

Kennisbasis stormvloedkeringen

Overzicht kennis en ervaring Deltares + vooruitblik in relatie tot klimaatverandering



Kennisbasis stormvloedkeringen

Overzicht kennis en ervaring Deltares + vooruitblik in relatie tot klimaatverandering

Kennisbasis stormvloedkeringen

Overzicht kennis en ervaring Deltares + vooruitblik in relatie tot klimaatverandering

Opdrachtgever	SO-2021
Contactpersoon	Coördinator Deltares-programma 'Replacement and Renovation of infrastructure' ('Vervangingsopgave')
Referenties	Onderzoeksplan 2021 Deltares-Programma 'Replacement and Renovation of infrastructure'
Trefwoorden	Stormvloedkering, Oosterschelde kering, Haringvlietsluizen, Hartelkering, Maeslantkering, Hollandsche IJsselkering, Algerakering, Balgkering Rampsol, MOSE barrier Venice, St. Petersburg, schaalmodelproeven

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	16-02-2022
Projectnummer	11206882-015
Document ID	11206882-015-HYE-0001
Pagina's	133
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	M.P.C. de Jong	Y.B. Broekema
	H.I. dos Santos Nogueira	E.S. van Baaren

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1 – oktober 2021	M.P.C. de Jong	Kruislings binnen team		Concept
0.2 - 16 februari 2022	M.P.C. de Jong <i>mg</i>	Kruislings binnen team	B. van Vossen <i>Bv</i>	Definitief

Samenvatting

In dit rapport is een overzicht gemaakt van de betrokkenheid van Deltares (en voorgangers) bij de ontwikkeling, het ontwerp en de bouw van de grote beweegbare stormvloedkeringen in Nederland en internationaal. Die ervaring beslaat vele decennia. Haalbaarheids- en ontwerpstudies in Nederland zijn uitgevoerd vanaf de eerste grote kering (Hollandsche IJsselkering, begin jaren '50) tot aan de meest recentelijk in gebruik genomen kering (Ramspolkering, 2002). Projecten zijn door Deltares uitgevoerd vanaf de allereerste verkenningen tot aan projecten gekoppeld aan onderhoudsactiviteiten die ook nu nog doorlopen.

Het overzicht is aangemaakt als een samenvatting van 'meta-data'. Er is niet gestreefd naar volledige weergave van alle details. Met de hoeveelheid aan projecten in het archief van Deltares is dat ook niet praktisch haalbaar. Dit document is vooral bedoeld om een overzicht te geven van welke keringsstypen en achterliggende onderwerpen er beschouwd zijn en met welke tools en methoden. Daarnaast is getracht om de ontwikkeling van (voortschrijdende) inzichten en optimalisatie van de keringsontwerpen in de loop van het ontwikkeltraject samen te vatten. Daarbij worden ook onderzoeken en alternatieven beschreven die om verschillende redenen uiteindelijk niet onderdeel zijn geworden van het eindontwerp van de kerings. Ook die redenen en achterliggende kennis zijn nuttig, zeker als op termijn de kerings aangepast of vervangen moeten gaan worden. Indien de oorspronkelijke redenen af te zien van specifieke ontwerukeuzes nog opgaan, dan hoeven die aspecten niet opnieuw beschouwd te worden.

Elke grote kering waar Deltares bij betrokken is geweest wordt in dit document in een apart hoofdstuk beschreven. Daarbij wordt een beknopte beschrijving gegeven van de beschouwde kering om vervolgens de in het verleden uitgevoerde onderzoeken en adviesprojecten samen te vatten. Daarnaast wordt voor elke kering een interpretatie gemaakt van de aanpak van destijds gezien vanuit de huidige beschikbare kennis en (reken-)methoden. Vervolgens wordt een vooruitblik gegeven van toekomstige aandachtspunten naar aanleiding van voor- en nadelen van het ingezette keringstype en naar aanleiding van aanpassingen in randvoorwaarden. Die randvoorwaarden veranderen door toenemende zeespiegelstijging, maar ook door aanscherping van normen die gesteld worden aan het overstromingsrisico van de achterliggende beschermde gebieden.

Na alle grote kerings op die manier uitgewerkt te hebben worden in een synthese hoofdstuk de algemene inzichten en overkoepelende aspecten bijeengebracht. Het onderwerp zeespiegelstijging wordt daarbij vanwege de grote relevantie in het bijzonder uitgelicht.

Het rapport eindigt met een vooruitblik naar kennisvragen en kennisontwikkelingen die benodigd zullen zijn in de aankomende jaren en op langere termijn. Op die manier vormt deze rapportage een stap in de ontwikkeling en verdieping van de kennisbasis stormvloedkeringen bij Deltares. Deltares zal die kennis inzetten bij de kennispartnerrol voor RWS op dit uitdagende onderwerp, in kennisnetwerken zoals I-STORM en bij internationale stormvloedkeringsprojecten in samenwerking met marktpartijen.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	8
1.1 Projectcontext	8
1.2 Ambitie voor de komende 4 jaar	9
1.3 Onderzoekstaak SVK 2021	11
1.4 Aanpak activiteiten 2021	12
2 Kennisvragen en kennisbronnen	14
2.1 Relevante kennisvragen	14
2.1.1 Kennisborging	14
2.1.2 Impact van aanpassingen in het watersysteem	14
2.1.3 Afwegingen voor Beheer en Onderhoud en Vervanging en Renovatie	15
2.1.4 Impact van klimaatverandering en van veranderende normen	15
2.1.5 Lange-termijn inrichting van de delta	16
2.1.6 HWBP en BOI	17
2.1.7 Internationale vraagstukken en I-STORM	17
2.1.8 Vervanging van beslis- en besturingssystemen	17
2.2 Doelstelling en afbakening onderzoek	18
2.2.1 Doel van de SO-taak in 2021	18
2.2.2 Afbakening beschouwde informatiebronnen	18
2.3 Identificatie van relevante kennisbronnen	19
3 Oosterscheldekering	20
3.1 Hoofdkenmerken kering	20
3.2 Functies van de kering	22
3.3 Kennisbasis Deltares	23
3.3.1 Kennisbasis opgebouwd tijdens de ontwerpfase	24
3.3.2 Kennisbasis opgebouwd tijdens de operationele fase	27
3.3.3 Recente studies	27
3.4 Grootste technische inzichten en aandachtspunten	28
3.4.1 Systeemschaal (Oosterscheldebekken)	28
3.4.2 Middelgrote schaal	30
3.4.3 Kleine schaal	33
3.4.4 Randvoorwaarden	37
3.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennismaken	38
4 Haringvlietsluizen	39
4.1 Hoofdkenmerken kering	39
4.2 Functies van de kering	41
4.3 Kennisbasis Deltares	41
4.3.1 Kennisbasis opgebouwd tijdens de ontwerpfase	41

4.3.2	Kennisbasis opgebouwd na ingebruikname	42
4.4	Grootste technische aandachtspunten	43
4.4.1	Waterbouwkundige aspecten	43
4.4.2	Natuurwaarde	46
4.5	Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten	47
5	Hartelkering	48
5.1	Hoofdkenmerken kering	48
5.2	Functies van de kering	50
5.3	Kennisbasis Deltares	50
5.3.1	Overzicht eerdere studies	50
5.3.2	Uitwerking en samenvatting voorgaande studies	50
5.4	Grootste technische aandachtspunten	55
5.5	Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten	55
6	Maeslantkering	56
6.1	Hoofdkenmerken kering	56
6.1.1	Algemeen	56
6.1.2	Sectordeuren	58
6.1.3	De kerende wanden	58
6.1.4	Beweging van de sectordeuren	59
6.1.5	Negatief verval en seiches	61
6.2	Ontwerpalternatieven	63
6.3	Functies van de kering	65
6.4	Kennisbasis Deltares	65
6.5	Grootste technische aandachtspunten	70
6.6	Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten	70
7	Hollandsche IJsselkering	72
7.1	Hoofdkenmerken kering	72
7.2	Functies van de kering	73
7.3	Kennisbasis Deltares	73
7.3.1	Overzicht eerdere studies	73
7.3.2	Uitwerking en samenvatting voorgaande studies	74
7.4	Grootste technische aandachtspunten	77
7.5	Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten	79
8	Ramspolkering	80
8.1	Hoofdkenmerken kering	80
8.2	Functies van de kering	83
8.3	Kennisbasis Deltares	83
8.3.1	Overzicht eerdere studies	83
8.3.2	Uitwerking en samenvatting voorgaande studies	84

8.4	Grootste technische aandachtspunten	91
8.5	Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten	92
9	Venice barrier (MOSE)	93
9.1	Main characteristics	93
9.2	Functionality	95
9.3	Deltares knowledge base	95
9.3.1	Summary of previous studies	96
9.4	Main technical points of attention	101
9.5	Past and present knowledge applied to future challenges of the barrier	101
10	St. Petersburg barrier	103
10.1	Main characteristics	103
10.2	Functionality	104
10.3	Deltares knowledge base	105
10.4	Main technical points of attention	108
10.5	Past and present knowledge applied to the future	109
11	Overige grote keringen en keringsplannen	110
11.1	Boston, Massachusetts, USA	110
11.2	Galveston, Texas, USA	112
11.3	Long Island, New York, USA	113
11.4	Denmark	114
12	Synthese, conclusies en bredere context	116
12.1	Synthese en conclusies	116
12.2	Bredere context en vooruitblik inzet kennis SVKs	117
12.2.1	Impact van aanpassingen in het watersysteem op werking van SVKs	117
12.2.2	Afwegingen voor BenO en VenR SVKs	117
12.2.3	Impact van klimaatverandering en veranderende normen – drivers voor VenR	118
12.2.3.1	Verzamelde kennisvragen/kennis-ontwikkelkansen	118
12.2.3.2	Oorspronkelijke ontwerpaannames voor zeespiegelstijging	118
12.2.4	Redesign the delta	120
12.2.5	Beoordeling (BOI), HWBP / hoogwaterbescherming	120
12.2.6	Vernieuwen van beslis- en besturingssystemen	121
12.2.7	Nederlandse waterbouwkundige kennis in het buitenland	121
12.3	Bredere context en aansluiting bij kennisagenda's	121
12.3.1	Kennisstrategie SVK van RWS (2018)	121
12.3.2	Kennisambities I-STORM	124
12.3.3	Toetsingswerkzaamheden RWS	124
Referenties		125

1 Inleiding

1.1 Projectcontext

Renoveren en vervangen van de grote stormvloedkeringen (SVKs) in Nederland zal op termijn noodzakelijk zijn. Doen we dat niet op tijd, dan ontstaan onacceptabele risico's voor het achterland. Maar welke rol speelt een SVK – eventueel in samenhang met andere objecten – in het systeem van primaire waterkeringen en in het garanderen van de veiligheid van het achterland? Aan welke andere functies moeten zij voldoen, nu en in de toekomst? En wat is de invloed van zeespiegelstijging? Om dit soort vragen in de toekomst te kunnen beantwoorden moet het hele systeem beschouwd worden, met SVKs als bijzondere elementen daarin.

SVKs zijn vaak unieke objecten. Elk object is een ‘one-of-a-kind’ en is vaak uitzonderlijk voor wat betreft werking, complexiteit en grootte. SVKs bestaan uit meerdere componenten en (bewegende) keringsdelen, worden in-frequent ingezet en indien zij niet goed functioneren heeft dat grote gevolgen. Niet-juist operationeel functioneren van een kunstwerk kan daarbij bijvoorbeeld betekenen: onbedoeld niet sluiten of niet meer openen na sluiten, maar ook onnodig sluiten. Dat maakt het functioneren van SVKs cruciaal en de aan beweegbare keringen gerelateerde kennis zeer waardevol en essentieel, zowel nu als in de toekomst.

Het bereiken van de technische levensduur, maar ook als gevolg van veranderingen in vereiste functionaliteit en ontwikkelingen in hydraulische belastingen, zal op termijn betekenen dat de grote Nederlandse SVKs vervangen moeten gaan worden. Maar vervangen we te vroeg, dan besteden we onnodig veel geld. En mogelijk kunnen de bestaande keringen aangepast worden, anders ingezet worden of elders in het systeem aangevuld worden om zo hun functionele levensduur te verlengen. En als we uiteindelijk een SVK toch moeten vervangen, hoe kunnen we die dan zodanig (adaptief) ontwerpen dat het nieuwe ontwerp zo lang mogelijk blijft voldoen aan veranderende eisen en wensen van de (onzekere) toekomst?

Dit vraagt om:

- Inzicht in de *technische* levensduur van SVKs; wellicht is die voor een aantal componenten (zoals de civiele delen) groter dan we denken. Maar daarvoor hebben we detailkennis nodig van de SVK. Kennis van vroeger, bijvoorbeeld achterliggende ontwerpkeuzes, en kennis van nu. Kennis van gerelateerde (hydrodynamische) effecten maar mogelijk ook van beheer en onderhoud en van de impact op SVKs van eventuele calamiteiten.
- Inzicht in de *functionele* levensduur van de SVKs en in de bijdrage die zij nu en in de toekomst hebben aan de veiligheid van het achterland. Dat vraagt ook om goede representatie van de SVK in de rekenmodellen; ook bij extreme situaties. Ook hiervoor hebben we toegankelijke en inzetbare achtergrondkennis nodig van de SVKs. Kennis van vroeger (inclusief ontwerp- en prestatie-eisen van destijds), van nu en van toekomstige ontwikkelingen.
- Ideeën voor de lange termijn voor het aanpassen van (de inzet van) SVKs en voor ontwerpen ten bate van renovatie of vervanging. Opnieuw een aspect waarvoor kennis en inzichten van ten tijde van het ontwerp en de bouw van de SVKs en nieuwe kennis benodigd is. De uitgebreide kennis rondom de ontwikkeling en bouw van een kunstwerk dient daarbij gecombineerd te worden met informatie die toen nog niet beschikbaar was, waaronder de laatste inzichten in de impact van klimaatverandering en in de andere functies die de kering vervult.

Achterliggende (technische) kennis van SVKs is relevant voor het inzichtelijk maken van de veiligheid van het achterland (HoogWaterBeschermingsProgramma, HWBP), voor BOI (Beoordeel- en OntwerpInstrumentarium, voorheen WBI), in het Vervanging en Renovatie (VenR) proces voor SVKs, bij de lange-termijn inrichting van Nederland (bv Kennisprogramma Zeespiegelstijging) en voor het op termijn adaptief ontwerpen voor het vervangen van SVKs.

Ook heeft die kennis een link met de kennisstrategie SVKs van RWS (2018). Uitgangspunt van die kennisstrategie van RWS is dat structurele investeringen in kennisontwikkeling en -borging binnen het werkveld stormvloedkeringen volgens RWS loont. In die kennisagenda wordt voor Deltares onder andere als relevante kennisaspecten genoemd (voor midden- en lange termijn):

1. Probabilistische modellen van het watersysteem;
2. Waterloopkundige modellen van het watersysteem (zowel numeriek als fysiek schaalmodellen);
3. Modellen met objectbeschrijving en de weergave van de werking van de SVK in modellen, waaronder bijvoorbeeld vul- en ledigsystemen (Maeslantkering en Balgkering Ramspol).

Bij bovenstaande opgaven is de interactie tussen een SVK en het watersysteem relevant (waterloopkundig specialisme). Dit is een combinatie van kennis van het (functioneren van het) object en van het gedrag van het (lokale) watersysteem. Die kennis is beschikbaar binnen Deltares, deels vanuit eerdere projecten maar ook vanwege recente projecten die Deltares uitgevoerd heeft voor de Maeslantkering en de Ramspolkering. Naast de meer ad-hoc inzet van onze kennis in die adviesprojecten zal het goed zijn om onze achterliggende kennis over SVKs meer gestructureerd in te richten en verder te ontwikkelen. Recent kennis en ervaringen worden daarbij gecombineerd met het hernieuwd opnemen van informatie, kennis en inzichten uit de oorspronkelijke projecten door (voorgangers van) Deltares ten tijde van het ontwerp van die bijzondere kunstwerken. Bij het opnemen van bestaande, historische kennis zullen oudere inzichten, werkwijzen en resultaten beschouwd worden in de context van de ervaring met soortgelijke projecten sindsdien. Daarbij zullen ook externe ontwikkelingen sinds de oorspronkelijke studies, zoals inzichten rondom (versnelde) zeespiegelstijging en degradatie van materialen, meegenomen worden.

De op die wijze verdiepte en bestendige kennis op het vlak van SVKs is vervolgens inzetbaar voor Nederland, maar zal ook een belangrijke pijler zijn van de inzet van Nederlandse waterbouwkundige kennis in het buitenland, bijvoorbeeld voor kennisdeling via het kennisnetwerk voor grote beweegbare stormvloedkeringen, ISTORM, waarin RWS en Deltares actieve leden zijn en gezamenlijke initiatieven uitwerken. Daarnaast zijn er op dit moment bijvoorbeeld in de Verenigde Staten op meerdere locaties concrete plannen voor grote beweegbare stormvloedkeringen (Galveston/Houston, Boston en New York zijn als voorbeelden kort samengevat in Hoofdstuk 11).

1.2 Ambitie voor de komende 4 jaar

Deltares, destijds vooral de onderdelen Delft Hydraulics en Grondmechanica Delft, heeft in het verleden veel onderzoeks- en adviesprojecten uitgevoerd naar alle grote stormvloedkeringen van Nederland, onder andere Oosterscheldekering, Maeslantkering en Balgkering Ramspol. Ten tijde van het ontwerp en bouw van die keringen was er vergrote en gefocuste aandacht voor hydrodynamische en geotechnische vraagstukken rondom stormvloedkeringen, maar ook voor aspecten gelinkt aan (operationele) inzet van die keringen (bijvoorbeeld dynamisch beweeggedrag Maeslantkering). Meerdere series van projecten zijn uitgevoerd op basis van uitgebreide en zeer gedegen schaalmodellen in het lab van Deltares. De daarin ontwikkelde project-specifieke kennis is voor een deel ook geschikt voor project-overstijgende inzet (via literatuur, richtlijnen en normering). In latere jaren is er door Deltares bijgedragen aan andere grote internationale keringsprojecten, waaronder de SVK in Sint Petersburg en de SVK van Venetië (MOSE).

Een deel van die onderzoeken en adviesprojecten is uitgevoerd samen met, en in opdracht van, bouwconsortia en andere tijdelijke samenwerkingsverbanden. Na oplevering van de SVK worden die consortia ontbonden. De kennisbasis van Deltares is een continue factor die, vanuit de ambitie van Deltares als kennispartner, beschikbaar zal moeten blijven voor RWS.

Enige jaren geleden is voor de MER ten bate van de verdieping Nieuwe Waterweg (2015/2016) eerder literatuur uit de Deltares-archieven ingezet als achtergrondinformatie over de Maeslantkering. Ook naar aanleiding van de recente adviesprojecten rondom de Maeslantkering (2016-heden) en voor de Balgkering Ramspol (2019-heden) is gebruik gemaakt van informatie uit archiefbronnen. Maar er is veel meer beschikbaar in de Deltares-archieven.

RWS heeft in het verleden meermaals aangegeven dat onder andere de kennisbasis van Deltares en de continuïteit in beschikbaarheid van kennis en ervaring door hen als grote meerwaarde van Deltares wordt gezien. Dit document draagt bij aan het vastleggen, structureren en verder uitwerken van die kennisbasis. Niet alleen zal kennis en ervaring samengevat worden, ook zal de toepasbaarheid van die kennis in de huidige context en manier van werken worden beschouwd (bijvoorbeeld in relatie tot andere normeringen¹, laatste inzichten van klimaatverandering).

Op dit moment wordt de groep van Deltares-medewerkers die werken aan stormvloedkeringen als *hydraulic structure* langzaam groter (onder anderen: Helena dos Santos Nogueira, David Kerkhoven, Esther van Baaren, Yorick Broekema, Martijn de Jong, Otto Weiler). Daaromheen zit een veel grotere schil met collega's die werken aan onderwerpen die ook een relatie hebben met stormvloedkeringen, of die ook voor stormvloedkeringen inzetbaar zijn. Daaronder valt ook de expertise op het vlak van bijvoorbeeld werktuigen en detailonderdelen van de keringen (pompen, kleppen, leidingen, damwanden, bodembescherming), van statistiek en hydraulische randvoorwaarden, van technische, functionele en economische levensduur in een VenR afwegingskader. Ook kennis over software, inclusief faalkansen en testmethoden worden steeds belangrijker. Het op moment van schrijven lopende project voor de update van het BOS-systeem van de Maeslantkering (2020-2021, projectleiders: J. Stout en K. Berends) is een voorbeeld waarin software-technische en hydrodynamisch inhoudelijke kennis bijeenkomen. Ook voor andere objecttypen zoals sluizen en stuwen wordt kennis ontwikkeld die voor de SVKs van belang kan zijn.

Door meerdere collega's uit de kerngroep SVKs in deze taak aan te sluiten wordt er direct gezorgd voor kennisverankering op meerdere ervaringsniveaus. Hiermee zijn de interne doelen van Deltares voor de komende 4 jaar in relatie tot SVKs:

- Vanuit kennis over SVKs doelgericht bijdragen aan opgaven, programma's en projecten als HWBP, BOI, WBI, vernieuwen van beslis- en besturingssystemen van SVKs, VenR, effecten van (extreme) zeespiegelstijging;
- Systemen en objecten verbinden in deze opgaven en programma's, waarbij een grote beweegbare kering – als object – een cruciale rol heeft in het vervullen van functies in het systeem;
- Met kennis en kunde bijdragen aan de kennisborging over SVKs in Nederland met 'klassiek-fundamentele' en nieuwe kennis;
- Kennispositie Deltares vergroten: groep collega's met kennis van en werkervaring met SVKs vergroten (aansluiten jonge collega's);
- De logische kennispartner voor SVKs voor RWS blijven;

¹ Destijds waren ontwikkeling, ontwerp en validatie veelal gericht op overschrijdingskansen, terwijl we nu veelal naar systemen kijken vanuit overstromingskansen.

- Kennispositie buitenland uitbouwen: nieuwe internationale projecten verwerven, bij voorkeur in de rol van onderaannemer van grote marktpartijen zoals (inter)nationale advies- en ingenieursbureaus.

Op dit moment is dit onderzoeksproject onderdeel van, en verankert in, het Deltares-programma ‘Infrastructure Renewal and Renovation’ (Vervangingsopgave’). Daarnaast wordt op dit moment aansluiting verkend bij het Deltares-programma ‘Flood Defences’ (‘Hoogwaterbescherming’).

1.3 Onderzoekstaak SVK 2021

In dit eerste jaar sluiten we aan bij lopende projecten, stellen we de kennisvragen voor de diverse opgaven vast, starten we gericht met het verzamelen en analyseren van data en informatie om deze vervolgens te koppelen aan het belang en relevantie voor de opgaven. De activiteiten onder de in deze rapportage beschreven SO-taak voor 2021 bestaan uit:

1. Inventarisatie kennisvragen (Hoofdstuk 2), onder andere naar aanleiding van de Kennisstrategie Stormvloedkeringen van RWS (2018), op basis van de Themasessie virtuele testomgevingen voor SVKs (26 maart 2021) en met behulp van aanvullende interviews. Vragen die daarbij aan bod kunnen komen zijn onder andere:
 - a. Hoe en op welke onderwerpen zou Deltares kunnen bijdragen en in welke rol (kennismakelaar?)?
 - b. Welke vragen van morgen i.r.t. stormvloedkeringen bij o.a. RWS (mogelijk ook waterschappen²), kunnen wij met de kennisbasis van vandaag niet beantwoorden?
 - c. Welke zorgen zijn er i.r.t. huidige en toekomstig beheer en onderhoud van stormvloedkeringen en welke kennisvragen horen daarbij?
2. Vaststellen en afbakenen van onderzoeksdoelstellingen (Hoofdstuk 2), inclusief vaststellen welke informatie kan bijdragen aan welke kennisvragen (bijvoorbeeld geschiktheid onder extreemere condities dan oorspronkelijk voorzien, effectiviteit van SVKs bij gedeeltelijk falen).
3. Identificeren en ontsluiten van relevante informatiebronnen naar aanleiding van projecten uit het verleden (geschreven documenten, personen) en van huidige (kennisintensieve) projecten (Hoofdstuk 2).
4. Doornemen van literatuur + verzamelen technische inzichten en cruciale aspecten voor elk van de grote SVKs (Hoofdstukken 3 – 11).
5. Waar mogelijk raadplegen van projectleiders en experts van gearchiveerde en huidige projecten en studies voor nadere achtergrondinformatie (per kering te verwerken in betreffende hoofdstuk).
6. Synthese van de resultaten (Hoofdstuk 12): wat heeft het opgeleverd? Wat zou gedaan moeten worden om verdere toepassing voor de diverse opgaven te realiseren? Zijn hier aanvullende activiteiten nodig om objectkennis te vertalen naar systeem? Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld:
 - a. samenvattend overzicht van de gevonden informatie over de grote SVKs in Nederland (beschreven in Hoofdstuk 12) in combinatie met specifieke eigenschappen, complexiteiten, technische uitdagingen, belangrijkste kering-specificke kennisgaten
 - b. samenvatting van cruciale kennis / uitgangspunten / ontwerp- en modelkeuzes / hoe is omgegaan met zeespiegelstijging (hoe lang kunnen we nog door met de huidige keringen naar aanleiding van de aannames en ontwerpinzichten van destijds?)
 - c. verwijzingen naar welke informatie waar te vinden is
 - d. vooruitblik op relevantie van informatie op aankomende vraagstukken rondom (vervanging van) stormvloedkeringen (aanpak destijds vs. nu, link met doelstellingen/aanpak voor vervanging?)

² Denk hierbij ook aan kunstwerken die op die moment nog niet explicet de rol van SVK hebben maar wel een kerende functie aan de kust hebben, bijvoorbeeld de spuisluizen bij Lauwersoog.

- e. vooruitblik op de bijdrage van een SVK aan de veiligheid van het achterland
 - f. verzamelen geschreven informatie en opnemen in rapport en/of PowerPoint.
7. Voortuitblikkende discussiesessie (voorzien eerste kwartaal 2022) met samenvattende presentatie en afstemming met verschillende stakeholders. Hierbij zullen mogelijke kennis- en ervaringshiaten worden geïdentificeerd. Die kunnen op die manier een aanvulling zijn op de Kennisagenda Stormvloedkeringen van RWS, de ambities van ISTORM en mogelijke verdere toetsingswerkzaamheden voor RWS-ontwerpt. Ook zal dit verder richtinggevend kunnen zijn voor de prioritering van strategisch onderzoek van Deltires voor de komende jaren. Mede op basis van input van externe stakeholders zal een plan van aanpak 2022+ worden uitgewerkt.

De uitkomsten van de activiteiten in 2021 zijn vastgelegd in dit document. Het vormt een eerste aanzet voor een overzichtsdocument met beschrijvingen van cruciale kennis en verwijzingen naar de bronnen van die kennis. De rapportage start met een overzicht van de bij aanvang van deze taak opgehaalde kennisvragen en eindigt met een interpretatie van de relevantie van de verzamelde kennis en ervaring in relatie tot het beantwoorden van die kennisvragen.

1.4 Aanpak activiteiten 2021

De projectcoördinatie is uitgevoerd door M.P.C. de Jong. Het literatuuronderzoek is uitgevoerd door meerdere collega's volgens Tabel 1.1. Die indeling is primair tot stand gekomen op basis van eerdere betrokkenheid bij specifieke keringen.

Tabel 1.1: Beschouwde grote SVKs waar Deltires bij betrokken is (geweest) en hoofdauteur van dat onderdeel

Hoofdstuk	Kering	Auteur / onderzoeker	Taal hoofdstuk
3	Oosterscheldekering	Y.B. Broekema	Nederlands
4	Haringvlietsluizen	Y.B. Broekema	Nederlands
5	Hartelkering	M.P.C. de Jong	Nederlands
6	Maeslantkering	M.P.C. de Jong	Nederlands
7	Hollandsche IJsselkering	M.P.C. de Jong	Nederlands
8	Ramspolkering	M.P.C. de Jong	Nederlands
9	Stormvloedkering Venetië	H.I. dos Santos Nogueira	Engels
10	Stormvloedkering St. Petersburg	H.I. dos Santos Nogueira	Engels
11	Overige grote internationale keringen (keringsplannen)	M.P.C. de Jong + H.I. dos Santos Nogueira	Engels

Voor de Nederlandse keringen is veel van de gearchiveerde documentatie in het Nederlands. De hoofdstukken die betrekking hebben op die keringen zijn daarom in het Nederlands geschreven. Documentatie van de buitenlandse keringen waarbij (voorgangers van) Deltires betrokken is geweest zijn doorgaans in het Engels geschreven. De hoofdstukken die betrekking hebben op die SVKs (Hoofdstuk 9 en 10) zijn daarom in het Engels geschreven. Dat maakte het ook mogelijk om niet-Nederlandse experts binnen Deltires aan het onderzoeksproject te verbinden. E.S. van Baaren is hoofdauteur van de bredere context en vooruitblik (Hoofdstuk 12). Zij treedt ook op als *linking-pin* naar het onderzoeksprogramma V&R van Deltires.

Voor elk van de keringshoofdstukken is een zoveel mogelijk identieke indeling aangehouden. Eerst wordt een algemene beschrijving van de kenmerken van de beschouwde kering gegeven. Daarna worden de functies van de kering kort samengevat. De kern van elk hoofdstuk is vervolgens een overzicht van voorgaande studies door Deltires en voorgangers, als kennisbasis voor die kering.

Vervolgens worden de belangrijkste technische uitdagingen en knelpunten van de besproken kering samengevat. Als laatste wordt er een interpretatie van de eerdere studies gemaakt en wordt vooruit gekeken, waarbij rekening gehouden wordt met huidige technische middelen en aangepaste inzichten sinds het oorspronkelijke ontwerp van de keringen, zoals verwachte sterkte van zeespiegelstijging.

2 Kennisvragen en kennisbronnen

2.1 Relevante kennisvragen

2.1.1 Kennisborging

De grote stormvloedkeringen in Nederland zijn inmiddels meerdere decennia oud. De laatst in gebruik genomen grote beweegbare kering is de Ramspolkering, in 2002. Onderliggende kennis van ontwerp en functioneren van de keringen is veelal opgeslagen en vastgelegd in de vorm van rapportages. Niet alle archieven bij RWS zijn behouden gebleven of eenvoudig te raadplegen. In recente projecten is bijvoorbeeld gebleken dat as-built-tekeningen niet altijd goed beschikbaar zijn. Dat lijkt vreemd, maar in de hectiek van de oplevering van een kunstwerk kan het voorkomen dat niet alle (last-minute) wijzigingen in de gearchiveerde versies van documentatie en tekeningen van het kunstwerk wordt opgenomen. Ook kan het voorkomen dat vanwege dezelfde reden informatie verspreid en versplinterd vastgelegd is door middel van losse memo's en interne oplegnotities in aanvulling op hoofddocumenten.

Om die redenen zijn specifieke oorspronkelijke ontwerpkeuzes en optimalisatie-stappen niet altijd meer bekend bij RWS. Voor een deel ligt die informatie vast in de rapportages in het archief van Deltares. Een goed overzicht van de informatie die beschikbaar is zal essentieel zijn in het ontsluiten en inzetten van die informatie en kennis, als onderdeel van de kennispartnerrol van Deltares voor RWS. Dat geldt per kering, maar ook voor kennis en inzichten die voor meerdere grote beweegbare keringen inzetbaar zal zijn, of zelfs voor andere typen van kunstwerken. Het doornemen van de originele project-documenten zal bovendien bijdragen aan het versterken van een nieuwe generatie kennishouders bij Deltares.

Ook RWS verwacht van Deltares dat wij kennispartner voor hen zijn en zorgdragen voor kennisborging op de lange termijn. In de 'Kennisstrategie Stormvloedkeringen' van RWS (2018) staat Deltares primair vermeld als kennishouder van numerieke modellen en van fysieke schaalmodellen. Het gaat daarbij over de interactie van de kering met het grootschalige watersysteem; zowel de invloed van een kering op het systeem, als invloed van condities uit het grootschalige watersysteem op die kering. Daaraan gekoppeld is de relevante kennis van het object (kunstwerk) en van bijvoorbeeld statistische beschrijvingen van onder andere hydrodynamische belastingen en mogelijk ook van sterktes.

Het operationele aspect van de rol van Deltares richting RWS, zoals genoemd in de 'Kennisstrategie Stormvloedkeringen', wordt momenteel ingevuld door deelname van Deltares-collega's in enkele van de operationele teams rondom de stormvloedkeringen (bijvoorbeeld: Maeslantkering) en/of teams voor de operationele hoogwaterverwachtingen (bijvoorbeeld: IJsselmeer).

2.1.2 Impact van aanpassingen in het watersysteem

Wanneer aanpassingen aan een watersysteem worden overwogen is het van belang om na te kunnen gaan of die beoogde aanpassingen de (hydrodynamische) belastingen op, en werking van, de grote kering(en) in dat gebied niet nadelig zullen beïnvloeden. Ook ogenschijnlijk lokale en kleinschalige ingrepen kunnen mogelijk onbedoeld een negatieve uitwerking hebben op de lokale van een SVK.

Als een voorbeeld van het analyseren van een gebiedsaanpassing worden hier genoemd de compacte studies die Deltares heeft uitgevoerd in 2015/2016 voor de MER verdieping Nieuwe Waterweg en de potentiële invloed van die aanpassing op de inzet en werking van de

Maeslantkering. Een ander voorbeeld is de uitbreiding van de Rotterdamse haven met Maasvlakte 2. Dat plan betekende een aanpassing in de havenlayout en van de resonantie-effecten (seiches). Ook bij die aanpassing moest vooraf vastgesteld worden dat de Maeslantkering niet ongunstig beïnvloed zou worden door de beoogde veranderingen.

In dergelijke situaties is het van belang om te weten wat de uitgangspunten van het ontwerp zijn geweest, inclusief ontwerpwaarden van hydrodynamische belastingen zoals stromings- en waterstandswaarden. Een goed overzicht van advies- en onderzoeksprojecten ten tijde van het ontwerp van een kering zal daarbij helpen. Ook de oorspronkelijke achterliggende motivatie voor soms heel specifieke vormen van keringsonderdelen, bijvoorbeeld een drempelconstructie, kunnen zo gereproduceerd en uitgewerkt worden.

In deze SO-taak kan op dergelijke vragen voor alle grote beweegbare kerings in Nederland al voorgesorteerd worden, in plaats van meer ad-hoc op het moment dat er een gebiedsaanpassing overwogen wordt. Bovendien zal het uitdragen van de beschikbaarheid van die kennis bij Deltares er ook aan bijdragen dat Deltares zowel voor RWS en marktpartijen een relevante (kennis-)partner blijft.

2.1.3 Afwegingen voor Beheer en Onderhoud en Vervanging en Renovatie

Volgens betrokkenen bij RWS is in de huidige situatie instandhouding van de Nederlandse SVKs het uitgangspunt. Het einde van de technische levensduur zal in die context niet bereikt worden voordat het civieltechnische fundament van de kering niet meer te vervangen of repareren is. Zo lang de basisdelen van de kering kleinere gewenste aanpassingen en verbeteringen mogelijk blijven maken is einde levensduur van de kering nog niet bereikt. In de praktijk wordt vaak ook omgekeerd gedacht: uitgaande van de civieltechnische onderdelen van een kering worden aanpassingen zo vormgegeven dat zij vanaf die basisonderdelen geïmplementeerd kunnen worden.

Daarnaast wordt vervanging van onderdelen op regelmatige basis uitgevoerd. Door ontwerpkennis te combineren met inzichten over het huidige gebruik en de huidige status van de SVKs kan gerichter vervangen worden, wellicht leidend tot afname van kosten voor Beheer en Onderhoud.

In onderzoeksprojecten (levensduur SVK, Kennisprogramma Natte Kunstwerken) wordt steeds meer gekeken naar een gecombineerde technische, functionele en economische levensduur en naar technische en functionele prestatie. Daarbij worden verschillende drivers beschouwd die in de toekomst invloed kunnen hebben op deze prestatie. Door oude en nieuwe kennis over de kerings te combineren en vergroten zou een betere schatting gemaakt kunnen worden van deze verschillende prestaties die kunnen leiden tot toename van kosten aan BenO of VenR of afname van de functionele prestatie voor een van de functies van de SVK. Uiteindelijk kan dit leiden tot einde levensduur. Gedurende de levenscyclus van de SVK kan bij BenO en VenR al adaptief rekening worden gehouden met mogelijke afname van prestatie. Op die manier zou dit onderzoek bij kunnen dragen aan verbeterd assetmanagement van de Nederlandse SVKs.

2.1.4 Impact van klimaatverandering en van veranderende normen

Voor de beoordeling van de potentiële impact van klimaatverandering (veranderende neerslagpatronen, mogelijke veranderingen in golfbelasting, zeespiegelstijging) en/of aangescherpte normeringen op de grote beweegbare kerings in Nederland is het van belang om te weten hoeveel 'ruimte' er in het ontwerp van de kerings zit. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan de uitkomsten van schaalmodeltesten onder zwaardere condities dan de oorspronkelijke ontwerpwaarden. De resultaten van dergelijke 'stress-testen' geven inzicht in de mogelijkheid de inzet van de kering in de toekomst mogelijk 'op te rekken'. Uiteraard na gedegen aanvullende analyses en controle-studies. Een specifiek voorbeeld hiervan is de

Ramspolkering (Hoofdstuk 8), waarvan het sluiten onder hogere stroomsnelheden is getest dan de ontwerpwaarde voor die parameter. Daarnaast kunnen uitkomsten en inzichten van schaalmodeltesten voor een bereik aan ontwerpwaarden geëxtrapoleerd worden om zo de mogelijkheid tot vergroting van de (inzet-)capaciteit van een kering na te kunnen gaan. Daarbij zijn inzichten over sterktes door voortschrijding van de kennis over de constructie en bouwmateriaal inmiddels mogelijk veranderd en misschien zijn daardoor kleinere veiligheidsmarges mogelijk dan ten tijde van het ontwerp van de kering oorspronkelijk aangehouden.

Ook kan nagegaan worden in hoeverre veranderingen in de hydraulische belastingen van keringen als gevolg van klimaatverandering opgenomen kunnen worden in de wijze van inzet van de kering, bijvoorbeeld door een ander sluitmoment. Om hier mogelijkheden in te kunnen verkennen is kennis van de motivatie voor de huidige/oorspronkelijke inzetwijze benodigd. Daarbij zal ook kennis van de werking van de achterliggende beslis- en stuurstuursoftware van de keringen relevant zijn. Een aangepaste inzet kan gekoppeld zijn aan de primaire functie van een stormvloedkering (keren van een hoge waterstand), maar ook aan andere functies die de constructie vervult en die beïnvloed worden door de impact van klimaatverandering.

Voor het vervolgens evalueren van beoogde aanpassingen in inzetwijze van de keringen is het benodigd dat de keringen op een passende en voldoende nauwkeurige manier worden weergegeven in numerieke hydrodynamische gebiedsmodellen. Daarbij speelt dat gebiedsmodellen per definitie de grootschalige fenomenen moeten beschrijven. Dit betekent dat niet alle details van de stroming rondom een SVK in dergelijke modellen beschreven hoeft te worden, maar wel de grootschalige effecten en invloeden. Dat wordt bereikt via een geparameteriseerde weergave van het kunstwerk in het rekenmodel. Dat wil zeggen dat de stroming rondom het kunstwerk niet in detail wordt berekend, maar dat de effecten van de keringsinzet toegevoegd worden aan het grootschalige stromingsgedrag in het watersysteem. Een dergelijk type weergave bevat meerdere instelparameters die de juiste waarde gegeven moet worden. Die waarden zijn zeker niet triviaal. Zij hangen veelal af van details van de constructie die in het verleden uitvoerig getest en bemeten zijn in schaalmodellen. Dat zou nader uitgezocht moeten worden.

Een andere strategie voor het opvangen van veranderingen in condities als gevolg van klimaatverandering kan zijn het accepteren van schade tijdens zeer extreme situaties indien die goed te herstellen zal zijn en die niet direct tot het falen van de gehele kering zal leiden. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld beperkte schade aan een bodembescherming in de verre toekomst gaan accepteren tijdens een extreme storm situatie met overtopping als gevolg. Zeker bij een kering die oorspronkelijk niet ontworpen is voor overtopping zal dit een aandachtspunt zijn. Informatie uit ontwerpstudies uit het verleden zou inzicht kunnen geven in welke mogelijkheden er met de bestaande kunstwerken op dit vlak bestaan. Ontwerpuitgangspunten en inzichten naar aanleiding van de Hartelkering (Hoofdstuk 5), die juist wel ontworpen is voor overtopping, zullen daarbij mogelijk ook voor andere keringen inzetbaar zijn.

2.1.5 Lange-termijn inrichting van de delta

Vanwege (versnelde) zeespiegelstijging is het mogelijk benodigd om de Nederlandse delta anders in te gaan richten en anders te gaan beheersen voor wat betreft waterverdeling. Dat betekent dat er mogelijk andere eisen aan SVKs gesteld zullen gaan worden. Hetzij aan het kunstwerk zelf (constructief, operationeel), hetzij aan een mogelijke combinatie met nieuwe kunstwerken. Dit vraagt goede kennis van de interactie van de SVK met het watersysteem en van zijn werking in dat systeem. Bovendien zal nagegaan moeten worden hoe de bestaande SVKs zo goed mogelijk adaptief beheerd en ingezet kunnen worden, om zo goed en zo lang mogelijk mee te blijven bewegen met een veranderde inrichting van onze delta.

En als er dan op termijn tot vervanging overgegaan zal moeten worden, dan is het de vraag of een SVK vervangen zal worden voor een nieuw kunstwerk van hetzelfde type beweegbare kering of dat inmiddels door ervaring en voortschrijdend inzicht een ander type meer passend zal zijn. Achterliggende studies en motivaties voor de oorspronkelijke keuze van het keringstype en mogelijk andere overwogen – maar na analyse afgewezen – keringstypen zullen daarbij van groot belang zijn.

2.1.6 HWBP en BOI

Voor het HoogwaterBeschermissingsPlan (HWBP) zal het inzichtelijk maken van de veiligheid van het achterland centraal staan. Daaraan gekoppeld zullen SVKs binnen het systeem van hoogwaterbescherming relevant zijn in het kader van beoordeling (BOI, Beoordeel- en Ontwerpinstrumentarium). Centraal bij dergelijke analyses is de inhoud van de Waterwet, waarin specifiek ook de SVKs als bijzondere keringen beschreven staan. Sommige keringen staan daar specifiek met naam vermeld. Niet voor alle SVKs wordt een volledige eis in de Waterwet beschreven; voor keringen met meerdere schuiven (bijvoorbeeld Oosterscheldekering) wordt er geen eis gesteld aan kans op niet-sluiten. Volgens de Waterwet is dat omdat voor keringen met meerdere schuiven het vaststellen van die eis ‘te complex is’. Aanvullende analyses en inbreng van kennis van SVKs kan daar mogelijk bij helpen.

2.1.7 Internationale vraagstukken en I-STORM

Deltares is in het verleden betrokken geweest bij de ontwikkeling en het ontwerp van buitenlandse keringen (St. Petersburg, Venetië). Op dit moment zijn er vooral in de VS meerdere plannen voor grote beweegbare keringen (Galveston, New York, Boston, New Jersey). Daarnaast wordt er in Singapore gewerkt aan een plan met meerdere stormvloedkeringen.

In 2018/2019 zijn, onder andere onder de koepel van I-STORM, workshops gehouden om een keringstype te selecteren voor de kering bij Galveston. In februari 2022 is een soortgelijke I-STORM-workshop gepland voor een keringsplan voor New Jersey. Ervaring met de technische achtergronden van verschillende typen van SVKs, inclusief voor- en nadelen, zullen daarbij essentieel zijn. Hieronder vallen aspecten die betrekking hebben op het ontwerp en functioneren van keringen, maar ook ervaring met de operationele inzet en beheer en onderhoud van grote beweegbare keringen.

2.1.8 Vervanging van beslis- en besturingssystemen

Bij het vervangen van beslis- en besturingssystemen zal kennis van het watersysteem, de werking en het gedrag van de kering in de praktijk en interactie van de kering met het watersysteem cruciaal zijn. Dit betekent dat kennis van het watersysteem, en modellering van dergelijke systemen, in combinatie ingezet zullen moeten worden met objectkennis van de SVKs als bijzonder waterbouwkundig kunstwerk. Bovendien zullen nieuwe ICT-systemen voor inzet en operationele aansturing van SVKs uitgebreid gevalideerd en getest moeten worden voorafgaand aan installatie op de echte keringen. Deltares is op dit moment al betrokken bij Acceptatie-testomgevingen van de Maeslantkering en voor de Ramspolkering. Ook voor andere keringen is een dergelijke omgeving voorzien (Hartelkering, 2023). Bovendien voorziet RWS ook andere doelen met dergelijke omgevingen op termijn in te kunnen gaan vullen (training van operators, optimalisatie van sluitcriterium).

2.2 Doelstelling en afbakening onderzoek

2.2.1 Doel van de SO-taak in 2021

Het primaire doel van de SO-taak in 2021 is het opstarten van een inhaal- en verdiepingsslag van de kennisbasis SVKs binnen Deltares. Hierbij worden inzichten en resultaten uit het verleden gecombineerd met ervaring en resultaten uit recente projecten, waaronder projecten voor SVKs.

Als onderdeel daarvan wordt naar aanleiding van hedendaagse numerieke modellen, bijvoorbeeld CFD (Computational Fluid Dynamics), en hedendaagse mogelijkheden van schaalmodeltesten, de studie-aanpakken van destijds tegen het licht gehouden. Mogelijk dat een deel van de schaalmodeltesten van vroeger tegenwoordig efficiënter en uitgebreider in een numeriek model weergegeven zou kunnen worden. Bovendien zijn ook de technische mogelijkheden van de schaalmodelfaciliteiten de afgelopen decennia sterk vergroot en verbeterd, bijvoorbeeld de opwekking van golven en stroming en de interactie met mobiel bodemmateriaal. Ook zijn meettechnieken in de schaalmodellen nauwkeuriger gemaakt en zijn er geheel nieuwe meettechnieken beschikbaar gekomen (bijvoorbeeld PIV, Particle Image Velocimetry). Dus ook indien op dit moment soortgelijke testen nog steeds alleen in een schaalmodel uitgevoerd zouden kunnen worden, dan zouden de project-aanpak en de uitgebreidheid van de resultaten er alsnog geheel anders uit kunnen zien.

Op deze manier combineren we de inzichten en gedegen werk uit het verleden met hedendaagse technische mogelijkheden en kennis. Deze proberen we vervolgens te vertalen naar de mogelijke bijdrage aan de kennisvragen en opgaven genoemd in Sectie 1.2 en Sectie 2.1. In 2021 zetten we hiervoor in samenwerking met betrokkenen vanuit de SVKs en vanuit de opgaven een eerste stap.

2.2.2 Afbakening beschouwde informatiebronnen

Deltares zit in een bijzondere situatie, aangezien Deltares zeer uitgebreid aan alle grote beweegbare kerings in Nederland heeft bijgedragen. Vanuit die positie is er alleen al binnen Deltares een grootarsenaal aan resultaten en rapportages. Om de SO-taak voor 2021 binnen projectrestricties als planning en budget uit te kunnen voeren zijn daarom vooralsnog externe bronnen (universiteiten, marktpartijen) binnen de huidige SO-taak nog niet uitgebreid beschouwd.

Per kering is in de referentielijst een overzicht opgenomen van relevante documenten van studies die voor die kering door (voorgangers van) Deltares zijn uitgevoerd. De belangrijkste uitkomsten en bevindingen worden samengevat in het betreffende hoofdstuk in de hoofdtekst. Daarbij wordt in principe niet op details ingegaan, maar wordt juist een samenvatting en synthese gegeven van de vaak zeer grote set aan documenten die per kering beschikbaar is.

Het is vooral de bedoeling om op die manier een werkbaar overzicht te geven van de soorten van studies en informatie die er beschikbaar zijn. Opmerkelijke kering-specifieke en/of zeer cruciale detailaspecten in relatie tot de onderzoeksraag zullen wel in de hoofdstukken benoemd worden. Ook de stappen die gezet zijn in de ontwikkeling van het ontwerp zullen op hoofdlijnen beschreven worden, omdat ook juist dat proces van ontwikkelen van inzichten van belang is, bijvoorbeeld voor het vastleggen van redenen waarom van een tussenontwerp is afgestapt en waarom specifieke aanpassingen en stapsgewijze verbeteringen in het ontwerp zijn doorgevoerd. De studies van het uiteindelijke keringsontwerp zijn waar mogelijk in meer detail beschreven als de samenvatting van de uiteindelijke ‘as-built’ situatie.

