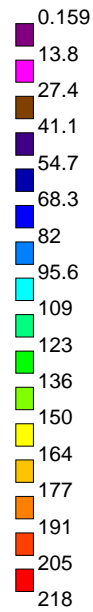
## Elementen bij opleggingen (dwarskracht en torsie):

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



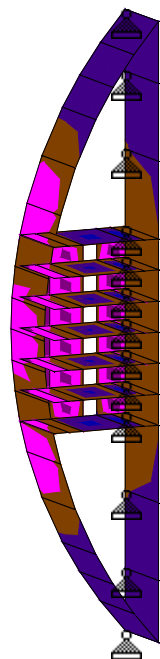
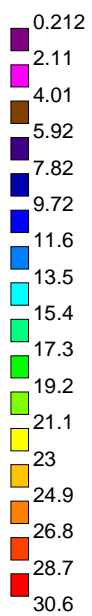
1: stormvloed

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



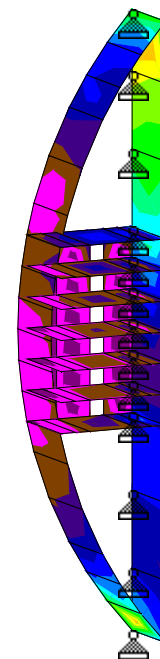
2: eigen-y

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



3: eigen-z

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

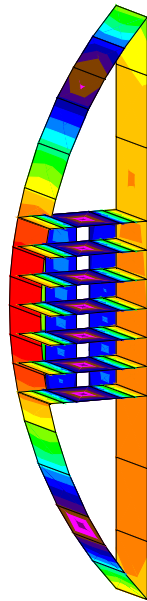


4: combinatie

## B11.6

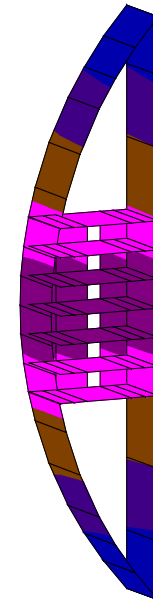
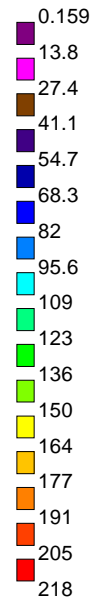
## Elementen in midden van constructie (buiging):

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



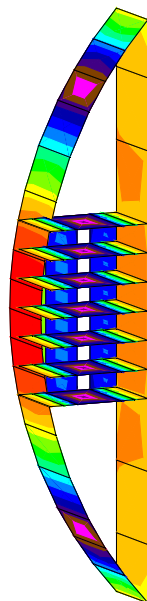
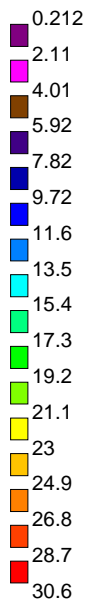
1: stormvloed

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



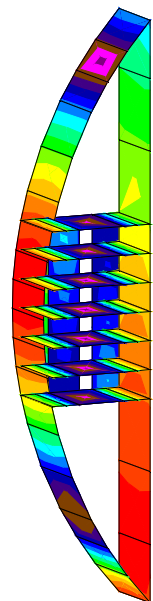
2: eigen-y

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



3: eigen-z

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



4: combinatie

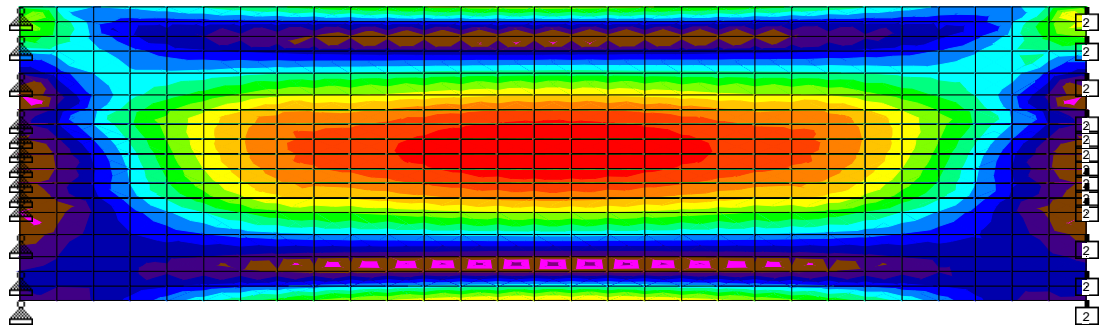
## Bijlage 12 Resultaten plaatsspanningen uit STAADpro, derde invoer