2.3 Identificatie van relevante kennisbronnen

In de SO-taak in 2021 is primair gebruik gemaakt van documenten over projecten uitgevoerd door de voorgangers van Deltares en die beschikbaar zijn in de bibliotheek van Deltares. Voor de keringsplannen buiten Nederland (Hoofdstuk 11) is in deze fase van het onderzoek al meer naar externe literatuur gekeken, waarvan toepassing.

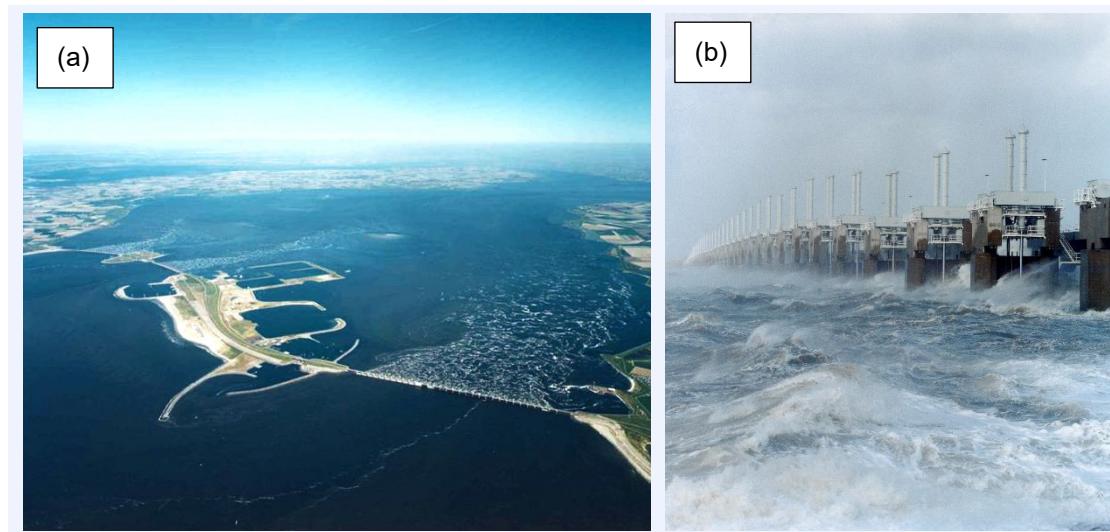
In vervolgfasen zal de kennisbasis van Deltares kunnen worden uitgebreid door een grootschalige inventarisatie van externe documenten, inclusief marktpartijen en bouwcombinaties, en van publicaties uit de literatuur. Daarbij zouden ook grote beweegbare keringen in het buitenland beschouwd kunnen worden waar Deltares niet bij betrokken is geweest.

3 Oosterscheldekering

Dit hoofdstuk bevat informatie over de kennisbasis van Deltares omtrent de Oosterscheldekering. De hoeveelheid literatuur die te vinden is over deze kering kan overweldigend zijn voor een nieuwe lezer, gezien de vele verschillende bouw en ontwerpfasen met elk bijpassende onderzoeken die zijn uitgevoerd. Een goed startpunt om het ontwerp van de kering en de verschillende ontwerpkeuzes te leren kennen is de officiële ontwerpnota voor de Oosterscheldekering. Deze bestaat uit 5 boeken, die te vinden zijn in de bibliotheek van Rijkswaterstaat. In de ontwerpnota's wordt ook veelvuldig gerefereerd naar de onderzoeken uitgevoerd door Deltares (destijds het Waterloopkundig Laboratorium). Los van deze documentatie bestaan er verscheidene overzichtsrapporten uitgegeven door WL|Delft Hydraulics zelf (zoals bijvoorbeeld Q0170). De belangrijkste referenties worden explicet benoemd, maar de referenties die in dit hoofdstuk worden genoemd zijn dus (bij lange na) niet alomvattend.

3.1 Hoofdkenmerken kering

De Oosterscheldekering (OSK), gelegen in de monding van de Oosterschelde, is een van de primaire hoogwaterverdedigingswerken van Nederland die de Zuidwestelijk delta van Nederland tegen overstromingen beschermt. De bouw van de kering is afgerond in 1986. De OSK is in totaal negen kilometer lang en bestaat deels uit dammen en deels uit pijlers met daartussen schuiven om de tussen de pijlers aanwezige doorstroomopeningen tijdelijk af te kunnen sluiten (zie ook Figuur 3.1a). De OSK kan daarom beschouwd worden als semi-open; open tijdens normale condities, gesloten tijdens extreme (storm) condities. De dammen beslaan ongeveer vijf kilometer van de totale lengte van de kering, de overige vier kilometer bestaat uit de half-afgesloten drie hoofdgeulen van het estuarium. Van Zuid naar Noord zijn dit: de *Roompot*, de *Schaar* en de *Hammen*.



Figuur 3.1 a) Luchtfoto van de Oosterscheldekering, kijkend vanaf de Noordzee naar de Oosterschelde. Van links naar rechts zijn de hoofdstroomgeulen Hammen, Schaar en Roompot zichtbaar aan het zog op die locaties. Bron: <https://deingenieur.nl>, artikel: "De Oosterschelde bracht het keerpunt". b) De pijlers van de Oosterscheldekering tijdens een storm. Bron: <https://watersnoodmuseum.nl>

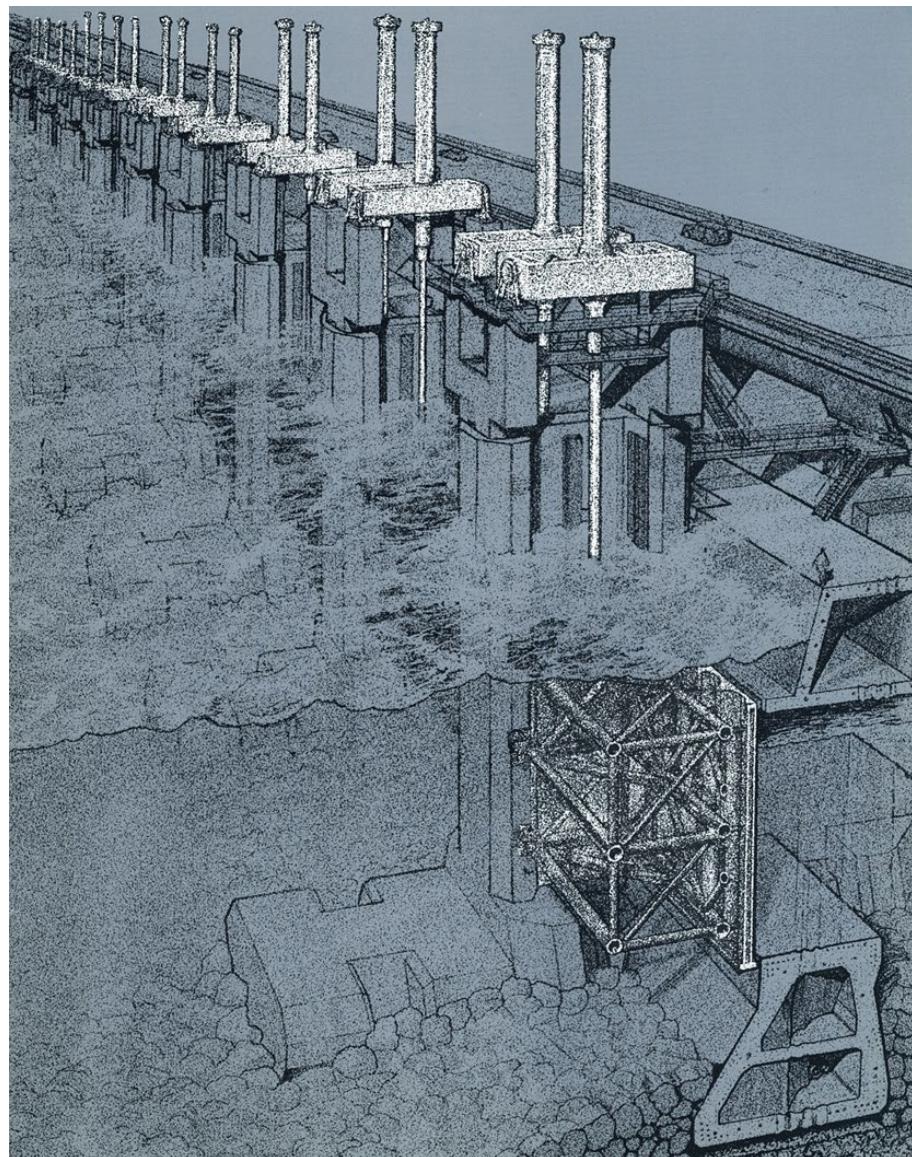
De drie stroomvoerende ingangen Roompot, Hammen en Schaar bestaan uit respectievelijk 31, 15 en 16 doorstroomopeningen van 39.5 m breed die afsluitbaar zijn met schuiven met een breedte van 42 m. Een deel van de schuiven valt in sponningen in de pijlers, waardoor de netto doorstroombare opening iets kleiner is dan de totale schuifbreedte. De schuiven en bijbehorende bewegingswerken (twee hydraulische cilinders) worden gedragen door in totaal 65 pijlers van 30-40 m hoog met een maximaal gewicht van 18.000 ton (zie Figuur 3.1b). Deze pijlers zijn gemaakt van beton, van binnen hol en gedeeltelijk gevuld met zand. De pijlers vormen daarnaast ook de oplegging voor de tussengelegen dorpelbalken, bovenbalken, en de verkeerskokers. Bij iedere doorstroomopening van de kering wordt de stroming dus geknepen door zowel de pijlers, een dorpelbalk aan de bodem en een bovenbalk. Deze onderkant van deze bovenbalken bevindt zich op 1.2 m +NAP, dus bij een gemiddeld hoogwater wordt de stroming al aan de bovenkant geknepen. De dorpelbalken zijn zodanig op een hoogtepositie geplaatst dat deze het oorspronkelijke doorstroomprofiel van de hoofdgeulen volgen. Dit houdt ook in dat de schuiven variëren in grootte. Deze layoutkeuze is gemaakt om er voor te zorgen dat het oorspronkelijke stroomgedrag zoveel mogelijk geholpen wordt. Er zijn evenveel bovenbalken aangebracht als doorstroomopeningen (62 stuks) met ieder een gewicht van 1100 ton, met een bovenkant op 5.80 m +NAP bij de Roompot en Schaar, en 5.60 m +NAP bij de Hammen. Deze hoogtes bedragen dus tevens de waterkerende hoogte van de OSK bij de verschillende doorstroomopeningen. Een doorsnede van de doorstroomopening is gegeven in Figuur 3.2. Zoals te zien bestaan de schuiven uit een vakwerk uit staal buizen in combinatie met beplating aan de Oosterscheldezijde. De schuiven variëren in hoogte tussen 6 tot 12 m (met stapgroottes van 1 m), afhankelijk van hun (dwars)positie in geul. De grootste schuif weegt 480 ton, en het sluiten daarvan duurt ongeveer 82 minuten.

Aan weerszijden van de OSK is een bodembescherming aangebracht die zich aan beide kanten uitstrekt over een lengte van 550-650 m in stroomwaartse richting van de kering af. Deze bodembescherming is ontworpen als geometrisch gesloten bescherming, wat inhoudt dat deze volledig zanddicht moet zijn. De bescherming bestaat uit grote betonblokken, betonmatten, blokkenmatten en breuksteen. Gedurende de levensduur van de kering zijn beschadigingen aan de bodembescherming gerepareerd met staalslakken.

De OSK is een primaire waterkering die de bevolking rondom het Oosterscheldebekken beschermt tegen hoogwater en stormvloeden. Bij verwacht hoogwater kan de kering gesloten worden. Zodra naar verwachting het eerstvolgende hoogwater boven het waarschuwingspeil van NAP +2.75 m uitkomt wordt de kering bemand. De kering dient vervolgens gesloten te worden als de verwachting van het eerstvolgende hoogwater boven de maatgevende peilverwachting van NAP +3.00 m uitkomt. Sluiting van de kering volgt in het algemeen zoveel mogelijk een 1-2-1 wisselstrategie. Deze strategie houdt in dat bij de eerste hoogwatertop en sluiting van de kering gestreefd wordt naar een Oosterscheldepeil van NAP +1.00 m. Voor een tweede en derde hoogwatertop gelden respectievelijk NAP +2.00 m en NAP +1.00 m als streefpeil van de Oosterschelde. Voor eventueel volgende toppen wordt de reeks van afwisselend NAP +2.00 m en NAP +1.00 m voortgezet. Op deze manier blijft een (klein) getij behouden ook tijdens langdurige sluiting om de natuur zo min mogelijk te beïnvloeden. Om de krachten op de schuiven te minimaliseren geschiedt het openen van de kering na afloop van het hoogwater, op het moment dat de buitenwaterstand gelijk is geworden aan de binnenwaterstand. Indien, om wat voor reden dan ook, de kering niet tijdig is bemand en gesloten, treedt bij gemeten overschrijding van het noodsluitpeil van NAP +3.00 m automatisch het noodsluitsysteem in werking. Automatische opening na afloop van het hoogwater geschiedt ook dan bij gelijke binnen- en buitenwaterstand.

Tot nu toe is, sinds de ingebruikname van de OSK in 4 Oktober 1986, de kering 28 keer gesloten geweest voor stormvloed.

Daarnaast wordt vier keer per jaar een proefsluiting gehouden; tweemaal met gesimuleerd hoogwater om een geautomatiseerde noodsluiting te testen, en tweemaal handmatig. Daarnaast wordt iedere 14 dagen een kleinschalige test gedaan waarbij de schuiven 1 meter in hoogtepositie worden bewogen.



<https://beeldbank.rws.nl>.

3.2 Functies van de kering

De Oosterscheldekering is ontworpen als onderdeel van de Deltawerken die, na de watersnoodramp in 1953, de Zuidwestelijke delta van Nederland moesten beschermen tegen hoogwater en stormvloed. Het was in eerste instantie de bedoeling dat de OSK een dam zou zijn, die het gehele Oosterscheldebekken zou afsluiten van de Noordzee (vergelijkbaar met de Brouwersdam en het Grevelingenmeer). Dit stuitte echter op zoveel weerstand van de lokale visserij en milieuorganisaties (zie bijvoorbeeld Figuur 3.3) dat hier vlak na de constructie van werkeilanden Neeltje Jans en Roggeplaat vanaf werd gezien.

Om het Oosterscheldebekken een getijkom te houden werd besloten om de OSK zoveel mogelijk open te houden.

Op deze manier vervulde de OSK naast zijn primaire functie als hoogwaterbescherming dus ook nog een andere rol in het systeem Oosterschelde, namelijk getij-controle. Door een afname van het instroomoppervlakte in de monding van het Oosterscheldebekken zou de verticale getijslag verminderen. Om dit zoveel mogelijk tegen te gaan, is integraal met het ontwerpen van de OSK de grootschalige waterbeweging onderzocht, en zijn er aan het einde van het Oosterscheldebekken scheidingsdammen aangebracht om de reductie in getijslag door middel van extra reflectie te verminderen.

Los van de functie van de OSK in het gehele systeem Oosterschelde, dient de kering ook als een van de belangrijkste verkeersaders tussen de Zeeuwse eilanden Schouwen en Noord-Beveland. Een sluiscrosscomplex bij de Roompot dient als scheepvaart-verbinding voor visserij schepen en recreatievaart. Op het oude werkeiland Neeltje Jans bevindt zich nu een educatief themapark met betrekking tot de Deltawerken en het Oosterscheldegebied.

De verschillende ontwerpoverwegingen behorende bij de OSK zijn talrijk. In het vervolg van dit hoofdstuk zal met name ingegaan worden op de hydraulische en geotechnische kennisbasis die is opgebouwd in de ontwerp- en gebruiksfase van de Oosterscheldekering.



3.3 Kennisbasis Deltares

Gezien het vernieuwende karakter van de OSK ten tijde van de voorstudie naar de mogelijkheid om een semi-open stormvloedkering te maken was er enorm veel kennisontwikkeling nodig gedurende de ontwerp fase (Rijkswaterstaat, 1976). Een zeer groot deel van deze kennisontwikkeling werd gedaan door het waterloopkundig laboratorium, één van de voorlopers van Deltares. Het merendeel van deze sectie zal dus betrekking hebben op het gedane (hydraulisch) onderzoek in het waterloopkundig laboratorium. Echter, sinds de ingebruikname van de kering is ook veel kennis en ervaring in de praktijk opgedaan van zowel de lokale als grootschalige impact van de OSK op het natuurlijk systeem in het Oosterscheldebekken. Daarnaast zijn recent een aantal gedetailleerdere studies met betrekking tot het functioneren van de OSK uitgevoerd. De kennisbasis in deze sectie zal dus worden opgedeeld in opgedane kennis in de ontwerp fase (Sectie 3.3.1), opgedane kennis in de operationele fase (Sectie 3.3.2) en opgedane kennis vanuit recente studies (Sectie 3.3.3).

3.3.1 Kennisbasis opgebouwd tijdens de ontwerp fase

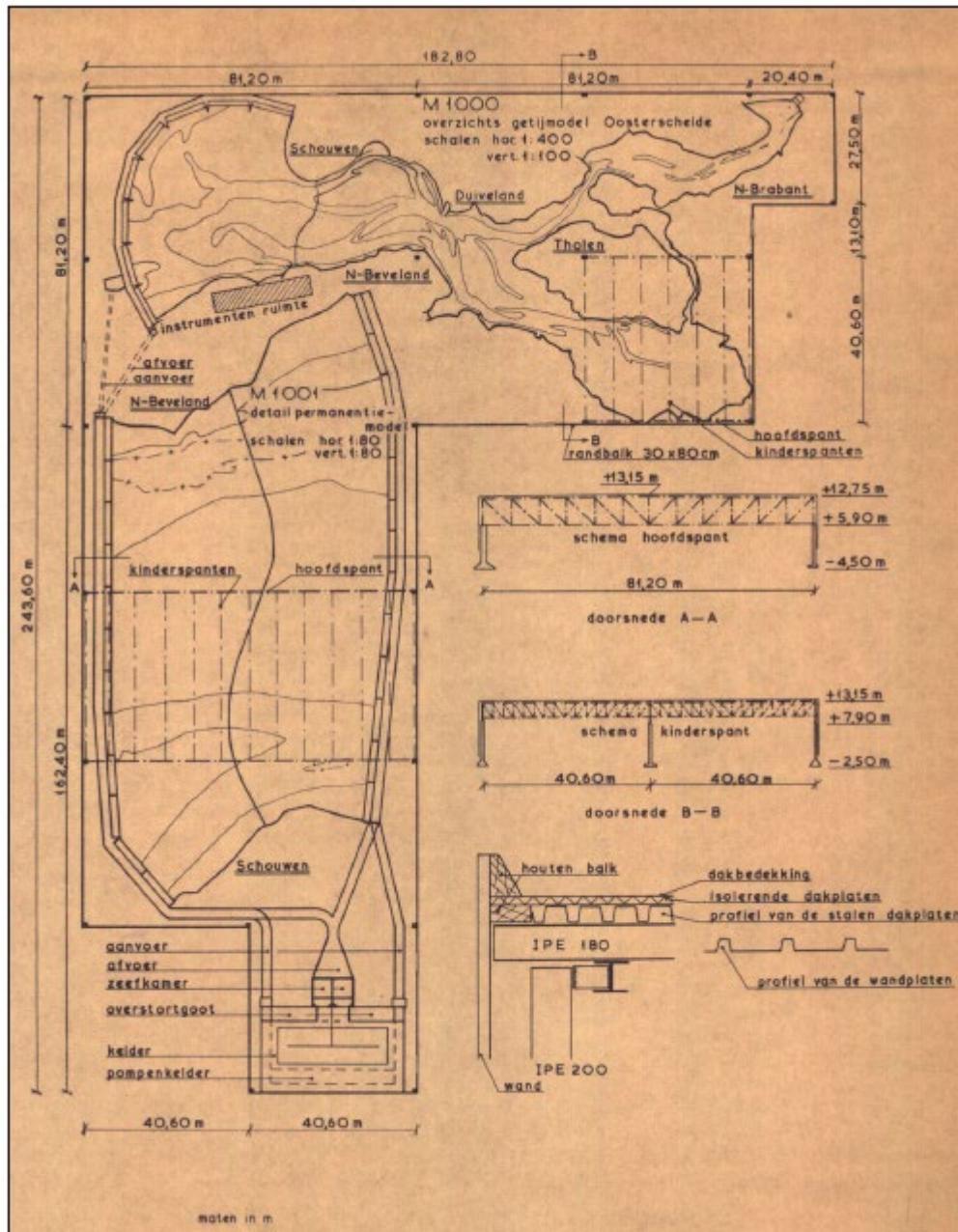
Tijdens de ontwerp fase van de OSK zijn een zeer groot aantal verschillende schaalproeven uitgevoerd ter ondersteuning van de ontwerpkeuzes. Dit zijn proeven die betrekking hebben op het uiteindelijk ontwerp, maar ook proeven die zijn uitgevoerd voor ontwerpvarianten die uiteindelijk zijn afgevallen. Zo is bijvoorbeeld eerst in de periode van 1972-1974 de volledige afsluiting van de Oosterschelde onderzocht. Na protestacties van belangenpartijen heeft de overheid er voor gekozen om de mogelijkheid van een gedeeltelijke afsluiting te onderzoeken, waarbij verschillende varianten hiervoor beschouwd werden in de periode van 1974-1976. Nader onderzoek op het kritische tijdschap naar de uiteindelijk gekozen variant werd uitgevoerd van 1977-1979, waarbij verdere detaillering tijdens bijvoorbeeld verschillende bouwfases uitgevoerd werd van 1979-1987. Een globaal overzicht van de (door Deltares) onderzochte onderwerpen wordt hier gegeven; inhoudelijke aandachtspunten en indien nodig reflectie daarop is het onderwerp van Sectie 3.4. De verschillende onderzoeken die zijn uitgevoerd zijn opgedeeld in een aantal categorieën; per categorie is een selectie van de meest relevante literatuur gegeven die geraadpleegd kan worden.

De schaalproeven zijn uitgevoerd in verschillende modellen. De belangrijkste daarvan zijn het grootschalig getijmodel van het gehele Oosterscheldebekken, M1000, en een detailmodel van de monding van de Oosterschelde, M1001. Deze waren beide gebouwd in de Oosterscheldehal van het voormalig waterloopkundig laboratorium in de Voorst (Figuur 3.4). Het getijmodel had een schaal van 1:400 voor de horizontale dimensies en 1:100 voor de verticale dimensie. Het detailmodel had een schaal van 1:80. Voor sommige gedetailleerde vraagstukken, bijvoorbeeld omtrent stabiliteit van de bodembescherming, zijn ook proeven uitgevoerd in (2D-Verticaal) stroomgooten, los van de modellen M1000 en M1001. Deze gootproeven konden op die manier ook uitgevoerd worden op grotere schaal. Hieronder wordt ingegaan op de specifieke onderzoeken die uitgevoerd zijn.

Stroombeelonderzoek werd voor verschillende doeleinden uitgevoerd, welke hier kort aangestipt worden en waarbij vanuit grootschalig onderzoek ingezoomd wordt naar detailonderzoek. De meeste onderzoeken richten zich op een gedeeltelijke afsluiting, omdat in dit geval de impact van de kering op de getijslag immers onderzocht moest worden.

- Stroombeelonderzoek werd uitgevoerd voor verschillende doorstroomoppervlakten in de monding van de Oosterschelde, resterend na plaatsing van de kering.
- Stroombeelonderzoek werd uitgevoerd om debietverdeling door de hoofdgeulen van de openingen te optimaliseren.
- Stroombeelonderzoek werd gedaan om afvoercoëfficiënten te bepalen van de kering, ook als input voor verdere constructieve berekeningen.
- Stroombeelonderzoek werd gedaan om de invloed van de langsdammen nabij de havens op de hoofdstroom te duiden, alsmede om het binnenklimaat in de (werk)havens te bepalen.
- Stroombeelonderzoek werd gebruikt om de werkcondities tijdens verschillende fasen van installatie te bepalen. Hierbij werd bijvoorbeeld ook gekeken naar het stroombeeld achter een aantal gesloten schuiven, en de rest van de schuiven open, om te onderzoeken of de condities in het zog goed genoeg waren voor bijvoorbeeld installatie of onderhoud aan schuiven.
- Stroombeelonderzoek is toegepast ten behoeve van de plaatsing van de dorpelbalken.

Selectie van literatuur: M1000 (plus onderliggende nummers), M1001 (plus onderliggende nummers), M1658 (deel I & II), M1690, M1737, M1756, M1786, M1878, M1898, M1929, M1945, M1982, M2037, M2131, M2135, Q225



Ontgrondingsonderzoek werd vaak in combinatie gedaan met stroombeeldonderzoek. Voor alle varianten van de Oosterscheldekering, van complete afsluiting tot aan verschillende manieren van gedeeltelijke afsluiting is getoetst wat de ontwikkeling van de ontgronding zou zijn benedenstroms van de te ontwikkelen bodembescherming. Ontgrondingsonderzoek werd onder andere uitgevoerd in het kader van de volgende ontwerpstappen:

- Ontgrondingsonderzoek voor vergelijking sluitingsmethoden tijdens de aanleg in het geval van een volledige afsluiting.
- Ontgrondingsonderzoek voor de invloed van de bouwvolgorde op de te verwachten ontgronding.

- Ontgrondingsonderzoek in oriënterende fase van de optie tot gedeeltelijke afsluiting, waarbij de effecten van verscheidene horizontale en verticale vernauwingen van de doorstroomdoornede werden onderzocht.
- Ontgrondingsonderzoek voor verschillende afsluitmethoden en verschillende doorstroomoppervlakten in de monding voor gedeeltelijke afsluiting.
- Onderzoek evenwichtsdiepte ontgrondingen uiteindelijke ontwerp van de OSK, o.a. ter behoeve van de dimensionering van de lengte van de bodembescherming.
- Onderzoek ontgrondingen uiteindelijke ontwerp in het geval van een of meerdere weigerende schuiven (schuif sluit niet) bij de kering. Die situatie resulteert in 1 of enkele openingen in de OSK tijdens een stormvloed en leidt tot lokale hoge stroomsnelheden achter de niet gesloten openingen.
- Onderzoek van de invloed van bestortingen op de hellingen van de ontgrondingskuil die ontstaat aansluitende op de bodembescherming en op het verloop van de verdere ontgronding.
- Onderzoek naar vorming en verloop van ontgronding tijdens verschillende bouwfases van het uiteindelijke ontwerp.
- Onderzoek naar reductie van ontgrondingen in het geval van natuurlijke aanvoer van bodemmateriaal in prototype condities.

Selectie van literatuur: M1000 (meerdere volumes, met name werkgroep 8), M1001 (meerdere volumes), M1321, M1385, M1657, M1658, M1690, M1737 (meerdere volumes), S0562, M1774.

Bodembeschermingsonderzoek werd uitgevoerd om stabiliteit van de te ontwerpen bodembescherming te bepalen. Ook dit onderzoek is uitgevoerd voor alle varianten van de afsluiting van de Oosterschelde, van complete afsluiting tot aan verschillende manieren van gedeeltelijke afsluiting. Dit type proeven is gedaan in zowel de grote schaalmodellen in het waterloopkundig laboratorium, alsmede in een gedetailleerdere opzet in stroomgooten op een grotere schaal (tot wel 1:10 tot 1:80 in detailmodel M1001). De volgende onderzoeken zijn uitgevoerd:

- Onderzoek naar een bodemverdediging in het geval van een gefaseerd uitgevoerde volledige afsluiting van de Oosterscheldemonding.
- Onderzoek naar de stabiliteit van bodembescherming voor verschillende varianten van afsluiten.
- Onderzoek naar de stabiliteit van de bodembescherming in het geval van een weigerende schuif (schuif sluit niet) in het uiteindelijke ontwerp.
- Stabiliteitsproeven van de bodembescherming in combinatie met turbulentiemetingen voor (gedeeltelijk) onjuiste installatie van de elementen.
- Stabiliteit van stortsteen en breukstenen dammen gebouwd bij de werkhavens.
- Stabiliteit van bestortingen uitgevoerd op de bodemhellingen van de ontgrondingskuilen, gedurende de oorspronkelijke aanleg en daarna.

Selectie van literatuur: M1000 (meerdere volumes), M1001 (meerdere volumes), M1245, M1329, M1477, M1774, M1916, M1982 deel II, M2010, M2028, Q455, Q520, R1775, R1431.

Krachten op de kering (keringsdelen) werden ook onderzocht door middel van schaalproeven. Deze proeven hadden met name het doel om de hydraulische belasting op de verschillende (bewegende) onderdelen van de kering te bepalen, en voor het optimaliseren van de vormgeving van de schuiven en drempel. Een groot deel van het berekenen van de verschillende belastingen op de kering werd gedaan met rekenmodellen; de input voor die modellen kwam (onder andere) uit schaalproeven. De volgende onderzoeken zijn uitgevoerd:

- Bepaling van afvoercoëfficiënten voor verschillende doorstroomconfiguraties.

- Bepaling van verliescoëfficiënten voor verschillende doorstroomconfiguraties.
- Bepaling van opstuwing en de daarbij behorende statische en dynamische drukken.
- Golfklappen en daaraan gerelateerde belastingen voor verschillende varianten van de schuiven voor regelmatige en onregelmatige golfbelasting, onder zowel loodrechte golfaanval als onder een hoek.
- Bepaling van door stroming en turbulentie veroorzaakte trillingen onder de schuiven.

Selectie van literatuur: M1000 (meerdere volumes), M1001 (meerdere volumes), M1327, M1377, M1396, M1424, M1469, M1477, M1494, M1507, M1509, M1516, M1543, M1593, 1207853.

Buiten de hierboven genoemde onderzoeken zijn er ook onderzoeken geweest naar bijvoorbeeld de geotechnische stabiliteit van de te verwachten ontgrondingskuilen. Aan de hand van die onderzoeken is een beheerstrategie opgesteld op basis van frequent monitoren van de ontwikkeling na ingebruikname van de kering. Dat brengt met zich mee dat tijdens de operationele fase van de kering veel informatie en kennis vergaard is (beschreven in de volgende sectie).

3.3.2 Kennisbasis opgebouwd tijdens de operationele fase

De operationele fase van de OSK trad aan na de ingebruikname eind 1986. Tijdens de bouw waren al verschillende metingen uitgevoerd om de laboratoriumbevindingen zoals beschreven in Sectie 3.3.1 beter te kunnen duiden en te valideren. In het kader van de door RWS zelf opgestelde beheerstrategie werd er ieder half jaar een bodemopname gemaakt om de ontwikkeling van de bodembescherming en de ontgrondingskuilen te monitoren, en indien nodig actie te ondernemen om de situatie beheersbaar te houden.

Kort na de ingebruikname is een aantal metingen uitgevoerd in het kader van conditiebewaking van de algehele keringsconstructie. Tijdens deze metingen zijn drukken op de onderzijde van de bovenbalk, response ten gevolge van golfklappen, de totale oplegkracht en waterstandsvariaties onder de bovenbalk gemeten. Uit deze data zijn ook trillingen van de vakwerkschuiven en afzonderlijke elementen herleidt.

Daarnaast is er een operationeel model ontwikkeld in WAQUA om de afvoeren door de Oosterscheldekering te monitoren. Dit model is gekalibreerd op waterstanden, niet op stroomsnelheden. Verder heeft men natuurlijk goed kunnen observeren wat de daadwerkelijke effecten van gedeeltelijke sluiting van de Oosterschelde zijn geweest op de getijslag in het Oosterscheldebekken (Vroon, 1994) en op de sedimenttransporten (Hoogduin, 2009, projectreferentie A1002334) via de monding. De impact van de kering op de morfologische ontwikkeling van het deltagebied in de monding van de Oosterscheldekering is onderzocht door Menno Eelkema (2013) in zijn PhD-werk, deels uitgevoerd bij Deltares. Daarnaast is de impact van de kering op de grootschalige morfologie, en met name de intergetijdengebieden, van het Oosterscheldebekken onderzocht door Deltares door middel van een combinatie van numeriek modelwerk en observaties (Arjen Luijendijk & Bas Huisman, ref. Z4581).

Inmiddels is er ook bijna 35 jaar aan ervaring opgebouwd met het opereren van een grote stormvloedkering als de OSK. Bij al het bovenstaande geldt dat Deltares hier niet direct bij betrokken is, maar via RWS wel toegang kan krijgen tot deze kennis indien nodig. Zo is bijvoorbeeld in een recente studie van Deltares gebruik gemaakt van de bodemopnames verzameld door RWS (zie ook Sectie 3.3.3).

3.3.3 Recente studies

In 2012 heeft een van de hoofdingenieurs van het ontwerp van de Oosterscheldekering, Frank Spaargaren, bij RWS aan de bel getrokken na bestudering van recente bodemopnames.

Het bleek dat de beheerstrategie zoals gedefinieerd tijdens de ontwerpfase niet goed genoeg was aangehouden. Daardoor was er een aantal zettingsvloeiingen rondom de ontgrondingskuilen die in de loop van de tijd waren ontstaan ongemerkt opgetreden, die op sommige plekken zelfs de bodembescherming hadden beschadigd. Verder bleek dat de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen veel sneller was gegaan dan geanticipeerd tijdens de ontwerpfase. Door een externe onderzoekscommissie is toen besloten dat aan de ene kant verdiepend onderzoek in de toen ontstane situatie nodig was om de ontgrondingsverwachtingen te updaten, en aan de andere kant dat er een beter fundamenteel begrip in de lokale (driedimensionale) stroomcondities benodigd was. Deltares heeft toen een geotechnisch onderzoek naar het risico op verdere zettingsvloeiingen bij de ontgrondingskuilen uitgevoerd (Theo Stoutjesdijk, ref. 1206907-005), alsmede een nieuwe voorspelling gemaakt van het verdere verloop van de ontgronding met behulp van een in-house ontwikkeld ontgrondingsmodel (Tim Raaijmakers, Greta van Velzen; Van Velzen et al., 2014). De spreiding in antwoorden vanuit deze studie gaf eens te meer aan dat meer kennis benodigd is. Op de TU Delft zijn twee PhD-onderzoeken uitgevoerd naar de ontgrondingskuilen; 1 gericht op geotechnische stabiliteit en 1 gericht op 3D stroming en turbulentie (Yorick Broekema; Broekema, 2020). Los daarvan is in samenwerking met de TU Delft een onderzoek gedaan naar het bepalen van de invloed van getijtenturbines op de stabiliteit van de bodembescherming met het gebruik van CFD (Tom O'Mahoney, Anton de Fockert & Arnout Bijlsma; O'Mahoney et al., 2020). Tot slot is de impact van de kering op de grootschalige morfologie van de Oosterschelde verder onderzocht, alsmede mogelijke suppletie-strategieën (Lodewijk de Vet, Jebbe van der Werf; ref. 1220324).

3.4 Grootste technische inzichten en aandachtspunten

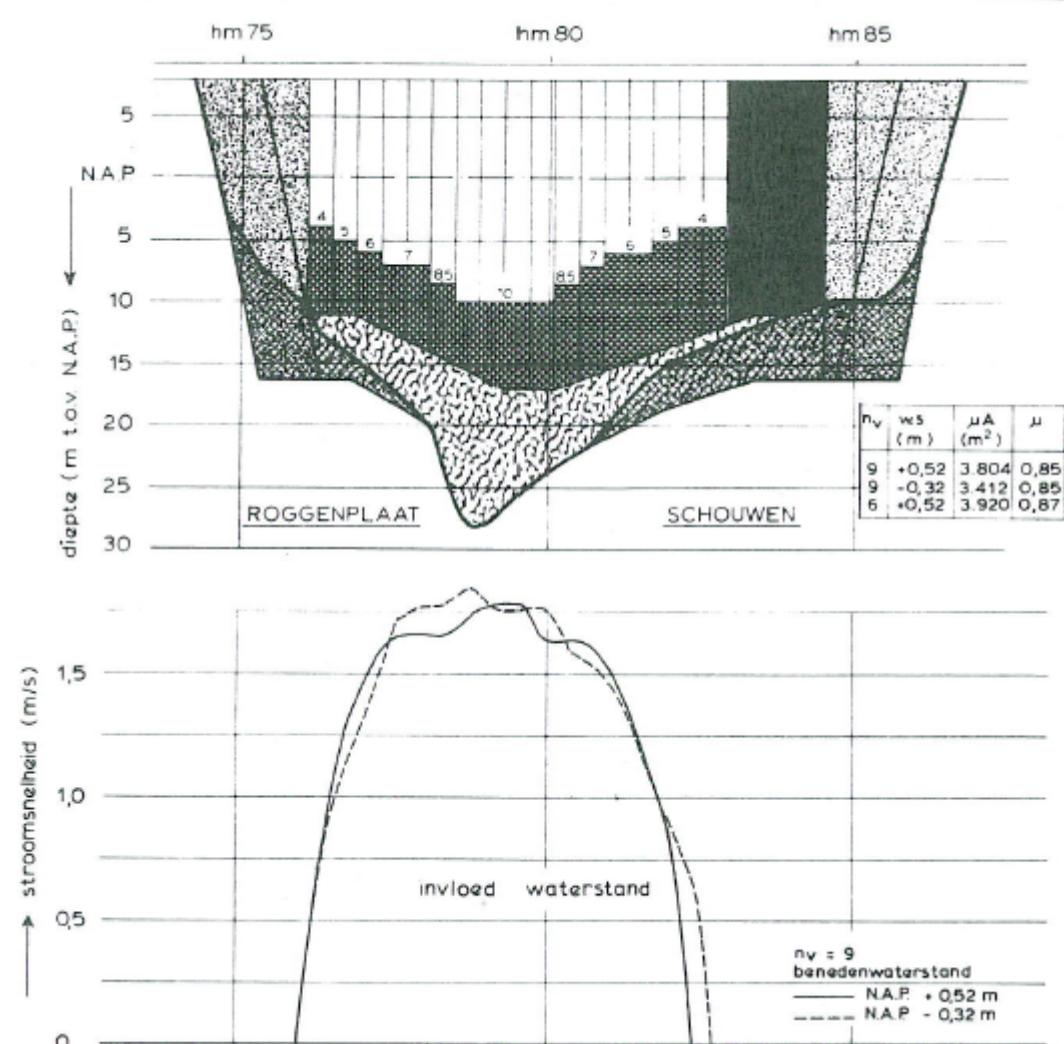
In deze sectie wordt op hoofdzaken de belangrijkste kennis zoals verkregen uit de onderzoeken beschreven in Sectie 3.3 en huidige interpretatie daarvan behandeld. Globaal zijn deze hoofdzaken ingedeeld op basis van schaalgrootte: systeemschaal (bijvoorbeeld getij-reductie en morfologische impact, Sectie 3.4.1), middelgrote schaal (bijvoorbeeld ontgronding en stabiliteit bodembescherming, Sectie 3.4.2) en kleine (lokale) schaal (bijvoorbeeld krachten op keringsonderdelen, Sectie 3.4.3). Daarnaast wordt nog een aantal aandachtspunten met betrekking tot de randvoorwaarden behandeld in Sectie 3.4.4.

3.4.1 Systeemschaal (Oosterscheldebekken)

Door de bouw van de OSK is de doorstroomoppervlakte in de monding van de Oosterschelde afgenoem van 80,000 m² naar 17,900 m². Door het plaatsen van dammen in het Oosten van de Oosterschelde is het kombergingsoppervlak van de Oosterschelde afgenoem van 452 km² naar 351 km². Deze dammen hebben er voor gezorgd dat de afname van de getijslag in de Oosterschelde beperkt is gebleven. De getijslag bij Yerseke is bijvoorbeeld afgenoem met 13% in plaats van 25% als deze dammen niet geplaatst zouden zijn. Daarnaast speelt ook het feit dat de drempels het oorspronkelijke profiel van de stroomgeulen volgen een grote rol in het beperken van de afname van het getijvolume (zie Figuur 3.5). De hierboven genoemde reductie in verticale getijslag is niet uniform over de gehele Oosterschelde, maar varieert van 12-20%. De verblijftijd van water in het Oosterscheldebekken, ten opzichte van voor de afsluiting, is toegenomen met ongeveer 10 getij-cycli net ten oosten van de kering tot aan 130 getij-cycli in het oosten van de getij-arm.

Een belangrijk gevolg van de afname in getijslag en getijvolume is dat het volume van de geulen en de platen in de Oosterschelde niet meer in evenwicht zijn met de stroomcondities in de Oosterschelde. Daarnaast blokkeert de OSK ook voor een groot deel inkomend zandtransport. Het gevolg van deze blokkade en de hierboven genoemde morfologische disbalans is dat zand van de platen afkalfst en in de geulen terecht komt. Dit fenomeen wordt ook wel "zandhonger" genoemd (zie bijvoorbeeld Q4264-3).

Dit heeft tot gevolg dat een groot deel van de intergetijde-zandgebieden in de Oosterschelde, die een belangrijke rol spelen bij het in stand houden van de lokale biodiversiteit, sterk afnemen in volume. Om dit tegen te gaan is er recent door RWS gesuppleerd op de Roggenplaat. Het ontwerp van de suppletie is gedaan door Deltares (ref. 1220324).



Rakend aan de grootschalige effecten is ook het bepalen van de doorstroming door de Oosterscheldekering. De effectieve doorstroomoppervlakte is een rekengrootheid die de verhouding geeft tussen het verval over de kering (al dan niet in aanbouw) en het debiet door de kering. Zowel het debiet als het verval kunnen worden herleid uit metingen, van waaruit men dan in principe de impact van het kunstwerk kan verdisconteren in een afvoeroëfficiënt. Voor de OSK zijn tweedimensionale afvoeren per opening en driedimensionale afvoeren voor de gehele kering bepaald. Verhoudingsgewijs kon aangetoond worden dat 2/3 van het totale debiet wordt afgevoerd door de Roompot, en dat de overige 1/3 van het debiet gelijk verdeeld is tussen de overige 2 sluitgaten. Deze verdeling is gelijk aan de situatie voorafgaand aan het plaatsen van de kering. Grootschalig onderzoek met de getijmodellen is gebruikt om de hoogteposities van de drempels in de oorspronkelijke geulen te bepalen, ook met het oog op het optimaliseren van de getijslag in de Oosterschelde met een semi-open kering (zie Figuur 3.5). Optimalisatie van de verticale drempelposities zou met de huidige methoden wellicht als numeriek vraagstuk beschouwd kunnen worden.

Het is echter ook op dit moment nog aan te raden om een aantal schaalproeven uit te voeren voor bijvoorbeeld het bepalen van de afvoercoëfficiënten en ter validatie van een numeriek model. De grootste uitdaging zit daarbij in het leggen van de relatie tussen lokale effecten (de blokkade door de drempels) en grootschalige effecten (waterstanden in het gehele bekken).

3.4.2 Middelgrote schaal

Een groot deel van de uitgevoerde stroomproeven was er op gericht om de benodigde lengte (in stromingsrichting) van de bodembescherming en de te verwachten mate van ontgronding te bepalen. De lengte van de bodembescherming was vastgesteld op 550-650 m, op basis van het uitgangspunt dat de maximaal toegestane ontgronding niet dieper zou worden dan 25 m. Dit werd vooral opgelegd door de maximale verdichtingsdiepte die bereikt kon worden met de Mytilus (installatieschip gebruikt voor verdichting, zie Figuur 3.6) ter voorkoming van zettingsvloeiingen aan de rand van de bodembescherming. Voor het voorspellen van de ontgrondingen zijn twee hoofdinstrumenten gebruikt: schaalmodelonderzoek en numerieke berekeningen op basis van dat modelonderzoek. Deze lopen in de verslaggeving uit die tijd vaak door elkaar heen; beide instrumenten werden op een symbiotische manier gebruikt ('hybride' modellering).



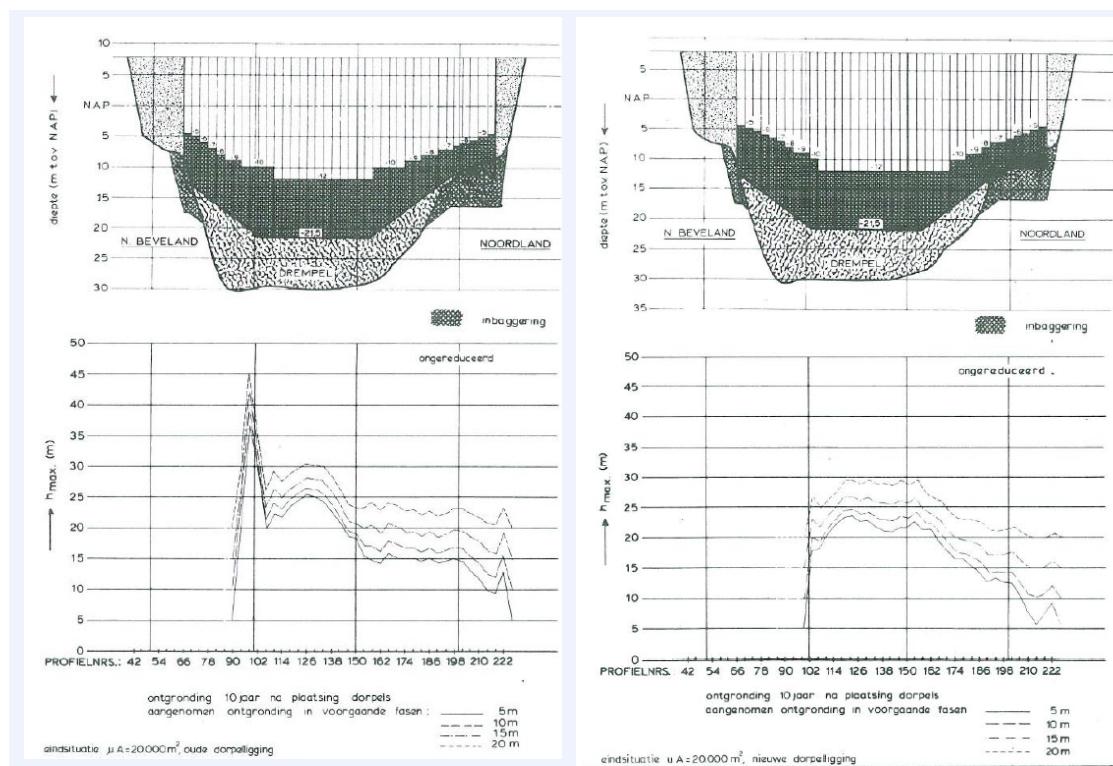
Een overzicht van de belangrijkste ontgrondingsonderzoeken uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium is gegeven in referentie S0562. Een groot deel van de uitgevoerde onderzoeken hebben betrekking op het ontwerp van de OSK, de belangrijkste aandachtspunten volgend uit deze onderzoeken worden hier behandeld.

Voordat aan de specifieke modeltesten voor de OSK werd begonnen is in de voorgaande jaren systematisch onderzoek gedaan door WL|Delft Hydraulics naar twee-en driedimensionale ontgrondingen (referentie M648 & M863). De daaruit volgende empirische relaties voor tijdsontwikkeling vormde de basis voor de voorspellende berekeningen gebruikt bij de OSK, terwijl kalibratie van deze relaties gedaan werd met behulp van de data verzameld in de modelproeven.

Hierbij werd in latere studiefasen opgemerkt dat door voortdurende wijzigingen in de planning in de bouw van de kering modelonderzoek te tijdrovend was, maar dat de voorspellingen hierdoor wel op een (te) beperkt modelonderzoek werden gebaseerd.

Nadat metingen uit het veld beschikbaar waren gekomen is gebleken dat de rekenmodellen de maximale ontgrondingsdiepte bij de OSK met een nauwkeurigheid van +/- 10% hebben kunnen voorspellen op modelschaal, uitgaande van optimale/perfecte modelrandvoorwaarden. Beschouwingen over de algehele nauwkeurigheid van de voorspelling van de maximale ontgrondingsdiepte op prototypeschaal, waarbij ook onzekerheid met betrekking tot de hydraulische randvoorwaarden en de bodemgesteldheid zijn meegenomen, heeft geleid tot de conclusie dat een standaardafwijking van 20-25% in rekening moet worden gebracht. Desalniettemin was men uiteindelijk toch verrast door het (snellere) verloop van de ontgrondingen op veldschaal. Het PhD-onderzoek van Broekema (2020) heeft aangetoond dat deze afwijking van de verwachtingen mogelijk te verklaren is door het sterke driedimensionale karakter van de stroming en turbulentie bij de OSK, waardoor de stroming rondom de kering meer aan blijft liggen aan de bodem.

Een voorbeeld van het type ontgrondingsonderzoek uitgevoerd in de ontwerpfase van de OSK is weergegeven in Figuur 3.7. Dit figuur laat ter illustratie de invloed van een verschillende verticale drempelpositie op de resulterende maximale ontgronding gevonden in het schaalmodel.



Figuur 3.7 Ontgronding (onder) bij de Roodpot-opening voor twee verschillende drempelposities (boven).

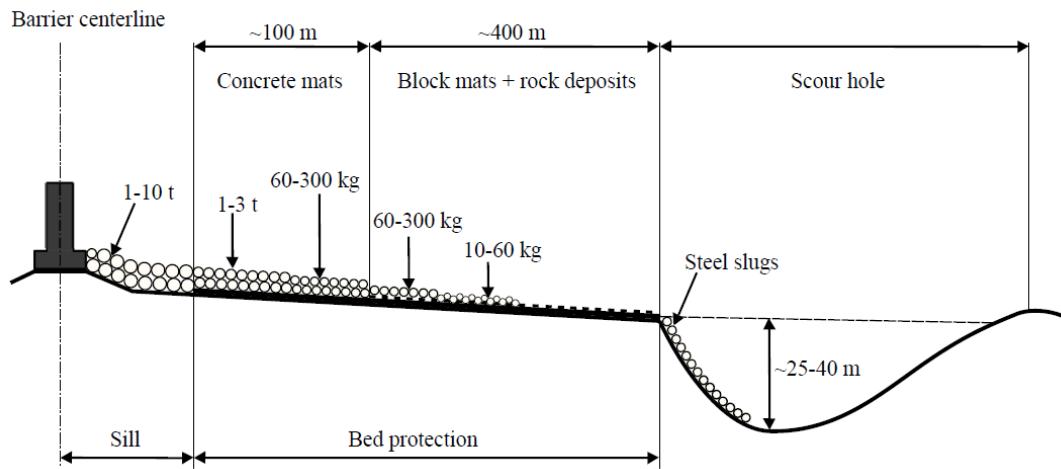
Deze methodiek wordt in de dagelijkse praktijk binnen Deltares eigenlijk niet meer toegepast; normaliter wordt fijn zand gebruikt. Dit heeft als nadeel dat de opschaling van het verwachtte tijdsverloop niet triviaal is, maar het gebruik van kunststoffen als bakeliet en polystyreen voor ontgrondingsproeven is geen duurzame keuze. Net als tijdens de ontwerpfase van de OSK is het huidige praktisch ontgrondingsonderzoek nog veelal gericht op het verkrijgen van een (empirische) relatie die inzicht geeft in de ontwikkeling van ontgronding op prototype-schaal. Momenteel worden wel stappen gemaakt in het gebruik van nauwkeurige 3D CFD rekenmodellen om ontgronding te berekenen, maar de koppeling van zeer snelle en lokale morfologische veranderingen met nauwkeurige stromingsberekeningen voor het grootschalige watersysteem is complex.

Op hetzelfde detailniveau als de ontgrondingsproeven zijn ook proeven uitgevoerd naar zowel de benodigde lengte als de stabiliteit van de bodemverdediging. Een schetsmatige weergave van de bodembescherming is gegeven in Figuur 3.8 (met vertrokken verticale schaal).

De lengte van de bodembescherming is zoals hierboven benoemd afgestemd op een maximaal verwachte ontgronding van 25 m. Een maatgevende instabiliteit die dan op zou treden in de ondergrond zou de kering in dat geval niet kunnen bereiken. Hoewel de huidige ontgronding zoals in de praktijk is opgetreden dieper is dan dit criterium, vormt dit (nog) geen probleem, omdat men in de geotechnische berekening uitging van een glijvlak dat zijn oorsprong zou hebben bij de rand van de bodembescherming. Het diepste punt van de ontgrondingen ligt hier ongeveer 50-100 m vanaf. Daarbij geldt ook dat de helling van het aangenomen optredende glijvlak zeer conservatief is, wat overeenkomt met een betrekkelijk uitgestrekt gebied waarin rekening is gehouden op ontgrondingseffecten. In combinatie met de juiste beheers-strategie zou het risico op beschadiging aan de kering dus zeer klein moeten zijn. In Sectie 3.4.4 wordt hier nog kort op ingegaan.

Bodembeschermingsonderzoek gericht op stabiliteit van de bodembescherming is uitgevoerd op verschillende modelschalen (van 1:10 tot aan 1:100). Uit dat onderzoek is geconcludeerd dat de maatgevende situatie het geval met een enkele weigerende (niet sluitende) schuif is. Dit is installatietechnisch een gunstige conclusie, omdat extra bestorting gefaseerd aangebracht kan worden omdat deze situatie pas op zou kunnen treden na voltooiing van de bouwwerken. De overgang asphaltmastiek-bodemverdediging is van de onderzochte constructieonderdelen de zwakste schakel, waardoor een bestorting van stortsteen daar noodzakelijk is. Bij alle onderzochte geometrieën is een minimaal benodigde steengradering van 60-300 kg nodig, echter in het geval van een weigerende schuif is aan de Oosterscheldezijde een bestorting met 300-1000 kg breuksteen nodig. Verder werd geconcludeerd dat voor onderzoek met stortsteen op kleinere schaal dan 1:10 rekening gehouden moet worden met schaaleffecten in de kritieke snelheid voor de rand van de bodembescherming.

Dimensionering van een bodembescherming in de huidige dagelijkse praktijk gebeurd, afhankelijk van hoe gebruikelijk een constructie is, veelal op basis van bureaustudies. Schaalmodellen worden gebruikt ter validatie en/of optimalisatie van het ontwerp. Binnen Deltares wordt ook aandacht besteed aan het gebruik van 3D CFD modellen voor zulke ontwerpdoeleinden, maar evenals voor ontgronding geldt hier ook dat dit momenteel nog geen dagelijkse praktijk is.



Figuur 3.8 Doorsnede van de bodemverdediging toegepast bij de OSK. Bron: Broekema, 2020.

3.4.3 Kleine schaal

Met onderzoeken op kleinere schaal wordt hier voornamelijk bedoeld onderzoeken op lokale schaal van de kering zelf. Denk hierbij aan verschillende keringsonderdelen, zoals bijvoorbeeld de vormgeving van de drempel, maar ook aan onderzoek naar het stroombeeld in het geval van één of meerdere gesloten (weigering te openen) of juist geopende schuiven (weigering te sluiten).

Het eerste onderzoek wat kort aangestipt wordt ter illustratie is een onderzoek dat uitgevoerd was tijdens de oriëntatiefase waarin vele alternatieven beschouwd werden als mogelijke gedeeltelijke afsluitmethode. Een van deze alternatieven was het implementeren van roosterschuiven in verzonken caissons. Het bepalen van de statische en dynamische belastingen op de constructie evenals het bepalen van de doorstroomcapaciteit van de roosters werd in het lab bepaald. Een belangrijk aandachtspunt daarbij is dat krachten op de constructie in het geval van duidelijk gedefinieerde loslaatpunten goed te bepalen zijn in een schaalmodel. Duidelijk gedefinieerde loslaatpunten vindt men bijvoorbeeld bij geometrisch scherpe vormen, waarbij de vorm van het object de bepalende factor is voor loslating van de stroming. Voor meer gestroomlijnde objecten, zoals aferonde vormen, is de dynamiek in de grenslaag bepalend voor de locatie van het loslaatpunt (en dus de weerstand die het object uitoefent op de stroming en andersom de kracht die de stroming uitoefent op het object). Grenslaagdynamiek wordt grotendeels beïnvloed door viscositeitseffecten, en dus ook de verschaling van turbulentie. Dit is doorgaans niet mogelijk in schaalmodellen zonder het karakter van de stroming in het schaalmodel wezenlijk te veranderen. Tegenwoordig zou een analyse met behulp van CFD hier goed bij kunnen helpen om dit soort alternatieven te toetsen.

Ontwerp van de pijlers

De hydraulische belasting op de pijlers zoals uiteindelijk toegepast voor de OSK is getoetst in een schaalmodel van 5 m breed (zie Figuur 3.9). In verband met de verwachte niet rechte aanstroming in de hoofdgeulen van de Oosterschelde zijn hier voor verschillende pijlerorientaties ten opzichte van de inkomende stromingsrichting metingen gedaan. Gegeven de wat rechthoekige vormen van de pijlers zijn de loslaatpunten goed gedefinieerd, en treden er dus geen schaaleffecten met betrekking tot het Reynolds getal op met betrekking tot de loslating. Turbulente aanstroming werd wel genoemd als factor die een effect zou hebben op de langskrachten op niet-gestroomlijnde lichamen; voornamelijk de intensiteit speelt hierbij een grote rol, de lengteschaal bleek van mindere betekenis te zijn. Daarop werd besloten dat gemeten turbulentie-intensiteit op prototypeschaal werd verwerkt in de aanstroomcondities tijdens de schaalproeven. Dit kan gerealiseerd worden door het toevoegen van extra ruwheid bovenstrooms.

Verder is er onderzoek gedaan naar de invloed van ongelijkmatig verdeelde turbulentie over de verticaal op de resulterende hydrodynamische krachten op de pijlers. Dit leverde geen eenduidig beeld op, omdat verschillende invloeden (verschil in intensiteit of in verdeling) niet goed van elkaar gescheiden konden worden.



Figuur 3.9 Meetopstelling bij het bepalen van krachten op de pijlers met een pijler in een stijf meetframe. De kracht die het kost om de pijler in het stijve frame stil te houden (gemeten) is gelijk aan de hydrodynamische kracht uitgeoefend op de pijler.

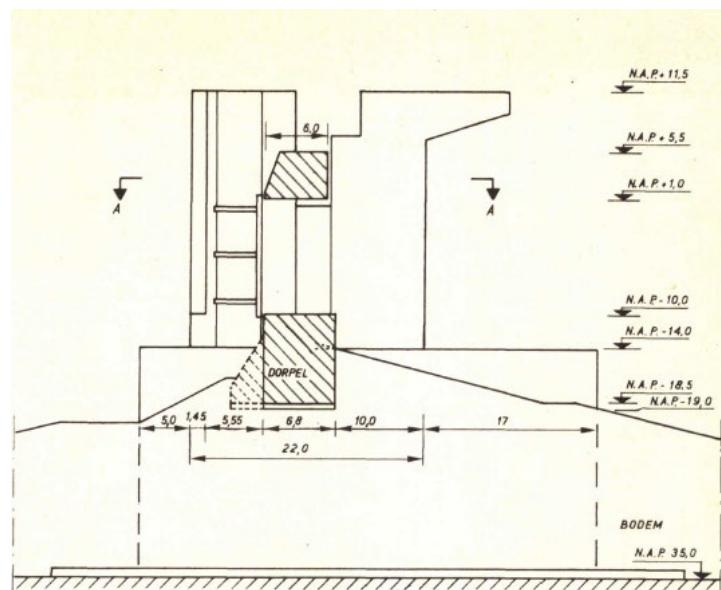
Ontwerp van de dorpels

Detailonderzoek werd ook uitgevoerd voor verschillende dorpelvarianten. Initieel werd een rechthoekig dorpelprofiel getest, later het uiteindelijk gekozen trapeziumvormige dorpelprofiel (zie ook Figuur 3.10 en Figuur 3.11). Voor verschillende waterstanden aan zowel de Noordzee- als aan de Oosterschelde-zijde van de kering werd het detailstroombeeld door de maatgevende doorstroomopening (en bijbehorende dorpelkrachten) onderzocht. Het maximale geteste waterstandsverschil was 7 m, en hoorde bij een Noordzee waterstand van 5.5 m +NAP en een Oosterschelde waterstand van -1.5 m NAP. De stroombeelden over de dorpel zijn aanschouwd voor verschillend verticale schuifstanden, van volledig open tot bijna gesloten. De kleinst beschouwde doorstroomopening tussen onderkant schuif en bovenkant drempelbalk was 2.3 m. Stroombeelden werden gevisualiseerd door middel van een metalen raamwerk waaraan wollen draadjes zijn bevestigd (zie Figuur 3.10). Snelheidsmetingen werden uitgevoerd met een micromolen op verschillende plekken. Wegens het turbulente karakter van de stroming en door de grote hoeveelheid luchtinsluiting in het water zijn deze metingen niet altijd even nauwkeurig. Waterstanden werden op verschillende plekken gemeten met golfhoogtemeters. Daarnaast zijn met drukopnemers drukken op en rond de dorpels gemeten, waarbij ook stabiliteit van verschillende dorpelvormen onder golfbelasting beschouwd kon worden in een latere analyse. Er werd geconcludeerd dat onder maximale schuifopening en maximaal verval voor beide beschouwde dorpelvormen de maximale afvoer wordt benaderd (wat een logische conclusie is). De stroombeelden zijn nagenoeg vergelijkbaar; een duikende straal en een dekneer in geval van een groot verval en grote schuifopening, een bodemeer met een duidelijk staand golfpatroon in geval van een kleiner verval en grote schuifopening, en een bodemeer met weinig oppervlaktegolven bij kleinere schuifopeningen.

Voor maximale afvoer is er weinig verschil in maximale stroomsnelheid tussen kering met trapeziumvormige dorpel of rechthoekige dorpel, ook al zou in theorie een meer gestroomlijnde drempel de stroming door de kering kunnen bevorderen.



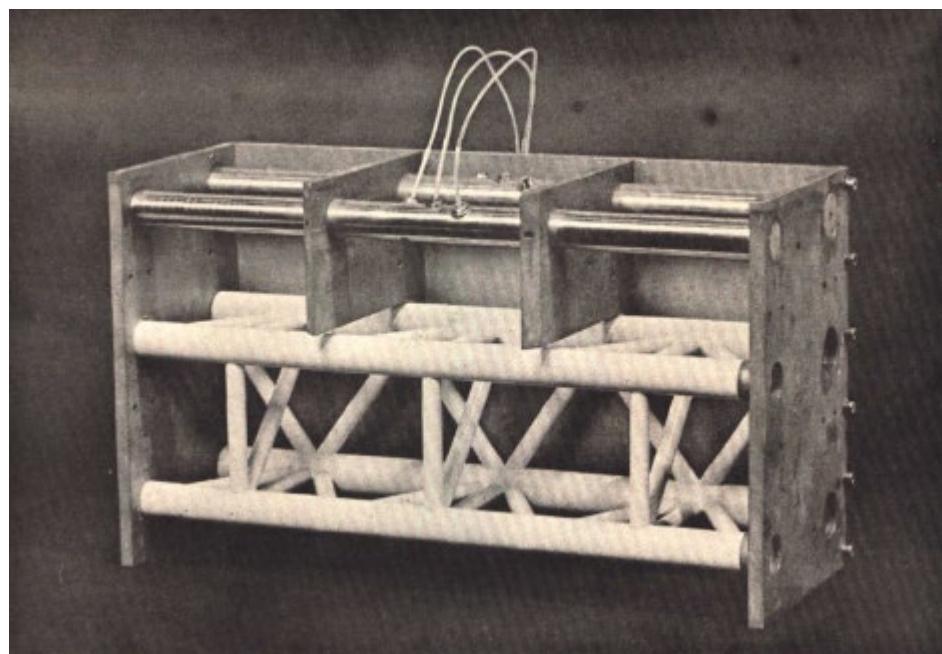
Figuur 3.10 Voorbeeld van een uitgevoerde stroommeting tijdens de dorpeltesten (links) en doorsneden van de twee beschouwde dorpelvarianten (rechts). Merk op dat de oriëntatie van de dorpel in de rechter schets 90° met de klok mee is geroteerd ten opzichte van de daadwerkelijke positie op de kering (zie ook Figuur 3.11).



Figuur 3.11 Geschematiseerde verticale doorsnede van de kering, met schetsmatig 2 verschillende ontwerpen van de drempeldoorsnede.

Ontwerp van de schuiven

Veel aandacht is ook besteed aan het onderzoeken van de (golf)belasting op de schuiven van de Oosterscheldekering (zoals het voorbeeld in Figuur 3.12). Het is gebleken dat voornamelijk golfklapbelastingen te groot waren om nog tot een economisch verantwoord ontwerp van een plaatliggerschuif³ te komen, waarna is besloten dat een vakwerkschuif de voorkeursoplossing zou zijn. Het uiteindelijke ontwerp van een vakwerkschuif kwam er niet zonder slag of stoot. In eerste instantie was dit ontwerp zowel constructief als economisch niet aantrekkelijk genoeg. Het golfklapprobleem kon wegens een gebrek aan inzicht in enerzijds het responsiedrag van de schuif en anderzijds de juiste schaalregels voor de vertaling van in het model gemeten golfklapdrukken naar prototypewaarden niet volledig worden overzien. Pas in een ver gevorderd stadium, tijdens gedetailleerde onderzoeken naar golfklappen op de plaatliggerschuif, moest dit probleem als zodanig ernstig onderkend worden dat een vakwerkschuif de voorkeursoplossing werd. Deze is gedimensioneerd op grond van de op probabilistische wijze verkregen belastingen voor de plaatliggerschuif. De golfklapbelastingen op de vakwerkschuif bleken uiteindelijk een factor 10 lager dan die op de plaatliggerschuif. De horizontale belasting ten gevolge van de verticale klappen is ongeveer 2 keer zo groot als de verticale belasting door klappen.

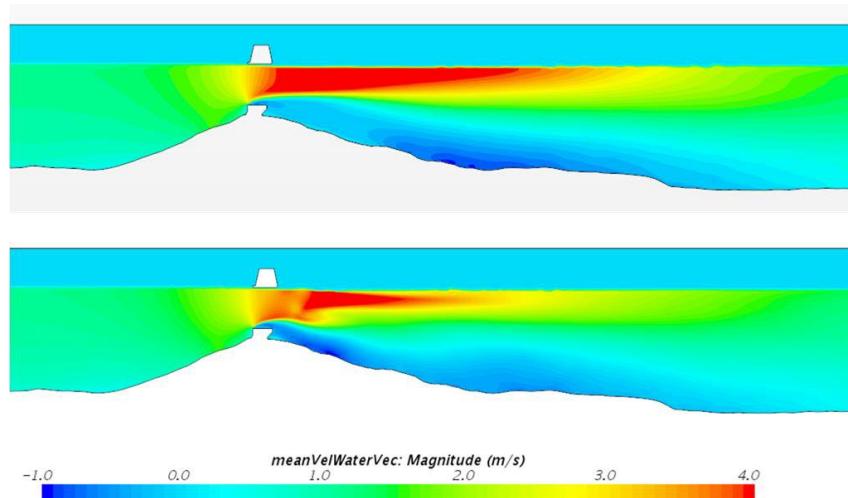


Figuur 3.12 Model van de vakwerkschuif zoals getest in project M1723. Schaal van de proeven was 1:40.

Dit type onderzoek zou zich in de huidige praktijk zeer goed lenen voor een CFD toepassing. Schaalproeven zouden hier naar verwachting nog zeker toegevoegde waarde hebben, enerzijds om een algeheel inzicht te verkrijgen van de relevante processen en gevoeligheden en anderzijds ter validatie van de numerieke berekeningen. De nauwkeurigheid en resolutie van snelheidsmetingen is nu beter dan tijdens de uitvoering van de proeven. Technieken als PIV zouden hier goed kunnen worden ingezet om een ruimtelijk beeld van de snelheidsverdeling te verkrijgen. Dat soort data leent zich uitstekend voor de validatie van numerieke modellen. De schaal van het probleem leent zich in ieder geval goed voor een toepassing van CFD berekeningen, en binnen Deltares gebeurt dit ook regelmatig. Een recent voorbeeld omvat de simulaties die gedaan zijn om de invloed van de plaatsing van getijturbines in een van de doorstroomopeningen van de kering te toetsen.

³ Schuiven bestaande uit een kerende schaalbeplating, gesteund door horizontale plaatliggers, die de op de schaalwand uitgeoefende belastingen overdragen op de pijlers.

Hier voor zijn zowel veldmetingen als laboratoriumproeven gedaan (voornamelijk aan de TU Delft) en numerieke berekeningen (door Deltares, zie bijvoorbeeld Figuur 3.13).



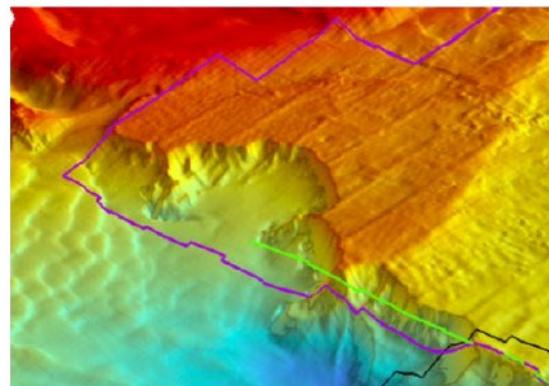
Figuur 3.13 Gemiddelde stroomsnelheid berekend met CFD voor een situatie zonder (boven) en met (onder) getijturbines aanwezig in de doorstroomopening (O'Mahoney et al, 2019).

3.4.4 Randvoorwaarden

In deze sectie wordt nog even kort ingegaan op de randvoorwaarden voor succesvolle operationele inzet van de OSK. In dit geval gaat het om fysieke randvoorwaarden met betrekking tot hydraulische condities, en om organisatorische randvoorwaarden in het beheer van de kering.

Een belangrijk aspect is de huidige kerende hoogte van de OSK. Deze is 5.6 m +NAP bij de Hammen opening, en 5.8 m +NAP bij de Roompot en Schaar openingen. Het ontwerpeisel van de kering voor deze openingen was destijds vastgezet op respectievelijk 5.3 m +NAP en 5.5 m +NAP. De extra kerende hoogte was ingebracht om rekening te houden met eventuele zetting van de OSK en met zeespiegelstijging (zie Paragraaf 12.2.3.2). Gegeven de huidige inzichten omtrent de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt of kan stijgen is er weinig ruimte in de aangebrachte extra hoogte.

Figuur 3.14 ter illustratie). Voor alle mogelijke partijen die betrokken zijn bij het ontwerpen, maar ook zeker bij het beheer en onderhoud, van stormvloedkeringen is dit een belangrijke aandachtspunt.



Figuur 3.14 Voorbeeld van een opgetreden instabiliteit aan de rand van de bodembescherming die ook daadwerkelijk tot schade aan de bodembescherming heeft geleid.

3.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

Deltares heeft de beschikking over een brede kennisbasis omtrent de OSK die zich uitstrekken over vele ruimte- en tijdschalen (van volledig estuarium tot aan elementen van de kering), alsmede een breed instrumentarium aan tools (van fysische schaalmodellen tot aan complexe numerieke modellen). In deze sectie zal een korte vooruitblik in mogelijke toekomstige toepassing van onze huidige kennis bij de OSK zelf (of bij andere, vergelijkbare keringen).

Zoals benoemd in Sectie 3.4.4 is er relatief weinig ruimte in acht genomen met betrekking tot veranderende randvoorwaarden (door bijvoorbeeld klimaatverandering). Een mogelijk risico van (versnelde) zeespiegelstijging is dat de Oosterscheldekering vaker zal moeten sluiten omdat het ontwerppeil vaker gehaald zal worden. In de praktijk zou dit kunnen betekenen dat de situatie kan convergeren naar een permanent gesloten kering, wat neerkomt op afdamming (en dus een nederlaag voor het openhouden van de Oosterschelde).

4 Haringvlietsluizen

4.1 Hoofdkenmerken kering

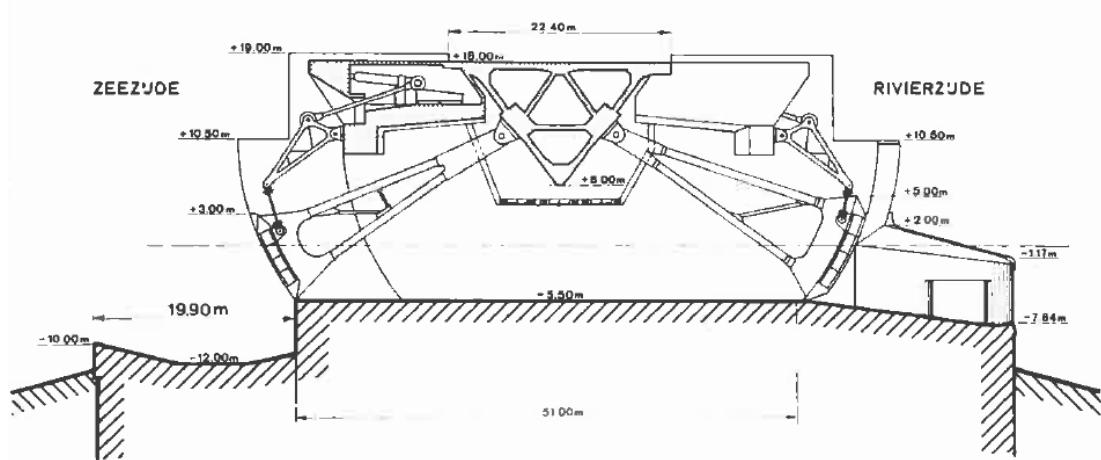
De Haringvlietafsluiting is het zesde afgeronde bouwwerk behorende bij het Deltaplan. Deze afsluiting bestaat uit een dam, met daarin een sluizencomplex, de Haringvlietsluizen (Figuur 4.1). De bouw van de sluizen was nodig, omdat het Haringvliet niet zonder meer afgesloten kon worden van de Noordzee omdat zowel de Maas als de Rijn uitkomen in het Haringvliet. Daarom werd gekozen voor een sluizencomplex met een spuicapaciteit van 25.000 m³ water per seconde. De Haringvlietdam is in totaal 5 km lang en 56 m breed. In dit hoofdstuk zal met name ingegaan worden op de Haringvlietsluizen. Het sluizencomplex bestaat uit 17 spuisluizen die ieder 56.5 m breed zijn. De Haringvlietafsluiting is symbolisch in gebruik genomen op 2 november 1970 door de 17 schuiven te laten zakken. De symboliek van deze afsluiting zal de meeste aanwezigen niet ontgaan zijn, aangezien kort hiervoor de schuiven reeds een aantal etmalen gesloten waren geweest ter beveiliging van het achterland tegen een stormvloed vanuit zee.



Figuur 4.1 Haringvlietsluizen, met in het midden 5 open sluispoorten. Bron: <https://beeldbank.rws.nl>

De Haringvlietsluizen hebben de status van een primaire waterkering. De sluisdeuren rusten in gesloten toestand op een drempel met een hoogtepositie van -5.50 m NAP. De waterkerende hoogte van de sluisdeuren aan de zeezijde is +3.0 m NAP en aan de rivierzijde +5.0 m NAP (Figuur 4.2). Zowel de sluisdeuren als het wegdek zijn bevestigd aan een zogeheten centrale Nabla-ligger (naar de vorm van de doorsnede van dat keringsonderdeel). De kering is gedimensioneerd op een extreme conditie die, volgens de inzichten ten tijden van het ontwerp, voorkomt met een frequentie van 1/4.000. Een expliciete waarde voor de bijbehorende waterstand kon niet gevonden worden, maar in een van de rapportages werd wel een waterstand van +5.65 m NAP bij Hellevoetsluis gegeven met een kans van 1/10000.

Gegeven de beperkte hoogte van de kering aan zeezijde, kan het overslagdebiet tijdens sluiting aanzienlijk zijn. De impact van deze overslag op het achterliggende watersysteem is minimaal vanwege de relatief grote bergingscapaciteit in het achterliggende gebied.



Figuur 4.2 Doorsnede van de Haringvlietsluizen (Document ref.: M0754_3)

De Haringvlietafsluiting was in principe bedoeld als permanente afsluiting, waardoor het Haringvliet zijn getijde karakter volledig kwijt zou raken. Dit bekent dus dat de voornaamste reden om de sluizen (deels) te openen is om de rivieraafvoeren door het Haringvliet kwijt te kunnen. Het opening van de sluizen is daarmee dus een functie van de rivieraafvoer. Het lozingsprogramma bij de Haringvlietsluizen was specifiek gerelateerd aan één parameter, namelijk de afvoer van de Rijn te Lobith. Het lozingsprogramma (Lozings- en bedienProgramma Haringvlietsluizen 1984, LPH84) was in eerste instantie opgesteld als volgt:

- Bij afvoeren tot 1100 m³/s zijn de sluizen gesloten op de zout- en visriolen na (alleen als de buitenwaterstand lager is dan de binnenwaterstand), wat tot globale afvoeren van 10 m³/s leidt.
 - Bij afvoeren tussen 1100 m³/s en 1700 m³/s staan de sluizen 25 m² open (alleen als de buitenwaterstand lager is dan de binnenwaterstand) ten behoeve van een gering doorspoeldebiet van globaal 50 m³/s gemiddeld over het getij.
-
- Bij afvoeren groter dan 9500 m³/s staan de Haringvlietsluizen geheel open (alleen als de buitenwaterstand lager is dan de binnenwaterstand).

LPH84 was volledig gericht op het afvoeren van rivierwater; het zeewater werd zoveel mogelijk buiten gehouden getuige dat alleen geloosd werd als de buitenwaterstand lager was dan de binnenwaterstand. De afsluiting van het Haringvliet voor getij en dus de verzoeting van de voormalige zeearm had een zeer grote impact op het ecosysteem van de Haringvliet. Vanaf eind jaren '80 ontstond al meer aandacht voor deze nadelige effecten voor de natuur.

Al in 2000 werd toen door de toenmalige staatssecretaris van VenW het Besluit beheer Haringvlietsluizen (het 'Kierbesluit') genomen. Dit besluit betrof het voornemen voor een veranderd sluisbeheer, waarbij de sluizen beperkt open gesteld zouden worden met als doelstelling het bieden van goede voorwaarden voor karakteristieke estuariene levensgemeenschappen en voor duurzaam gebruik aan weerszijden van de sluizen.

Met deze maatregel zouden de sluizen vaker en verder open worden gezet voor meer getijdenwerking in het Haringvliet en een zogeheten ‘getemd getij’ met een totaal verticaal getijverschil van 70 cm. Het heeft geduurd tot 2018 dat het Kierbesluit daadwerkelijk in werking is getreden.

4.2 Functies van de kering

In een speciale uitgave van het maanblad “Weg en Waterbouw” uit 1971 werd het sluiscomplex bij de Haringvlietafsluiting een bolwerk en een hoofdkraan genoemd door de heer H.J. Stuvel. Een bolwerk voor veiligheid tegen overstromingen en de hoofdkraan voor de landelijke waterbeheersing. Deze omschrijving geeft duidelijk de twee primaire functies van deze primaire waterkering aan; enerzijds de waterkerende functie en anderzijds een afvoerende functie. Daarnaast vormt de kering een belangrijke verkeersverbinding tussen Zuid-Holland en Zeeland.

4.3 Kennisbasis Deltares

In deze sectie wordt de kennisbasis van Deltares met betrekking tot de Haringvlietsluizen uiteengezet. Zoals benoemd in Sectie 4.1 is het gebruik van de sluizen door een veranderde blik op natuurwaarde recentelijk aangepast. Bij de kennisvragen die rond deze vraagstukken speelden is Deltares ook veelvuldig betrokken geweest. In de beschrijving van de Deltares kennisbasis wordt daarom een onderscheid gemaakt tussen kennis opgebouwd tijdens de ontwerp fase en kennis opgebouwd na ingebruikname.

4.3.1 Kennisbasis opgebouwd tijdens de ontwerp fase

Een zeer groot aantal modelproeven is uitgevoerd tijdens de ontwerp fase ter ondersteuning van verschillende aspecten van het ontwerp van de Haringvlietsluizen. De proeven zijn onder andere uitgevoerd in het laboratorium in de Voorst, in een 3D model met schaal 1:30. Verder zijn er ook proeven uitgevoerd in verschillende stroomgotten voor detaildimensionering (op schalen variërend van 1:20 tot 1:7).

Stroombeeldonderzoek werd voor verschillende doeleinden uitgevoerd, samenvattend:

- Het bepalen van de positionering van verschillende elementen behorend bij de Haringvlietafsluiting, met als oog de gewenste (piek) afvoeren te kunnen realiseren.
- Onderzoek naar het construeren van toeleidings-geulen voor het sluiscomplex teneinde afvoermogelijkheden te vergroten.
- Onderzoek naar stroming tijdens verschillende bouwfases, en benodigde randvoorwaarden tijdens constructie van verschillende delen van de afsluiting.
- Stromingsonderzoek voor de gedetailleerde vormgeving van verschillende elementen van de Haringvlietafsluiting.
- Stromingsonderzoek teneinde de juiste randvoorwaarden te bepalen voor ontgrondingsanalyse.
- Stromingsonderzoek ten behoeve van het plaatsen van de zinkstukken behorende bij de bodembescherming.

Selectie van literatuur: M0515 (meerdere volumes), M0581 (meerdere volumes), M0505 (meerdere volumes), M0629, M1081.

Bodembeschermings- en ontgrondingsonderzoek werd uitgevoerd teneinde de stabiliteit van de fundering van de constructie te waarborgen. Dit omvatte:

- Stabiliteit van het stortbed voor verschillende afvoeren en sluisopening-configuraties voor verschillende sluisontwerpen.

- Vormgeving van de bodembescherming op basis van ontgronding aan de rand van de bescherming voor verschillende sluisontwerpen om ondermijning te voorkomen.
- Algemeen systematisch ontgrondingsonderzoek voor verschillende sluisontwerpen om tot een optimaal ontwerp van de bodembescherming te komen.
- Vormgeving bodembescherming nabij de landhoofden van de sluizen.
- Drukvariaties in en stabiliteit van het stortebed door wervelstraten in het geval van een gesloten schuif tijdens extreme omstandigheden.

Selectie van literatuur: M0505 (meerdere volumes), M0506, M0765, M0715, M0731 (meerdere volumes).

Onderzoek naar belastingen op de sluizen vormde een groot deel van de uitgevoerde onderzoeken. Dit omvatte:

- Onderzoek naar de tangentiele belasting op de schuiven van het sluizencomplex voor zowel stromingen als golven.
- Onderzoek naar golfbelasting op de sluisdeuren ter vaststelling van de uiteindelijke vorm en oplegging.
- Onderzoek naar door de spuistroom veroorzaakte trillingen van de segmentschuiven.
- Na oplevering zijn buitenmetingen naar trillingen en golfbelastingen van de segmentschuiven in de gebouwde situatie.

Selectie van literatuur: M0399 (meerdere volumes), M0621 (meerdere volumes), M0620 (meerdere volumes), M0754 (meerdere volumes).

4.3.2 Kennisbasis opgebouwd na ingebruikname

De onderzoeken genoemd in Sectie 4.3.1 geven aan dat de nadruk tijdens de ontwerpfasen voornamelijk lag op waterbouwkundige aspecten van het ontwerp. Richting eind jaren '80 van vorige eeuw begon het idee dat de natuurwaarde van waterbouwkundige constructies ook belangrijk is steeds meer te leven. Men zag na het afsluiten van het Haringvliet voor de getijbeweging de nadelige gevolgen voor het ecosysteem in het Haringvliet, en het bestaande ecosysteem werd in de jaren na de sluiting grondig op zijn kop gezet. Het Kierbesluit is daarom in het leven geroepen om toch enigszins het getijkarakter in de Haringvliet weer terug te krijgen. Andersom hebben trekvissen zoals zalm en zeeforel op deze manier meer mogelijkheden om hun paaigebieden te bereiken als de sluizen op een kier staan tijdens vloed. Dit betekent echter wel dat een deel van het Haringvliet weer zouter wordt, wat mede tot gevolg zou hebben dat innamepunten voor zoetwater voor bijvoorbeeld drinkwater of de landbouw wellicht oostwaarts verplaatst moeten worden. Deltares is nauw betrokken geweest bij onderzoeken gerelateerd aan het Kierbesluit met betrekking tot de volgende onderwerpen:

- (3D) numerieke modellering voor (gedeeltelijk) geopende Haringvlietsluizen voor effectonderzoek alternatief beheer Haringvlietsluizen op zowel zoutindringing als op morfologische veranderingen.
- Veldonderzoek in het kader van "lerend implementeren" van het Kierbesluit, waarbij metingen naar zoutindringing, zoetspoeling, nalevering (verspreiding van zout water uit de diepe putten in het Haringvliet bij gesloten sluizen) en vismigratie zijn uitgevoerd. Dit zijn veldmetingen in de praktijk geweest.
- Mechanismen van zoutverspreiding in het Haringvliet.
- Mogelijkheden tot het uitvoeren van herstel van de getijdenatuur in het Haringvliet.

Selectie van literatuur: Z0686, T1623, Z0342, 1208788-000, 1207941-002, 11203735.

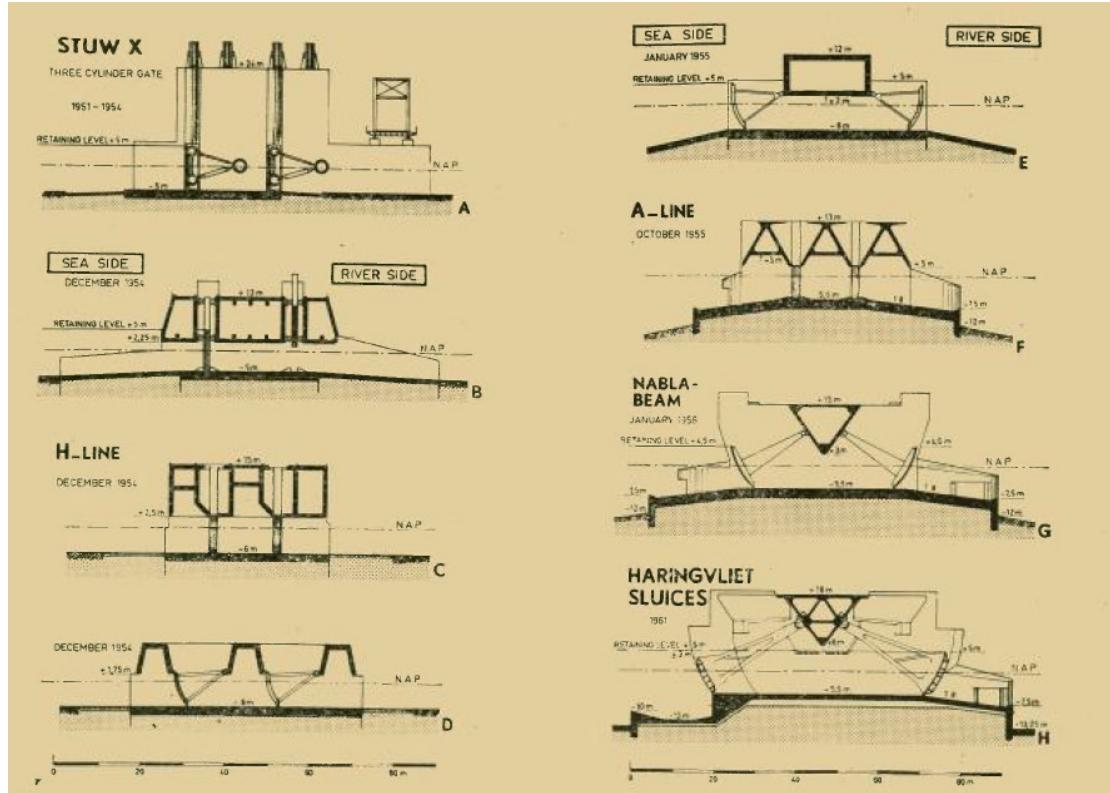
4.4 Grootste technische aandachtspunten

Gegeven het duidelijke verschil in het karakter van studies die zijn uitgevoerd tijdens de ontwerp fase (hoofdzakelijk waterbouwkundig) en studies die daarna zijn uitgevoerd (hoofdzakelijk gericht op natuurwaarde) is in het beschrijven van de grootste technische aandachtspunten eenzelfde onderscheid gemaakt. In Sectie 4.4.1 worden de belangrijkste waterbouwkundige aandachtspunten aangestipt, en in Sectie 4.4.2 worden de belangrijkste aandachtspunten met betrekking tot (het verbeteren van) de natuurwaarde aangestipt.

4.4.1 Waterbouwkundige aspecten

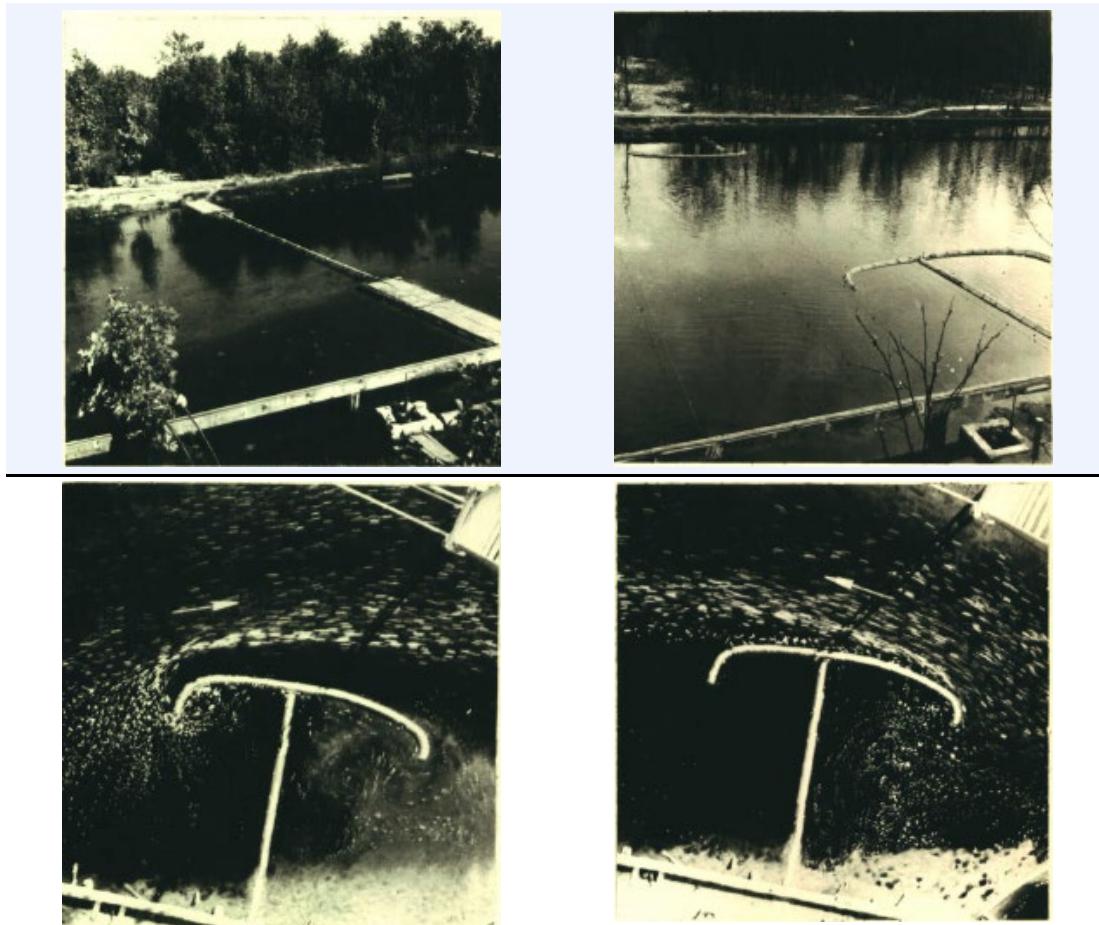
In deze sectie worden de belangrijkste inzichten volgend uit de ontwerp fase besproken. Hierbij wordt van grote schaal (algemene layout van de afsluiting) naar kleine schaal (dimensionering van de losse sluisdeuren) gekeken.

De uiteindelijke vormgeving van het sluizencomplex is in een geleidelijk proces aan een aantal iteraties onderhevig geweest (Figuur 4.3). Het ontwerpproces van ‘Stuw X’ (linksboven) naar de uiteindelijke sluizen is grotendeels gedreven door de verwachte golfkrachten op de constructie. Vanwege de grote breedte van een eventuele golfsbreker die benodigd zou zijn werd het ontwerp direct gestuurd naar een ontwerp dat zelf de golfklappen zou kunnen doorstaan. Alternatieven B, C, D en F hadden als basis dat de impact van golven op de sluisdeuren gereduceerd zou worden door een kleine doorlatendheid of door dissipatie van de golfenergie door luchtcompartimenten aan te brengen. De hoge krachten op de sluisdeuren (met een overspanning van 60 m) vroegen echter om een oplossing waar de belasting overgedragen kan worden op tussenpunten. Alternatieven D, E, G en H zijn daarom dus ontwerpen waarbij de verschillende sectordeuren met meerdere armen verbonden zijn met een scharnierpunt boven het water. Een gevolg hiervan was dat een deel van het probleem van de golfbelasting nu verplaatst werd van de deuren naar de draagconstructie. De dikte van de sluisdeuren kon gereduceerd worden tot 1.5 m, waardoor de bediening simpel genoeg bleef. In de uiteindelijk gekozen variant (alternatief H) is er geen absolute retentie van water, iets wat al eerder besproken is in Sectie 4.1. Voor de ontwerpwaterstand van 5.0 m +NAP zal overtopping door hoge golven frequent optreden, maar de hoeveelheid water geassocieerd hiermee is niet genoeg om de waterstand in het Haringvliet significant te beïnvloeden. Voor een sluisdeur met een hoogte van 2 m +NAP of hoger is de zoutindringing te verwaarlozen ten opzichte van schutverliezen en lekdebit.



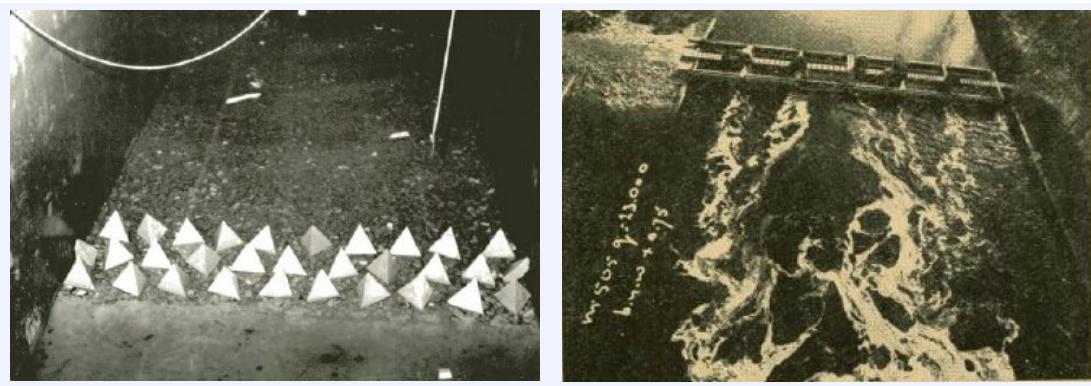
Figuur 4.3 Verloop van het ontwerp van de Haringvlietsluizen.

Een belangrijk ontwerpaspect van de afsluiting was bij deze kering natuurlijk de noodzaak om rivierwater af te kunnen voeren. De dimensionering van de landhoofden moest daarom dusdanig zijn dat enerzijds een zo kort mogelijke afstand tussen de landhoofden werd gerealiseerd, om de kosten van de sluizen te minimaliseren, terwijl anderzijds de afstand dusdanig groot moet zijn om de piekafvoeren aan te kunnen. Hierbij werd ook veel aandacht besteed aan de impact van de layout op de mogelijke ontgronding, om eventuele bodembescherming ook zo efficiënt mogelijk te kunnen uitvoeren. Toenaderingsgeulen bleken een positief effect te hebben op het aanstroombeeld en de debietverdeling door de sluizen heen om de afvoeren te kunnen optimaliseren. Ook is tijdens stroombeelonderzoek aangetoond dat voor verschillende bouwfases de stroombeelden (en dus de werkcondities) acceptabel zijn, maar dat in de meest kritieke fase een snelle afronding van de sluiting vereiste is om het optreden van hoge snelheden te minimaliseren. Deze onderzoeken zijn grotendeels experimenteel uitgevoerd, zie bijvoorbeeld Figuur 4.4. Deze onderzoeken zouden zich tegenwoordig prima lenen voor een numerieke benadering, waardoor op een snelle en efficiënte manier de impact van veel verschillende alternatieven voor afsluiting berekend kan worden. Een experimentele benadering voor detailvraagstukken of bijvoorbeeld ontgronding zou nog wel gangbaar zijn. Het zou tegenwoordig vermeden worden om met een samengeknepen model (een grotere horizontale schaalfactor dan verticale schaalfactor) te werken tijdens een experimentele benadering.