Hier wordt een overzicht gegeven van de resultaten uit STAADpro waarin de plaatsspanningen zijn weergegeven voor de verschillende belastinggevallen.

### B12.1 Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 1: Stormvloed

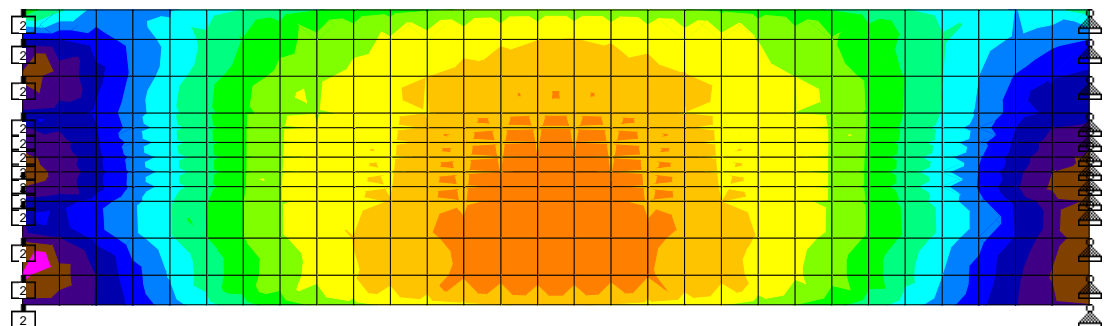
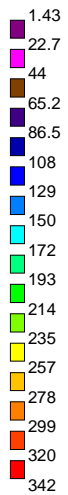
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



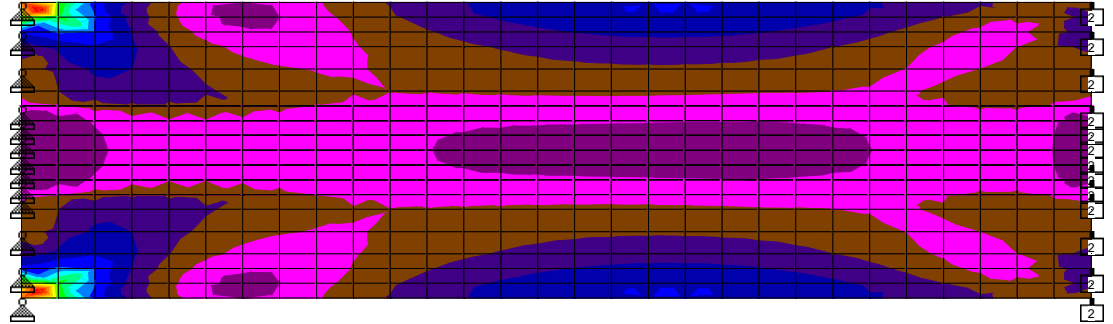
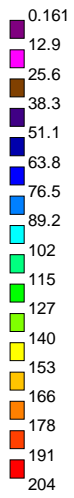


## B12.2

## Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 2: y-eigen:

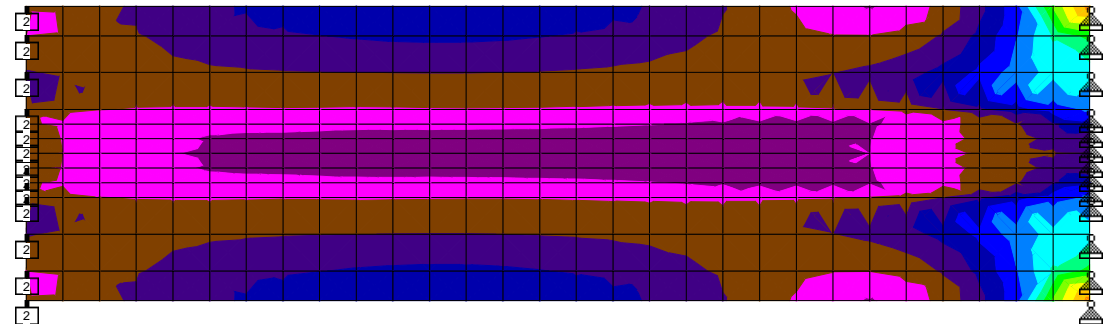
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

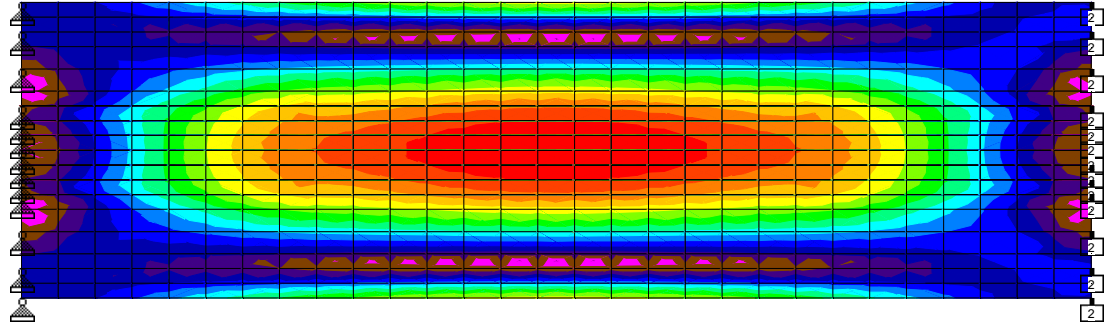
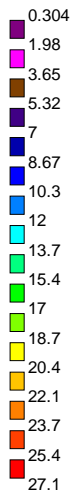


### B12.3

### Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 3: z-eigen:

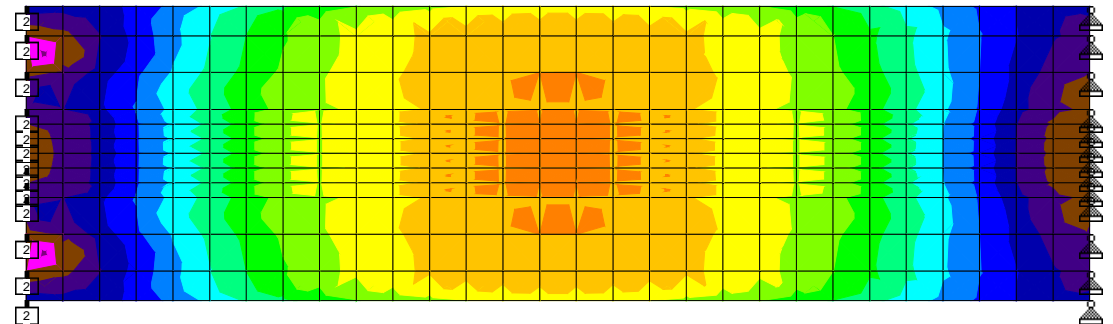
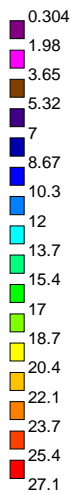
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>