Figuur 4.4 Overzicht van verschillende modellen gebruikt voor stroombeeldonderzoek. Linksboven: uitgangstoestand om de hoeken te meten die de stroming maakt met de pijlers. Rechtsboven: Geleideconstructie ter verbetering van de aanstroming. Linksonder: stroombeeld rond het zuidelijk landhoofd van de aanstroomverbetering tijdens vloed. Rechtsonder: stroombeeld rond het zuidelijk landhoofd van de aanstroomverbetering tijdens eb.

Systematisch ontgrondingenonderzoek heeft aangetoond dat een optimale diepte van de bodembescherming zich op -13.5 m NAP bevindt. Deze diepte is de beste oplossing voor zowel de stabiliteit van de verdediging zelf als voor de uitvoering van de verdediging. Voor een diepere verdediging werden weliswaar lagere snelheden gemeten, maar hogere turbulentie-intensiteiten langs de bodemverdediging, met als resultaat een veel ongunstigere vorm van de ontgrondingskuil die in absolute zin t.o.v. NAP dieper zou zijn. Dit zou het risico op grote gevolgen van een afschuiving, en uiteindelijk schade aan de constructie, vergroten. De stabiliteit van de bodemverdediging kon vergroot worden door extra ruwheid toe te voegen aan de rand van de verdediging, in dit geval uitgevoerd met tetraëders (zie Figuur 4.5). Voor de bodembescherming is een maatgevende situatie als een van de schuiven niet geopend kan worden. De hydraulische belasting op de bescherming is dan het grootst in verband met de wervelstraten die zich dan benedenstroms van de sluispijlers vormen. Als een van de schuiven onverhoop gesloten zou blijven moet met de naast liggende schuiven een regelmatige debietovergang worden gecreëerd, wat met 1 of 2 schuiven aan weerszijden van de gesloten opening voldoende mogelijk is door deze bewust te openen. Ontgrondingenonderzoek en bodembeschermingsonderzoek zou tegenwoordig nog grotendeels experimenteel uitgevoerd worden. Het aantal benodigde experimenten kan waarschijnlijk wel flink gereduceerd worden door een aantal gerichte numerieke simulaties uit te voeren om de meest relevante condities te herleiden.



Figuur 4.5 Links: tetraëders aan de rand van de aangebrachte bodembescherming bij de Haringvlietsluizen voor extra stabiliteit. Rechts: wavelstraten aan weerszijden van de sluispijlers in een schaalmodel in het geval van een gesloten schuif (maatgevend belasting bodembescherming).

Zoals eerder genoemd speelde de verwachtte golfbelasting op de constructie een bepalende rol in de keuze voor het uiteindelijke ontwerp. Voor de gedetailleerde dimensionering van de landhoofden, vloeren en pijlers werd gebruik gemaakt van het 3D schaalmodel, voor de sluisdeuren zijn een groot aantal proeven uitgevoerd in een 2D wind-golf goot. Door de afgeronde vorm van de bovenkant van de schuif treedt een vermindering van de horizontale golfbelasting op. Door aan de bovenkant van de schuif de beplating zowel aan de voor- als achterzijde af te buigen treedt ook een verlaging op van de verticale belasting. Het beste resultaat als compromis tussen de verticale en de horizontale belasting werd bereikt door een verschillende magnitude van afbuiging toe te passen aan zowel de voor- als achterkant.

De dynamische golfbelasting tegen de buitenschuif treedt bij zowel lange als korte golfkammen slechts plaatselijk op. De totale pootkracht is daardoor ongeveer een factor 7-8 kleiner dan wat zou volgen uit een drukmeting met een star model waarbij de aannname gemaakt is dat de schuif over zijn gehele lengte gelijkmatig wordt belast. De lage buitenschuif en grote diepte voor de schuif beperken de dynamische golfaanval, terwijl anderzijds in het geval van een niet volledig geheven buitenschuif een duikende straal weer naar het oppervlakte is gebracht voordat deze de sluisvloer kan raken. Schaaleffecten werden niet waargenomen bij de vergelijking van modelresultaten met een schaal van 1:20 en 1:40.

4.4.2 Natuurwaarde

Vanaf eind jaren '80 ontstaat meer aandacht voor de nadelen van de afsluiting van het Haringvliet voor de natuur. Daarom is door de staatssecretaris van VenW in 2000 het Besluit beheer Haringvlietsluizen (het 'Kierbesluit') genomen, waarin het voornemen voor een veranderd sluisbeheer werd opgenomen. Voordat deze uiteindelijk in werking werd gesteld, zijn verscheidene onderzoeken uitgevoerd om de mogelijke impact van het veranderd sluisbeheer in te kunnen schatten.

Een concreet en direct gevolg van het geleidelijk terug laten komen van een getijbeweging in het Haringvliet is dat het zoutgehalte in de zee arm toeneemt. Vanuit veldproeven in het kader van lerend implementeren is gebleken dat in een aantal diepe putten in het Haringvliet de zoutconcentratie sterk toeneemt bij instroming. Uitspoelen van de putten door middel van een hogere afvoer lijkt ineffectief te zijn om het zoute water uit het diepste deel van deze putten af te voeren; slechts het zoute water in de ondiepe delen spoelt makkelijk weg, opmenging lijkt beperkt te zijn. Hierdoor blijft dus zout water achter in de diepere delen van het Haringvliet. Wind draagt wel positief bij aan de hoeveelheid opmenging, en dus aan de effectiviteit van het zogenaamde zoetspoelen van de Haringvliet.

Het openstellen van de Haringvlietsluizen zal naar verwachting niet de zandonger oplossen in het gebied, omdat de resulterende stroomsnelheden te laag zijn om substantieel zandtransport te induceren. De opening in de kering biedt de kans voor nieuwe soorten om zich te vestigen, maar dit zullen voornamelijk typische brak-water soorten zijn. Voor de echt mariene soorten zal het zoutgehalte in het Haringvliet waarschijnlijk niet hoog genoeg en te variabel zijn.

4.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

De kennisbasis van Deltares omtrent de Haringvlietsluizen kan goed ingezet worden bij het evalueren van de effecten van zwaardere condities als gevolg van klimaatverandering. Denk hierbij aan bijvoorbeeld het vaker optreden van (hogere) golfsbelasting op de schuiven, maar ook aan mogelijk hogere rivierafvoeren als gevolg van grotere smeltwatervolumes en een toename in neerslag. Verder wordt op dit moment de kennis die men heeft al volop ingezet bij de evaluatie van de effecten van de aangepaste sluisbediening.

Het ontwerp van de Haringvlietsluizen is grotendeels vormgegeven door de verwachte hoge golfsbelastingen op de bewegende keringsdelen. Dit betekent andersom ook dat bij het ontwerp van een kering in een omgeving met vergelijkbare condities, voor locaties waar dit type kering passend zou zijn in relatie tot de functionele vereisten, de principes zoals toegepast bij het huidige ontwerp van de Haringvlietsluizen een mooi beginpunt zijn.

5 Hartelkering

5.1 Hoofdkenmerken kering

De Hartelkering is, net als de Maeslantkering (Hoofdstuk 6), in gebruik sinds 1997. De Hartelkering bestaat uit twee openingen met breedtes van respectievelijk ca. 98 m (zuidelijke wand) en ca. 49 m (noordelijke wand, Figuur 5.1). Direct ten noorden van de kering ligt een sluis (de Hartelsluis). In geheven toestand bevindt de onderrand van de kerende wanden zich op +14 m NAP. Het vakwerk van de schuiven is uitgevoerd met open profielen en niet met buizen. Op die manier wordt het drijfvermogen beperkt en wordt een naar boven gerichte kracht in de cilinders te allen tijde voorkomen. De voorkant van de schuiven is gekromd om zo een meer symmetrische gewichtsverdeling van de wand in de lengterichting van het kanaal te verkrijgen (Figuur 5.2). Op deze manier konden de heftorens ranker worden uitgevoerd dan die voor de Hollandsche IJsselkering (Hoofdstuk 7). Echter, ook de kerende hoogte van de wanden is kleiner dan bij de Hollandsche IJsselkering, dus de wanden zijn simpelweg ook minder groot, en minder zwaar.

De kerende hoogte van de kering in gesloten toestand bedraagt +3.0 m NAP. De kerende wanden zijn 9.3 m hoog. Dit betekent dat de onderzijde van de schuiven zich in gesloten situatie op -6.3 m NAP bevindt. Op de rivierbodem is een drempel aanwezig op -6.5 m NAP. De drempel is 3 m breed, gezien in de lengterichting van de rivier. Tussen de schuif en de drempel blijft in gesloten toestand een spleet over van 0.2 m. De schuiven rusten daarbij dus niet op de drempel.



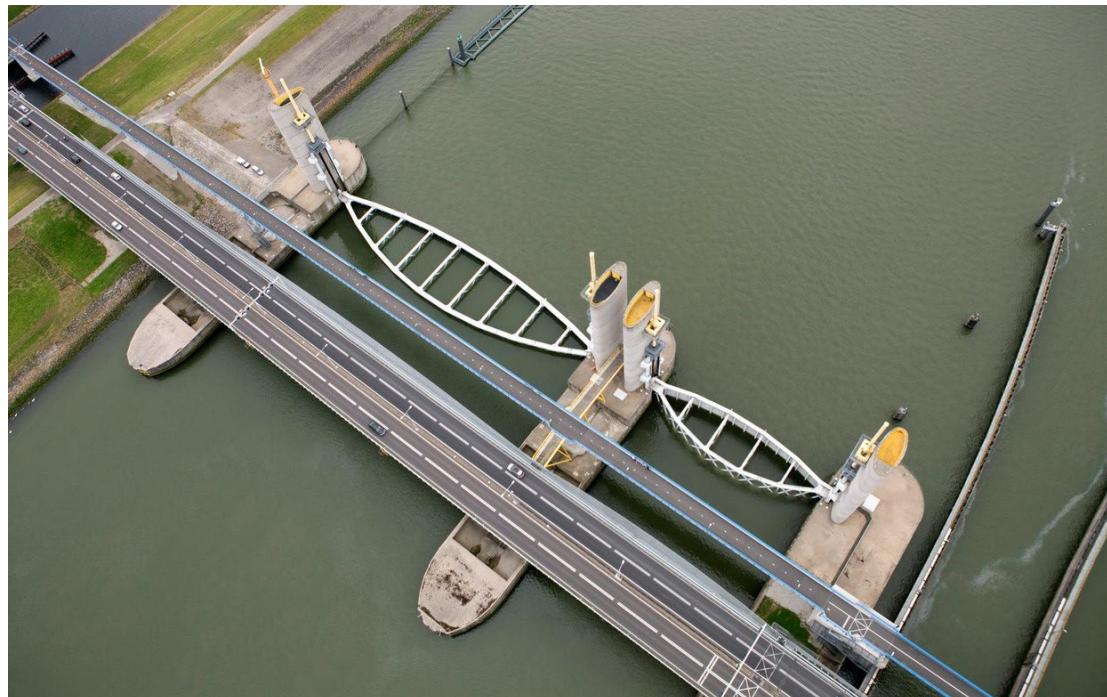
Figuur 5.1: De Hartelkering met beide schuiven gehesen. De foto toont de zeezijde van de kering. De sluis ligt op de foto direct links van de kleine schuif. Direct achter de kering is de onderkant van de Hartelbrug zichtbaar. Op de voorgrond het ponton tegen drijfvuil, dat bij gesloten kering op het Hartelkanaal gedraaid wordt.

De kerende hoogte is beperkt gehouden om zo de bestaande achtergelegen Hartelbrug niet te hoeven versterken. Op die manier kon de kering kosten-efficiënt toegevoegd worden op verlengde delen van de bestaande brugfundatiedelen. Uitgaan van de bestaande sterkte-capaciteit van de bestaande brugfundatie impliceert wel dat de vervalbelasting een randvoorwaardelijk aspect zal zijn voor juist deze kering.

Daarnaast is de kerende hoogte beperkt gehouden om zo de waterstand westelijk van de kering niet teveel op te laten lopen als gevolg van de gesloten kering.

De beperkte kerende hoogte van de constructie houdt in dat er bij het ontwerp al rekening gehouden is met een significant debiet door overslag (periodiek effect, door golven) en overloop (continue stroming, door hoge waterstand). Bij het ontwerp is rekening gehouden met een waterstand van +6,7 m NAP en de bijbehorende overstort.

Sluitcriteria voor de Hartelkering zijn gelijk aan die van de Maeslantkering. Het BOS-systeem, dat besluit dat de Maeslantkering moet gaan sluiten, stuurt tegelijkertijd ook de Hartelkering aan. Onder reguliere situaties sluiten die beide keringen dus altijd gelijktijdig.



Figuur 5.2: Foto met een bovenaanzicht van de Hartelkering met daarop zichtbaar de vorm van de schuiven.

In de praktijk worden beide wanden van de Hartelkering niet gelijktijdig gesloten. Naar verwachting met als doel om de translatiegolf laag te houden, in aanvulling op een beperkte sluitsnelheid voor beide schuiven. Beide schuiven beginnen vanaf de geheven stand met onderkant kerende wanden op +14 m NAP met dezelfde daalsnelheid (1 m/minuut). In het laatste deel van het sluitproces – vanaf onderkant kerende wanden op +3.5 m NAP – daalt de kleine schuif minder snel (0.2 m/minuut; grote schuif gaat verder op basis van 1 m/minuut). Bij openen heeft de grote schuif een hefsnelheid van 1 m/minuut en de kleine schuif van 0.2 m/minuut (ref: W-DWW-96-106).

Tot nu toe is deze kering, net als de Maeslantkering, sinds de ingebruikname twee keer gesloten voor een storm: 8 november 2007 en 3 januari 2018. Die sluitingen vonden plaats naar aanleiding van een in dat jaar/stormseizoen tijdelijk verlaagd sluitpeil. Om die reden zal er tijdens die sluitingen naar verwachting geen grote overslag opgetreden zijn bij de Hartelkering. Functioneringssluitingen van de Hartelkering worden, net als die van de Maeslantkering, jaarlijks uitgevoerd.

5.2 Functies van de kering

Het centrale onderdeel van het complex van de Hartelkering bestaat uit 2 schuiven die ‘parallel’ ingezet worden. Beide schuiven zijn dus actief benodigd voor de functie ‘waterkeren’. Daarbij heeft de kering als aanvullende functie overslag en overtopping toe te laten om zo de waterstand westelijk van de kering niet teveel op te laten lopen. In die functie is de kering samen met de Maeslantkering onderdeel van de ‘Europoortkering’ die door het Rotterdamse havengebied loopt.

De sluis wordt gebruikt voor de functie scheepvaart. In geopende toestand heeft de kering als functie het doorlaten van water en het faciliteren van passages van schepen die onder de geheven schuiven door kunnen.

De ‘aanvaarconstructie’ (Sectie 5.3) heeft als functie het vrij houden van de gesloten kering van drijvend vuil en zo schade aan de kering te voorkomen.

De naastgelegen brug heeft een verkeersfunctie. Veelal wordt de kering als een los kunstwerk beschreven, waarschijnlijk omdat de brug eerder al aangelegd was.

5.3 Kennisbasis Deltares

5.3.1 Overzicht eerdere studies

De bijdragen van Deltares aan voorstudies en andere projecten die bijgedragen hebben aan de ontwikkeling en ontwerp van de kering zijn primair gericht geweest op de volgende onderwerpen:

- Fysieke schaalmodeltesten (2D) van trillingen van de schuiven onder stromingscondities en het optimaliseren van de doorsnede van schuiven (vorm van onder- en bovenrand zeewaartse plaat) om die trillingen te voorkomen (Q1500)
- Uitwerking van een ‘aanvaarconstructie’, primair bedoeld tegen zwerfvuil en andere drijvende elementen die de kering zouden kunnen beschadigen (Q1500_2, Q1800)
- Fysieke schaalmodeltesten (3D) van de bodembescherming rondom de kering, inclusief overslag over de kering (Q1522)

5.3.2 Uitwerking en samenvatting voorgaande studies

Schaalmodelproeven in 2D zijn in project Q1500 van WL | Delft Hydraulics uitgevoerd op schaal 1:25 om trillingen van de schuiven te meten en waar mogelijk te voorkomen. Trillingen zijn doorgaans het gevolg van resonant gedrag. Dergelijke effecten zijn zeer ongewenst in constructies vanwege de resulterende hoge belastingen en grotere kans op falen van de constructie of constructieonderdelen. Falen kan optreden door een piekbelasting, of door duurbelasting (vermoeiing). Voor de schaalmodeltesten van deze effecten zijn secties van de schuiven (‘uitsneden’) in een gootmodel (2D) getest onder verschillende verval- en stromingscondities. Het stijfheidsgedrag van de totale schuifconstructie kon op basis van een schuifsectie worden benaderd door veren in te stellen die opgenomen waren tussen de schuifsectie en een meetframe. De benodigde instellingen volgden uit een bureaustudie naar de trilgedragingen van de gehele schuif. Testseries waren gebaseerd op: 1) een sectie uit het midden van de schuif en op 2) een sectie op een kwart van de lengte.

Testen met het (gewijzigde) basisontwerp bij kleine schuifopeningen lieten zien dat bij overstort van zee naar rivier een verticale trilling ontstond gerelateerd aan de vorm van de bovenkant van de plaat. Ook bij lagere waterstanden traden er onder dat type verval trillingen op, maar dan als gevolg van de vorm van de onderkant van de plaat.

Bij stroming van rivier naar zee, zonder water over de kering, traden ook verticale trillingen op, maar enkel als gevolg van de vorm van de onderste plaatrand. Initiële testen bij grotere openingen toonden aan dat bij stroming van rivier naar zee onder die condities de onderrand en vakwerkelementen aan de rivierzijde trillingen in de schuif veroorzaakten.

Nadat ongewenste trillingen werden gemeten in het (gewijzigde) basisontwerp zijn in latere testseries aangepaste plaatdoorsneden beschouwd om die trillingen te voorkomen. Op basis van een bureaustudie zijn meerdere plaatdoorsnedevormen getest. Hierbij ging het vooral om de onder- en bovenrand van de plaat aan de zeezijde van de schuiven. Daarnaast is de overstortstraal belucht⁴, waardoor er geen afgesloten luchtkamer onder de overstortstraal kon ontstaan die anders juist tot trillingen zou kunnen leiden. De veren die de stijfheden van het sectiemodel bepaalden zijn in latere series aangepast naar aanleiding van aanvullende rekenresultaten met een numeriek model van de gehele schuif. Hierbij is ook getest onder extreme condities van +5 m NAP zeewaterstand en een rivierwaterstand van 2 m NAP of 2.5 m NAP. Met de nieuwe instellingen en de aangepaste plaatdoorsneden bleken de trillingen voorkomen te worden. Enkel onder uitzonderlijke condities traden nog trillingen op met beperkte magnitude. Aangezien die toestand maar kort aan zou houden in de inzetpraktijk, of een acceptabele kleine kans van voorkomen zou hebben, zijn daar geen verdere maatregelen voor getroffen. De uiteindelijke doorsnedevorm van de keringsplaten zoals opgenomen in het keringsontwerp zijn uiteindelijk vastgesteld op basis van dit onderzoek, in combinatie met constructieve vereisten. Daarbij is onder andere de afgeronde bovenrand meegenomen als effectief middel om trillingen bij overstort te voorkomen.

De testen in project Q1500 zijn uitgevoerd voor de grote, zuidelijke schuif. De noordelijke, kleine schuif is stijver en liet in numerieke analyses hogere eigenfrequenties zien. De rapportage van Q1500 vermeldt dat vanwege die hogere frequenties resonante trillingen minder snel aangeslagen zullen worden. Daardoor worden sterke trillingen in de kleine schuif minder snel verwacht dan in de grote schuif. Het vermijden van trillingen in de testen van de grote schuif werd daarom ook als een voldoende oplossing voor de kleine schuif gezien.

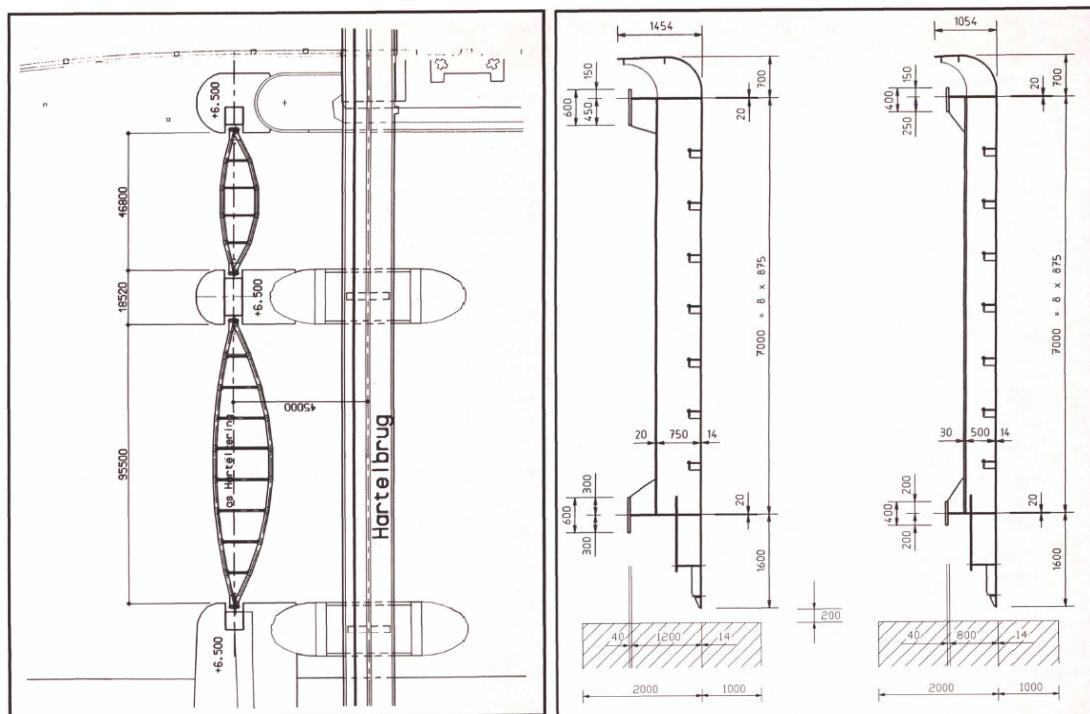
Het rapport van Q1500 vermeldt als aanvullende observatie dat de gemiddelde krachten op de kering door stroming met golven nagenoeg gelijk waren aan die met alleen stroming. Niet vermeld wordt of de piekwaarden in belastingen, naar verwachting het meest relevant voor ontwerp en mogelijk ook voor dynamisch gedrag, sterk afwijken.

In een losse rapportage onder projectnummer Q1500 (Q1500_2) is ook een eerste verkenning gemaakt van opties voor een mogelijke ‘aanvaarconstructie’ voor de Hartelkering. Het gaat daarbij echter niet over schepen maar over drijfvuil en andere drijvende elementen, tot aan de grootte van een container. Het doel van de beschermingsconstructie is die elementen op afstand van de (gesloten) kering te houden. Dit is des te meer van belang, gezien de overstort die een integraal onderdeel is van de werking van deze kering, en waardoor er dus ook in gesloten toestand sprake zal zijn van een stroming richting de kering. Er zijn uitwerkingen gemaakt van een ponton- en een hekvariant van de beschermingsconstructie. In de geciteerde rapportage wordt aangeraden om schaalmodeltesten van dergelijke oplossingen uit te voeren. Onder projectnummer Q1800 is later nog een offerte voor een combinatie van numerieke simulaties en schaalmodeltesten uitgebracht, maar er zijn geen rapportages over het eventuele uitgevoerde werk teruggevonden in de archieven van Deltares. Naar verwachting heeft die offerte niet geleid tot een project. In de beschrijvingen van de kering zoals gebouwd (website RWS) wordt wel gesproken over een beschermingsconstructie, dus een dergelijke constructie is uiteindelijk wel onderdeel geworden van het keringscomplex (op de voorgrond in Figuur 5.1).

⁴ Bij hogere waterstanden komt de constructieve elementen die zorgen voor de beluchting geheel onder water en werken zij minder goed of niet.

Die beschermingsconstructie wordt met een klein bootje verlegd naar dwars over de rivier, zoals bijvoorbeeld ook de ketting met markeringsboeien bij de Hollandsche IJsselkering (Hoofdstuk 7).

Uitvoerige schaalmodeltesten (1:60) in 3D van stromingseffecten rondom de kering en van de stabiliteit van omringende bodembescherming staan beschreven in rapport Q1522 van WL | Delft Hydraulics. Figuur 5.3 tot en met Figuur 5.8 zijn overgenomen uit die rapportage. In dat project zijn eerst testen uitgevoerd om de stromingseffecten over en rondom de kering te meten bij een breed bereik aan zeewaterstanden, vervallen en spleethoogtes: waterstanden aan de zeezijde tot ca. 7.2 m NAP, vervallen tot ca. 6.2 m en spleethoogtes van 0.2 m tot enkele meters⁵. De minimale spleethoogte geeft daarbij de gesloten toestand weer; de grotere spleethoogtes een tijdelijke situatie die (kortdurend) optreedt in de loop van het sluit- en openproces.

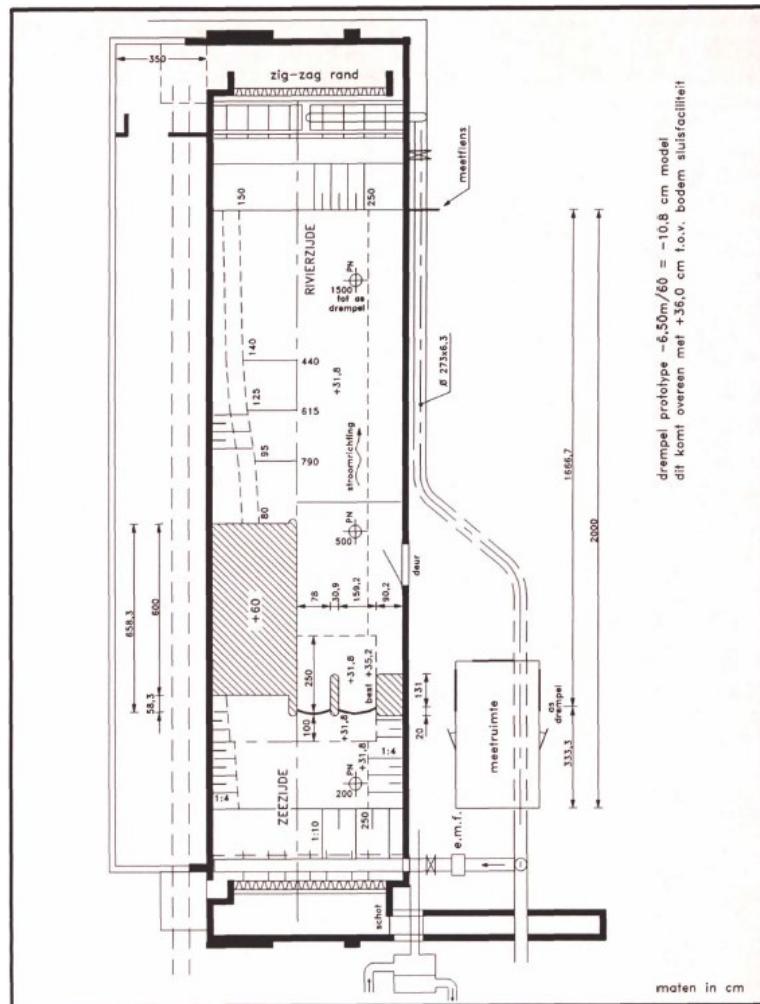


Figuur 5.3: Kering-dimensies opgenomen in het model (links) en doorsneden van de kerende wanden (rechts).

Daarna zijn in studie Q1522 testseries uitgevoerd om de stabiliteit van de bodembescherming rondom de kering te testen. Bezwijken van bodembescherming trad in die testen op vanaf ca. 5 m verval, terwijl bij 4.5 m er nog geen problemen waren. Dat geeft aan dat de overgang van 'voldoen' naar 'falen' heel scherp op kan treden. Schade achter kleine schuif bleek daarbij groter dan achter grote schuif. Dit werd toegeschreven aan de relatief grote kromming van die wand die de overstortende straal concentreert. Mitigerende maatregelen zijn in het onderzoek ontwikkeld en getest aan de hand van combinaties van: het verhogen van de kerende wanden (minder overstort), dikkere laagdichten van stortsteen en een zwaardere gradatie stortstenen.

⁵ Hierbij wordt aangenomen dat de genoemde waterstanden aan de zeezijde de waterstand op het Hartelkanaal op enige afstand van de kering werd bedoeld, zoals dat op de rand van het schaalmodel opgelegd zal moeten zijn. Die waterstand zal niet gelijk zijn aan de waterstand ter plaatse van de overstromende kering en zal ook afwijken van de overeenkomstige hoogwaterstand bij Hoek van Holland.

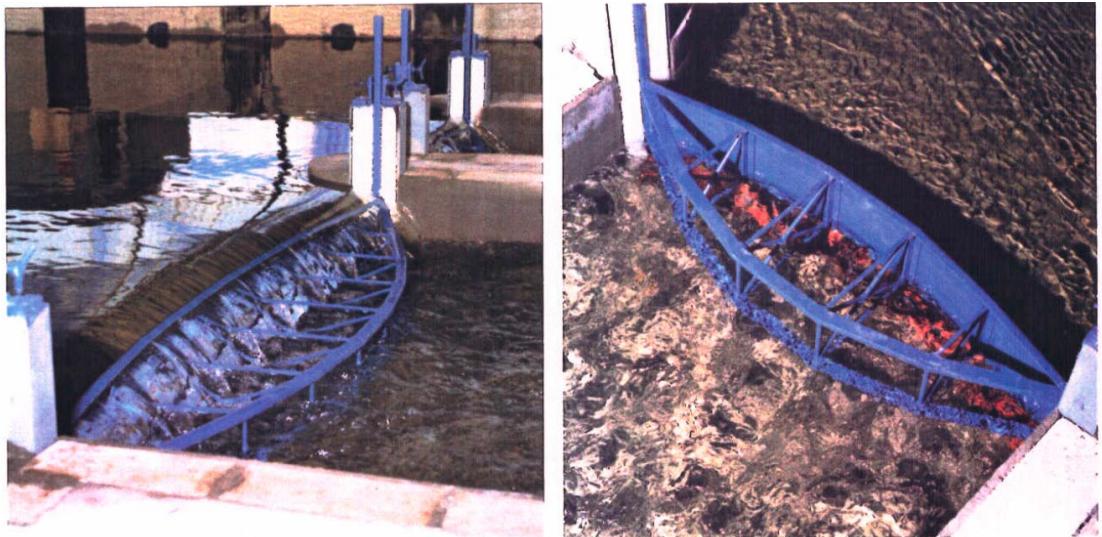
Die opties resulteerden in minder schade, maar bij vervallen van ca. 5-6 m trad nog steeds bezwijken van de stortstenen laag op. Of en hoe het ontwerp en bouw van de kering uiteindelijk zijn aangepast op deze bevindingen staat niet vermeld in de rapportage van Q1522.



Figuur 5.4: Schematisch bovenaanzicht van de toegepaste meetopstelling.



Figuur 5.5: Modeloverzicht met geopende schuiven (links) en met gesloten schuiven (rechts).



Figuur 5.6: Overstortsituatie (links) en stroming door spleet kleine schuif (rechts).



Figuur 5.7: Stroming door spleet grote schuif (links) en bodembescherming voorafgaand aan testen (rechts).



Figuur 5.8: Detail van bodemverdediging voorafgaand aan testen (links) en schadevoorbeeld (rechts).

5.4 Grootste technische aandachtspunten

De Hartelkering is ontworpen om overslag en overtopping toe te laten. Met versnelde zeespiegelstijging zou in de toekomst bij het sluiten voor een stormsituatie mogelijk een hogere waterstand boven de kering op kunnen treden en daarmee een zwaardere belasting op de omringende bodembescherming. Onbekend is of de spleet onder die condities mogelijk een invloed heeft op het functioneren van de kering en op de hydrodynamische belastingen op de constructie en omringende bodembescherming.

De nut en noodzaak van deze kering staat soms ter discussie (persoonlijke communicatie RWS), mogelijk juist omdat deze niet geheel kerend is. Echter, ook onder een toestand van overtopping zal de kering een waterstandsverlagende werking voor het achterland hebben. Bovendien is deze kering onderdeel van de grote Europoortkering, waar ook de Maeslantkering onderdeel van is, en om de gehele kering volledig af te kunnen sluiten is ook de Hartelkering benodigd.

Eerdere studies naar het effect van overtopping over de SVKH op de waterstanden achter de kering, uitgevoerd door Deltares of anderen, zouden mogelijk in een vervolg op dit kennisproject samengevat kunnen worden. Mogelijk ook dat onderhoudsprojecten (beschreven in de volgende sectie) de mogelijkheid zullen bieden om hier nadere analyse op uit te voeren.

5.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

Deltares kan bijdragen aan het verifiëren van de inzet van de kering onder zwaardere condities die mogelijk in de toekomst met grote kans op zullen gaan treden als gevolg van klimaatverandering. De betrekkelijk hoge waterstanden die in eerdere schaalmodeltesten zijn beschouwd kunnen daarbij ingezet worden als uitgangspunt. Bovendien kan Deltares met systeemkennis en met simulaties bijdragen aan de juiste informatie als input voor een discussie over de nut en noodzaak van de Hartelkering.

RWS is momenteel van plan de besturingssoftware van de Hartelkering rond 2024 te vervangen. Net als eerder voor Maeslantkering en voor Ramspolkering verzoekt RWS Deltares om bij te dragen aan een testomgeving voor het testen en accepteren van de nieuwe software op een virtuele weergave van de kering (vergelijkbaar met een *digital twin*), alvorens installatie op de echte kering. Groot aandachtspunt in dat project zal de weergave van de kering als kunstwerk in het overall watersysteem zijn, inclusief overtoppingseffecten. Na aanmaak en validatie van een geschikt instrumentarium zouden ook de effecten van de kering aan de voor- en achterzijde van de kering beschouwd kunnen worden. Daarmee zouden eerder beschreven verwachting van een beperkte opstuwing aan de voorzijde, en beperkte toename van de waterstand achter de kering als gevolg van overtopping, geverifieerd kunnen worden.

6 Maeslantkering

6.1 Hoofdkenmerken kering

6.1.1 Algemeen

De Maeslantkering bestaat uit twee beweegbare holle stalen wanden die via een vakwerkarm zijn verbonden aan scharnieren op de oevers (Figuur 6.1). De totale breedte van de Nieuwe Waterweg tussen de landhoofden is 360 m. Onder de wanden ligt een drempel met dezelfde kromming als de wanden op -17 m NAP. De wanden zijn 22 m hoog. Dat betekent dat in afgezonken positie, staand op de drempel, de ronde stalen wanden een kerende hoogte hebben van +5 m NAP.



Figuur 6.1: Luchtfoto van de Maeslantkering in rust en met de kerende wanden in de droogdokken.

In gesloten toestand wordt de druk van het te keren zeewater via de wanden, de vakwerkarmen en de bolscharchieren overgedragen op de ondergrond onder de behuizingen van de bolscharchieren. Die behuizingen bestaan uit grote betonnen platen die op verdicht zand zijn aangebracht. Zij zijn 'op staal' gefundeerd, wat betekent dat er geen palen onder zitten. De horizontale kracht wordt primair via ribbels onder de grote betonnen platen overgebracht op de ondergrond. Heipalen zouden ook niet veel nut hebben, aangezien de scharnier-behuizingen vooral een horizontale kracht om moeten zien te zetten naar een verticale krachtafdracht.

De kering sluit in geval van een voorspelde waterstand van +3.0 m NAP in Rotterdam centrum of +2.9 m NAP in Dordrecht. De beslissing om te sluiten wordt gemaakt door het BOS (Beslis Ondersteunend Systeem), dat elke 10 minuten een SOBEK-berekening maakt voor de aankomende dagen. Na de beslissing om te sluiten voert BESW (Besturingssysteem Stormvloedkering Nieuwe Waterweg) de bediening van de werktuigen in de kering in detail uit om de sluiting uit te voeren. Bij de start van het sluitproces worden de droogdokken volgelaten met water onder vrij verval. Zodra de waterstand in de dokken gelijk is aan de waterstand op de Nieuwe Waterweg worden de dokdeuren geopend en kunnen de wanden de Nieuwe Waterweg opgedraaid worden. Dit wordt gedaan met locomobielen die verbonden zijn met een betonnen kolom (Figuur 6.2).

Door over een tandwielbaan naar voren te rijden duwen zij daarmee de kerende wand de Nieuwe Waterweg op en draaien zij na afloop van de keringsinzet de wanden weer terug het dok in.



Figuur 6.2: De sectordeuren van de Maeslantkering in afgezonken toestand in de Nieuwe waterweg. In de afbeelding zijn de benamingen toegevoegd van enkele van de onderdelen van de kering.

Tijdens het afzinken van de kerende wanden kunnen de wanden op enige verticale afstand tot de drempel tijdelijk op die hoogte gehouden worden om de stroming onder de kering door de kans te geven om de drempel schoon te spoelen van slijf. Na een dergelijke ‘sedimentstop’ worden de kerende wanden geheel afgezonken naar de drempels. In de praktijk is de aanslibbing op de drempel zeer beperkt gebleken (persoonlijke communicatie H. Nederend, BMK/RWS), naar verwachting omdat door de landhoofden van de kering er lokaal sprake is van een versmalde rivierdoorsnede en daarmee ter hoogte van de kering en de drempel een iets verhoogde stroomsnelheid is ten opzichte van andere delen van de rivier.

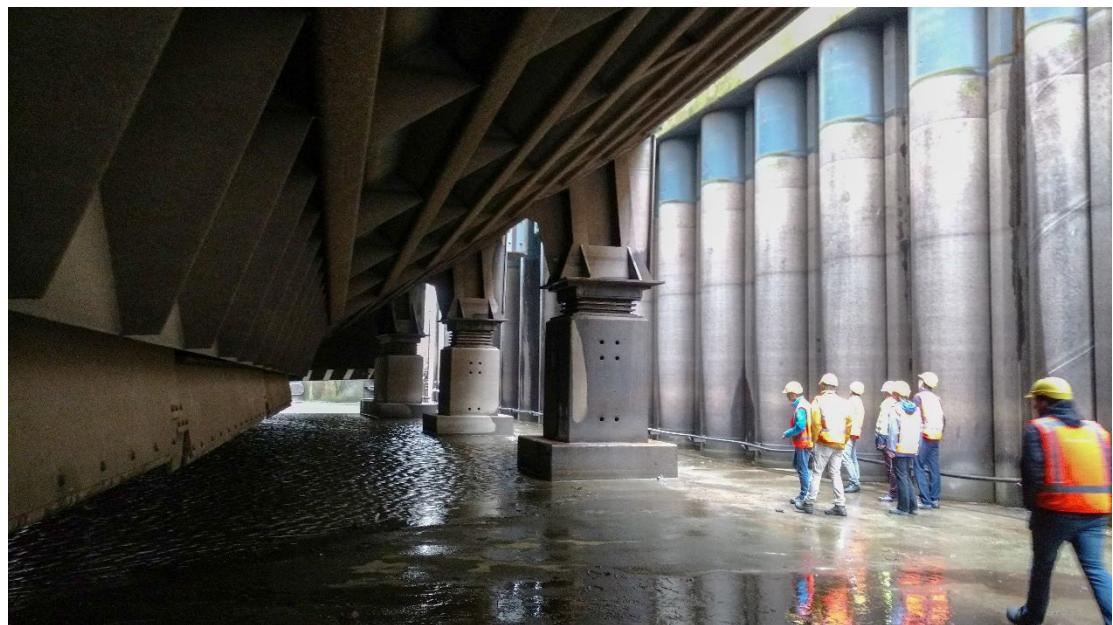
Het moment van sluiten van de Maeslantkering ten opzichte van het voorspelde moment van hoogwater hangt af van de afvoer bij Lobith. Voor afvoeren kleiner dan 6000 m³/s sluit de Maeslantkering op het moment dat +2 m NAP voorafgaand aan het hoogwater wordt bereikt (peil-sluiting). Voor grotere debieten sluit de Maeslantkering op het moment van kentering voorafgaand aan het hoogwater (kentering-sluiting). In die tweede situatie sluit de kering dus vroeger in het stormverloop. Op die manier wordt een zo laag mogelijke waterstand achter de kering geborgd om zo meer bergingsbuffer te hebben voor het rivierwater dat zich achter de gesloten Maeslantkering opbouwt.

In rust worden de drooggdokken leeggepompt en kan er onderhoud aan de wanden worden gepleegd. In het drooggdok rusten de kerende wanden via stalen oplegpunten aangebracht op de kerende wand op betonnen poeren in het drooggdok (Figuur 6.3). Op die poeren is verend materiaal aangebracht om zo een ‘zachte’ landing te verzekeren en naar verwachting voor het opnemen van toleranties ten bate van een gunstige krachtenverdeling.

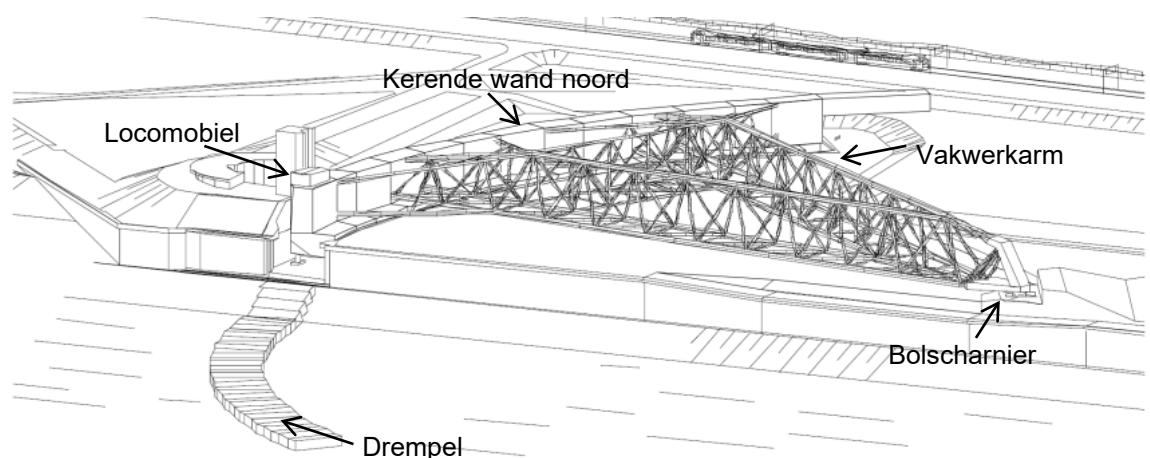
Elk jaar is er rond september een functioneringssluiting, kort voordat het stormseizoen van start gaat. Doorgaans wordt elk jaar op andere aspecten van de sluiting gefocust tijdens een functioneringssluiting, zoals bijvoorbeeld het gedeeltelijk met de hand deelprocessen uitvoeren om dat te trainen mocht het bij een echte stormsluiting bij uitval van systemen nodig zijn. Daarnaast is er in het verleden getest met verschillende duren van de sedimentstop.

6.1.2 Sectordeuren

De twee sectordeuren van de Maeslantkering bestaan elk uit drie hoofdonderdelen: de kerende wand, de vakwerkarmen en het bolscharnier, zie Figuur 6.2. Wanneer de Maeslantkering open is, staan de twee sectordeuren geparkeerd in de parkeerdokken aan beide zijden van de Nieuwe waterweg (Figuur 6.1 en Figuur 6.3). Wanneer de Maeslantkering gesloten wordt, worden de twee sectordeuren ingevaren met behulp van twee locomobielen (rode elementen in Figuur 6.2). Vervolgens worden de twee sectordeuren afgezonken op de drempel, zoals de situatie vastgelegd op de foto in Figuur 6.2. Wanneer de Maeslantkering gesloten is wordt de belasting door het verval over de kerende wand afgedragen via de vakwerkarmen en het bolscharnier naar de fundering van het bolscharnier.



Figuur 6.3: Bezoek van Deltares projectteam van project 1230119 in juni 2016. Rechts de wand van het droogdok, links en midden-boven de onderkant van de Maeslantkering. In het midden zijn de betonnen poeren op de bodem van het droogdok, de metalen oplegpunten van de kerende wand en de tussengelegen verende opleggingen te zien.

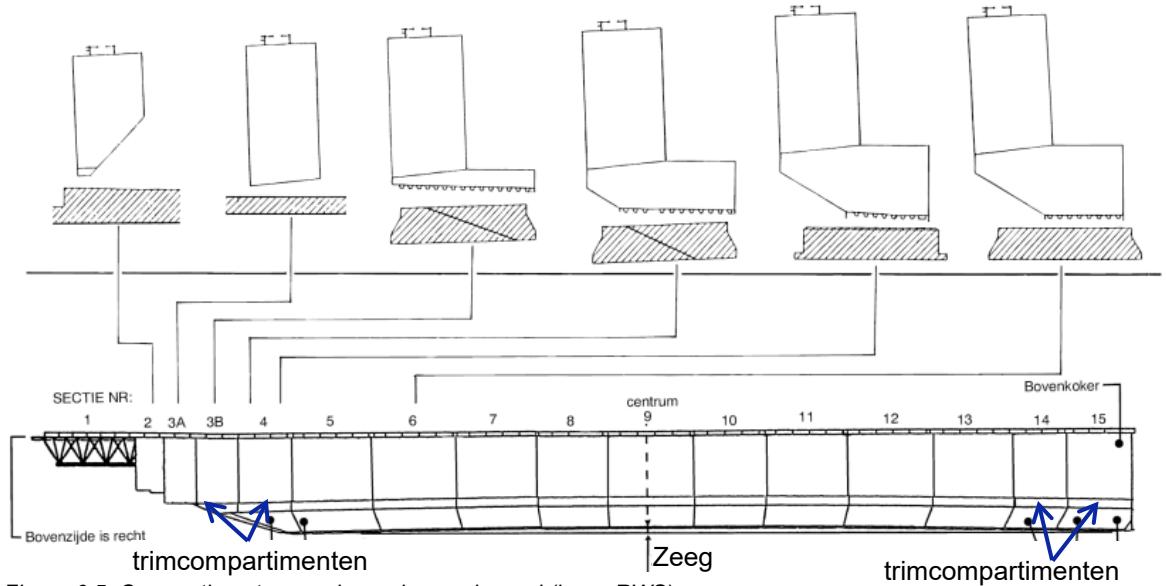


Figuur 6.4: Tekening van de noordelijke sectordeur in het parkeerdok (bron: RWS).

6.1.3 De kerende wanden

De kerende wanden noord en zuid hebben de vorm van een cirkelboog met een straal van 246 m en een booglengte van circa 248 m (de dichte wand heeft een lengte van ca. 220 m). Zij zijn ingedeeld in compartimenten (Figuur 6.5).

De onderzijde van de kerende wanden afgevlakt; dit wordt de zeeg genoemd, zoals aangegeven in Figuur 6.5. Door die afvlakking raakt de onderkant van de ronde kerende wand over zijn gehele lengte de drempel in afgezonken toestand. In opgedreven toestand bedraagt de zeeg maximaal ca. 1.1 m. Wanneer de kerende wanden worden afgezonken neemt de effectieve grootte van de zeeg af door de rotatie van de kerende wand. In afgezonken toestand rust de kerende wand op de drempel (zie Figuur 6.4) en is de onderzijde van de kerende wand recht (de effectieve zeeg is 0 m).