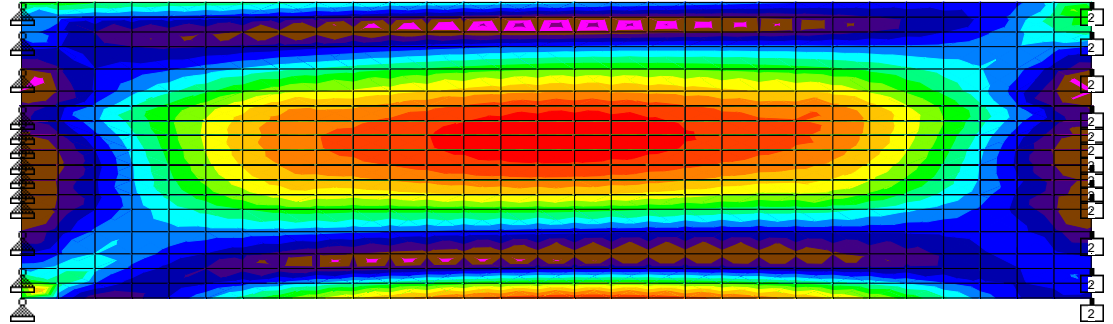


## B12.4

## Plaatsspanningen ten gevolge van belasting 4: combi:

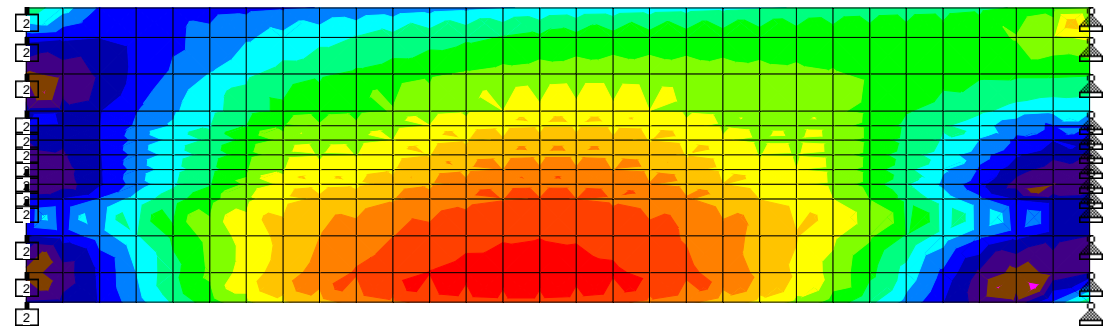
Voor:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



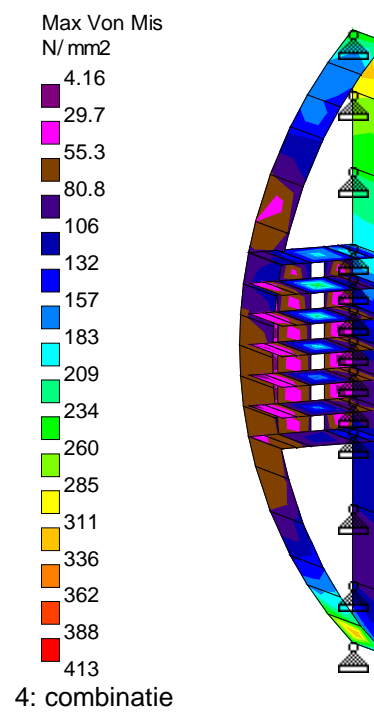
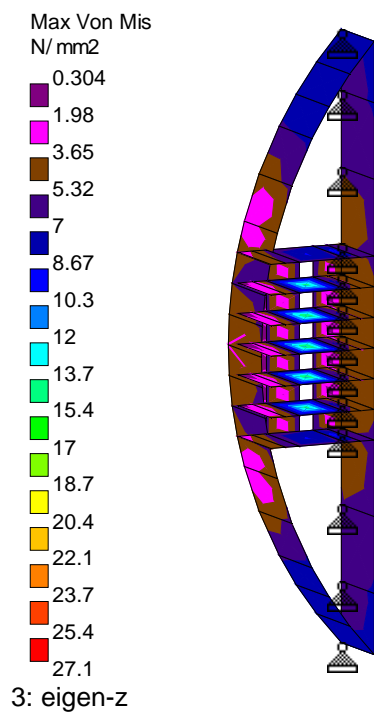
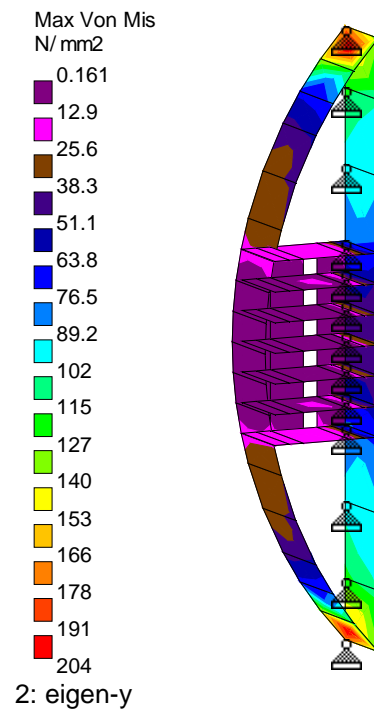
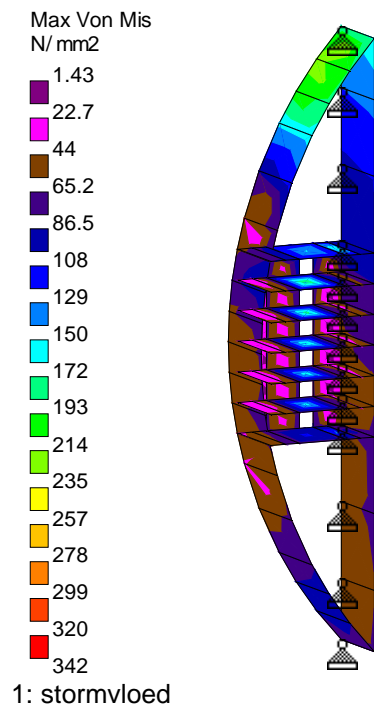
Achter:

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



## B12.5

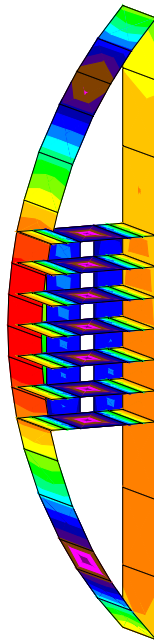
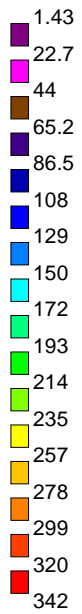
## Elementen bij opleggingen (dwarskracht en torsie):



## B12.6

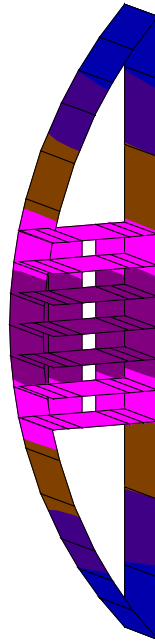
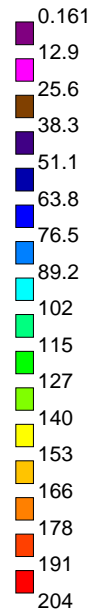
## Elementen in midden van constructie (buiging):

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



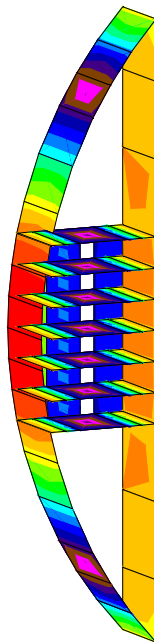
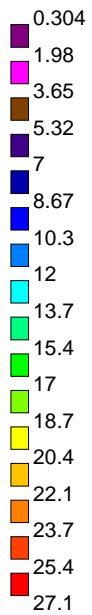
1: stormvloed

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



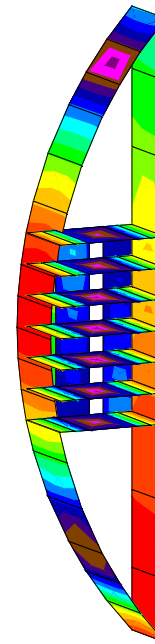
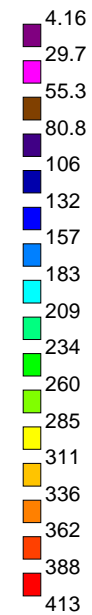
2: eigen-y

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



3: eigen-z

Max Von Mis  
N/mm<sup>2</sup>



4: combinatie