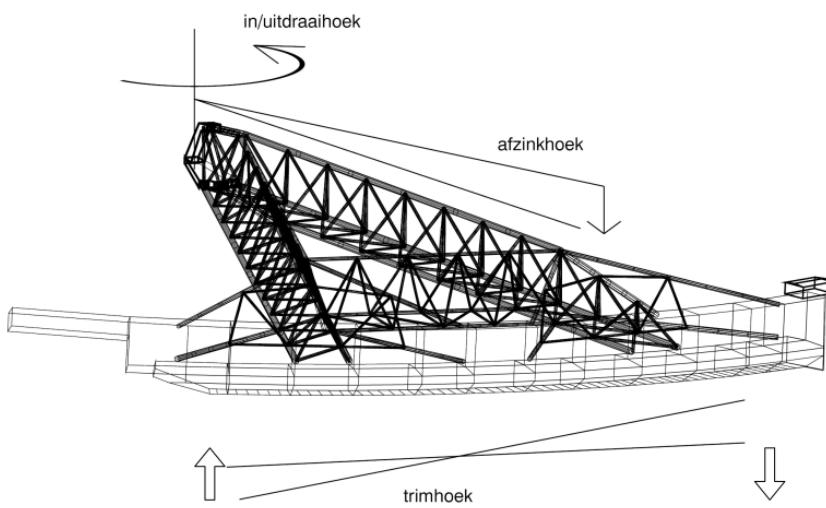


Figuur 6.5: Compartimenten van kerende wand noord (bron: RWS).

Compartiment 3, 4, 14 en 15 zijn trimcompartmenten; vooral deze compartimenten worden gebruikt om de kering in drijvende toestand horizontaal te houden, vanwege hun buitenste positie. Compartiment 5 tot en met 13 zijn ‘reguliere’ ballastcompartmenten voor het afzinken.

6.1.4 Beweging van de sectordeuren

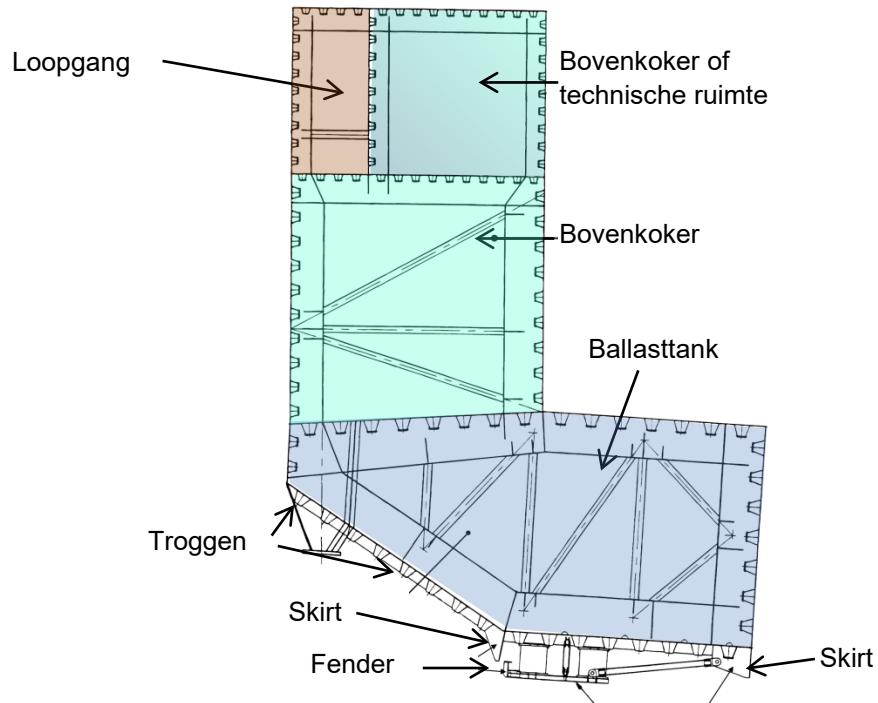
De sectordeuren hebben 3 assen waarom deze kunnen roteren, zoals aangegeven in Figuur 6.6. Hiermee kan de positie van de sectordeuren worden aangepast.



Figuur 6.6: Illustratie in/uitdraaihoek, afzinkhoek en trimhoek (bron: RWS).

Het horizontaal openen en sluiten van de kering, ofwel een rotatie over de in/uitdraaihoek, wordt geregeld/opgelegd door de locomobiel.

Voor het afzinken en opdrijven, ofwel een rotatie over de afzinkhoek, worden de ballastcompartimenten gebruikt. De stalen doosconstructies van de ballastcompartimenten bestaan uit een ballasttank (ook wel drijflichaam genoemd) en een bovenkoker (zie Figuur 6.7). De ballasttanks worden actief gevuld en geleegd door middel van kleppen en pompen waardoor de kerende wand meer of minder afzinkt. Elk actief beheerst compartiment beschikt over twee kleppen en twee hoofdpompen⁶. De bovenkokers worden passief ('automatisch') gevuld en geleegd door middel van perforaties in de kerende wand aan de zeezijde (zie Figuur 6.9). Via ontluchtingsgaten in de bovenkokers aan rivierzijde wordt de in de bovenkokers aanwezige lucht tijdens vullen afgevoerd en wordt tijdens legen lucht van buiten aangezogen. Het passief vullen van de bovenkokers resulteert ervan dat de beweging van de kerende wand iets na-ijlt.



Figuur 6.7: Standaard dwarsdoorsnede van de kerende wand (bron: RWS).

De skirts (uitstekende stalen platen) in de doorsnede (Figuur 6.7) zijn toegevoegd naar aanleiding van schaalmodeltesten (Sectie 6.4). De voorste skirt (zeezijde) draagt vooral bij aan de stabiliteit in stroming tijdens het afzinken. De achterste skirt (rivierzijde) draagt primair bij aan de stabiliteit van de kerende wanden onder golfbelasting.

Wanneer een sectordeur drijft kan deze ook roteren over de trimhoek. Omdat een te grote trimhoek ongewenst is, vanwege mogelijke beschadiging van de kerende wand (bodemberoering), worden de trimcompartimenten gebruikt om de kerende wand zoveel mogelijk horizontaal te houden tijdens het afzinken, opdrijven en het dok invaren. Dit gebeurt door de ballasttanks in de trimcompartimenten (de buitenste ballastcompartimenten, zie Figuur 6.5) te vullen door kleppen open te zetten of te legen door middel van pompen.

⁶ Elk compartiment heeft ook een nazuigpomp om het laatste restwater uit het ballastcompartiment te halen. Deze heeft een relatieve kleine capaciteit en wordt alleen ingezet met de kerende wanden in rust in het droogdok.

Het zich ten opzichte van de kerende wand verplaatsende gewicht van de locomobielen wordt niet gecompenseerd bij het draaien van de wanden de Nieuwe Waterweg op, terwijl bij het terugdraaien van de wanden het dok in dat gewicht wel wordt gecompenseerd door het compartiment 15 (Sectie 6.1.3) bij het opdrijven niet geheel te ledigen en pas tijdens het indraaien het dok in leeg te pompen. De capaciteit van de ledigingspomp is daarbij (ongeveer) gelijk aan het effect van de bewegende locomobiel. Bij het uitvaren de Nieuwe Waterweg op liggen de wanden dus niet geheel horizontaal. Tijdens het afzinken wordt dat pas gecorrigeerd. Dat de kering wel recht wordt gehouden bij het indraaien het dok in is naar verwachting gekoppeld aan het bodemniveau van de drooggokken en mogelijk het goed kunnen passeren van de oplegpoeren (Sectie 6.1.2).

In afgezonken toestand rust elke kerende wand op 31 rubberen fenders die aan de onderzijde van de kerende wand zijn aangebracht, zie Figuur 6.7. De fenders zijn ca. 1.1 m hoog. De fenders zijn uitgevoerd als een plaat met 4 rubberen cilinders, waarvan er drie zichtbaar zijn in Figuur 6.8. Tussen de fenders is er een opening van ca. 1.1 m vanwege de hoogte van die elementen. Verticale platen (skirts) zijn aangebracht onder de kerende wand om die resterende opening zoveel mogelijk te sluiten. Onnauwkeurigheden in het plaatsen van de drempelelementen zijn zoveel mogelijk gecompenseerd door de hoogte van elk van de fenders daar op aan te passen ('contra-mallen') zodat drempelpositie + hoogte fender uiteindelijk de juiste hoogteligging van de onderkant van de kerende wand oplevert.

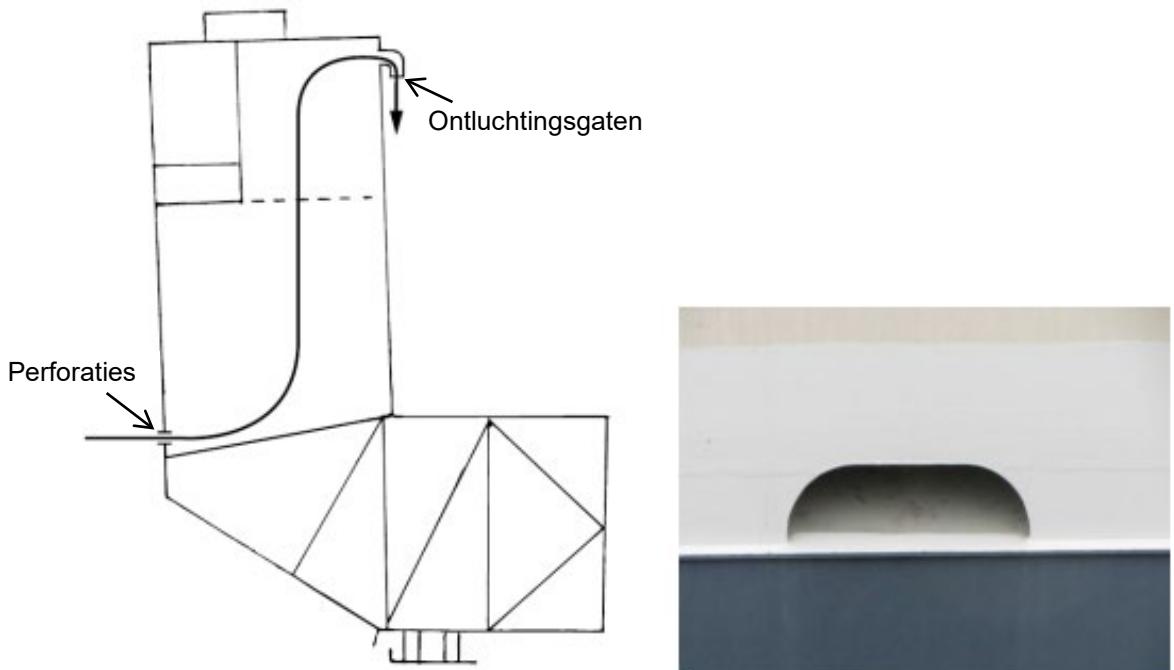


Figuur 6.8: Fender onder de kerende wand van de Maeslantkering (bezoek projectteam 1230119, juni 2016).

De wanden van de compartimenten zijn versterkt met stalen troggen (profielen). Bij de boven- en zijwanden zijn deze troggen aan de binnenzijde bevestigd. Bij de bodem zijn de troggen aan de onderzijde/buitenkant bevestigd. De troggen en skirts (zie Figuur 6.7) samen zijn gunstig voor de overall stabiliteit van de kerende wand in drijvende toestand.

6.1.5 Negatief verval en seiches

De kering kan goed een positief verval opnemen, dat wil zeggen een hogere waterstand aan de zeezijde. Een negatief verval, met een hogere waterstand aan de rivierzijde, kan de kering minder goed opnemen (ontwerpwaarde voor grootste negatieve verval is -1.5 m). Bij een te groot negatief verval kan de kering uit zijn bolschannieren gedrukt worden. Dat is daarmee de achilleshiel van de kering.



Figuur 6.9: Links: werking perforaties aan de zeezijde (in- en uitstroom water) en ontluchtingsgaten (in- en uitstroom lucht) aan de rivierzijde van de bovenkokers; rechts: foto van perforatie aan zeezijde; (bron: RWS).

Een negatief verval kan optreden door het opbouwen van de waterstand achter de kering door het bergen van rivierwater, of door een lager wordende waterstand aan de zeezijde. Havenslingeringen (seiches) die kunnen optreden aan de zeezijde van de kering kunnen niet alleen tot een groter positief verval leiden (top van een seiche) maar ook tot een extra waterstandsverlaging (dal van een seiche). Het optreden van een dal van een seiche zou dus kunnen leiden tot een negatief verval. De kans op een dergelijke situatie is het grootst rondom de start van de storm, zolang er nog niet een grote positieve opzet is ontstaan die als buffer zou kunnen dienen voor het opnemen van het dal van het seiche.

In eerste instantie waren openingen in de kerende wanden voorzien, die pas na neerdalen op de drempels gesloten zouden worden. Die openingen zouden de translatiegolf mogelijk kunnen beperken, maar in ieder geval zouden zij kunnen bijdragen aan het voorkomen van een negatief verval over de kering. De eerste schaalmodeltesten hadden ook die openingen nog in de modelweergave van de kering zitten (Figuur 6.10). Door bezuinigingen op het ontwerp zijn die openingen in de loop van het ontwerpproces komen te vervallen. Dit had onverwachts ook invloed op de dynamische stabiliteit van de kerende wanden onder stromingscondities. Hiervoor is de dwarsdoorsnede van de kerende wand op basis van tussenuitkomsten uit schaalmodeltesten meermaals aangepast om onder alle combinaties van verval en spleetopeningen ervoor te zorgen dat de wanden stabiel gedrag vertoonden.



Figuur 6.10: Foto van schaalmodelmetingen van de Maeslantkering met het originele ontwerp inclusief de openingen met schuiven in de kerende wanden. Foto is naar verwachting genomen van de meetopstelling in project Q0969 (zie Sectie 6.4).

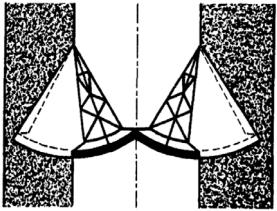
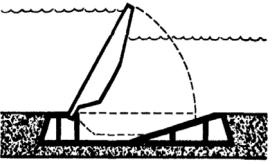
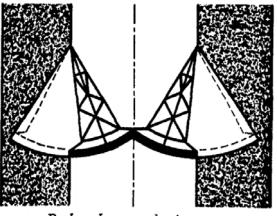
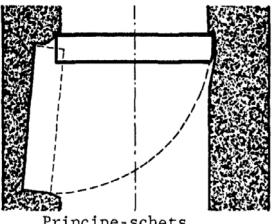
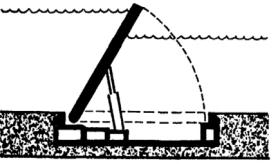
Het vermijden van een negatieve invloed van seiches op de kering is uiteindelijk verdisconteerd in de wijze van keringsinzet. Bij de huidige inzetwijze wordt de kering slechts beperkt geballast en staan de kerende wanden met een klein netto gewicht op de drempel ('voorspanning'). De waterstanden voor en achter de kering worden actief gemonitord door het besturingssysteem van de kering (BESW) en de hoeveelheid ballast wordt aangepast op veranderingen in de buitenwaterstanden. Zodra een negatief verval wordt geregistreerd worden de kerende wanden zo snel mogelijk leeggepompt en opgedreven. De grens van een negatief verval waarbij de kering geheel wordt opgedreven is 5 cm tijdens het afzinken en 0 cm in de situatie met de kerende wanden rustend op de drempel. Het opdrijven heeft twee effecten: 1) de kracht op de kerende wanden door het negatieve verval zal zeer snel afnemen en 2) de opslingering van het seiche aan de zeezijde van de kering wordt gestopt, waardoor de amplitude van de seiche gereduceerd wordt.

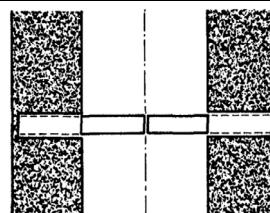
De geïmplementeerde aanpak heeft het probleem van de seiches voor de Maeslantkering opgelost. Echter, het heeft wel geleid tot een betrekkelijk complexe operationele aansturing van de kering, in aanvulling op de complexiteit van de constructie zelf.

6.2 Ontwerpalternatieven

Voor het ontwerp van de Maeslantkering werden bouwconsortia door RWS in de jaren '80 gevraagd om een aanbieding te doen inclusief een keringstype. Tabel 6.1, gebaseerd op Commissie Studie Stormvloedkering Nieuwe Waterweg (1987), geeft een samenvatting van de ingediende alternatieven. Deze alternatieven werden afgezet tegen de eisen, onder andere in relatie tot scheepvaart. Uiteindelijk heeft BMK met een drijvende sectordeur op locatie rivier-km 1026.3 gewonnen.

Tabel 6.1: Overzicht van alternatieve keringstypen van verschillende bouwcombinaties.

Type, consortium	Locatie (rivier-km)	Beschrijving	Principeschets
Drijvende sectordeur, Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK) – het winnende consortium	1026.3	Het winnende ontwerp en de aanpak zoals uiteindelijk toegepast voor de Maeslantkering. Beide sectordeuren bestaan uit een gebogen waterkerende wand die door middel van een stalen vakwerk is verbonden met een op de oever geplaatst bolscharnier. In geopende toestand zijn de deuren opgeborgen in afgesloten inkassingen in de oevers. Bij sluiting worden de deuren eerst drijvend gemaakt, ingedraaid en vervolgens afgezonken door ze met water te vullen. In de deuren bevinden zich afsluitbare doorstroomopeningen.	 Principeschets (bovenaanzicht)
Pneumatische kleppen-kering, BMK	1027.6	De kering bestaat uit 14 holle stalen kleppen, elk 25 m breed, welke met een scharnier aan in de bodem van de Nieuwe Waterweg verzonken caissons zijn verbonden. In geopende toestand liggen de kleppen in de caissons. Om de kering te sluiten wordt lucht in de kleppen geperst waardoor deze gaan drijven, omhoog draaien en een gesloten kering vormen. Onder de kleppen is dan een brede spleet aanwezig, waar water doorheen stroomt en waardoor zand en slijf uit de kas worden weggespoeld.	 Principeschets (zijaanzicht)
Rijdende sectordeur-kering, Combinatie Nieuwe Waterweg SVK (NIWAS)	1023.0	De deuren bestaan uit een gebogen waterkerende wand die door middel van een stalen vakwerk met op de oever geplaatste scharnieren is verbonden. In geopende toestand staan de deuren in inkassingen in de oevers, welke in open verbinding met de Nieuwe Waterweg staan. Bij sluiting worden de deuren over een drempel in de bodem van de Nieuwe waterweg naar elkaar toe gereden. In de deuren bevinden zich afsluitbare doorstroomopeningen.	 Principeschets (bovenaanzicht)
Bootdeur-kering, Combinatie SVK Nieuwe Waterweg (CSNW)	1026.2	De kering bestaat uit een ca. 400 m lang ponton. In geopende toestand ligt het ponton afgezonken op een onderwaterberm onder de noordelijke oever, bijna evenwijdig aan de as van de Nieuwe Waterweg. Het ponton is aan één zijde scharnierend met de oever verbonden. Bij sluiting wordt het ponton eerst drijvend gemaakt, vervolgens haaks op de Nieuwe Waterweg gedraaid en afgezonken. Onder de deur is dan een brede spleet aanwezig. De aanslagpunten bestaan uit landhoofden nabij de oevers. In de deur bevinden zich afsluitbare doorstroom openingen.	 Principeschets (bovenaanzicht)
Hydraulische kleppen-kering, SVK Combinatie (STORCOM)	1026.2	De kering bestaat uit 24 stalen kleppen, elk 15 meter breed. In geopende toestand liggen de kleppen in caissons op de bodem van de Nieuwe Waterweg, waarmee ze scharnierend zijn verbonden. Bij sluiting worden ze door middel van hydraulische cilinders omhoog bewogen, zodat ze een kering vormen.	 Principeschets (zijaanzicht)

Type, consortium	Locatie (rivier-km)	Beschrijving	Principeschets
Schuifdeurkering, Combinatie Hoogwaterkering Nieuwe Waterweg (CHNW)	1026.3	De kering bestaat uit twee ruim 200 m lange, stalen deuren. In geopende toestand staan de deuren in afgesloten deurkassen in de oevers, dwars op de as van de Nieuwe Waterweg. Bij een sluiting worden de deuren naar elkaar toe geschoven over een drempel op de bodem van de Nieuwe Waterweg. In de deuren bevinden zich afsluitbare doorstroomopeningen.	 Principeschets (bovenaanzicht)

6.3 Functies van de kering

De Maeslantkering heeft de volgende technische functies:

- Geopend:
 - scheepvaart mogelijk maken
 - rivieraafvoer mogelijk maken
 - doorlaten van sediment met de rivierstroming
- Gesloten:
 - hoogwater keren
 - berging rivieraafvoer faciliteren (via sluitmoment ten opzichte van getij)

6.4 Kennisbasis Deltares

De volgende documenten zijn in de archieven van Deltares teruggevonden van projecten die zijn uitgevoerd ten bate van het ontwerp, bouw en inzet van de Maeslantkering:

- Schaalmodeltesten in een sectiemodel (2D testen) van de sectorwanden, inclusief openingen, om het dynamische gedrag van de wanden te analyseren. Meerdere doorsneden zijn beschouwd. Ook is de stabiliteit van de bodembescherming en drukken in het filter en op de drempel geanalyseerd (Q0958).
- Schaalmodeltesten in een overzichtsmodel (3D testen), inclusief openingen in de kerende wanden (Q0969). Onderzoek was primair gericht op het dynamische gedrag van de kerende wanden. Daarnaast is de stabiliteit van de bodemverdediging getest.
- Vervolgonderzoek in een overzichtsmodel (3D testen). Dit is het eerste onderzoek waarin de kerende wanden zonder openingen zijn beschouwd, zoals uiteindelijk als eindontwerp is aangehouden. In deze serie studies en rapportages is vooral gekeken naar het responsiedrag van de kerende wanden onder invloed van golven en stroming. Testen zijn uitgevoerd voor alle inzetfases van de deuren: invaren, afzinken, gesloten, opdrijven en uitvaren terug de drooggokken in. Ook zijn afvoercoëfficiënten bepaald (afvoer/vervalrelatie). Daarnaast is een inschatting gemaakt van potentiele schaalmodeleffecten en onzekerheden (Q1140).
- Snelheidsmetingen en bodemstabiliteitstesten in een 3D overzichtsmodel (Q1146). Testen bij een gedeeltelijk geheven en een geheel open kering. Bij gedeeltelijk geheven kering testen onder positief en negatief verval.
- Verdere optimalisatie van de doorsnede van de kerende wanden in 2D en 3D schaalmodeltesten (Q1190). Meerdere symmetrische en asymmetrische dwarsdoorsneden en met scherpe of afgeronde randen. Verdere optimalisaties door toevoegingen van ribbels en scherpe loslaatpunten. Aanvullende metingen hadden betrekking op de drukken op de drempel en op de deuren.
- Conferentie-publicaties in 1988 en 1991 → numerieke analyses van keringstypen

- Definitieve serie van schaalmodeltesten (3D: 1:60) ter ondersteuning van optimalisatie van het ontwerp van de doorsnede van de kerende wand in verband met (resonant) dynamisch gedrag van de deuren (Q1278). Daarnaast schaalmodeltesten voor het detailleren van de overall bodembescherming (deelnummer .30) en een aanvullende bodembescherming ter plaatse van het ontmoetingspunt van de kerende wanden in plaats van het toepassen van betonnen drempelementen op die locatie (deelnummer .50). Dat laatste onderzoek is later uitgebreid met een verdere beschouwing van die locatie en nabij de beide dokkingangen (deelnummer .60).
- Numerieke studie naar het responsiedrag van de sectordeuren (Q1271).
- Detailonderzoek in een sectiemodel (2D) voor deurvarianten 6-20 (zelfde meetopstelling als in Q0958 en Q1190). Kracht- en drukmetingen ten bate van analyse responsiedrag, stabiliteitsberekeningen en metingen van fenderkrachten en -indrukkingen bij landen op de drempel (Q1293).
- Aanvullend onderzoek naar de stabiliteit van het stortbed in een sectiemodel (2D) (Q1421).
- Onderzoek met een schaalmodel naar trillingen in de deuren (Q1796).
- Numeriek onderzoek naar de weergave van seiches in het Europoortgebied (Z0568).
- Conferentie-publicaties in 1995 over trillingen in de kerende wanden.
- Compacte studies rond 2015 naar de impact van de toen voorgenomen – en inmiddels uitgevoerde – verdieping van de Nieuwe Waterweg op de seiches en deiningsgolven die de Maeslantkering beïnvloeden en van de potentiele invloed van de verdieping op het dynamisch gedrag van de kering onder stromingsinvloeden (1220363 en 1221262).
- Adviesproject voor bijdragen door Deltares aan een digitale acceptatie-testomgeving (A-omgeving), vergelijkbaar met een vorm van een *digital twin* (1230119).
- Studie naar plooigevoligheid buispalen grondkerende constructies Maeslantkering (1120895-006).
- Vernieuwing hydrodynamisch rekenmodel in het BOS-systeem voor de Maeslantkering (11206112-011).

Een groot deel van de eerdere series van studies en rapportages zijn gericht geweest op de optimalisatie van de doorsnede van de kerende wanden en de stabiliteit van de bodembescherming rondom de kering. De bouwcombinatie (BMK) heeft in 1992 een samenvattend document geschreven over het proces rondom de doorsnede-optimalisatie toen de definitieve doorsnedevariant (#20) bereikt was (voorbeeldfoto's van de gebruikte meetopstelling staan in Figuur 6.11 en Figuur 6.12). De onderstaande samenvattende tabellen zijn overgenomen uit de samenvattende rapportage van BMK, waarbij een opdeling is gemaakt tussen het oorspronkelijke ontwerp met de openingen in de kerende wanden en het uiteindelijke ontwerp zonder die openingen.

Onderzoeken met openingen in de kerende wanden

Oktober 1988 Voorbereidingen modelonderzoek.	Het drijflichaam was voorzien van een gestileerde onderkant, terwijl in de sectordeur een twintigtal doorlaatschuiven was aangebracht (totaal circa 1.000 m ² per deur).
Januari 1989	Een sectie van de deur is ingebouwd in een smalle goot (zgn. 2D-model). De deur blijkt een heftig dynamisch gedrag te vertonen in de eigen dompfrequentie. Diverse varianten van de onderzijde van de deur worden gevarieerd en uiteindelijk blijkt een simpel rechthoekig bakprofiel goed te voldoen. "Verslag modelonderzoek Q958, deel I, maart 1989".
Maart 1989	De nieuwe deurvorm wordt beproefd in het 3D-model en blijkt ook onder zeer extreme stromings- en golfcondities stabiel. De situatie waarbij tijdens het afzinken de schuiven dicht staan is niet onderzocht (de kans op falen van de schuiven was veel kleiner dan toelaatbaar). "Verslag modelonderzoek Q969, deel I, juni 1989".
September 1989	Om verschillende redenen wordt besloten de schuiven uit het ontwerp te nemen. Inlaten en spuien gebeurt nu door ofwel het heffen van de deur, ofwel het niet volledig afzinken. Wel werd vastgelegd dat het hydraulisch onderzoek diende te worden herhaald omdat deze

ontwerpwijziging niet in het proevenprogramma was opgenomen. De verwachting was dat het slechts om een verificatieonderzoek zou gaan.

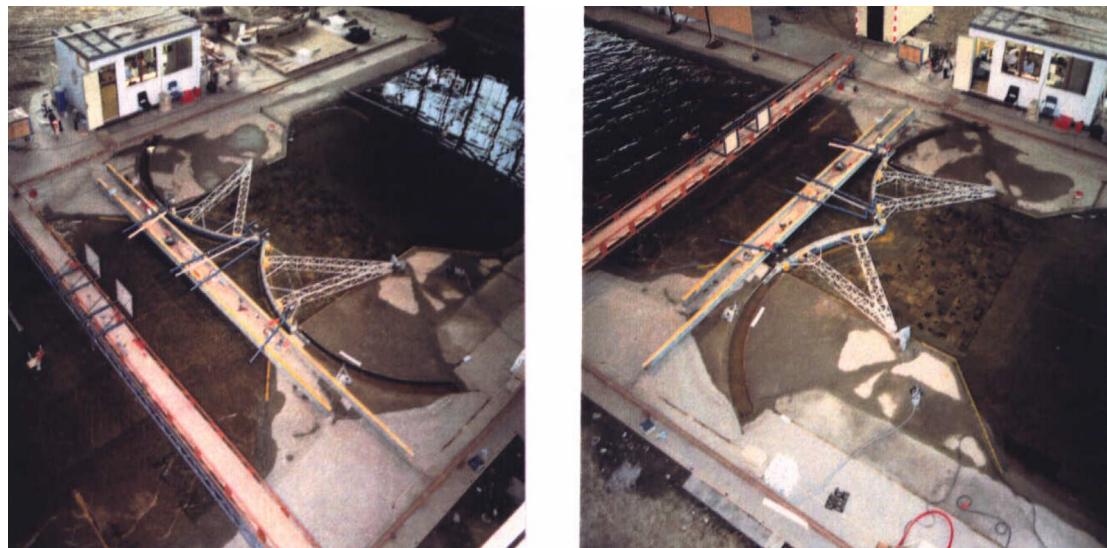
Onderzoeken zonder openingen in de kerende wanden

December 1989	Het 3D-model wordt verbouwd.
Januari 1990	De sectordeuren blijken een zeer bijzonder laagfrequent gedrag te vertonen. Bij positief verval (zee naar rivier) maken de deuren een uit-fase dompbeweging, waarbij aan de benedenstroomse zijde, tussen de landhoofden, een staande golf ontstaat. De periode van de golf is 60 s. Bij negatief verval ontstaat, in mindere mate, een staande golf, die vanwege de afwijkende geometrie van de landhoofden daar een andere golflengte heeft. De deuren bewegen kort-frequenter (30 s) en hebben een rotatie als bewegingsvorm. 'Speelproeven' wijzen uit dat toevoegen van waterdoorsnijdend oppervlak aan de bovenstroomse zijde het gedrag aanzienlijk verbeterde. Verder wordt vrij overtuigend aangetoond dat de oorzaak van het fenomeen een 2D-oorsprong moet hebben. "Verslag Q1140, juni 1990". Omdat een vergroting van het waterdoorsnijdend oppervlak aan de zeezijde nogal wat consequenties had en aldus strijdig met de onderzoeks-uitgangspunten werd besloten nader onderzoek te doen naar de vormgeving van de onderkant van de deur.
Februari 1990	In het 2D-model wordt in hoog tempo een aantal varianten getest en beoordeeld. Een belangrijke handicap vormt het feit dat de deur zowel voor positief als negatief verval dient te worden ontworpen. Als meest veelbelovende variant komt uit de bus die waarbij de voorzijde over ongeveer de helft van de lengte is afgeschuind. "Verslag Q1190, november 1990"
April 1990	In 3D blijkt de variant, bij de toen gestelde norm, goed te voldoen. Echter als aan het eind van de proevenserie een gevoelighedenonderzoek naar de invloed van sediment op de drempel plaatsvindt, blijkt de deur niet meer te voldoen. Voor de zomer wordt vastgesteld dat de optie "gefaseerd afzinken" of het creëren van een "vast" oplegpunkt aan de oeverzijde de stabiliteit aanzienlijk verbetert. Nader onderzoek wordt uitgesteld tot na de zomer. "Verslag Q1140, juni 1990".
September 1990	Bij nadere uitwerking blijkt het vaste oplegpunkt (het zgn. okselfender) technisch niet haalbaar. De optie gefaseerd afzinken blijkt minder op te leveren dan was verwacht. Op grond van de in januari 1990 reeds uitgevoerde 'speelproeven' is bekend dat een sterke koppeling met de bovenwaterstand een stabiliserende factor is. Met andere woorden het opbouwen van zoveel mogelijk bovenwaterdruk werkend op de onderzijde van de kering is gunstig. Hierdoor wordt de aandacht op het skirt gevvestigd. Bij proefnemingen blijkt dat een relatief klein skirt reeds een effectieve drukbouw kan garanderen. Gekozen wordt voor een skirt van 1 m hoogte (0,60 m zou al voldoende zijn). De stabiliteitsgrens van de kering ligt nu ruim boven het gedefinieerde gebruiksgebied van de kering. "Verslag Q1278, concept, februari 1991".
December 1990	Min of meer bij toeval wordt ontdekt, dat bij zeer lage rivierwaterstanden, een sterke verlaging van de stabiliteitsgrens optreedt. Hoewel de onderzochte waterstand bij afzinken met relatief hoge vervallen niet op kan treden, is besloten tot nader onderzoek. Oe onzekerheid met betrekking tot de oorzaak van het waterstandseffect lag hieraan ten grondslag.
Februari 1991	De mathematische modellen zijn inmiddels zover ontwikkeld dat via metingen in het 2D-model, het gedrag in 3D kan worden voorspeld. Het hoofdspoort bestaat nu uit een variant waarbij het skirt 1,25 m naar de rivierzijde wordt verplaatst. Na uitvoering testen in 2D met de meest ongunstige sedimentvormen wordt een nieuwe variant bepaald, die wordt ingebouwd in 3D. In deze periode neemt ook de eis toe, die aan de stabiliteitsgrens moet worden gesteld. Verfijning van de probabilistische berekeningen levert een gebruiksgebied (in termen van verval) op dat meer dan 25% hoger ligt dan voorheen. "Modelonderzoek Q1293, conceptnotities".
Mei 1991	Uitvoerig onderzoek in 3D met de gekozen variant, waarbij met name de invloed van waterstanden en sediment wordt onderzocht, leidde tot een voldoende hoge stabiliteitsgrens, waarbij slechts voor een enkel geval de optie "gefaseerd afzinken" wenselijk is. "K, L, M-proeven, Q1378, conceptnotitie"

Onderzoeken zonder openingen in de kerende wanden

Juni 1991	Bij evaluatie van het aspect "volledigheid" van het mei-onderzoek komt aan het licht dat de variabele spleetgrootte (afstand deur tot drempel) slechts in beperkte mate is onderzocht. Op voorhand werden echter geen problemen verwacht omdat eerdere varianten wel volledig waren doorgestest. Echter tijdens proeven naar het gedrag in golven blijkt dat de kering bij grote spletten en relatief lage vervallen een dompbeweging uitvoert in de eigenfrequentie. Hoewel de grootte van de beweging en de opgeroepen krachten kleiner zijn dan die bij een ontwerpgolfconditie wordt dit verschijnsel door de BMK als ontoelaatbaar geoordeeld. Vorige varianten vertoonden dit gedrag niet. Hierover filosoferend ontstaat al snel de hypothese dat een achterskirt aan de rivierzijde positief zou kunnen werken. Deze oplossing blijkt afdoende te zijn. "P-proeven, Q1278, conceptnotitie"
Juli 1991	In het 2D-model wordt een drietal sub-varianten doorgemeten. De voorspellingen die hieruit volgen voor het 3D-gedrag blijken aan de optimistische kant te zijn. Het waterstandseffect speelt hier (opnieuw) een belangrijke rol.
Najaar 1991	De variant die uiteindelijk werd gekozen is uitvoerig en volledig doorgestest. Hierbij is tevens getracht optimalisaties uit constructief oogpunt door te voeren. Dit leidde uiteindelijk tot deurvariant 20.

De bovenstaande samenvatting beschrijft hoe de keuze van het weglaten van de openingen in de kerende wanden tot onverwacht dynamisch gedrag van de sectordeuren heeft geleid. Hierdoor waren meerdere series van aanvullende onderzoeken en schaalmodeltesten benodigd. Het dynamische gedrag kan optreden in verschillende 'modes'. Figuur 6.13 toont schematisch de verschillende potentieel optredende modes. De meeste bewegingen worden door de beide wanden gezamenlijk uitgevoerd (mode 1-4), enkele door een individuele kerende wand (mode 5 en 6). In de uitgebreide optimalisatiestudies van de doorsnede van de kerende wanden is ervoor gezorgd dat elke specifieke mode niet meer kan optreden of dat de condities waaronder een mode optreedt zijn verschoven naar een bereik dat in de praktijk geheel niet kan optreden of dat een voldoende kleine kans van voorkomen heeft.

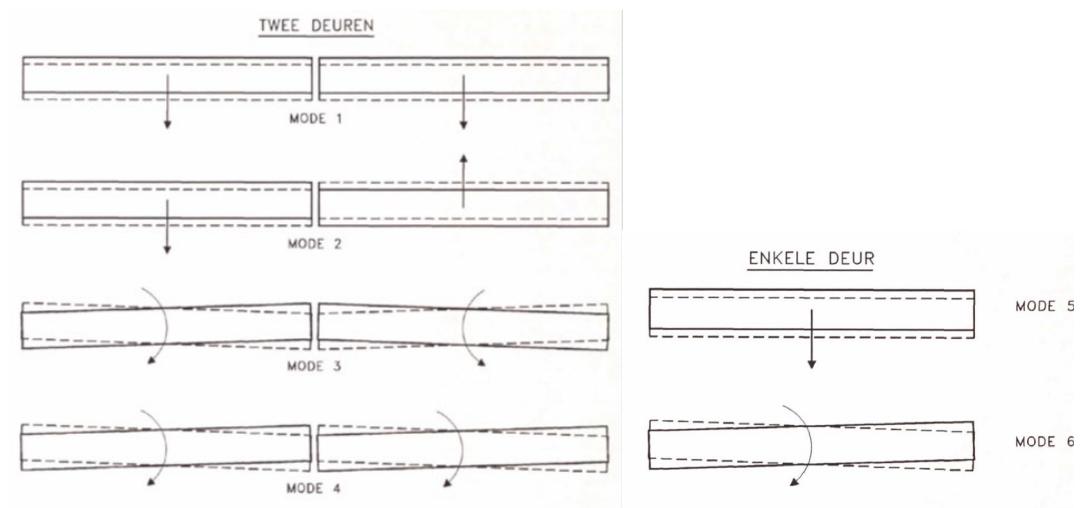


Figuur 6.11: Foto's van het 3D overzichtsmodel van de Maeslantkering in het schaalmodel (1:60).

Latere studies en projecten ten bate van de Maeslantkering zijn alle numerieke studies geweest. Er is onder andere gekeken naar de modellering van seiches in het havengebied (Z0568). Ook zijn er enkele expert-inschattingen uitgevoerd (1220363 en 1221262) ten bate van de Milieu-Effect-Rapportage (MER) die rond 2015 zijn uitgevoerd voorafgaand aan de verdieping van de Nieuwe Waterweg. In die expert-analyses is gekeken naar de invloed van een lagere bodemligging op seiches in het havengebied, op de deiningsgolven die de kering kunnen bereiken en op het dynamische gedrag van de kering. De impact van de voorgenomen verdieping bleek op al die punten beperkt. Inmiddels is de verdieping uitgevoerd.



Figuur 6.12: Foto's van details van de kerende wand in het 3D overzichtsmodel, inclusief de ribbels onder de kerende wand en met de fenders onder de wanden weergegeven met veren (Q1278).



Figuur 6.13: De verschillende dynamische modi die de kerende wanden van de Maeslantkering kan vertonen.

Van 2016 tot 2021 is door Deltires bijgedragen aan een digitale testomgeving van de Maeslantkering (1230119). Die acceptatie-testomgeving (A-omgeving) kan gezien worden als een soort 'digital twin'. In eerste instantie is die omgeving ontwikkeld om de nieuw aan te maken stuurssoftware van de kering (BESW) op te testen en te accepteren voorafgaand aan installatie op de echte kering. Deltires heeft twee simulatiemodules ontwikkeld en aangeleverd die de hoofdbeschrijving van de fysieke wereld verzorgen. De eerste module beschrijft het watersysteem en de interactie met de kering. De tweede module beschrijft het ballastsysteem van de kering en de resulterende verticale posities van de kerende wanden. Omdat de kering in 2007 en 2018 tijdens stormen gesloten was, op basis van een tijdelijk verlaagd sluitpeil, kon er voor de eerste keer ook een uitgebreide validatie van de berekening met beide modules gedaan worden.

De grondkerende constructie van de landhoofden van de Maeslantkering bestaat uit een combiwand (buispalen met damwanden ertussen). Omdat de drainage van de landhoofden naar verwachting niet meer (optimaal) functioneert kan de belasting op de wanden anders zijn dan in het ontwerp is aangenomen. Daarom was nader onderzoek van die constructie benodigd om na te gaan of de beoogde levensduur van 100 jaar gehaald kon worden (project 1120895-006). Uitgaande van een niet-functionerende drainage bleken niet alle delen van de constructie te voldoende aan de geldende (bouw-)codes. Die resultaten zijn gedeeld met RWS om daar verdere acties op te programmeren.

In 2021 heeft Deltires bijgedragen aan de vernieuwing van het BOS van de Maeslantkering (project 11206112-011). Binnen het BOS draait een SOBEK simulatiemodel dat elke 10 minuten een voorspelling van de waterstanden voor de komende tijd maakt. Op basis van die voorspelling beslist BOS of de Maeslantkering (en de Hartelkering) gesloten moet gaan worden. Deltires leverde een nieuwe softwareversie en gebiedsbeschrijving na uitgebreide validatie van de nauwkeurigheid van het nieuwe rekenmodel (software + gebiedsbeschrijving).

6.5 Grootste technische aandachtspunten

Het keringstype van de Maeslantkering ('sector gate vertical axis') heeft vele voordelen, waaronder een grote opening voor de scheepvaart tijdens de kering in rust en directe toegang tot de kerende wanden voor onderhoud via de drooggdokken. Bij een langdurige storm – door betrokkenen bij het ontwerp en inzet van de kering een 'dubbel-topper' genoemd – kan indien de situatie dat toelaat het tussenliggende laagwater gebruikt worden om de kering tijdelijk op te drijven en verzameld rivierwater te lozen. Nadelen en technische aandachtspunten zijn primair het beperkt opneembare negatieve verval, de complexe aansturing van de kering en de algehele complexiteit van de kering met vele (bewegende) onderdelen en deelsystemen. Daarbij spelen seiches en het grootschalige dynamische gedrag (bewegingsmodes) van de kering een grote rol.

6.6 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

Mogelijk dat in de toekomst de kering vaker dicht zal moeten gaan als gevolg van zeespiegelstijging. De kering is niet bedoeld voor heel veel sluitingen. Oorspronkelijk was een sluiting gemiddeld elke 7 jaar en op termijn als gevolg van zeespiegelstijging elke 5 jaar voorzien. Dat betekent slechts 15-20 stormsluitingen in een standaard levensduur van 100 jaar, naast de jaarlijkse min-of-meer onbelaste functioneringssluitingen. Wat heeft meer sluiten tijdens stormen voor impact op de kering en hoe kan de kennis van Deltires worden ingezet om gevolgen te beperken? Misschien dat de sluitcriteria in de toekomst aangepast (verhoogd) kunnen en moeten worden? Mogelijk dat er in extreme gevallen overtopping geaccepteerd kan worden? Daar is de kering oorspronkelijk niet voor ontworpen. Vraagt dat nog aanpassingen in de dwarsdoorsnede van de kering? Of zijn aanpassingen vanwege beperking aan de constructie sowieso geheel uitgesloten?

Elk jaar vind een functioneringssluiting plaats. Vanwege hinder voor de scheepvaart zijn er verder geen testmogelijkheden in de praktijk. Hoe kan zoveel mogelijk inzichten uit die jaarlijkse testen gehaald worden? Mogelijk dat de A-omgeving Maeslantkering hiervoor ingezet kan worden. De A-omgeving kan mogelijk ook voor trainingsdoeleinden worden ingezet of voor het vooraf bepalen van de impact van aanpassingen aan de kering (bijvoorbeeld vervangen van de kleppen voor een ander type en/of grootte).

De statistische analyses die tijdens het ontwerp en de bouw zijn uitgevoerd zouden opnieuw nagerekend kunnen worden met de huidige kennis en inzichten van onder andere zeespiegelstijging en de invloed van seiches op de kering. De software die tijdens het ontwerp is aangemaakt (RASFLOW) zou vernieuwd kunnen worden zodat er opnieuw een operationeel modelinstrumentarium beschikbaar is. De twee modules die Deltares voor de A-omgeving heeft aangemaakt, bewust in 'levende' software, vormen gecombineerd als een groot deel van een nieuw instrumentarium. Daar zouden nog enkele modules aan toegevoegd kunnen worden.

Mogelijk kan de sluit-timing geoptimaliseerd worden? Invloed rivierafvoer staat centraal in combinatie met tijdig sluiten voor piek in stormopzet.

7 Hollandsche IJsselkering

7.1 Hoofdkenmerken kering

De Stormvloedkering Hollandsche IJssel, of Algerakering, sluit de Hollandsche IJssel af van de Nieuwe Maas. De kering ligt tussen dijkringen 14 en 15. Er zijn twee schuiven, achter elkaar gelegen (Figuur 7.1). Inzet van één enkele schuif is voldoende op de kering te sluiten en beide schuiven hebben dezelfde kerende functie voor hoogwater vanaf zee. De dubbele uitvoering is primair ingegeven door het willen reduceren van de faalkans. Dit is de enige grote kering in Nederland die dubbel is uitgevoerd⁷.



Figuur 7.1: Luchtfoto van de Hollandsche IJsselkering (Algerakering), met op de voorgrond de noordelijke van de 2 kerende wanden.

De schuiven zijn opgehangen aan 45 m hoge betonnen heftorens. Elke schuif heeft een hoogte van 11.5 m en een breedte van ca. 82 m. De kerende hoogte is +5.0 m NAP. De hoogtepositie van de drempel is -6.5 m NAP. De eerste schuif was operationeel in 1958, de tweede in 1976. Naast de kering ligt een sluis voor de scheepvaart. In geheven positie is de doorvaarthoogte +12 m NAP.

Het officiële peil waarbij deze kering wordt gesloten ligt lager dan het peil voor de Maeslantkering, namelijk^{8,9} +2.25 m NAP.

⁷ Voor zover bekend is, naast de Hollandsche IJsselkering, alleen bij het ontwerp van de Oosterscheldekering (Hoofdstuk 3) oorspronkelijk ook gedacht aan een dubbele uitvoering van de schuiven, maar daar bleek de reductie in faalkans niet op te wegen tegen de sterk toegenomen complexiteit van de kering in geval van dubbele schuifulvoering. Die veel kleinere impact op de faalkans is vooral het gevolg van het feit dat die kering uit veel naast elkaar gelegen schuiven bestaat en dat het falen van een enkele schuif niet tot falen van de gehele kering leidt; ook als een enkele schuif weigert te sluiten zal die kering een stormvloed grotendeels kunnen tegenhouden.

⁸ Uit: "Waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek, Definitieve versie", Rijkswaterstaat Zuid-Holland, 2005", geciteerd in rapportage Deltares 11200579-008-BGS-0003.

⁹ Uit gesprekken met keringsoperators (maart 2021) werd duidelijk dat in de praktijk doorgaans bij een lager peil al wordt gesloten (+2 m NAP) om zo een marge te hebben voor mogelijke onnauwkeurigheden in de hoogwatervoorspelling.

Na het sluiten van de Maeslantkering (reguliere sluitpeil: +3 m NAP Rotterdam, +2.9 m NAP Dordrecht) zal de waterstand niet verder oplopen vanuit zee, maar wel zal de waterstand nog oplopen door afvoer van de Rijn die door de gesloten meer westelijk gelegen keringen niet af kan stromen naar zee.

Als oudste beweegbare stormvloedkering van Nederland heeft de kering sinds 8 september 2018 een formele monumentale status. Dat betekent onder andere dat zichtbare aanpassingen aan de kering niet zomaar meer gemaakt kunnen worden. Onbekend is of dit toekomstige aanpassingen en mogelijke technische verbeteringen in de weg kan gaan zitten.

7.2 Functies van de kering

De harde constructies van het complex van de Hollandsche IJsselkering bestaan uit de volgende hoofdonderdelen: een dubbel (serieel) uitgevoerde stormvloedkering, een sluis voor het passeren van schepen indien niet mogelijk via de keringsopening en een verkeersbrug. In Tabel 7.1 staat een overzicht van de verschillende functies die de Hollandsche IJsselkering heeft.

Tabel 7.1: Overzicht van functies Hollandsche IJsselkering (uit project ‘Levensduur stormvloedkeringen’, projectreferentie 11206063)

Kerntaak of beleidsdoel	Functie	Uitleg (toestand)
waterveiligheid	Bescherming tegen hoogwater	Keren van hoogwater (gesloten)
	Afvoer van water	Polderwater afvoeren
	Bergen van water	Weerstand tegen hoge belastingen
Voldoende water	Aanvoeren zoetwater	Doorspoelwater leveren aan polders
	<i>Beperken verzilting</i>	
Schoon en gezond water	Bieden water met basiskwaliteit	Gezuiverd afvalwater laten afstromen naar zee
	Leefgebied planten en dieren (incl. vismigratie)	Getijdebeweging Hollandsche IJssel
Vlot en veilig vaarwegverkeer	Varen mogelijk maken	Voldoende vaarhoogte, breedte, diepte en zicht. Voldoende vaak open zijn, kunnen openen
	Faciliteren vaarwegverkeer	Voldoende weerstand oeverconstructie tegen overschrijden sterkte / stabiliteit
Overig	Iconisch monument	
	Faciliteren wegverkeer	Wegverbinding tussen Krimpen a/d IJssel en Capelle a/d IJssel

7.3 Kennisbasis Deltares

7.3.1 Overzicht eerdere studies

Onderzoeken en projecten door Deltares als bijdragen aan het ontwerp van deze kering zijn beperkt tot de volgende onderwerpen:

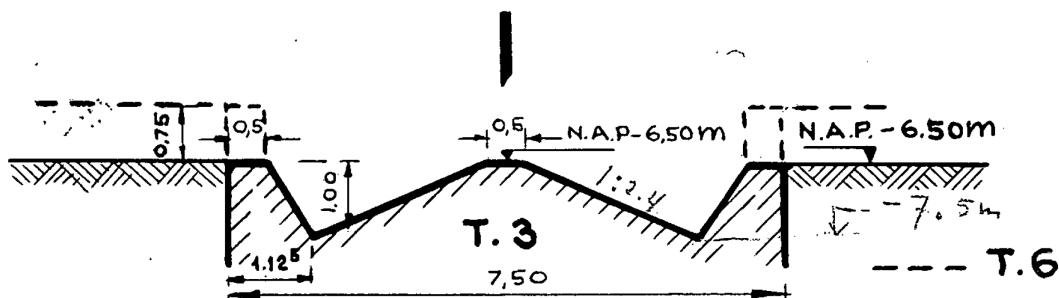
- Fysieke schaalmodeltesten van de optimale stroming rondom en onder de schuiven door (project M0479);
- Veldmetingen van trillingen van de schuiven (project R1304).

7.3.2 Uitwerking en samenvatting voorgaande studies

Het oudste teruggevonden onderzoek voor deze kering is project M0479, gerapporteerd in januari 1954. Dit is zeer kort na de Watersnoodramp uit begin 1953. Echter, plannen voor deze kering bestonden al langer en waren grotendeels al uitgewerkt toen de Watersnoodramp uit 1953 optrad¹⁰. Centraal in onderzoeksproject M0479 stond een schaalmodel (schaal 1:25) dat werd ingezet voor het optimaliseren van de vorm van de drempel in relatie tot het stroombeeld onder de schuif door en de impact van een resulterende jet op omringende bodem. Zand werd gebruikt als ondergrond rondom de drempelconstructie. Dat is begrijpelijk in verband met schaalbaarheid (anders wordt grond op schaal al snel zeer fijne klei), maar waarschijnlijk gaf dat een overschatting van de mobiliteit van het bodemmateriaal ten opzichte van meer cohesief materiaal dat naar verwachting lokaal het meest aanwezig zal zijn. Aan de andere kant blijken stroomsnelheden die op kunnen treden onder de schuiven door dermate hoog dat erosie-effecten aandacht vragen ongeacht de cohesie van het rivierbed.

De rapportage van M0479 vermeldt dat volgens de eisen van RWS de drempel en omringende bodem bestand moeten zijn tegen 1.17 m/s bij geopende kering¹¹. Tijdens sluiten dient de drempel en omringende bodem (en daarmee de kering?) bestand te zijn tegen een stroomsnelheid van 1.75 m/s (overeenkomstig een verval van 1.25 m). Ook voor de situatie tijdens (tussentijds/deels) heffen om de waterstand achter de kering te regelen dient voldoende sterkte beschikbaar te zijn. Die laatste wijze van de inzet van de kering is onderdeel van de oorspronkelijk voorziene toepassing van regelstuw ten bate van zoutbeheersing¹².

Rapport M0479 beschrijft hoe, door te werken met een lokale verdieping in de drempelconstructie in combinatie met een opstaande rand (Figuur 7.2), de straal van het water dat onder de kering doorkomt omhoog wordt gericht in plaats van langs de bodem. Op die manier wordt een stabiele bodemsituatie verkregen. Dit vraagt wel extra sterkte van de opstaande rand van de drempelbak. Breedte en diepte van de drempelvorm zijn gevarieerd in de schaalmodeltesten om het optimum te vinden. Ook de hoogte van de drempel onder de schuif is gevarieerd door drempelhoogten te beschouwen van -6.25 m NAP en -6.5 m NAP.



Figuur 7.2: Voorkeursalternatief van de drempelvorm op basis van de testen in M0479.

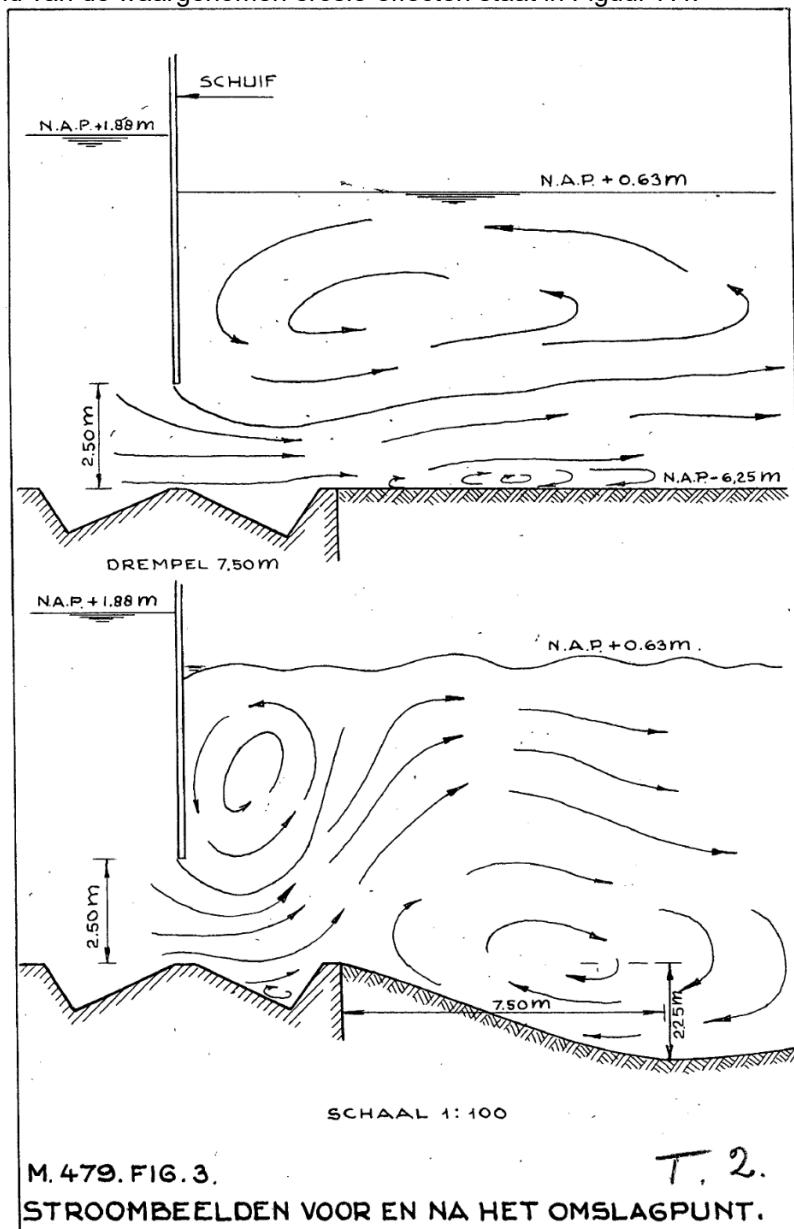
De rapportage van R1304 vermeldt dat bij kleine spleethoogten de drempeloplossing het beste werkt, bleek uit de schaalmodeltesten. Bij grotere spleethoogten krijgt de waterstraal weer de kans om meer langs de bodem aan te gaan liggen en alsnog ontgronding te veroorzaken.

¹⁰ Persoonlijke communicatie met keringsoperators van de Hollandsche IJsselkering, maart 2021. In het kader van project 'Levensduur stormvloedkeringen', projectreferentie 11206063.

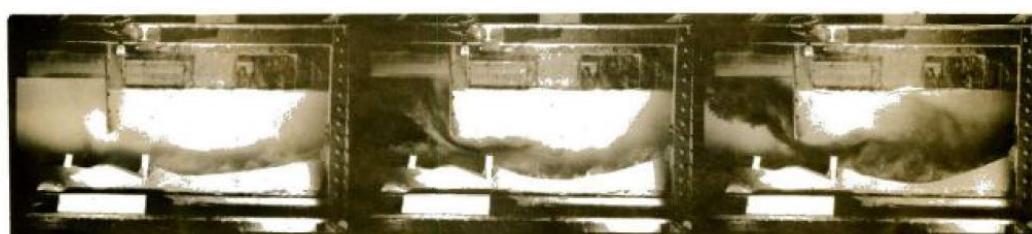
¹¹ Dit lijkt een betrekkelijk lage waarde. Onzeker is of dit een stroomsnelheid bij de bodem is of een diepte-gemiddelde stroming. Het is bovendien onduidelijk of dit inderdaad de uiteindelijk toegepaste ontwerpwaarde van de stroming is geweest. Merk op dat dit de stroomsnelheden in geopende toestand zijn en dat er voor de situatie tijdens het sluiten rekening is gehouden met hogere stroomsnelheden (verderop in de hoofdtekst beschreven).

¹² De kering wordt op dit moment niet meer ingezet voor de functie van zoutbeheer, aangezien in de praktijk is gebleken dat enig effect bereikt met het sluiten van de kering, voor een in de praktijk haalbare sluitduur, direct weer 'ingejaald' wordt door de zoutinvloeden kort na het openen van de kering (persoonlijke communicatie operators, maart 2021).

Die situaties treden echter maar kort op omdat de schuif zal doorgaan in zijn sluitende/openende beweging. De verschillen in stromingsconditie voor situaties voor en na dat omslagpunt staan geschetst in Figuur 7.3, overgenomen uit het rapport van project M0479. Een voorbeeld van de waargenomen erosie-effecten staat in Figuur 7.4.



Figuur 7.3: stroombeeld voor (boven) en na (onder) het omslagpunt tussen een horizontale naar een meer verticale jet in de loop van het proces van het neerlaten van de schuif.



Figuur 7.4: voorbeeld van de modeluitkomsten met dynamische bodem voor de situatie met de grootste ondergronding. De vaste drempel is het deel boven het horizontale witte vlak onder in de foto's. De verticale opstaande randen vormen de uiteinden van de vaste drempel.

De drempelhoogte lijkt uiteindelijk op -6.5 m NAP aangelegd te zijn (kerende hoogte van +5 m NAP in combinatie met schuifhoogtes van 11.5 m), conform het voorkeursalternatief voor de drempelvorm (Figuur 7.2). Of de gehele oplossing inclusief die drempelvorm is overgenomen in het eindontwerp van de kering staat niet vermeld in de rapportage van M0479. In project R1304 (hieronder verder beschouwd) staat een ‘as-built’ tekening inclusief de drempelvorm uit Figuur 7.2 en daarmee lijkt de oplossing inderdaad geïmplementeerd te zijn.

De rapportage van project R1304 beschrijft veldmetingen van trillingen van de schuiven van de Hollandsche IJsselkering. De veldmeting is gecombineerd met een deskstudie naar de theoretische achtergrond van dergelijke trillingen. Naast deze onderwerpen is ook gekeken naar de potentiële sterkte van translatiegolven. Figuur 2 uit de rapportage van R1304 toont doorsneden en aanzichten van de as-built versie van de kering, inclusief drempelvorm uit Figuur 7.2. Daarnaast beschrijft de rapportage een systeem van loopwielen waarmee de schuif bewogen kan worden langs rolbanen in de sponningen. De schuif wordt daarbij eerst ‘vrij gemaakt’ door een afdrukmechanisme, dat in te zetten is tot een momentaan verval over de schuif van 1,95 m. In gesloten toestand vormen verticaal geplaatste balken op de uiteinden van de schuif de opleggingen die de horizontale krachten op de schuif via sponningen in de zijwand afdragen naar de landhoofden (Figuur 7.5).



Figuur 7.5: Links: houten oplegging die de horizontale krachten afdraagt; rechts: uitsparing in landhoofd waarin kopse kant van de schuif en de oplegging zakt (foto's genomen tijdens proefsluiting 12 maart 2021).

Project R1304 is uitgevoerd in 1980, betrekkelijk kort na de tijd van de installatie van de 2^e schuif in 1978. Oorspronkelijk had juist die tweede schuif een beoogde stuwwerking en waterbeheersfunctie ten bate van het verminderen van zoutindringing, in aanvulling op de primaire waterkerende functie van de Hollandsche IJsselkering (zie Voetnoot 12).

De rapportage beschrijft als potentiële trillings-issues met de schuiven: trillingen van de onderrand van de schuif (in geval van kleine spleet), trillingen van de onderste verstijvingsligger

voor spleethoogtes 0.6-0.9 m in combinatie met een hogere waterstand aan de Gouda-zijde. Wervelingen rondom de booglijger kunnen gehele schuif in trilling brengen. Stroming langs de booglijger kan wervelvorming veroorzaken die mogelijk elementen van de booglijger in trilling kunnen brengen.

Maximale stroomsnelheden door de spleet onder de gesloten schuif kunnen in de orde van 3-4 m/s zijn en in geval van kleine spleethoogtes mogelijk nog hoger. Het Strouhalgetal is in R1304 berekend op basis van die stroomsnelheden om zo de gevoeligheid van de situatie voor het ontstaan van trillingen af te kunnen leiden. De stroomsnelheden zoals vermeld blijken volgens het Strouhalgetal tot trillingen van de schuiven te kunnen leiden.

Tijdens de veldmetingen van de Hollandsche IJsselkering bleken de trillingen in de schuiven beperkt, maar gemeten situaties waren alleen onder beperkte vervallen (<1.2 m). De meest relevante trilling bleek een trilling bij 90 Hz van – naar verwachting – de onderkant van de schuifplaat in gesloten toestand, primair omdat die situatie relatief lang aanhoudt waardoor materiaalvermoeiing op kan treden. In het ontwerp was al een nominale spleethoogte van 35 mm aangehouden tussen de schuif en de drempel. De studie uit 1980 raadt aan om die spleethoogte bij inzet van de kering in de praktijk iets groter aan te houden om zo de trillingsvorm van 90 Hz te onderdrukken¹³. Bij voorkeur is de spleet enkele malen de plaatdikte van de onderkant van de schuif. Daarbij heeft een ‘scherp’ vormgegeven onderrand van de schuif de voorkeur. Merk op dat een trilling op de onderrand van de schuif ook voorkomen kan worden door geheel geen spleet toe te passen – de trilling wordt immers veroorzaakt door fluctuaties in de stroming onder de schuif door. Echter, in de praktijk is het ongewenst de schuif contact te laten maken met de drempel, of de schuif zelfs (deels) te laten rusten op de drempel, vanwege toleranties, vermijden van wisselende en niet-uniforme belastingen en het vermijden van mogelijk schrapen van de schuif over de drempel. Eenzelfde soort filosofie lijkt later te zijn toegepast bij de Hartelkering (Hoofdstuk 5) en de Maeslantkering (Hoofdstuk 6).

In de bijlage van de rapportage van R1304 wordt de hoogte van translatiegolven bij openen en sluiten berekend volgens theoretische formuleringen. Hierbij is een specifieke sluit- en opensnelheid aangenomen en wordt uitgegaan van 1 m verval (bij start van openen) of 1 m/s stroming (bij start van sluiten).

Het rapport uit 1980 van R1304 bevat als een aanvullend onderwerp een korte vermelding van ervaring met hefschuif Volkeraksluis, de vizierschuiven bij Hagestein en met kleppen in een sluis bij IJmuiden. In schaalmodelmetingen of in de praktijk bleken trillingen in die constructies op te treden. Door het ontwerp van de doorsnede aan te passen, primair de onderste rand van een schuif, of door het toepassen van een spleet onder de schuif werden de trillingen (afdoende) vermeden. Bij de vizierschuiven bij Hagestein bleek volgens de geciteerde rapportage de oplossing te liggen in het toepassen van een niet-gelijke spleethoogte bij de verschillende schuiven.

7.4 Grootste technische aandachtspunten

De Hollandsche IJsselkering is de oudste grote SVK in Nederland. Bij een standaard ontwerplevensduur van 100 jaar zou de kering zijn einde technische levensduur bereiken in 2058. De vraag is echter of een aangenomen ontwerp-horizon (referentieperiode) niet losgezien moet worden van de daadwerkelijke levensduur. Zeker ook omdat instandhouding van de oorspronkelijke/gewenste toestand van de kering het uitgangspunt is van RWS als beheerder. Een potentieel knelpunt is de monumentale status van de kering.

¹³ Bij de huidige keringsinzet wordt in de praktijk inderdaad een speethoogte van ca 50 mm aangehouden (persoonlijke communicatie keringsbeheerders, maart 2021).

Enerzijds is dat een weergave van de historische waarde en uniekheid van het kunstwerk, maar het kan ook de primaire functie van waterkering in de weg zitten indien aanpassingen, vernieuwingen of versterkingen vanwege de monumentale status niet doorgevoerd zouden mogen worden. Mogelijk dat de overal constructie herkenbaar zal moeten blijven als ‘het monument’, maar dat detailveranderingen en -verbeteringen toegestaan zijn.

Deze kering is de enige grote kering in Nederland die dubbel is uitgevoerd. Dat geeft mogelijk aanvullende kansen. De kans op niet sluiten per inzetvraag wordt momenteel door RWS in hun beoordeling laag aangenomen, maar waarschijnlijk is die kans veel kleiner. Dat biedt kansen in relatie tot eisen aan overstromingskansen in het achterland.

Deze kering was de eerste grote Nederlandse kering die opgeleverd is. Daarna zijn er aanvullende grote keringen westwaarts van de kering aangelegd. Misschien dat juist bij deze kering veel ruimte in het ontwerp zit. De kerende hoogte van +5 m NAP is net zo hoog als die van de Maeslantkering (Hoofdstuk 6). Indien de westwaarts gelegen keringen de maatgevende waterstand bij de Hollandsche IJsselkering hebben verlaagd, dan zou daar ruimte zijn ontstaan om een toename in de belastingen op te vangen¹⁴.

De torens zijn ontworpen voor een zware schuif die nog met klinknagels samengesteld is. De noordelijke schuif is 18 jaar na de eerste al een stuk lichter uitgevoerd dan de oorspronkelijke zuidelijke¹⁵. Na een aanvaring van een schip met de zuidelijke schuif is ook die schuif aangepast naar een lichtere constructie¹⁵. Dat geeft aan dat de heftorens en de bewegingsmechanieken daarin een overcapaciteit hebben. Die eigenschappen zullen dus naar verwachting niet als eerste maatgevend worden. In 2021 heeft groot onderhoud plaatsgevonden aan de bewegingswerken. Het is onbekend of de oorspronkelijke hefcapaciteit wordt gehouden, of dat de nieuwe installaties zijn geoptimaliseerd voor een lager hefgewicht.

Ook de sluis zal niet snel aan zijn capaciteit zitten, aangezien die aangelegd is voor een ontwerpschip gekoppeld aan de scheepswerven die in het gebied achter de kering oorspronkelijk gelegen waren. Die scheepswerven zijn niet meer in bedrijf. De schepen die nu van de sluis gebruik maken zijn een stuk kleiner dan de grootste schepen die op de werven gebouwd werden¹⁵. Verwacht wordt dat de maximale vaarklasse van het achterliggende vaarwegennet eerder maatgevend zal zijn.

Sedimentatie ter hoogte van de kering kan een aandachtspunt zijn. De beheerders verwachten dat ook de bocht in de rivier ter hoogte van de kering bijdraagt aan de sedimentatie ter plaatse¹⁵. Op regelmatige basis wordt er gebaggerd ter hoogte van de kering. Of er issues zijn met sediment/slib op de drempel is onbekend, maar naar verwachting spoelt die schoon bij het laten zakken van de schuif, mits er voldoende verval over de kering ontstaat.

Het watersysteem achter de kering is ogenschijnlijk klein. Echter, het is wel een deel van de dijkring rondom zeer drukbevolkte gebieden (Dijkring 14). Dat maakt dat de kering een zeer kritiek deel van Nederland beschermt.

¹⁴ Als voorbeeld: tijdens de zware storm van 9 november 2007 zijn de Maeslant- en Hartelkering gesloten, wat als neveneffect had dat de Hollandsche IJsselkering niet sloot. Mogelijk is die situatie het gevolg van het tijdelijk verlaagde sluitpeil voor de Maeslantkering dat in dat stormseizoen werd gehouden, maar ook indien de Hollandsche IJsselkering wel sluit zal de Maeslantkering een verlagende werking hebben op de waterstanden die kunnen optreden bij die meer landwaarts gelegen kering.

¹⁵ Persoonlijke communicatie kering-beheerders, maart 2021

De schuiven zijn niet gemaakt voor overtopping. Door de aanwezigheid van de Maeslantkering zal daar waarschijnlijk niet snel sprake van zijn, maar mogelijk wordt dit in de toekomst waarschijnlijker als gevolg van zeespiegelstijging. Mogelijk dat met een andere vorm van de bovenkant van de schuiven overtopping wel geaccommodeerd kan worden? De vraag is dan of de bodembescherming rondom de kering dat aan kan (recentelijk zijn er delen van de bodembescherming vastgelegd als onderdeel van onderhoudswerkzaamheden¹⁶). Bovendien zal er voldoende bergingscapaciteit in het systeem moeten zitten. Bij een gesloten kering zullen ook de naastgelegen polders op de Hollandsche IJsselkering moeten kunnen lozen.

7.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

Op dit moment loopt een project levensduur SVKs (projectreferentie 11206063). Daarin is de Hollandsche IJsselkering als casestudy geselecteerd voor het nader uitwerken en controleren van een raamwerk voor het bepalen van de levensduur van SVKs. De voor die kering verkregen inzichten, maar ook opgedane algemene kennis over de Nederlandse SVKs, draagt bij aan het uitdenken van een afwegingskader voor het Deltahes onderzoeksprogramma Vervanging en Renovatie (Infrastructure Renewal and Replacement).

De beheerder/RWS heeft aangegeven dat men niet goed bekend is met de achtergronden van het drempelontwerp¹⁷, waarbij huidige vertegenwoordigers van RWS niet bekend bleken met het oorspronkelijk uitgevoerde onderzoek, beschreven in Sectie 7.3. Mogelijk dat daarnaast ook de lokale sedimentatie een aandachtspunt is.

De capaciteit die mogelijk in het huidige ontwerp beschikbaar is zou nader uitgezocht kunnen worden, bijvoorbeeld de sterkte van de omringende bodembescherming en de mogelijkheid om andere schuiven te plaatsen die (beperkte) overtopping toelaten. Mogelijk dat de kering in zijn bestaande vorm als veel ruimte geeft voor het opnemen van zwaardere condities, onder andere vanwege de ingebuikname van de Maeslant- en Hartelkering enige tijd na ontwerp en bouw van de Hollandsche IJsselkering.

¹⁶ Persoonlijke communicatie Koos Vrolijk, juli 2021.

¹⁷ Persoonlijke communicatie, maart 2021.

8 Ramspolkering

8.1 Hoofdkenmerken kering

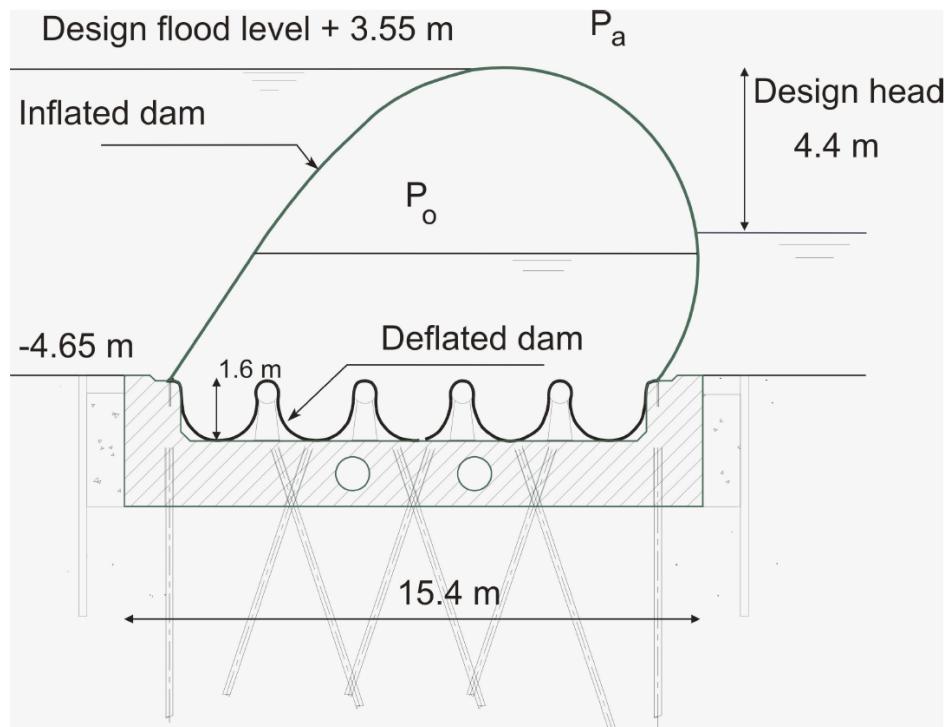
De Ramspolkering ligt in het Ramsdiep en de Ramsgeul, iets ten noorden van Kampen, en is in gebruik genomen eind 2002. Deze kering beschermt het achterland tegen opgestuwde water vanuit het IJsselmeer tijdens (noord)westelijke stormen. De kering bestaat uit drie identieke opblaasbare delen (Figuur 8.1). Twee balgen liggen in de Ramsgeul, één balg ligt in het Ramsdiep. De noordelijke balg (Ramsdiep) wordt vanuit het noord-gebouw bediend en aangedreven, de twee andere balgen (Ramsgeul) vanuit het zuidelijke gebouw. Elke balg heeft zijn eigen vul- en ledigsysteem, dus de faciliteiten in het zuidelijke gebouw zijn dubbel dat van het noordelijke.



Figuur 8.1: De Ramspolkering met opgeblazen balgen, kijkend vanaf het zuidelijke bedieningsgebouw naar het noorden. Het Ketel- en IJsselmeer liggen links op deze foto; het Zwarte Meer ligt rechts.

Figuur 8.2 toont een schematische doorsnede van een balg van de Ramspolkering¹⁸, inclusief de niveaus van de drempel en de ontwerpwaarde van de kerende hoogte (+3.55 m NAP). De drempel ligt op -4.65 m NAP. De balg heeft dus een constructiehoogte van drempel tot kruin van 8.2 m. De ontwerpwaarde van het verval is 4.4 m.

¹⁸ Deze weergave is een benadering van de echte balgvorm, mede ook afhankelijk van de momentane verval. Op enige boogafstand van de inklemming bij de drempel zal de vorm van een deel van de omtrek rond zijn indien er aan beide zijde van dat deel van de omtrek lucht bevindt of aan beide zijden water (Bouwdienst Rijkwaterstaat en WL | Delft Hydraulics, 2005). Bij lucht-water combinaties aan weerzijde van een sectie van het doek zal dat deel van de omtrek een andere vorm aannemen. Nabij de aansluiting op de drempel zal door de invloed van de inklemming de vorm lokaal ook niet cirkelvormig zijn.



Figuur 8.2: Doorsnede SVKR volgens ontwerp BAM Bridgestone (overgenomen uit: Rijkswaterstaat Bouwdienst en WL | Delft Hydraulics, 2005).

De breedte van een enkele balg (haaks op de rivieras) op het hoogteniveau van de drempel is ca. 60 m. De breedte op kruinniveau is ca. 78 m. De zijtaluds aan weerszijde van elke balg lopen vanaf het drempel- naar het kruinniveau met een 1:1 helling. Het doek zit op die oeverhellingen ingeklemd, net als over de drempellengte. De drie balgen gecombineerd hebben – op kruinhoogte – een lengte van 234 m.

De kering sluit op basis van waterstandsmetingen direct westelijk en oostelijk van de kering in de Ramsgeul in combinatie met metingen van stroomsnelheden onder de Ramspolbrug. Waterstandsmetingen worden op 3 punten aan weerszijde van de kering uitgevoerd; de stromingsmetingen op 2 locaties tussen verschillende sets van brugpijlers. De kering sluit indien de waterstand +0.5 m NAP overschrijdt en er sprake is van een oostwaarts gerichte stroming (negatieve richting in de meetwaarden). Dat komt gemiddeld eens per jaar of eens per enkele jaren voor.

De kering wordt gesloten door lucht in de balgen te pompen met compressoren. Tegelijk worden de kleppen in de waterleiding vanaf de balg naar het bovenpand opengezet. Door het opdrijvend vermogen van de luchtbel in de balg wordt het doek naar boven meegenomen en de aanzuigende werking die dat oplevert zorgt ervoor dat de balg 'vanzelf' zich ook met water vult. Voor het sluiten van de balg worden dus geen waterpompen ingezet. Het proces van sluiten duurt in de orde van 1 uur in geval van inzet van beide luchtcompressors beschikbaar per balg, wat ook de standaard werkwijze is. Indien maar één compressor ingezet kan worden duurt het ca. 2 uur om te sluiten. Op basis van de ingeblazen lucht en aangezogen water richt de balg zich 'vanzelf' op. Er is ook verder geen mogelijkheid om de sluiting verder actief aan te sturen of te beïnvloeden. Dit autonome sluitgedrag was zelfs een fundamenteel uitgangspunt binnen het ontwerp ('ontwerpfilosofie').

De resulterende overdruk van de lucht in de balg ontstaat automatisch bij de gegeven inzetduur van de compressoren. Zodra die einddruk is bereikt worden de compressoren uitgezet.

Vervolgens zal de luchtdruk in de balg, via de communicerende werking met het bovenpand via de open waterleidingen, ‘meegaan’ met veranderingen in de waterstand buiten tijdens het verdere verloop van de storm en de stormopzet. Op die manier is de luchtdruk in de balg altijd passend bij wat er benodigd is om geheel opgericht te blijven en tegendruk te bieden tegen de buitenwaterstand. Ook dit is een onderdeel van het autonome ontwerpgedrag van de balgen.

Oorspronkelijk werd een balgdoek versterkt met Aramide voorzien, maar later is het ontwerp aangepast naar een balgdoek versterkt met Nylon. Vanwege de hogere stijfheid van het doek hoorden bij het aangepaste ontwerp hogere balanswaarden voor de autonoom op te bouwen luchtdruk in de balg tijdens het sluitproces.

De kering gaat open zodra er een negatief verval wordt gemeten, dat wil zeggen een waterstand hoger aan de oostzijde van de kering dan aan de westzijde. Een negatief verval ontstaat door afname van de waterstand westelijk van de kering, door luwende stormcondities, en/of door een toename van de waterstand oostelijk van de kering door het bergen van de afvoer van de Overijsselse Vecht achter de gesloten kering. Bij het strijken van de balg wordt eerst de overdruk van lucht in de balg afgelaten, de grote waterafsluiters gesloten en wordt het water uit de balg gepompt. Eerst het grootste deel van het watervolume met grote ledigingspompen, het laatste deel via een aanvullend onderdruksysteem. Uiteindelijk landt het balgdoek op de drempel en de taluds. De drempel is zo vormgegeven dat het initieel ‘landen’ autonoom gebeurt. Vervolgens wordt het doek ‘opgeschut’. Dat betekent dat de balgen meerdere keren kort achter elkaar nog iets gevuld en daarna direct weer leeggepompt worden. Voor het vullen worden alleen de afsluiters in de waterleiding geopend en door de waterdruk vanaf het bovenpand stroomt er al water de balg in. Door dat opschudden wordt er voor gezorgd dat het balgdoek zich goed verdeelt over de rollers in de drempel, zonder dat er spanning op het doek blijft. Duikers worden ingezet kort na elke sluiting om de gestreken balgdoek te controleren alvorens de vaarweg weer vrijgegeven wordt voor de scheepvaart.

De kering wordt jaarlijks getest met een functioneringssluiting (F-sluiting), waarbij alle drie de balgen sluiten. Daarnaast worden soms inspectie-sluitingen (I-sluiting) uitgevoerd. Hierbij wordt veelal maar één balg eerst regulier gesloten, waarna het water uit de balg wordt gepompt in combinatie met gelijktijdig aanvullen van de luchthoeveelheid om de overdruk te handhaven. Dit gaat door tot (praktisch) al het water uit de balg is en de balg alleen gevuld is met lucht. Via sluisdeuren in de landhoofden kunnen mensen de opgeblazen balg betreden en inspecties uitvoeren. Voor een I-sluiting geldt dezelfde overdruk in de lucht als voor een reguliere sluiting, enkel het ingenomen volumedeel lucht in de balg is anders. Voor het strijken wordt de balg aan het eind van een I-sluiting eerst weer gevuld met water door de verbinding met het bovenpand te maken, onder afsluiten van de corresponderende hoeveelheid lucht. Vervolgens wordt de balg gestreken zoals bij een reguliere sluiting.

De balgen van de Ramspolkering zijn uitzonderlijk groot voor een dergelijk type constructie. Op deze schaal is het een uitzonderlijke constructie in Nederland en internationaal. Balgen worden in het buitenland veel vaker ingezet dan in Nederland, maar dan veelal als stuwen niet als kering. Bovendien zijn die veelal veel kleiner, typisch enkele dm hoog.

De faaldefinitie van de kering is dat de kering binnen 2 uur na een inzetvraag kerend moet zijn. Opvallend genoeg zit in de huidige faaldefinitie dus geen eis in relatie tot het tijdig openen van de kering.

8.2 Functies van de kering

Water keren, scheepvaart, rivieraafvoer mogelijk maken, niet opvallen in het vlakke landschap.

8.3 Kennisbasis Deltares

8.3.1 Overzicht eerdere studies

De eerste (grote) studie naar balgkeringen en -stuwen die is teruggevonden is uitgevoerd door WL | Delft Hydraulics in 1967. Dat betrof een balg voorzien in de Berkelse Zwt. De eerste studie voor de Ramspolkering stamt uit 1989. De meest recente studies voor de Ramspolkering zijn uitgevoerd door Deltares in 2021. Sinds 1989 zijn de volgende studies uitgevoerd voor de Ramspolkering, in chronologische volgorde van de projectrapportages en niet noodzakelijkerwijs met oplopende projectnummers:

- Verkennend onderzoek van een spinakerkering (doek tussen 2 horizontaal lopende kabels) (Q0920)
- Verkennend onderzoek naar een ‘balgstuw’¹⁹, nog met gewichten op het balgdoek in het schaalmodel en met asymmetrische fixatie op de taluds (Q1025)
- Nader onderzoek naar een ‘balgstuw’, met gewichten op het balgdoek en met symmetrische fixatie van het doek op de taluds (Q1545)
- Literatuurstudie en numerieke modellering van de balgkering, focus op invloeden van onder andere golven (Q2099)
- Balgkering Kampen, schaalmodelstudie van een balgkering onder invloed van golven (Q2263)
- Numerieke studie met een 1D-golfopwekkingsmodel voor het vaststellen van maatgevende golfcondities ter hoogte van de Ramspolkering (H3185)
- Schaalmodelonderzoek naar functioneren van de kering onder gebruiksomstandigheden, primair beweging in golven, effect van overtoppend water, gedrag bij terugkomen van het doek op de drempel en de benodigde sterkte van bodembescherming (Q2258A)
- Generieke studie naar de theoretische achtergronden van (kunststof/rubberen) schermen en opblaasbare constructies (H3214)
- Schaalmodeltesten met een aangepast ontwerp van de taluds van de Ramspolkering (Q2258B)
- Schaalmodeltesten voor de vormgeving van de ribbelvloer op de drempel onder de balg, voor een lucht-gevulde en een water-gevulde balg en voor een dunner en een dikker balgdoek (Q2239)
- Uitbreiding schaalmodelonderzoek vormgeving taluds, inclusief specifieke inklemmingsvorm van de doekrand (Q2258C)
- Uitbreiding schaalmodelonderzoek met nieuw type balgdoek (op basis van nylon-rubber) en een alternatieve wijze van inklemming van het balgdoek bij de taluds (Q2547)
- Onderzoeksprojecten naar stromingsgeïnduceerde trillingen in balgstuwen (Q2624+Q2677)
- Samenvattende technische publicatie modelonderzoek Ramspolkering van RWS en WL | Delft Hydraulics (Q3864)
- Studie naar slingeringen op het IJsselmeer die de inzet van de Ramspolkering beïnvloeden, inclusief ongewenst meermaals sluiten en openen tijden dezelfde storm (H4531), in combinatie met publicatie De Jong et al. (2006)

¹⁹ Bij de eerste projecten rondom de Ramspolkering is doorgaans de term ‘balgstuw’ gebruikt om de kering te benoemen. Feitelijk is dat onjuist, omdat de Ramspolkering een constructie is die primair bedoeld is om water buiten te houden (water keren) in plaats van vast te houden (stuwwerking).

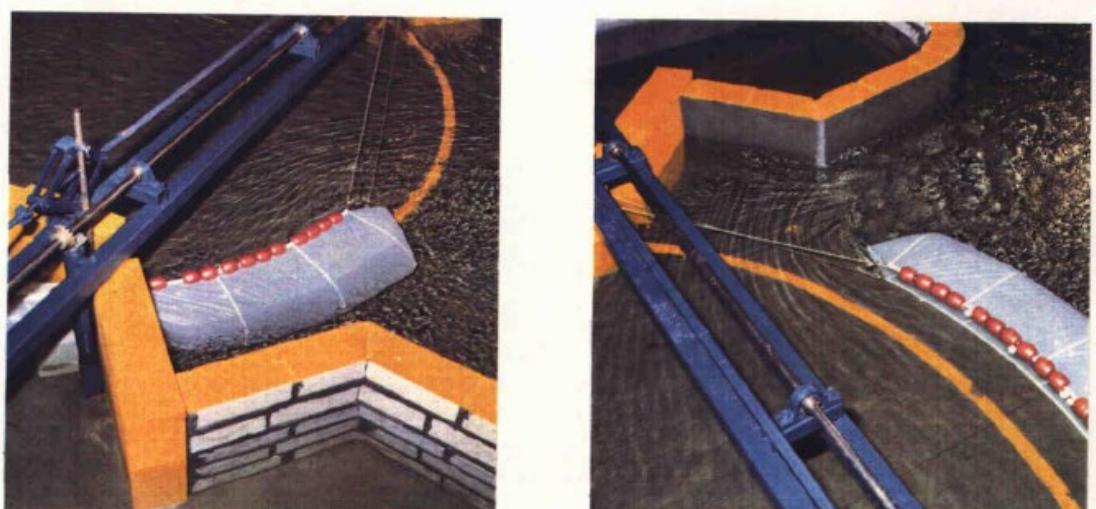
- Nadere studie naar oorzaak van ongewenst meermalig sluiten en openen van de Ramspolkering tijdens dezelfde storm en eerste opzet van een alternatief sluitcriterium om dat ongewenste sluitgedrag te vermijden (11205263-004)
- Aanmaak van een hydrodynamisch model van het lokale watersysteem en van een hydraulisch model van het vul- en ledigsysteem van de Ramspolkering voor inzet in een digitale testomgeving ('A-omgeving') van de kering voor het testen en accepteren van nieuwe stuursystemen van de kering (11203532)

Op basis van bovenstaande serie studies tot aan dat moment is in 1999 bovendien een samenvattende publicatie gepresenteerd op een conferentie (Jongeling, T.H.G. and N.H. Rövekamp, 1999).

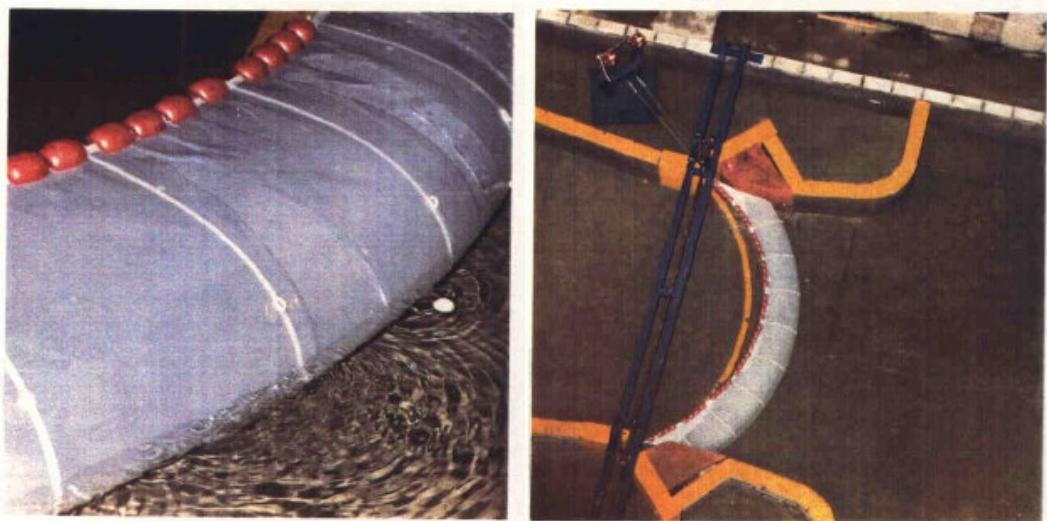
8.3.2 Uitwerking en samenvatting voorgaande studies

De eerste studie naar een balgstuw/kering ging over een stuwdam in de Berkelse Zwet. Die balg was voorzien om alleen met lucht te vullen en was bedoeld voor slechts een beperkte kerende hoogte (1.9 m).

Voor de Ramspolkering, op dat moment nog voorzien voor een locatie oostelijk van de Ramspolbrug, is in project Q0920 eerst onderzoek gedaan naar een spinakerkering. Dat keringstype bestaat uit een doek opgespannen tussen 2 kabels die op twee verschillende hoogteniveau's dwars over het af te sluiten water zijn gespannen. Het doek wordt van één van de oevers langs de kabels over de gehele breedte van het water gebracht. Om de krachten op het doek tijdens sluiten te beperken kan als alternatieve sluitwijze het opgebonden/bijeengehouden doek eerst over de breedte van het water worden gebracht en daarna pas naar beneden worden afgerold. Bij het afrollen zorgt de stroming dat het doek op spanning komt. Echter door het 'grijpen' van het doek door de stroming kunnen ook hier hoge dynamische trekkkrachten in het doek en de kabels ontstaan. In beide sluit-aanpakken – wel/niet opgerold horizontaal sluiten – is de aansluiting van de doekconstructie op de oevers een aandachtspunt. Bovendien dient de constructie de krachten als gevolg van golfinvloeden op te vangen. Uiteindelijk is een combinatie van een doek en een scherm getest en dat bleek het beste te functioneren. Figuur 8.3 en Figuur 8.4 tonen voorbeelden van foto's gemaakt tijdens de schaalmodeltesten van Q0920.

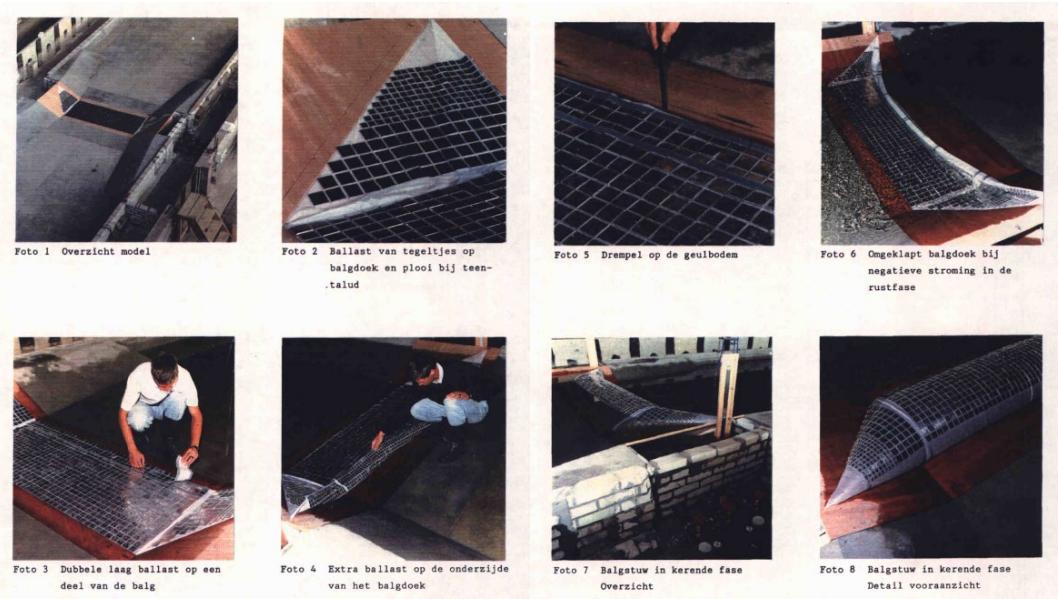


Figuur 8.3: foto's van de schaalmodeltesten van de spinakerkering, oorspronkelijk voorzien als keringstype voor de Ramspolkering. Foto's tonen het horizontale sluitproces van de niet opgeboden kering bij $\frac{1}{4}$ (links) en $\frac{3}{4}$ (rechts) gesloten situatie.



Figuur 8.4: als Figuur 8.3, met nu links een detail van het doek tijdens kerend en rechts een overzicht van de situatie tijdens de kerende inzetfase.

In project Q1025 worden in aanvulling op de optie van een spinakerkering schaalmodeltesten uitgevoerd met een opblaasbare balg als alternatief keringstype voor de Ramspolkering. In de context van een haalbaarheidsstudie is gekeken naar de inzetbaarheid en beheersbaarheid van een dergelijk keringstype. Daarnaast was een onderzoeksdoel het (vroegtijdig) signaleren van eventuele problemen met een dergelijk waterbouwkundig ontwerp. In die testserie is er gewerkt met aluminium gewichten op de balg voor het weergeven van ballast en/of het eigengewicht van het doek (Figuur 8.5).



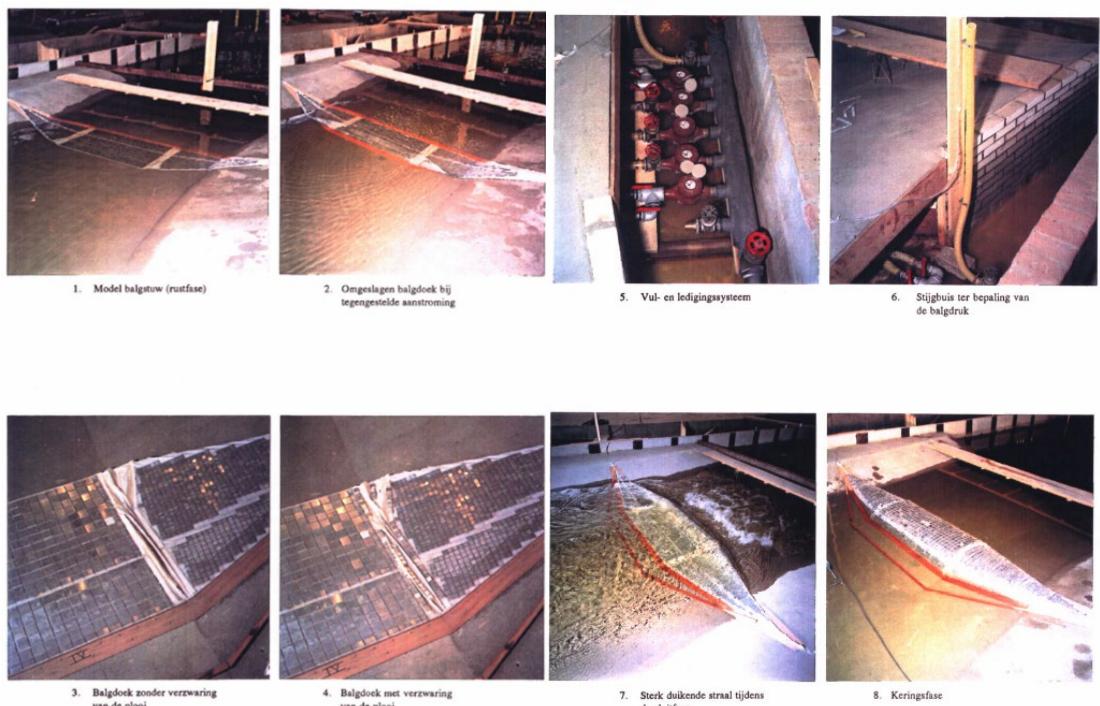
Figuur 8.5: foto's van het schaalmodel van de balgkering in project Q1025.

In de meeste latere studies bleek voor de schaalmodeltesten het eigengewicht van het doek niet van significante invloed op de onderzoeksvragen en is er niet meer gewerkt met gewichten op het doek.

In project Q1025 werd nog uitgegaan van een geheel met water gevulde balg. De stabiliteit van het doek om op de bodem te blijven liggen in gestreken toestand bleek afhankelijk van de stroomrichting een aandachtspunt in combinatie met de in dat project aangehouden

drempelvorm. Hierbij is destijds gekeken naar maatgevende stroomsnelheden tot aan 4 m/s(!). Een aanpassing aan de drempel of door toepassing van extra ballast zou die problemen kunnen voorkomen. Daarnaast bleek ook bij dit type kering de aansluiting op de oevers een potentieel knelpunt. In het algemeen wordt geconcludeerd dat een dergelijke constructie goed controleerbaar in te zetten is tijdens de inzetfases 'keren' en 'strijken'. Voor strijken is het volgens de beschrijvingen in de rapportage van Q1025 van belang om dit niet bij een te klein verval over de kering te doen om er zo voor te zorgen dat de balg op de juiste manier op de bodem terecht komt. Sleuven in de vloer worden voorgesteld om er zeker van de zijn dat het doek niet bij het laatste deel van strijken de uitstroomopeningen van het water blokkeert. In verdere uitwerking van het ontwerp van de balgkering lijkt hier inderdaad op doorontwikkeld te zijn.

Q1545 is de volgende studie naar de Ramspolkering, ca. 4 jaar na de eerste verkennende studies (Q0920+Q1025). Hierin wordt verder gegaan met de uitwerking van het keringstype op basis van een balgkering. Als voordelen wordt genoemd dat een dergelijke kering 40% goedkoper kan zijn in aanleg dan een meer 'traditionele' kering en ook de onderhoudskosten na ingebruikname zullen lager zijn (zonder bronvermelding/onderbouwing). Daarnaast is ook de beperkte zichtbaarheid in gestreken toestand een groot pluspunt van dit type kering. In schaalmodelwerk is de werking en hydraulische aspecten van de balg in alle inzetfasen beschouwd. Inmiddels is de locatie die overwogen wordt westelijk van de Ramspolbrug, wat uiteindelijk ook de definitieve locatie geworden is. Er wordt geen reden gegeven voor de verandering in beoogde locatie. De balgdelen op de taluds in dit model hebben een symmetrische vorm met spitse punten (Figuur 8.6). De drempel onder de balg is vlak in het model en van de balg wordt verwacht dat deze meest naast de drempel zal landen.



Figuur 8.6: foto's van het schaalmodel van de balg in project Q1545.

Voor de kruinhoogte (+4 m NAP) en het drempelniveau (-4 m NAP) van de balg lijken in Q1545 voorlopige waarden aangehouden te zijn. Er wordt in die rapportage alleen gesproken over watervulling. Ook in dit project is nog gewerkt met een balgweergave inclusief gewicht-plaatjes op het doek om het doekgewicht, en eventueel aanvullend ballastgewicht, weer te geven. Testen zijn gedaan tot aan een stroomsnelheid van 3.7 m/s voor situaties met de stroming komend vanaf de kant waar de balg op de bodem ingeklemd is (de balg ligt in gestreken vorm

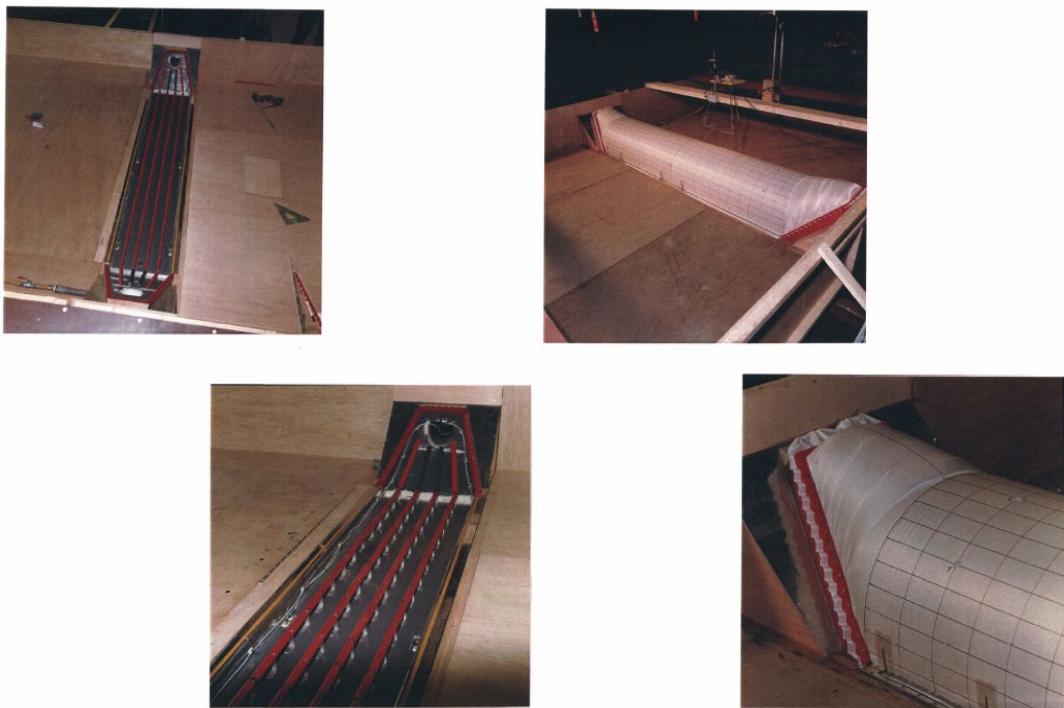
dus in de stroomafwaartse richting en moet zich tegen de stroming oprichten). Voor situaties waarin de balg zich moest oprichten met de stroom mee is getest tot 2.5 m/s. Verzwarening van het doek werd voorgesteld als stabiliserende werking voor stromingsinvloeden tijdens rust of het gebruik van een opstaand element op de drempel. In de andere inzetfasen gedraagt de balg zich goed en overall wordt positief geconcludeerd over de werking van dit type kering. De beschouwde balgconstructie bleek geschikt te zijn voor het keren van een verval vanaf beide richtingen. Golfinvloeden zijn beschouwd en werden als voldoende beperkt gezien. Naast de werking van een balgkering (buitenhouden van water) is in Q1545 ook gekeken naar een mogelijke werking van de balg als balgstuw (binnenhouden van water). Q1515 is de laatste studie waarin met gewichten op het balgdoek is gewerkt.

Literatuuronderzoek in project Q2099 liet zien dat balgen internationaal vaak worden ingezet, veelal geheel met water of geheel met lucht worden gevuld. De dimensies zijn doorgaans veel kleiner (max. 1-2 m hoogte) dan die benodigd zijn voor Ramspol. Praktische aspecten als een korte bouwtijd, vrije doorstroom in gestreken toestand en aandachtspunten voor het vul- en ledigsysteem zijn beschouwd. Onder andere blijkt dat het doek (in gestreken toestand) zeer weinig schade zal oplopen door meteo-condities en UV-straling. Een balgconstructie is volgens de literatuur ook goed in staat eenvoudig weerstand te bieden tegen externe krachten, zoals ijsvorming, boomstammen of ander drijvend vuil tegen de gesloten kering aan en passerend bodemmateriaal in gestreken toestand. Voor het eerst wordt er in deze studie ook gesproken over het optreden van een V-notch, een deuk in de kruin waardoor water nog kan blijven stromen afhankelijk van omgevingscondities. De plek waar die deuk ontstaat in de lengtepositie van de balg is onbepaald en kan dus willekeurig op een positie in de rivierbreedte ontstaan. In een numeriek model is de interactie tussen golven en de balg verkend, voor zowel een luchtgevulde als een met water gevulde balg. Door de grotere massa zijn de eigenfrequenties van de laatste hoger dan voor de luchtgevulde balg. Hierdoor kunnen eigenfrequenties in het golfperiode-bereik van de windgolven komen. Nader onderzoek in een schaalmmodel werd aangeraden voor verdere verificatie van de uitkomsten.

Die schaalmodelproeven zijn vervolgens uitgevoerd binnen project Q2263. Testen zijn daarbij gedaan op schaal 1:7.5, maar er wordt ook een schaal 1:25 vermeld. De strek- en buigstijfheid van het doek in het schaalmodel zijn afgestemd op representatieve waarden van die parameters overeenkomstig het op dat moment voorziene doektype. De rekstijfheid van het uiteindelijk praktisch inzetbaar gebleken doek was ca. een factor 2 te hoog op schaal, maar uit de type gedragingen van de balg (roll) bleek dat later niet van doorslaggevende invloed op de testuitkomsten. De stijfheid van lucht schaalt niet (volledig) mee met Froude-schaal en een geschaald balgvolume ($1:7.5^3 \rightarrow 1:422$) geeft niet het correcte luchtgedrag, aangezien de achtergrond luchtdruk (1 atmosfeer) niet mee-geschaald wordt en enkel de overdruk schaalbaar is. Op basis van alleen de Froude-schaal zou de lucht hierdoor veel te stijf reageren. Om hiervoor te compenseren is een aanvullend volume aan de balg toegevoegd van 5 maal het nominale balgvolume (6 maal balgvolume totaal). Dat extra volume is buiten de hoofdopstelling aangebracht en via leidingen met het binnenste van de balg verbonden. Merk op dat de schaling van de luchtdruk niet relevant is voor een geheel met water gevulde balg. Ingezette meetinstrumenten: verplaatsingsmeters, drukopnemers, golfhoogtemeters en krachtmeters. Die laatste zijn ingezet om de inklemkrachten van het doek te meten. Er zijn testen gedaan met een symmetrische en een asymmetrische taludvorm van de balg. In het lab is in studie Q2263 een sectie van 100 m (prototype) weergegeven. Statische en dynamische (golf-)krachten zijn beschouwd voor een water- en een luchtgevulde balg. Bovendien zijn taluds en rechte kopeinden getest. Ook de overdrukken in de balg zijn gevarieerd, waarbij hogere overdrukken doorgaans leidden tot kleinere bewegingen van de balg in golven. Loodrecht inkomende golven resulteren in de grootste bewegingen van de balg; bij golven inkomend onder een hoek is de response van de balg duidelijk veel lager. In de testen met golven is geen resonantie in de bewegingen van de balg waargenomen, zelfs als de golfperiode werd ingesteld op een verwachte eigenperiode van de balg.

De rapportage beschrijft het optreden van golfklappen op de balg, waarbij het voorlopende dal van de golf balghoogte blootlegt waarop de daaropvolgende kam vervolgens op klap. Golfklappen traden vooral op bij loodrecht inkommende golven. Daarnaast zijn ook overtoppingseffecten in de testopstelling weergegeven. Een kleine toename in golfhoogte (0.1 m) kon in sommige configuraties al tot zeer veel meer overtopping leiden. De watergevulde balg richt zich met een andere vorm op dan een lucht-gevulde balg, waarbij de kruin lager ligt dan bij de lucht-gevulde balg. Hiervoor trad er bij de water-gevulde balg meer overtopping op. Door de overdruk te variëren in combinatie met specifieke waterstanden kan de hoogtepositie van de bovenkant van de balg en daarmee de kruinhoogte, nog wel beïnvloed worden. Als hoofdconclusie stelt men in deze studie dat de lucht-gevulde balg beter presteerde en meer inzetbaarheidsmogelijkheden lijkt te hebben dan een water-gevulde balg. Daarnaast wordt een bredere drempel (in lengterichting van de rivier) aangeraden om zo een stabielere balg te hebben tegen roll-effecten. Bovendien zijn dan de hoeken in de dwarsdoorsnede gezien waarop het doek aansluit op de balg minder scherp, waardoor de kans op en invloed van golfklappen naar verwachting lager wordt. Beide onderzochte vormen van de kopse kanten van de balg lijken geschikt. Plooivorming die optreedt bij het toepassen van taluds aan de kopse kanten van de balg laten beweging van het middendeel van de balg toe, onder invloed van golven, hetgeen in principe gunstig is aangezien daardoor de krachten op de inklemming op de taluds beperkt blijven. Rechte (verticale) kopse kanten van de balg bleken weinig lekkage te veroorzaken. Echter, zij resulteren in wrijving met de kade en in mogelijk ongewenste krachtverdelingen. Bovendien zal er dan versnelde slijtage van het balgdoek op kunnen treden.

De schaalmodeltesten in project Q2258 (a-c) zijn op schaal 1:25 uitgevoerd. Focus hierbij was op gebruiksomstandigheden. Hoofdonderwerpen waren: beweging in golven, waterbeweging in de balg als gevolg van golven, het opbergen van het doek in de drempelkas bij openen, trillingen als gevolg van overslaand water in gesloten toestand en de benodigde sterkte van bodembescherming. In deze testen is voor het eerst de uiteindelijk toegepaste vorm van de balg ingezet, met taluds aan de kopse kanten van de balg en met daarom een rechthoekige inklemvorm (Figuur 8.7).



Figuur 8.7: Foto's van de balg in het schaalmodel voor project Q2258A.

Ook zijn in deze proeven de rollers in de drempel toegepast waarop het gestreken doek op moet rusten. De modelopzet in dit project is in hoofdlijnen gelijk aan eerdere schaalmodellen (waaronder de extra luchtkamers). Er zijn twee typen balgdoek beschouwd. In de loop van de testen zijn de rollers op het talud verwijderd, wat een betere verdeling van het balgdoek opleverde bij het strijken van het doek. Die aanpak is uiteindelijk ook in de uiteindelijk gebouwde versie zo toegepast.

De bodembescherming is getest in verschillende sluitsituaties onder stromingscondities (Figuur 8.8). Sluitingen zijn succesvol getest tot aan 3.7 m/s, gemeten in een enigszins gecontraheerde stroming nabij de balgconstructie. De ontwerpwaarde voor de stroomsnelheid waarin nog gesloten moet kunnen worden is 3.3 m/s volgens de rapportage van Q2268A.



Figuur 8.8: Boven: bodembescherming voorafgaand aan de test; onder: sluiten van de balg in stromingscondities. Het natte witte balgdoek laat de onderliggende rollers zien in de drempelkas.

Er zijn testen gedaan met sneller en langzamer inbrengen van lucht in de balg. Bij langzamer inbrengen van lucht kon water beter toestromen in de balg en ontstond een meer horizontaal oprichtende balg ten opzichte van een situatie van snel vullen. Wel bleek de balg in die situatie meer ontvankelijk te zijn voor trillingen in golven.

Bij een gesloten balg zijn vervolgens testen in golven gedaan, waarbij ook in dit project loodrecht inkomende golven en golven onder een hoek zijn beschouwd. De transmissie van golven als gevolg van de beweging van de balg bleek beperkt. Ook de beweging van het water in de balg bleek niet in resonantie te komen. Opnieuw bleek een hogere overdruk tot kleinere bewegingen van de balg te leiden. Ook de fluctuaties in de luchtdruk in de balg en de gemeten inklemkrachten van het doek bij de drempel bleken kleiner/lager bij hogere overdrukken.

Gedurende het sluitproces, voordat de balg voldoende overdruk heeft om zich geheel op te richten, treedt een stromingsconcentratie op via de *V-notch*. Hierdoor ontstaat er een geconcentreerde aanval op de bodembescherming. Die bleek maatgevend voor de belastingen op de bodembescherming. De bescherming aan de Ketelmeer-zijde wordt minder zwaar belast dan die aan de Zwarte Meer-zijde. Voor de Ketelmeer-zijde is de gehele open situatie met rivierstroming maatgevend.

Overtopping door golven is beschouwd en hoe periodieke fluctuaties in het loslaatpunt de kering in beweging kan brengen, die vervolgens weer versterkend werkt op de fluctuaties in het overtoppingsgedrag. Een dergelijke zelf-exciterende trilling zal niet snel optreden omdat dit vooral bij een lage en platte halfgevulde balg optrad en die situatie in de praktijk niet snel verwacht wordt, gegeven de procedure van sluiten en openen van de balg.

In een vervolgstudie (Q2258B) zijn de taluds aangepast en is de omtrek van het toegepaste doekmateriaal in de doorsnede aangepast zodat een betere weergave van de uiteindelijke kruinhoogte van de balg werd verkregen, gegeven het vervormingsgedrag van het in het schaalmodel ingezette type balgdoek. De aanpassingen aan het talud bestonden vooral uit meerdere aangepaste configuraties van de rollers op het talud. Dit onderzoek is voortgezet in Q2258C, waarbij ook een andere inklemming van het doek op de taluds is bekeken om zo de krachten in het doek te beperken en als een verdere optimalisatie van het ontwerp. Deze optimalisatie is voortgezet in Q2547, waarin een aanvullend alternatief voor de inklemming van het doek is bekeken, samen met een ander type doek als weergave van een rubber doek versterkt met nylon in plaats van met Aramide dat tot dan toe werd voorzien. Het doek met versterkt nylon is uiteindelijk ook ingezet bij de bouw van de kering.

In project Q2547 is ook gewerkt met kortkammige golven. Hieruit bleek dat de gemeten krachten bij de inklemming van het doek niet significant anders waren dan in eerdere testen met langkammige golven. Dit geeft aan dat de golfbelasting op de balg lokaal wordt afgedragen naar de fundering, zonder sterke zijdelingse spreiding van die krachten. De aanwezigheid van rollers op het talud bleek geen gunstige invloed te hebben op hoe het doek neerkomt op de taluds bij het strijken van de balg. Bovendien helpen die rollers niet bij het zekerstellen van een betere verdeling over de rollers in de drempel. Uiteindelijk zijn de rollers op het talud geheel weggelegd en zijn zij alleen op de drempel toegepast. Als ontwerpwaarden worden hydraulische belastingen met een kans van voorkomen van $1.4 \cdot 10^{-3}$ per jaar genoemd. Daarbij wordt geen bron of andere onderbouwing genoemd.

In Q2624 is tenslotte nog een aanvullend onderzoek gedaan naar trillingen in de balg als gevolg van stroming over de kruin van de balg, dus tijdens zeer extreme condities. Deze studie is als een afzonderlijk onderzoeksproject uitgevoerd, in aanvulling op eerdere ontwerpvraagstukken. In de testen werd gekeken naar een balgvulling met alleen lucht, alleen water, of een combinatie daarvan. De gemeten trillingen zijn geanalyseerd en het trillingsgedrag is nader uitgewerkt. Er wordt niet beschreven hoe waarschijnlijk dergelijke trillingen voor de Ramspolering zijn. Er lijkt na deze studie geen verder onderzoek naar deze trillingen gedaan te zijn.

In project Q3864 is samen met RWS een overzichtspublicatie aangemaakt met daarin een samenvatting van de relevante aspecten en inzichten voor balgkeringen en -stuwen.

Na de bouw en ingebruikname van de Ramspolkering in 2002 bleek dat er waterstandslingerlingen op het IJsselmeer en Ketelmeer op konden treden waardoor de Ramspolkering meerdere keren tijdens dezelfde storm sloot en ontrecht tussentijds weer open ging. In project H4531 is in 2005 de oorzaak van die grootschalige meerslingerlingen geanalyseerd en zijn er numerieke simulaties in WAQUA gemaakt. De meerslingerlingen die de fluctuaties in de waterstand veroorzaken bleken gelinkt te zijn aan fluctuaties in de windsnelheid. Daarmee leek dit opwekkingsproces op het opwekkingsmechanisme van de havenslingerlingen (seiches) in de haven van Rotterdam (De Jong, 2004).

In project 11205263-004 (2020) is een nadere verkenning gemaakt van andere potentiele oorzaken van de grootschalige meerslingerlingen, maar uiteindelijk bleken fluctuaties in de windsnelheid inderdaad de meest waarschijnlijke bron. In dat onderzoek is ook een uitwerking gemaakt van een aangepast sluitcriterium voor de Ramspolkerig. In plaats van een vaste waarde voor de waterstand en een oostelijke stroming is gekeken naar een combinatie van een aangepaste waterstand in combinatie met bepaalde sterkte van de oostelijke stroming. Bij grotere oostelijke stroomsnelheden wordt in dit aangepaste sluitcriterium gesloten bij een lagere waterstand. Op die manier wordt er meer bergingscapaciteit oostelijk van de kering zekergesteld en zal er ook minder snel een negatief verval optreden. Met dat sluitcriterium is de kering naar verwachting meer effectief en wordt tegelijkertijd zoveel mogelijk ongewenst meervoudig openen en sluiten tijdens dezelfde storm voorkomen. Verdere uitwerking en verificatie van de geschiktheid en resulterende veiligheid van een dergelijk aangepast sluitcriterium is benodigd voorafgaand aan implementatie in de praktijk.

In 2020 en 2021 is aan een groot adviesproject gewerkt (11203532) voor het aanmaken een leveren van twee simulatiemodules voor een acceptatie-testomgeving (A-omgeving) van de nieuw aan te maken stuurstuursoftware van de Ramspolkerig (het 'B&B-systeem'). Die omgeving is daarmee vergelijkbaar met de testomgeving voor de Maeslantkering (Hoofdstuk 6). De bijdragen van Deltares bestonden primair uit een module voor het simuleren van het omringende watersysteem, inclusief de interactie met de sluitende kering, en om een module voor het simuleren van het vul- en ledigsysteem van de kering, inclusief een gestileerde weergave van de balgen. De modules leveren uitkomsten en gesimuleerde meetwaarden die aan het besturingssysteem worden gevoed alsof die software verbonden is met de echte kering. Voor validatie van de aangemaakte simulatiemodules zijn onder andere vergelijkingen gemaakt met gemeten waterstanden voor en achter de kering en met stroomsnelheden gemeten onder de Ramspolbrug. Validatie van het model van het vul- en ledigsysteem is onder andere gedaan op basis van referentiewaarden voor de overdruk in de lucht in de balg voor verschillende waterstanden op het Ketelmeer en het Zwarte Meer en uitgaande van een gegeven inzetduur van de luchtcompressoren.

8.4 Grootste technische aandachtspunten

Een groot potentieel aandachtspunt van een balgkering is de levensduur van het doek. Echter, uit de praktijkervaring met het doek is gebleken dat de oorspronkelijk ingeschatte levensduur van 20-30 jaar mogelijk 50 jaar kan zijn. Dat is voornamelijk vanwege de bescherming tegen UVlicht zolang het doek op de bodem van de rivier ligt.

De inzet van sluitcriteria gebaseerd op lokale metingen resulteert in een eenvoudige sluitbeslissing, zonder complexe voorspelling en gerelateerde operationele infrastructuur. Wel maakt het deze kering gevoelig voor ongewenst meervoudig openen en sluiten tijdens dezelfde storm. Nadere analyse en verificatie van de meerwaarde van een aangepast sluitcriterium zou overwogen kunnen worden.

Een ander aandachtspunt is het goed laten terugvallen van het doek bij het strijken van de balgkering.

Daar zijn automatische sensor-systemen voor, maar die zijn veelal zeer kostbaar en mogelijk minder betrouwbaar in troebel water. Vooralsnog is de inzet van duikers na afloop van elke keringsinzet een stuk goedkoper (persoonlijke communicatie met keringsmanager T. Bushnach, 2020).

8.5 Vooruitblik inzet kennis en huidige kennisgaten

Een belangrijk aandachtspunt is de optimalisatie van het sluitcriterium. Het recent voorgestelde alternatieve sluitcriterium zou nader uitgewerkt moeten worden, inclusief verificatie van de betrouwbaarheid en veiligheid. Dat zou mogelijk meervoudig sluiten tijdens dezelfde storm kunnen voorkomen. Tegelijkertijd zal ook nog steeds voorkomen moeten worden dat de kering onnodig sluit. Dus alleen conservatieve aanpakken implementeren kan niet.

Als alternatief voor sluiten op basis van ad-hoc lokale metingen zou overwogen kunnen worden om op basis van voorspelde waterstanden te gaan sluiten, net als op dit moment al gebeurt bij de Maeslantkering. Op die manier zou het optimale sluitmoment uitgewerkt kunnen worden om op die manier tijdig gesloten te zijn en tegelijkertijd zoveel mogelijk berging oostelijk van de kering zeker te stellen.

De invloed van een mogelijk aangepast meerpeil op het IJsselmeer zou een aandachtspunt voor toekomstige studies kunnen zijn. Mogelijk dat een hoger meerpeil in de toekomst het mogelijk houdt om onder vrij verval water vanuit het IJsselmeer af te laten naar zee. Wel kan dat betekenen dat de Ramspolkering vaker dicht zal moeten. Bij een zeer grote verhoging van het meerpeil kan mogelijk de inzetbaarheid van de huidige kering in de knel komen.

Ook mogelijke grotere rivieraafvoeren op de IJssel in de toekomst zullen een invloed hebben op de inzet van de Ramspolkering, al is het maar omdat een grote rivieraafvoer een verhang over het watersysteem veroorzaakt en daarmee een waterstandstoename nabij de locatie van de Ramspolkering ten opzichte van het basis-meerpeil op dat moment.

De faaldefinitie van de kering zou mogelijk uitgebreid kunnen worden om ook weigeren te openen daarin op te nemen. Ook die ongewenste situatie heeft negatieve gevolgen, zoals het opbouwen van rivieraafvoer en daarmee toenemende waterstanden achter de kering en langer durende hinder voor de scheepvaart.

Recentelijk is een MSc-project aan de TUD uitgevoerd (Stikvoort, 2020) naar aanvaringseffecten van schepen. Daar zou mogelijk op aangehaakt kunnen worden.

Er zitten veel voordelen aan dit keringstype. Er zou een verkenning gemaakt kunnen worden naar de inzetmogelijkheden van dit type kering elders. Hierbij kan ook voortgebouwd worden op de recente PIANC-publicatie over opblaasbare keringen en stuwen (PIANC, 2018). Mogelijk kan op langere termijn dit type kering ingezet worden in combinatie met sommige van de bestaande SVKs op andere locaties in Nederland. Zeker indien men op lange termijn er voor kiest om de delta open, en met voortgezet gebruik van SVKs, in wil blijven richten.

9 Venice barrier (MOSE)

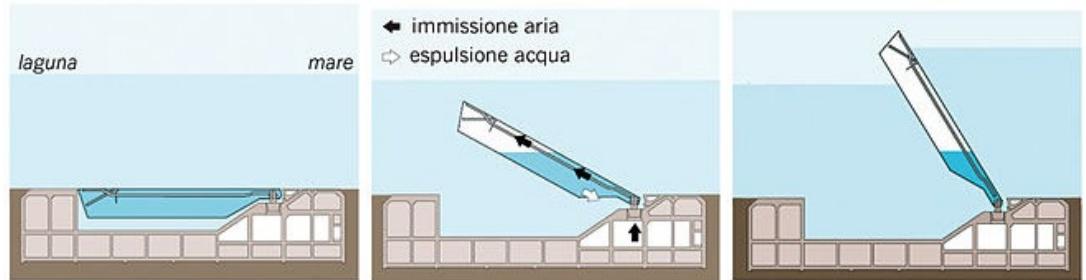
9.1 Main characteristics

The Venice barrier or MOSE (Modulo Sperimentale Elettromeccanico) was built to protect the city of Venice from high tides from the Adriatic Sea. The city is located in a lagoon that connects with the sea via three inlets (Lido, Malamocco and Chioggia) with different widths (550m - 920m) and depths (6m - 15m). Barriers consisting of multiple flap gates, each 20 m wide, were built in each inlet: two barriers at the Lido inlet, separated by an artificial island, one barrier at the Malamocco inlet and one at the Chioggia inlet. This accounts for four barriers with a total of 78 gate units. The height of the barriers varies among the inlets (18.5m – 29.2m).



Figuur 9.1: Location of the barriers at the inlets in the Venice lagoon.

With the waterway open, the gates are filled with water resting in recesses in the caissons embedded in the bottom of the lagoon entrances (Figuur 9.2). When the barrier is closed, the barriers are filled with air, rotating around the axis of their hinges, raising to a position of about 50 degrees with the horizontal. The gates are flexible in their orientation around their hinges, meaning that for a water level difference over the gate higher than 2.5 m the gates cannot be maintained in the 50 degrees angle position and will start to lower, and overtopping may occur.



Figuur 9.2: Working principle of the gates.

The design level for closing the gates is +1.10m above the local mean sea level, with a retaining level up to +3.0m above mean sea level. The design of the barriers (gate elements) started in 1984 and the first barrier was partially operational in 2014 (Lido inlet). In 2020 the first full test was successfully performed, and the barriers were activated for the first time in October 2020 during a high tide event (forecast +1.30m), preventing some of the low-lying parts of the city from being flooded.

During the experimental phase, an activation level of +1.30 m was considered instead of the design level (+1.1 m). On 8th December 2020 the water level forecast indicated a flood level of +1.25 m for which the barriers were not activated, but the water level ended up reaching +1.45 m. The decision to close the barrier system must be made with sufficient time in advance (>48 h) to account for all operational procedures and that far ahead of the event the forecast did not yet indicate levels above +1.25 m. However, a rapid change in the weather conditions occurred, a characteristic of the phenomena affecting the highwater levels in the Adriatic Sea. This highlights the need for an accurate and reliable forecast system for the proper functioning of the barrier. In any case, even with a criterion of +1.1 m the lower parts of Venice will continue to be inundated during high-water events. The criterion to close the gate can change based on forecast and measured levels. A summary of the main characteristics of the Venice barrier can also be found in the memo prepared for the DCA (project number 11201883).



Figuur 9.3: One inlet of the Venice barrier, with 4 flaps/gates closed during a test/demonstration situation.

9.2 Functionality

The main function of the Venice barrier is to protect the lagoon and the hinterland from floods. The barrier is part of an integrated system of protection formed by the barriers, local measures for the defense of urban areas and protection of the shoreline. The 3 lagoon inlets and surrounding shorelines have been strengthened with new concrete walls and embankments, whereas along the shoreline beach nourishment and seawall strengthening were some of the measures performed. To keep the average number of closures per year to a manageable level, the lower parts of Venice are being raised to at least +0.87 m above mean sea level. This is done by raising the elevation of embankments and urban pavements in lower areas; when that's not possible, small local gates and walls are built along the canals.

The navigation lock in the Malamocco inlet allows vessels to reach the ports in the Venice Lagoon when the gates are closed. The Venice barrier is designed to cope with 60 cm of sea level rise in a century (reference year 2100, reference: <https://www.mosevenezia.eu/>).

The selection of this type of barrier relates to economic and ecology requirements: the barrier should not disturb the Venice landscape (tourism), for which it should be invisible when not operational, and it should not disturb the ecosystem of the Venice lagoon since this is a protected Natura 2000 area (EU Habitat and Bird Directive). In addition, Venice has ports and fisheries that are important, for which the lagoon inlets should remain open during normal conditions. Since the gates are independent from each other, it is possible to close one or more of the inlets if necessary. There is a gap of a few centimeters (about 10 cm) between each gate, which will only allow small amounts of water leakage through the gate and obviates the need for seals. The lagoon area is of such a large size that a small amount of leakage of water between the gate flaps is not critical.

9.3 Deltaires knowledge base

Deltaires has been closely involved with the Venice barrier since the 80's, providing advice on multiple aspects based on physical scale model research, numerical modelling and expert judgment. Below are listed the main projects developed by Deltaires and its predecessors:

- **H0872** (1988): a study on the necessary keel clearance in the navigation channels and inlets.
- **Q0744** (1988) **and Q1033** (1990): two studies comprising physical scale model research on the dynamic response of the gates; influence of the inclination angle and the gate shape were assessed (in the former study), and forces in the gate supports and leakage discharge (in the latter); from these studies resulted **publications 482** and **490**;
- **H0054** (1990): investigation of the wave behavior at Lido, Malamocco and Chioggia inlets for the current situation and alternative future layouts. HISWA and PHAROS modelling.
- **Q0020** (1992): two studies comprising physical scale model research on the forces and the behavior of the gates in the Malamocco and Chioggia channels (study B.6.5) and bed protection and scour assessment downstream of the bed protection (study B.5.9)
- **H3617** (1999): multiple studies on the assessment of the impact of alternative measures to reduce tidal and storm surge penetration on the lagoon, comprising hydrodynamic modelling of the inlets, expert judgment on alternatives to increase hydraulic resistance of the inlets and nautical aspects;
- **H4248** (2003): second opinion on the Chioggia gate tests and on the Malamocco gate tests
- **1208200** (2013): physical model tests on caisson placement at the Chioggia Inlet

9.3.1 Summary of previous studies

In project **H0872** (1988) the necessary under keel clearance, relative to the ship's design draught, in the navigation channels and inlets was assessed in the context of the construction of a barrier. Four general situations are considered: ship passing over soft soil (near entrance inlets), over a bottom protection, over a mobile barrier and into one of the locks. First safety criteria were derived based on experience with other ports, wave conditions (peak period and angle of incidence) resulting in maximum ship motions were determined. The minimal UKC values for different types of ships as function of their size are determined. Variations in the water depth (e.g. due to tide), and variations in the bottom level (e.g. rocks protruding above nominal bed level) are not considered in this study.

In project **Q0744** (1988) a physical scale model of the Venice barrier was built at Deltares to study aspects related to the design and functioning of the barrier. A 60m section of the Malamocco barrier (3 gates) was built at scale 1:60, where the gate resonance phenomena were investigated under the action of both regular and irregular waves. This project has shown that multiple resonance modes can occur. Resonance will be more frequent and severe under the action of regular waves, depending on the period of the incoming waves (in particular, resonance was observed when $T_{\text{wave}} \approx 0.5T_{\text{natural}}$). The higher the inclination angle of the barrier (i.e. the more vertical the barrier is) the stronger the resonance effects, same for wave height (high waves are necessary to overcome damping forces). For irregular waves, which is the type of waves existing in nature, the phenomenon was practically absent. Several measures to reduce or inhibit resonance were also investigated, such as reshaping part of the gate structure (in particular making the gates wider), disrupting the self-excitation forces (wave overtopping) and application of mechanical damping.

Project **Q1033** (1990) extended the test programme of the previous scale model project by including force measurements on the gates (hinges). The vertical forces on the gates are mainly caused by fluctuations in the buoyancy force, related to the passing waves, whereas horizontal forces in the hinges are related to the added mass flow related to the resonance mechanism, being dominant for a situation without a water level difference over the gate.

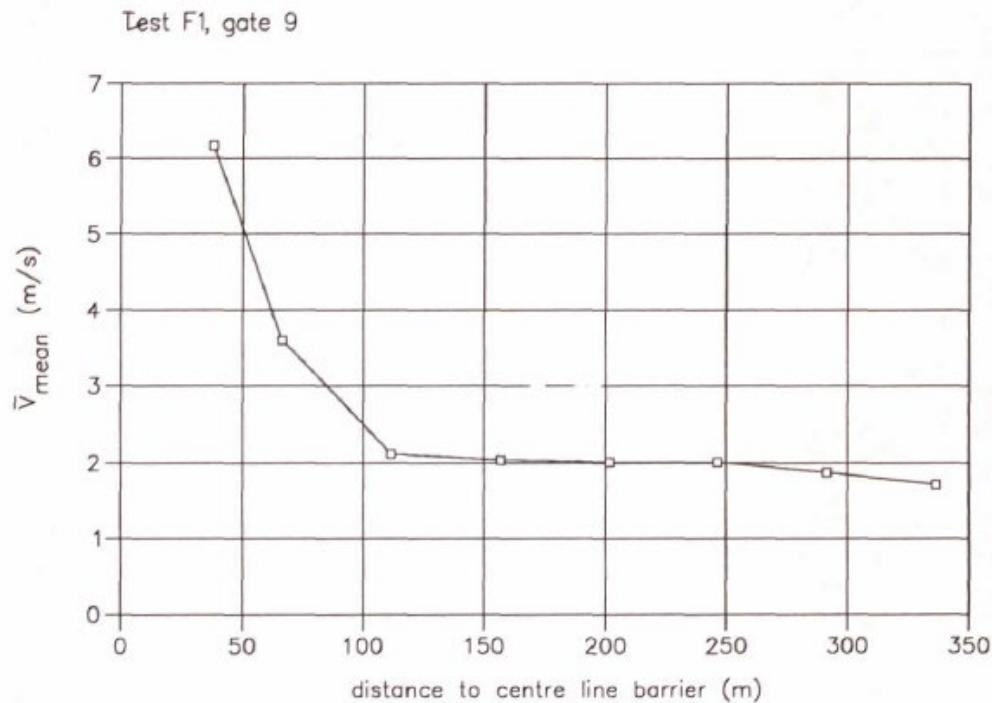
In Project **H0054** (1990) extensive wave modelling using HISWA and PHAROS programs was performed for the 3 inlets. Wave propagation from offshore to the lagoon was simulated. It was observed that waves up to 4 m do not suffer large transformations over this area. Higher waves are subject to considerable reduction in height (bottom dissipation and wave breaking).

In project **Q0020-B.6.5** (1992) the dynamic response of the gates was further investigated to determine the final design of the barriers in Malamocco and Chioggia inlets. The scale model built for the previous projects was modified for this project and tests were performed at a scale 1:30. The tests were done for a closed barrier and for a barrier in operation (closing and opening), where gate-resonance phenomena, extreme gate rotation and forces on the gates support system were measured. All tests were carried out with stationary flow conditions; in the tests where the gates open or closed, the gates were kept at different fixed positions for the duration of the test, i.e., no simulation of the real opening or closing time of the barrier was performed. Tests were performed with irregular waves, perpendicular to the barrier and at an angle of attack. Gate oscillation angles were determined for both Malamocco and Chioggia gates; the measured oscillation angles for the Chioggia gate have a wider range than for the Malamocco gate caused by waves with longer periods.

Project **Q0020-B.5.9** (1992) focused on bed protection and scour assessment by means of scale model research. The main goal of these studies was to assess the performance of the (design) bed protection, made of multiple layers of rock, and to assess scour parameters to predict the scour hole formation downstream of the protected bed.

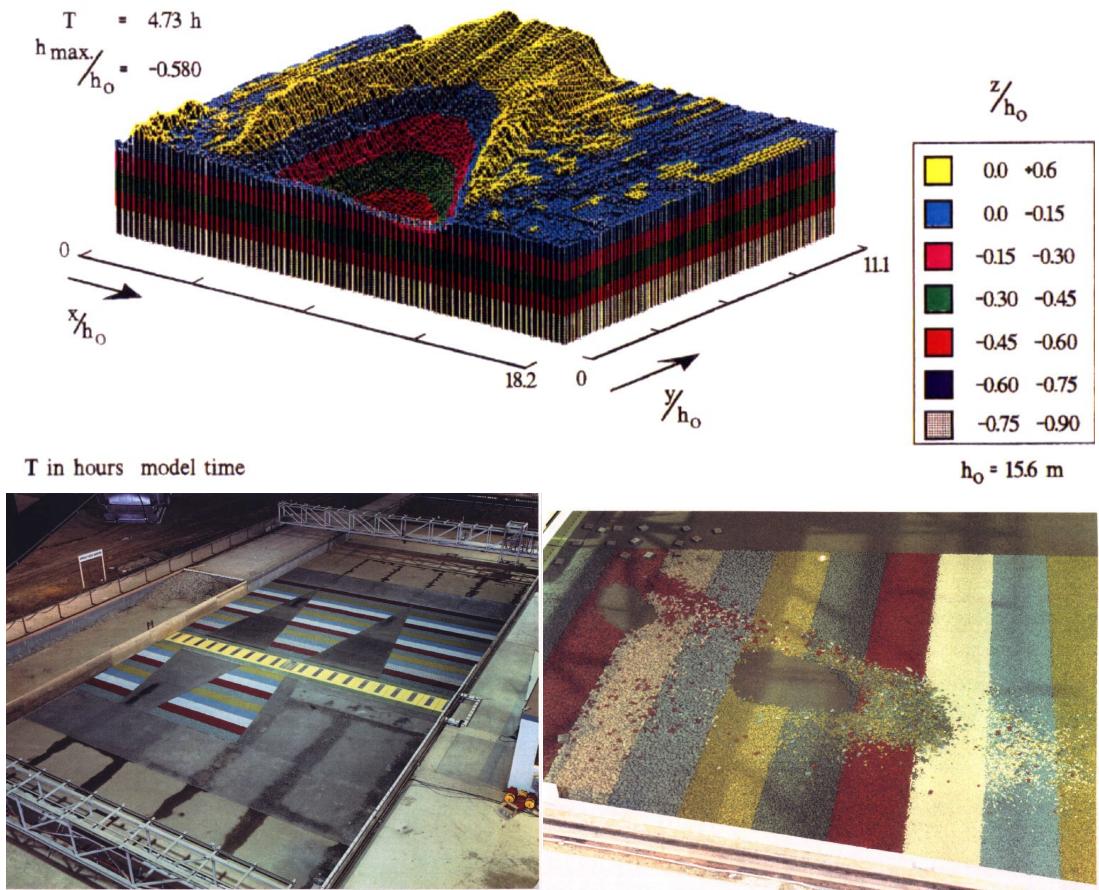
The determinant gate configuration for both the bed protection and scour studies corresponds to a (single) failing-gate condition as it leads to the highest hydrodynamic loading on the bed. The location of the open gate within the barrier was varied and its influence on the measured flow velocities and bed protection damage was investigated. The jet resulting from an open gate at the center of the barrier is characterized as having a free jet behavior, whereas a gate open near the abutments leads to a wall jet.

Bed protection study: the bed protection made of loose rock was installed on a concrete floor. Scale effects are mentioned to be limited at this scale (1:30) for the tested rock material ($D_{50} > 6\text{mm}$). The results of these tests had direct implications in the barrier operation procedure, gates should close in an alternately manner regarding hydrodynamic loads on the bed near the barrier, and the last gates to close should not be the side ones due to wall-jet behavior (higher flow velocities expected). The influence of a partially open gate (10 degrees closed) was also assessed; with this configuration the jet is deflected upwards and higher flow velocities are measured close to the water surface. Transport of bed material (rocks) into the gate recesses was not observed. Flow velocities up to 7 m/s (time-averaged over 1 min measurement) were measured within 50m from the barrier, for the situation of one gate not closing and for a head difference over the barrier of 2.5 m.



Figuur 9.4: Mean velocity as function of the distance to the barrier, centerline of the jet (project Q0020 – B.5.9).

Scour study: polystyrene was used as bed material for the scour study; using sand would lead to a too long test duration. Only currents were used for the scour tests, no waves. A free jet is expected to cause a deeper scour hole than a wall jet, for the same velocity. Exploratory computations for the full open barrier were performed indicating that small scour holes would develop under normal tide conditions.



Figuur 9.5: Photos from the scale model tests performed to assess the stability of the bed protection around the Venice barrier (project Q0020 – B.5.9).

In project H3617 (1999), the impact of alternative measures, as proposed by the Ministry of the Environment and other organizations in Venice, was assessed to reduce tidal and storm surge penetration in the lagoon through the inlets. Alternative measures considered: i) construction of groynes to increase resistance in the entrance channels, ii) reduction of the water depth at the inlet and iii) adding offshore breakwaters. Three different studies have been performed: hydraulic characteristics of the measures were assessed via numerical modelling, then a desk study on bed protection and bottom roughness was performed and finally nautical aspects were investigated for the proposed alternative measures. The tested alternative measures would indeed provide additional resistance and reduce the discharge capacity through the lagoon inlets; however, this effect would be mostly relevant for short duration events (e.g. semi-diurnal tides) rather than for storm surges, typically with longer duration, for which high water levels would eventually be reached in the lagoon. In fact, the increased hydraulic resistance would have a negative impact on the water quality of the lagoon due to reduced discharge capacity during regular tidal cycles in absence of stormy conditions.

Numerical modelling study: the hydraulic resistance (μ and μ_A) of each measure was computed with a Delft3D model; the obtained output resistances were then built in the overview 2D model (of Technital) representing the entire lagoon, simulating the propagation of the tide into the lagoon. The highest resolution of the detailed model was about 20-35m.

Bed protection and bottom roughness study: for the considered measures and structural elements around the main barrier (e.g. groynes, breakwaters), some degree of bed protection will be necessary next to these structures to support increased flow velocities along the bed.

Considering riprap for the top of the bed protection near these additional structures, the required mean diameter of the rock material was estimated for a maximum local velocity of 3.0 m/s. Alternatives for additional artificial roughness are also considered, including vegetation, groynes and bed structures (such as screens, sills, gabions), rock and concrete blocks. The different alternatives are compared qualitatively, and it is concluded that vegetation cannot be applied (limited increased roughness, not made to survive submerged conditions, or not stiff enough to withstand high flow velocities), for which more solid solutions are preferred. Physical scale model research is recommended to check the estimated roughness values and terms of reference are provided for the tests.

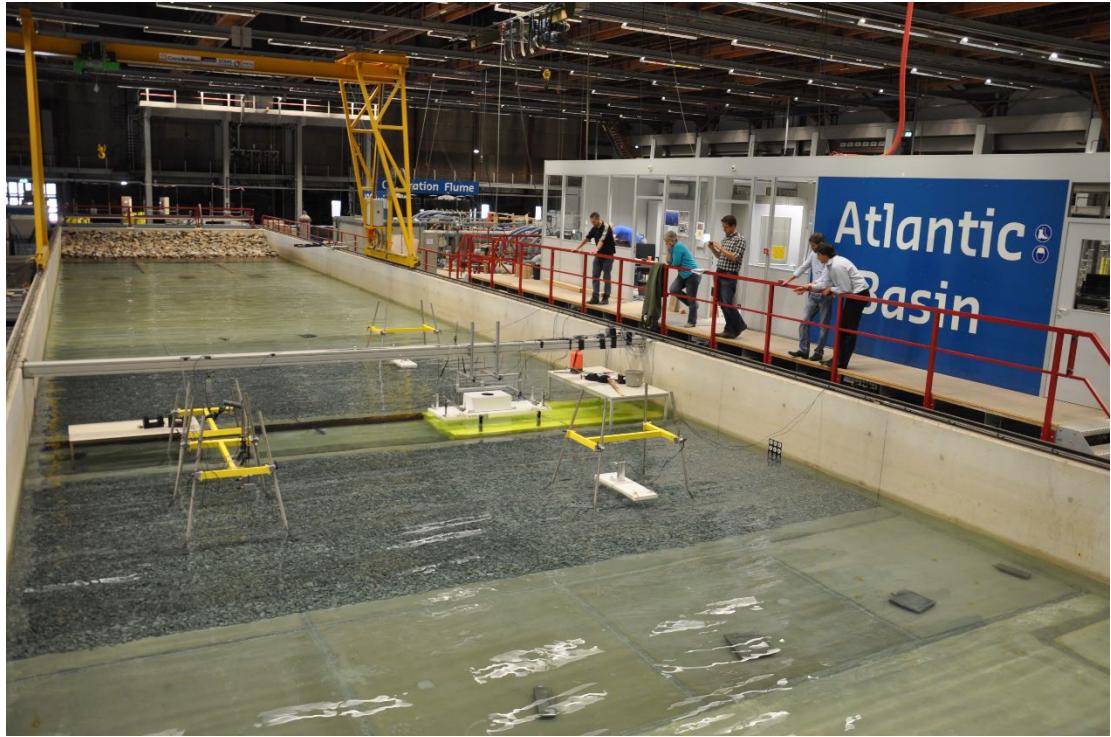
Nautical aspects: based on the earlier nautical study (**H0872**), additional considerations and analysis are included considering the alternative measures and the effect of tides. The required UKC result higher than in the earlier study due to increased squat by the inclusion of groins and narrow entrances in the inlets and associated high flow velocities and high speeds of ships through the water. The considered measures are mostly ok for shipping, with the exception of breakwaters (e.g. influence on the channel width and bed radius, leading to cross flows and large flow gradients). Only for the Chioggia inlet the breakwater was ok since the inlet is wide enough in relation to the dimensions of the expected class of ships.

In project **H4242** (2003) a second opinion on scale model tests on the Chioggia gate and on the Malamocco Scour tests executed by Protecno was provided. The request for a second opinion originated from concerns on the wave spectra selected for the tests in respect to gate resonance phenomena and occurrence of scale effects in model studies.

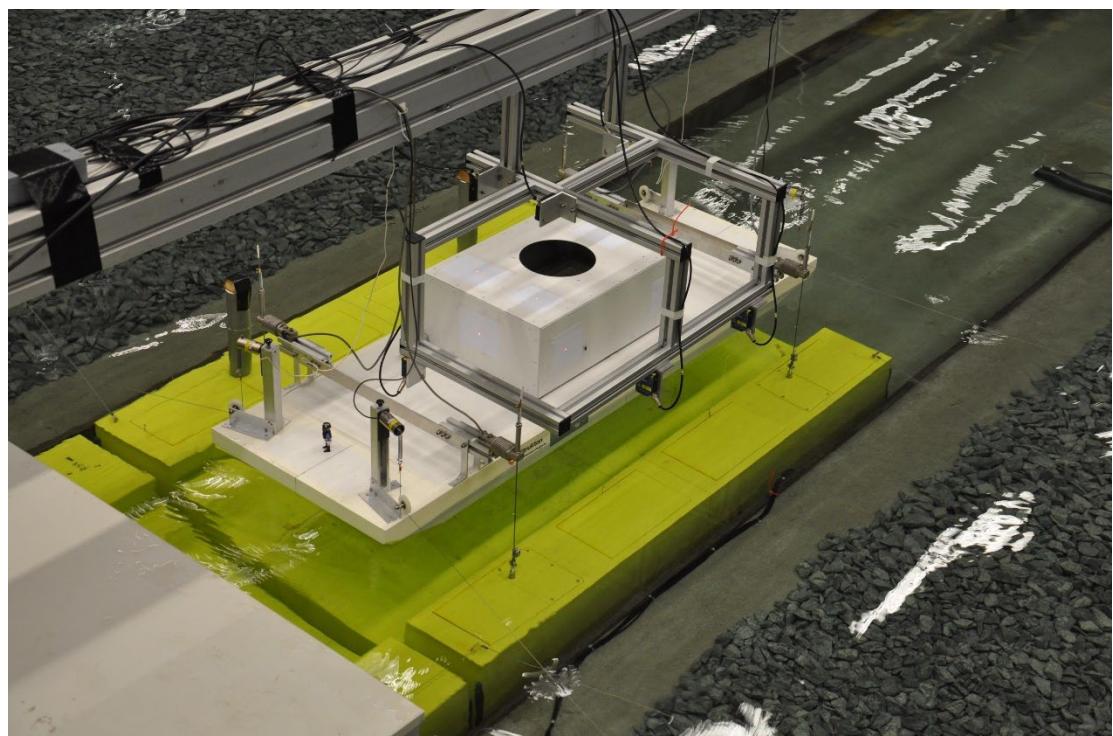
Chioggia gate tests: overall a positive review is given for the adopted scales and methods, as well as tests and results. Regarding resonance phenomena, scale effects are less relevant which has been proven by comparable results from scale model tests in 3 different model scales (1:10, 1:30 and 1:60). Scale effects will however play an important role when assessing the forces acting on the gate hinges, in particular their alignment and friction should be well represented in the model in order to avoid unrealistic force values. The gap between the gates was also a point of attention regarding scale effects (laminar flow); however, in the model these gaps were realized a bit larger than geometrically scaled, thus the effect is less critical. The effect of the reflection of waves at the wave generator were not considered.

Malamocco Scour tests: scour studies were performed to determine whether changes in the flow patterns, due to the construction works at the inlet, may result in scour near the existing breakwater and near the new detached breakwater, and whether protection measures are necessary. The review on the performed tests and numerical modelling is overall positive, with some attention points on the effect of clay not being considered, a possibly incorrect time scale of scour development and not considering the effect of offshore currents.

The placement of the caissons for the barrier at the Chioggia inlet was tested at Deltires in 2013 (project **1208200**, see Figuur 9.6 and Figuur 9.7). The main goal of the project was to determine the forces and movements, optimization of the sinking operation and determination of the period of workability. Placing tolerances of the caissons are very tight since the gates should have a minimal (10 cm) space between units to limit water leakage. This led to construction tolerances of ~ 1 cm in the field. Laser distance measurements were performed in the scale model to determine the 6 degrees of motion. The tests have shown that roll motions were limited, the horizontal motions being the dominant factor when sinking the caissons. Also, operations during high tide are more critical for motions and forces than during low tide; however, statistical analyses showed that during high tide wave heights are lower. The client (Dutch company, Strukton) used the information from the scale model tests to plan the transport and installation operations.



Figuur 9.6: Photo from the scale model tests for the placement of the Chioggia caissons (1208200). Overview.



Figuur 9.7: As Figuur 9.5, now showing a detail of the caisson over the trench in its anchor lines and the laser-based motion measurement system.

9.4 Main technical points of attention

The main technical and practical points of attention for the Venice barrier, and in general for barriers with flexible flap gates, are:

- Impact of the open barriers on tidal discharge and flow patterns
- Impact of the local morphology in the inlets & in the lagoon, and the stability of shipping channels in the lagoon and outside
- Translatory waves when closing the barrier
- Gate dynamic behavior (resonance phenomena)
- Forces acting on the gates and gate supports
- Influence of the barrier on shipping
- Influence of the barrier on water quality and ecology of the closed (protected) water body
- Siltation in the gate recesses
- Sediment transport over the gates and abrasion of the gate plates
- Transport of surrounding bed protection material into the gate recesses
- Access for inspection and maintenance (quite difficult for a submerged barrier)
- Corrosion risk of the underwater hinges
- Danger of not having enough clearance for shipping in case the gate(s) cannot fully open due to a potential obstruction of a gate recess

9.5 Past and present knowledge applied to future challenges of the barrier

The main future challenges expected for the Venice barrier relate to sea level rise. Although sea level rise has been considered in the design of the barrier (a rise of 60 cm over a century, reference year 2100), there is the possibility that this level will be reached earlier than expected. Currently the barriers are expected to close every year up to 10 times. In a scenario of sea level rise, the closure of the barrier will become a much more frequent event, which will directly impact shipping, maintenance operations of the barrier (more frequently required) and ecology of the lagoon. In the worst scenario, the barrier will have to close too frequently, which may lead to questioning the benefit of a flexible barrier over a permanently closed solution. The dependence of Venice on flood protection by the barrier will thus be greater in the future. Also, locations along the coast that are currently perceived as safe may become more critical for flooding than the inlets in the near future. In addition to rising water levels, Venice itself has been sinking due to groundwater pumping. Although ground water extraction has been stopped, land subsidence continues at a slower pace (Tosi et al., 2013).

Another challenging aspect relates to the forecasting system. The effectiveness of the barrier is crucially dependent on accurate storm surge forecasting. The Venice barrier operation uses a protocol that includes water level measurements, and atmospheric and oceanographic forecasting. In particular, the decision to close the barrier will depend on the water level forecast, and the time of closure will be decided based on water level measurements inside the lagoon. Hence, water level forecasting is one of the fundamental aspects of the closing procedure of the mobile gates. Improving the reliability of these forecasts will contribute to avoid missing or false closures due to too low or too high predictions. Currently there are multiple (independent) models running in Venice, however a thorough comparison of the performance of each individual model for different weather conditions has not been performed (Umgieser et al. 2020).

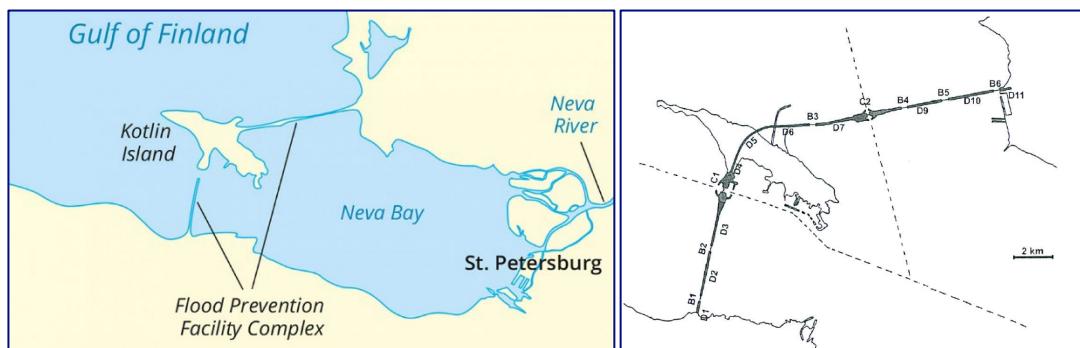
Combined, or coupled/integrated numerical models, including both the river section and the lagoon and coast could help decision-makers not only on the operation of the barrier itself, but also on the evaluation of integral measures to protect the hinterland in the future.

In the light of current, more advanced, measurement techniques (e.g. PIV) and numerical modelling capabilities the level of conservativism assumed in previous projects could eventually be reduced (e.g. in the bed protection tests, project Q0020 – B.5.9, rock material was placed on a concrete floor, which makes it very vulnerable to displacement). In addition, detailed numerical modelling (CFD) can be used to compare different barrier types, or different layouts for a certain type of barrier, being a useful tool during the design phase. The computation of discharge coefficients, as well as the determination of wave and current induced forces on the barrier structure are also aspects that nowadays can be assessed with numerical models. However, for some aspects, in particular in the presence of complex flow patterns, physical scale model research may still be necessary, to validate the numerical models, to investigate more complex phenomena (e.g. gate dynamic response), or as a final step to verify the behavior of the gate final design.

10 St. Petersburg barrier

10.1 Main characteristics

The St. Petersburg Barrier, consisting of a combination of multiple gate types, is presently the longest storm surge barrier in the world (Figuur 10.1). It was built to isolate the Neva Bay from the Gulf of Finland and consists of a system of embankments or dam sections, movable barriers in two navigation openings and six sluice complexes, spanning over a total of 25 km (~23 km of which are dam sections).



Figuur 10.1: Location of the barrier in the Neva Bay. Dashed lines represent the main navigation channels.

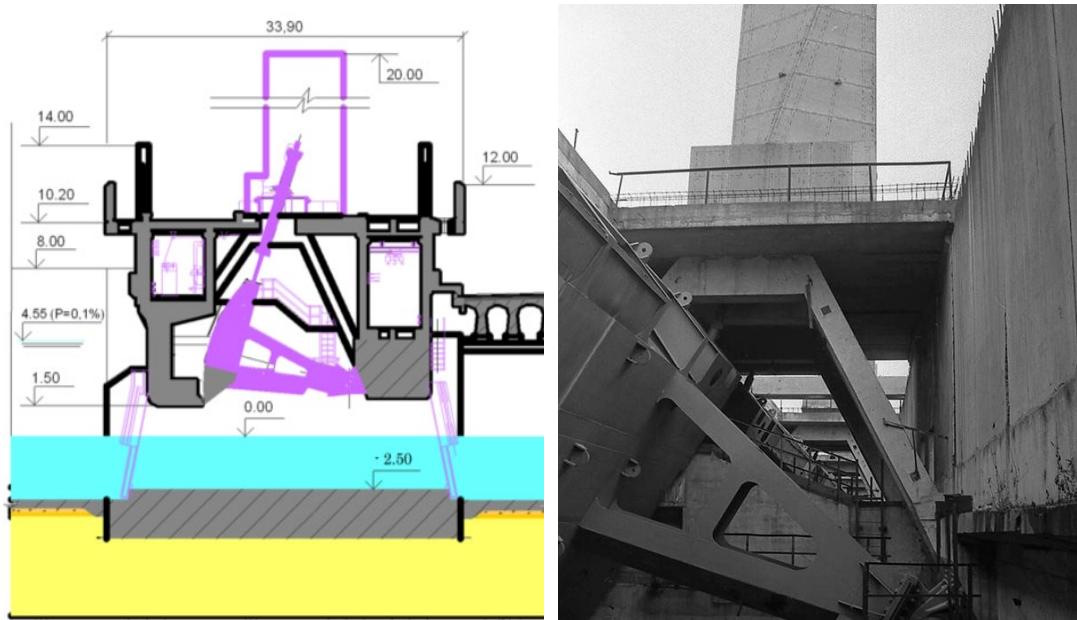
The southern and largest navigation channel is 200 m wide and 16 m deep. It has a pair of symmetrical radial sector gates (see Figuur 10.2, $R = 132$ m), closing the navigation channel during a flood. This barrier type is similar to that used for the Maeslant Barrier in Rotterdam. The sector gates at St. Petersburg are each 110 m wide, 22m high and each weigh 2650 t. The hinge for each gate is a steel sphere in a bronze socket, 1500 mm diameter with a maximum load of 11,000 tons. The gates are floating structures kept in lateral drydock chambers; gates are closed by flooding the docking chambers and floating the gates until their closure positions. The gates are then immersed in a sinking process by allowing water into the ballast tanks. As part of the design, these gates are expected to close once every two years. To limit the head difference over the gates during closing and opening operations, these are the ones to close first and the ones to open last after a storm, together with the vertical sliding gate on the northern navigation channel. Gates are designed for a maximum positive head difference of 4.15 m, and maximum negative head difference of 0.80 m. The gates were designed for a max current of 3 m/s. Moreover, the gates were designed for a successful closure under any ice conditions. For the gate design, load design factors of at least 1.4 were adopted (project Z2962).



Figuur 10.2: View of the sector gates in the southern navigation channel (left) and vertical sliding gate placed above water for inspection/maintenance (right).

The northern navigation channel is 110 m wide and 7 m deep. A vertical rising gate closes the entire width of this channel during a flood (see Figuur 10.2). This gate is designed to be closed during ice periods. The gate is designed to open and close through a ice layer 0.6 m thick. In open position the gate is stored in an underwater gate recess in the bed and is raised during a storm; the gate is raised above water for inspection and maintenance operations.

A total of 64 sluice gates regulate the water flow in the Bay. All sluice gates consist of vertically moving, horizontally hinged sector gates 24 m wide (Figuur 10.3). In normal situations all gates are fully open to allow free exchange of water. These structures must allow for closure in heavy ice conditions. The sluice gates penetrate the ice layer utilizing their weight.



Figuur 10.3: Schematization and view of the sluice gates.

There are no measurable tides in the Gulf of Finland; high sea levels are caused by the interaction of wind and low atmospheric pressure causing surges to move eastwards up the Gulf of Finland. The water level in the Bay should not rise above +1.6 m above mean sea level since parts of the city start to flood at that level. The flooding probability at that level is once a year. The worst registered floods in history reached +4.21 m (1824). The design protection level at the Gulf side is +4.55 m above local mean sea level.

Planning of the present flood defenses started in the 60's. Several alternatives were considered, namely the eastern and western variants. In the eastern variant a system of interlinked dikes along the eastern shoreline and along various branches of the Neva Bay was considered; in the western variant a barrier/dam system is built across the island of Kotlin, about 25 km from St. Petersburg. In the end the western variant was chosen. The construction started in 1979-1980 but came to a halt in 1987 due to concerns regarding environmental impacts (mainly concerns with wastewater discharges from the city), and also due to the break-up of the Soviet Union shortly thereafter. In 1990 an international commission concluded that impact would be neutral for which the barrier could proceed. Financial constraints however hindered progress and in 2005 construction resumed and the barrier was finished in 2011.

10.2 Functionality

The main function of the barrier is to provide protection to the city of St. Petersburg against storm surges originating from the Gulf of Finland.

The barrier is also part of the Integrated System for Water Resource Management, i.e., barrier is used to manage the water quality of the Bay by the operation of the sluice gates. Moreover, the barrier is used for shipping and is also part of a ring road around St. Petersburg (highway). To fulfill this function a road was built via the barrier with a tunnel underneath the southern navigation channel and bridges over the northern navigation channel and sluices.

The barrier is also used to control accidental oil spills in the Bay, wastewater discharges, algae blooming, etc. Selective closure of the barrier openings influences the flow patterns within the Bay and in the Gulf; depending on the type and location of a spill, the gates may be manipulated in order to temporarily contain a spill or change the pollution transport directions, to protect certain areas. The time the barrier can remain completely closed is however limited because the water level in Neva Bay will quickly increase due to inflow of water from the Neva river and the gates have not been designed for a negative water level difference of more than 0.8 m.



Figuur 10.4: Ice accumulation at the embankment of northern navigation channel (2002).

Ice is a local phenomenon. The maximum ice thickness is on average 0.60 m for winter floods (sometimes it is up to 1m). Strong wind effect and water level rise may lead to 8 m (sometimes 12 m) ice pile-up over the embankment height (Figuur 10.4). That is why the sluice gates are heavy, ballasted with concrete (each weigh 200 ton) to be used for breaking ice. It is noted that the presence of a thick layer of ice inhibits the development of extreme floods.

10.3 Deltires knowledge base

Deltires has been involved with the St. Petersburg barrier since the 90's, providing advice on multiple aspects of the barrier, most notably on the technical feasibility and environmental impacts studies, and on flood forecasting and decision support systems. WL | Delft Hydraulics was part of the international commission of experts formed in the 90's. Later in 2002 was also part of the NEDECO, a Dutch expert group organized to perform a series of feasibility studies of the barrier. Below are listed the main projects where Deltires was involved:

- **WL417** (1992): report summarizing the evaluation of the international commission of experts on the water quality of the Neva Bay and the influence of the barrier on the local ecology and environmental impact;
- **Z2962** and **Z3194** (2002): technical feasibility study (TFS) and Environmental Study (EIA) of the barrier, performed by the Dutch expert group NEDECO;
- **Q3393** (2004): numerical modelling of different closing scenarios of the barrier using Delft3D-FLOW considering two types of surges (long and short surge). Data from this study serve as basis for estimation of boundary conditions for further scale model studies;
- **Z3979** (2005): report on the international workshop held in Russia on the operational management of the barrier; this meeting led to the creation of the I-STORM network (<https://www.i-storm.org>).

- **X0324** (2005): report with advice on the essential aspects and necessary immediate steps for a flood warning system;
- **Z4190** and **EP1399** (2007): report and paper on the St. Petersburg Demonstrator project (decision support system for opening/closing the barrier); the key aspect of the Demonstrator is to show (demonstrate) to technical specialists and decision makers how highly complex operational management decisions can reliably be taken using real time data and forecast conditions, before a full system has been built. It is meant to create awareness among all the relevant parties on the key issues that need to be addressed in actual barrier operation.
- **Z4666** (2008): report on hydrodynamic modelling of a scenario of reducing the width of the temporary navigation passage;
- **1203387** (2011) and **1206889** (2012): review reports on the development of the flood forecasting and decision support system.

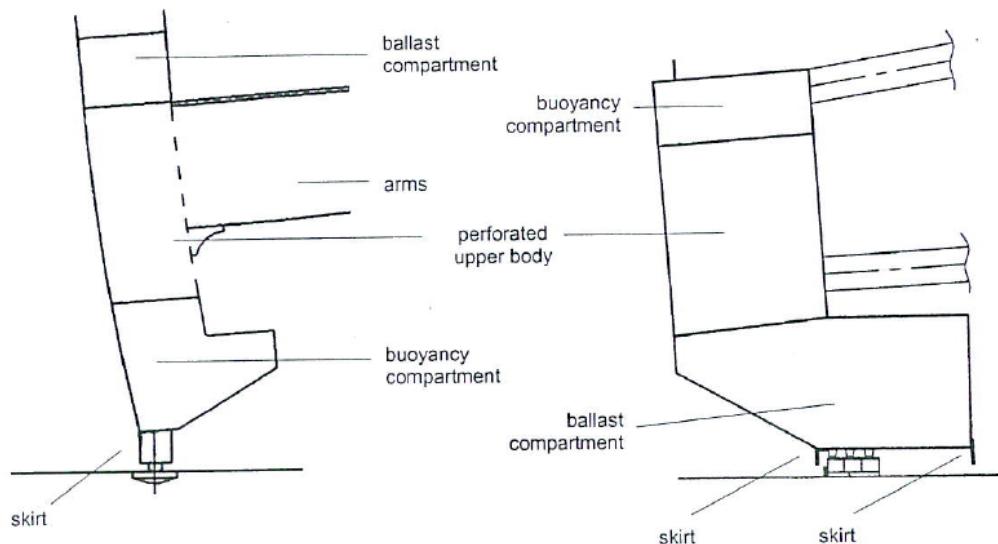
In project **WL417** (1992) a summary of the findings of the International commission of experts are presented. Different commissions of Soviet experts were organized in the 80's to assess the impact of the barrier on water quality of the Bay, arriving at different and contradicting conclusions. Due to controversy around the barrier, an international commission was requested to evaluate the problem. Delft hydraulics was requested in 1990 to set up an international commission to coordinate work and provide support, joining a total of 11 members, representing 6 nationalities, covering multiple disciplines. The commission itself did not do any additional new studies. They based their judgement on earlier studies (incl. scale models and mathematic models, not performed by Deltares). Also, site visits were organized and several meetings with stakeholders, opposition representatives and public hearings were held. Main aspects discussed by the commission relate to the water quality of in the Bay, which factors besides the barrier can influence its ecology; which actions should be stopped to avoid further deterioration of the conditions, and which actions should be done to improve them. Main points of attention relate to siltation issues, effective water exchange (between Bay and Gulf) and pollution levels from sewage and heavy metals. It was concluded that the barrier has negligible influence on these aspects. No technical aspects of the barrier are discussed in this report.

Projects **Z2962** (2002) and **Z3194** (2002) are dedicated to the feasibility studies requested by the European Bank for Reconstruction and Development after the Russian Federation had requested European Funds to complete the barrier project, which by then was in an incomplete state. The following studies were conducted: Technical feasibility (TFS), Environmental Study (EIA), Cost recovery study (CRS) and Economic Analysis (EA). These studies concluded that the barrier must be completed; based on these studies, the European Bank released funds to complete the barrier.

TFS study: 3 scenarios were considered to complete the barrier: do minimum (only maintenance works), build the barrier only, and build the barrier with provisions for future highway. Cost estimates for these scenarios are provided, as well as a review of existing designs focusing on functional requirements, suitability of design, necessary upgrades/adjustments, cost saving approaches to complete the works. It was concluded that an incomplete barrier still offers some level of protection against floods, however not sufficient to avoid a catastrophe in the presence of a very high storm surge. Also, such floods would also damage the barrier since protection layers were not applied yet. A summary of the design requirements for the gates are presented in this report:

- **Sector gates:** when submerging, the gates lower with an angle relative to the horizontal (trim) in which the stern lands first on a stern bumper support located at the wall of abutment chamber (originally also considered for Maeslant Barrier, but following scale model tests this approach was abandoned in the course of the design process, Section 6.4). The trim can affect the current under the gate; gate oscillations may occur especially when gap does not have constant width.

More ballast is then added until bow also lands. Submerging process initially set to last about 42 minutes, which was deemed too short for the following reasons. A fast submerging operation has the risk of striking the sill in uncontrolled way; also, in respect to the amplitude of the generated translation waves. The submerging process was recommended to be slowed down. Closure and landing operations were modelled in scale model (by VNIIG – Russian research institute for hydraulic engineering). Some aspects related to the submersion process and hydraulic stability of the barrier during water ballasting were recommended to be further investigated by physical model testing. Experience with the Maeslantkering was crucial to give advice on design aspects of this barrier. For instance, in order to reduce flow-induced vibrations, in the Maeslantkering two skirts in addition to changing the cross-sectional shape of the buoyancy chamber were applied (Figuur 10.5).



Figuur 10.5: Schematized cross-sections of the sector gates in St. Petersburg barrier (left) and in the Maeslantkering (right).

- **vertical rising gate:** the gate chamber can accommodate sediments up to 1500 m³, to be removed periodically by lifting the gate fully out of the water and using a dredger. Gate structure designed for overtopping. At this design stage the gates were supposed to be fully operated with hydraulic jacks; NEDECO proposed to also include buoyancy chamber to facilitate the lifting procedure.

EIA study: key environmental issues and local concerns (public consultation part of the process) were identified. Main concerns after consultation with public: sedimentation and displacement of polluted sediments, changes in water quality, impact on recreational beaches and fish migration routes, loss of biodiversity in wetlands. Same scenarios as considered in the TFS study were considered. An environmental Action Plan was defined for actions after barrier is completed, which included the recommendation of frequent monitoring at multiple locations in the bay and in the Gulf of multiple water quality parameters and the improvement of waste water treatment to improve the water quality in the bay and gulf. Accidental spills (of oil and other chemical substances due to shipping and industrial use) are a common problem in the water system; the barrier can be used to temporarily contain oil spills, for which an effective monitoring and operational system are necessary. Procedures for decision making must balance environmental and economic damages. A case study paper summarizes this process and main outcomes (Deltares ref: EP0102).

In 2004 numerical model simulations of scenarios for closing and opening the gates were requested by DHV (project **Q3393**). In this project a series of closure and opening scenarios were investigated by means of Delft 3D-FLOW, making use of the existing modelling expertise for the barrier from previous projects. Two characteristic surges were considered: a long surge (50-60 cm/h) and an intensive surge (90 cm/h). The criteria require that the level in the bay always remains below +1.60 m and they prescribe avoiding negative water level differences over the barrier since the barrier is not designed for levels in the bay higher than in the gulf. This study has shown that long surge is more critical for the maximum water levels in the bay. However, the short, intensive surge is more critical for the design and testing the barrier gates as it leads to a higher water level difference over gate. In a closing scenario as simulated in these calculations, the gates from the sluices and the navigation channels close fully, with exception of the radial sector gates in the southern navigation channel, which reduced the opening height to 10 cm allowing a limited amount of flow. In the operational system, the closing (and opening) of the gates rely heavily on the accuracy of the prediction system; recommendation: the closing procedure should allow for enough flexibility to handle the uncertainty inherent in weather predictions and other complications related to the gate operations.

Report on the international workshop (May 2005, **Z3979**) on the operational management of the St. Petersburg flood protection barrier. RWS and the City St. Petersburg have been working in cooperation on water management and transport for many years. Regular meetings by the standing committee. Cooperation will be to exchange experience for flood prediction (early warning systems and operational management > joint seminar) and continued cooperation on integrated water resources management (coastal protection and coastal zone management). Representatives from key stakeholders, international experts on flood protection management (including Rijkswaterstaat) and representatives of international financing organizations were present.

In 2008, during the construction phase of the barrier, Boskalis requested Deltares to assess the impact on flow velocities of multiple stages of width reduction of the temporary navigation passage adjacent to the southern navigation channel. In this project (**Z4666**), the existing numerical model of the area, developed earlier within the context of NEDECO, was adjusted to increase the resolution in the main project area. The question was whether reducing the channel beyond 305 m would lead to excessive flow velocities. Six different scenarios were simulated, by varying the channel reduced width and external forcing conditions. It was concluded that for the simulated scenarios the impact of reducing the gap width is small and depth-averaged velocities would remain below 2.5 m/s.

10.4 Main technical points of attention

The main technical points of attention for the sector gates:

- ballast concept and immersion operation
- hydraulic stability
- flow induced vibrations (in the work for Maeslant Barrier this is called 'dynamic behaviour' of the barrier walls, as it describes periodic motions of the wall and their arms and not a vibration in the true sense)
- low resistance capacity for negative hydraulic head

The main technical points of attention for the vertical sliding gates:

- Sediment accumulation in the underwater gate chamber, frequent inspection required
- Danger of not having enough clearance for shipping in case the gate cannot fully open due to obstruction of gate chamber

General:

- Translatory waves when closing the barrier (too quickly)
- Forces acting on the gates and gate supports
- Influence of the barrier on shipping
- Influence of the barrier on water quality and ecology of the closed (protected) water body

10.5 Past and present knowledge applied to the future

Sea level rise is the main expected challenge for this barrier, especially in absence of a strong local tide. If storms become too frequent (i.e., water level forecast in the Neva Bay > +1.6 m), the barrier will have to close more frequently than presently expected, directly impacting shipping, maintenance operations of the barrier and eventually the water quality of the Bay. The bay freezes about 130 days per year; the frozen surface of the bay is known to be beneficial for mitigating storm surges, i.e. reducing surge build-up. With climate change, the bay freezes later each year, making the city more vulnerable to storm surges.

For this specific barrier, the complex functionality brings challenges. The different barrier components (dam sections, water sluices, gates in the navigation channels) form an integrated system of protection. For the barrier to fulfill its purpose, all elements should function as designed, which adds to a significant complexity in operation and maintenance of the barrier.

A common aspect to all storm surge barriers relates to the flood forecasting system and decision support system. The effectiveness of the barrier is crucially dependent on these systems. Deltares has extensive experience on these topics, applied on this specific barrier type, and other gate types, in the Netherlands.

11 Overige grote keringen en keringsplannen

11.1 Boston, Massachusetts, USA

Plans for a large barrier in the Boston Bay have been studied by the University of Massachusetts Boston. Other authors of the study and associated report were: Woods Hole Group, Arcadis and Woods Hole Oceanographic Institute. The study considered: 1) a larger barrier around the bay of Boston consisting of solid barrier parts and movable gates/storm surge barriers and 2) more nearshore local measures as an alternative (Figure 11.1). The option of an outer barrier plan included one or more movable gate systems such as the Maeslant Barrier in Rotterdam (Figure 11.2).



Figure 11.1: Boston barrier plan options.

Deltares was requested to provide feedback on a draft version of the study report in 2018 in the form of a compact 2-day assignment. The original Word document was returned with 400+ critical comments as deliverable (Deltares, 2018).

The report and the project context proved to be highly political. The study was flawed and strongly colored on several points and aspects. Main findings and observations made were related to:

- Assuming a closed barrier levee along the full length of the barrier, with only openings in the shipping channels, instead of including additional gates for ensuring proper water tidal water exchange between the bay and the ocean.
- With only movable gates in the shipping channel flow velocities were unnecessarily high in the shipping lanes, and which because of that were found unacceptable for vessels.
- The shipping channels foreseen through the barrier gates meant that ships would have to sail a slightly longer route to their destinations either north or south of the Boston Bay. This was considered as a highly critical impact of the barrier plan by the authors, while on the scale of the total shipping routes the difference in practice will be negligible.

- The movable storm surge barriers (gates) included in the plan were foreseen in the future to close on every high tide, which will not be feasible in practice because of unrealistic requirements to a large movable barrier (wear, maintenance).
- Providing a longer fetch for generation of waves was considered a drawback of a barrier at a somewhat larger distance from the coast. While presently the fetch is ‘unlimited’ and coastal structures have already been laid out for those loadings. The shorter fetch created with an offshore barrier will even lead to significantly shorter and lower waves, leading to much lower runup and loadings. Such a shorter fetch may even offset any possible increase in storm intensity in the future if that would be an influence of climate change in the greater Boston area.
- Serious misinterpretations of numerical flow and wave modelling results.
- Quite high discount rates were used to assess the economical context of investments required to design and build the barrier. This then resulted in a conclusion that a central outer barrier is not an economic option.



Figure 11.2: Location of 2 Maeslant Barrier-type gates in the Boston coastal barrier plan.

The approach and findings in the report were clearly steered towards dismissing the plan for a large barrier in favor of small scale local measures, although in the document version considered this only materialized after 10+ chapters discussing – and often misrepresenting and misinterpreting – details of the barrier plan. This viewpoint has been shared as part of the requested feedback on the report. The reason for this colored position of the authors of the report by the University of Massachusetts Boston remains unknown. It is also unknown to what extent the provided feedback has been processed and incorporated in an improved later version of the document.

In 2019 local organizations and municipalities in the Boston area not covered by local measures contacted Deltaires to discuss views on plans for a large barrier that would also protect their areas. E. Welles of Deltaires USA attended a workshop on this topic and presented Deltaires. So far that has not resulted in any further developments or actions.

11.2 Galveston, Texas, USA

Plans for a movable barrier (gate) near Galveston USA have been around for quite some time already. Such a gate structure would be part of a larger coastal barrier plan (Ike Dike). Several university studies have been performed in the past, mostly by local universities and by students of Delft University of Technology (references to be considered in detail in a follow-up task).

The main involvement by Deltaires on the conceptual gate design has been more recent. In 2018, Arcadis organized a gate workshop at their Houston offices to discuss possible gate options that would be feasible and fitting in this context. Deltaires (Martijn de Jong) was hired to join that session as expert advisor, presenter and co-organizer. Attendees of that session included representatives from the US Army Corps of Engineers.

The international movable barrier knowledge organization ISTORM organized a similar but more elaborate workshop early 2019. As a member of ISTORM, Deltaires (Martijn de Jong) joined these sessions and discussions. That workshop concluded that a combination of barrier types would be required to facilitate vessel traffic in and out of the port of Houston and to ensure sufficient tidal exchange between the Houston lagoon and the Gulf of Mexico in open gate position (Figure 11.3). A Maeslant Barrier type was foreseen for the traffic lanes, while Eastern Scheldt Barrier types were foreseen next to that, to provide additional tidal exchange while open. Culverts are foreseen in the shallowest parts of the cross section. Optimizations in the design consisted of splitting the traffic lanes into an ingoing and outgoing lane to allow less wide main gates. Using an elongated middle island and placing the barrier doors behind each other reduces the blockage of the cross section when the barrier is open, allowing the tide to move in and out as freely as possible. Further differentiation in large cargo vessels and smaller pleasure vessels, the latter with a separate passage in the barrier, allowed for a further optimization.

Challenges of this approach include:

- reaching the central island for monitoring or maintenance, also under extreme storm conditions
- sedimentation
- wave loadings and overtopping

Since that workshop plans have been work out further by the Army Corps of Engineers. Preparatory studies and design tasks are expected to continue in the near future.

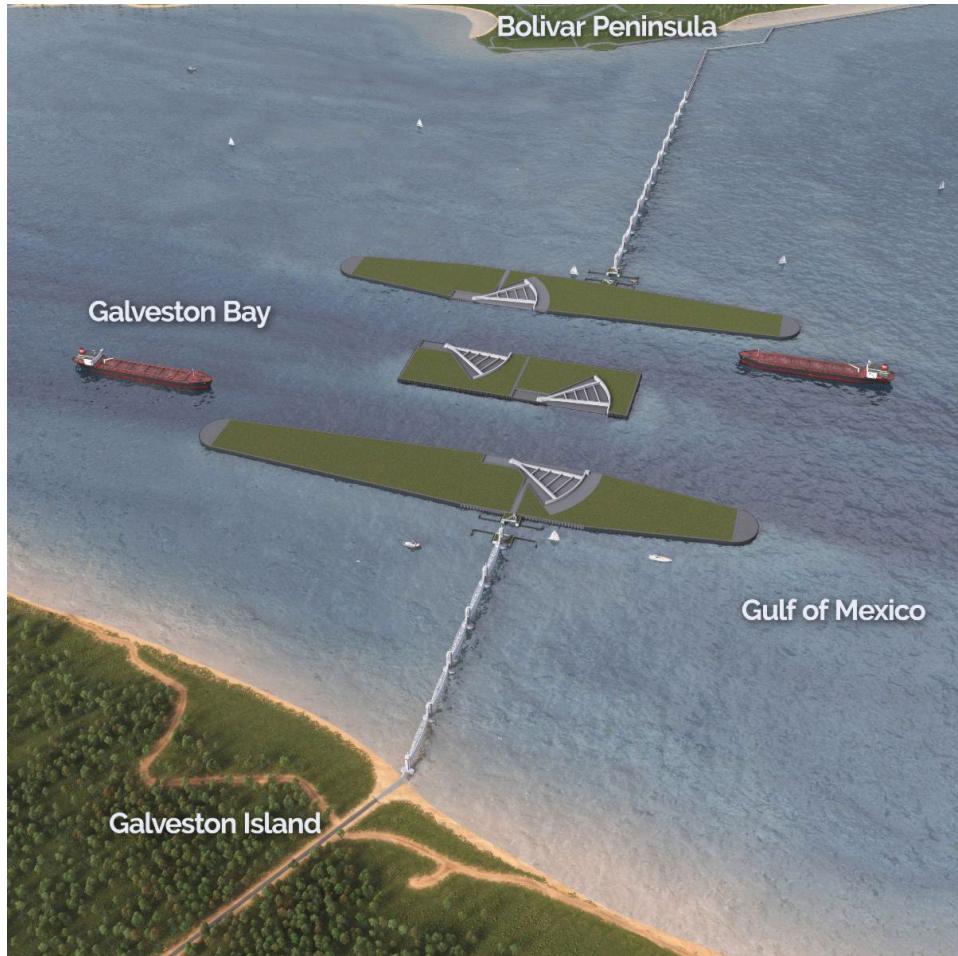


Figure 11.3: artist impression of a possible moving gate configuration for the Galveston barrier.

11.3 Long Island, New York, USA

Following hurricane Sandy, the greater New York area has been the focus of studies and plans for developing improved protection against flooding. Some of these plans include large coastal barriers with movable gates (Figure 11.4). At this moment studies are in preparation to further work out these plans and to develop conceptual designs for such barriers. Deltares has been involved earlier in pre-qualifying for performing a part of that work. The present status of that tender is unknown.



Figure 11.4: Overview of possible movable barriers in the New York and Long Island area.

11.4 Denmark

In 2017 the Danish Coastal Authority (DCA) has contacted Deltares as a first step to build up expertise on storm surge barriers, promoted by the growing interest on this type of protection method among municipalities, and also due to limited knowledge and experience in-house with this type of structures. The DCA is the coastal government agency in Denmark; the DCA does not own assets nor fund infrastructure projects. One of the main tasks of the DCA is to provide advice to the Ministry of the Environment, municipalities and public authorities on coastal protection. Deltares paired with RWS (Marc Walraven), as both members of the I-STORM network, to best serve the DCA in this project. Deltares & RWS prepared a report (I-STORM, 2018) summarizing the main aspects of the different types of existing movable barriers, providing facts and figures for some of the barriers in the Netherlands and abroad. Deltares organized a workshop within this project together with site visits to multiple barriers in the Netherlands.

Although Denmark may be perceived as a country with limited vulnerability towards coastal flooding, the country has experienced severe storm surges throughout history. In recent years Denmark has experienced a number of large storm surges with adverse economic impact in different parts of the country. Because of this, and due to obligations in the EU Floods Directive, several municipalities are considering using storm surge barriers as a possible coastal protection measure, especially for larger areas. The main issue with coastal protection in Denmark relates to responsibilities. The current legislation states that “those who benefit must pay”; this approach not only places a too heavy financial burden on landowners, but also makes it impossible to define a proper and coherent coastal protection plan and implementation of integrated solutions. This is a problem not only for construction, but also for the maintenance of these structures. In a scenario of sea level rise, where present-day safe areas will become also at risk, the sharing of responsibilities among landowners, municipalities and the state will become even more urgent.

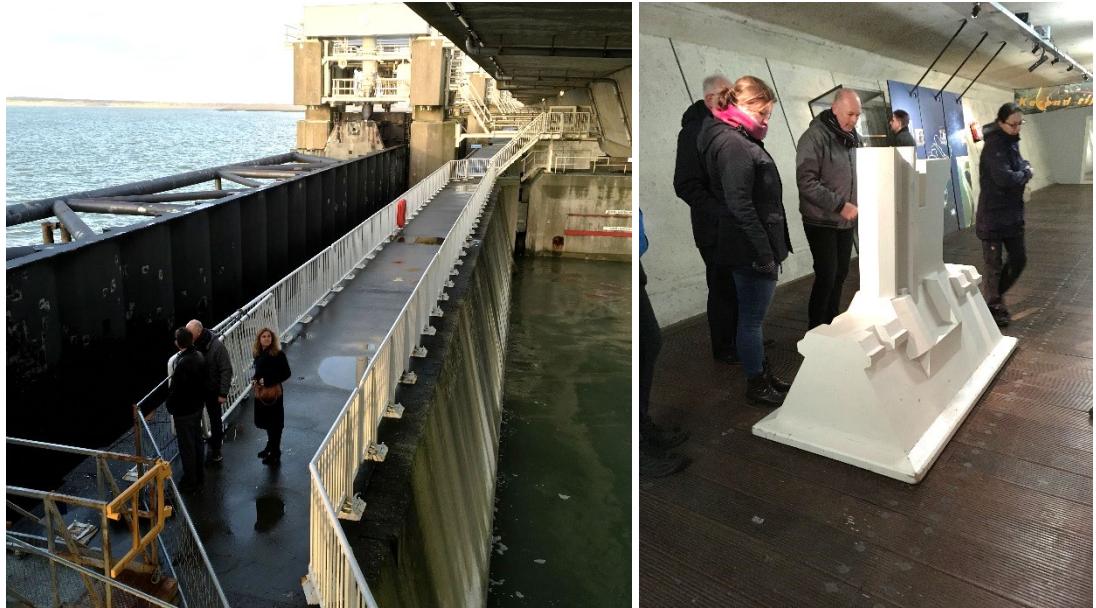


Figure 11.5: Visit to the Oosterscheldekering with representatives of the Danish Coastal Authority, Deltares and Rijkswaterstaat (2017).

12 Synthese, conclusies en bredere context

12.1 Synthese en conclusies

De overzichten in de voorgaande hoofdstukken geven aan dat er ten tijde van het ontwerp van de grote Nederlandse SVKs door (voorgangers van) Deltares zeer uitgebreid en zeer gedegen onderzoek is gedaan naar ontwerpopimalisaties, extreme ontwerpbelastingen en operationele inzet/gedrag van de keringen (zoals gedrag en functioneren tijdens sluiten en openen). Gedurende het ontwerpproces zijn er veelal meerdere (deel)opties beschouwd en kon op basis van de verkregen studie uitkomsten de optimale aanpak vastgesteld worden. In sommige gevallen werden ontwerukeuzes (deels) ingegeven door externe, niet-technische factoren (doorgaans bezuinigingen). De uitgevoerde studies hebben in die gevallen bijgedragen aan het mitigeren van ongewenste constructieve of operationele neveneffecten als gevolg van op externe factoren gebaseerde ontwerukeuzes.

De beschouwde grote beweegbare keringen verschillen allemaal in type, grootte en positie in hun watersysteem. Dit betekent dat er een zeer breed palet aan studies, inzichten en ervaringen is opgebouwd. In een los spreadsheet zijn de hoofdpunten per beschouwde Nederlandse kering opgenomen ('objectspecifiek.xlsx', opgeslagen in de projectmap).

Het overzicht in de vorige hoofdstukken geeft aan dat elke situatie en locatie uniek is en dat dit veelal om een specifiek SVK-type vraagt. Dit heeft te maken met de lokale eigenschappen en complexiteit van het watersysteem, maar vaak ook met vereiste aanvullende functionaliteiten zoals het mogelijk maken van scheepvaartverkeer. Meer functies leidt in de regel tot een complexer SVK-type, bijvoorbeeld vanwege de functie 'faciliteren scheepvaart' kan er geen compacte (hef)constructie boven het water aangebracht worden. En hoe complexer een kering, hoe veeleisender het beheer en onderhoud zal zijn en hoe gevoeliger een kering zal zijn voor onjuist/niet operationeel functioneren.

Ondanks dat elk keringstype zijn eigen aandachtspunten heeft komen sommige onderwerpen bij nagenoeg alle keringstypen terug als technisch aandachtspunt. Dat geldt onder andere voor:

- bodembescherming, voorkomen van ontgrondingskuilen;
- trillingen van sluitmiddelen/schuiven/platen;
- gedrag tijdens openen en sluiten, inclusief stroming door nog niet afgesloten deel;
- (invloed van) aanslibbing van drempels;
- ontwerpwaarden van vervallen;
- omgaan met negatief verval (zeewaterstand lager dan binnenwaterstand);
- overall interactie van de werking van de SVK op het grootschalige watersysteem (waterstanden, verdeling debieten) en optimalisering sluitmoment;
- stabiliteit van de vaste constructie en grootschalige stabiliteit van sluitmiddelen.

In de loop van de tijd is bij de ontwikkeling van SVKs, in Nederland en internationaal, steeds meer aandacht gekomen voor een optimale inbedding van een SVK in zijn omgeving en voor het minimaliseren van impacts op het natuurlijke (water-)systeem. Sterker nog, in sommige gevallen zijn eisen aan natuurwaarden/ecologie hoofddrivers gebleken voor het kiezen van een type SVK, of in ieder geval waren zij leidend in de keuze voor de aanleg van een SVK in plaats van een vaste kering/dam (bijvoorbeeld de Oosterscheldekering). Ook voor bestaande keringen zijn ecologie en natuurwaarden nog steeds relevant voor een optimale inzet van de SVKs en mogelijke aanpassingen in keringsinzet in de toekomst in respons op bijvoorbeeld zeespiegelstijging.

12.2 Bredere context en vooruitblik inzet kennis SVKs

In deze paragraaf wordt voor diverse opgaven aangegeven waarom een overzicht van kennis over de SVKs relevant is, en ook welke kennis aanvullend nodig zou zijn. Dit laat zien dat een degelijke kennisbasis, met ook kennis uit het verleden, direct bij kan dragen aan de opgaven van nu en de opgaven van de toekomst.

12.2.1 Impact van aanpassingen in het watersysteem op werking van SVKs

Hoe draagt de kennis bij?

Bij een gebiedsaanpassing is het handig als direct de gegevens en informatie beschikbaar zijn om aan te kunnen geven of de beoogde aanpassingen in het gebied de (hydrodynamische) belastingen op, en werking van, de grote kering(en) in dat gebied niet nadelig zullen beïnvloeden. De beschikbaarheid van een overzicht van de functies van de kering en de functionele samenhang is daarbij ook handig. Aangepaste wensen tijdens de levenscyclus van de SVK aan het watersysteem kunnen ook nieuwe eisen stellen aan de SVK, bv functie ecologie / getijdecontrole voor de Haringvlietsluizen.

Welke kennis is nodig?

- uitgangspunten ontwerp, incl. ontwerpwaarden van hydrodynamische belastingen als stromings- en waterstandswaarden
- Interactie tussen een SVK en het watersysteem. Kennis van het (functioneren van het) object en van het gedrag van het (lokale) water- en bodemsysteem
- modellen die snel aangepast en ingezet kunnen worden
- meetreeksen en resultaten veldonderzoek

12.2.2 Afwegingen voor BenO en VenR SVKs

Hoe draagt de kennis bij?

Voorbeeld voor de Ramspolkering: de drivers hoger peil IJsselmeer en toename afvoer IJssel hebben invloed op de functionele levensduur van de Ramspolkering. Een ander voorbeeld voor de Ramspolkering: de technische levensduur van het doek is mogelijk langer dan de oorspronkelijk aangenomen ontwerplevensduur. Ook de zeespiegelstijging heeft effect op technische en functionele levensduur, dit staat apart beschreven.

Welke kennis is nodig?

Om de technische en functionele prestatie van de SVKs in de tijd te bepalen, en daarmee ook de verwachtingen voor de technische en functionele levensduur te voorspellen helpt het om de volgende kennis te hebben of te ontwikkelen:

- Belangrijke drivers die invloed hebben op de prestatie van de SVKs en daarmee voor een kortere of juist langere levensduur kunnen zorgen.
- Inzicht in samenhang tussen infrastructuur: welke infrastructuur is verantwoordelijk voor welke functies in welke gebieden. En welke ruimte biedt dat voor VenR-beslissingen. Een beschrijving van de functies en de samenhang tussen de functies kan helpen maar ook inzicht in de systeemwerking (beschrijving beschikbare modellen, effect omgeving op de kering en effect kering op de omgeving).
- Aangeven waar ruimte zit in het ontwerp: zijn er nieuwe inzichten of is bijvoorbeeld onder strengere condities getest of zit er op een andere manier ruimte in het ontwerp of systeem (die we misschien vergeten zijn).
- Aangeven wanneer de beslismomenten voor VenR in beeld komen, afhankelijk van de scenario's. Dus wanneer grote investeringen in VenR nodig zijn, of wanneer een grote afname van de baten in het systeem voor één of meer van de functies kan optreden

Bovenstaande is relevant voor VenR / afwegingskader, initiatief 'Redesign the delta' (Paragraaf 12.2.4), impact klimaatverandering (Paragraaf 12.2.3).

12.2.3 Impact van klimaatverandering en veranderende normen – drivers voor VenR

12.2.3.1 Verzamelde kennisvragen/kennis-ontwikkelkansen

Dit is een onderdeel / verdere uitwerking van VenR afwegingen (de vorige paragraaf).

Welke kennis is nodig (inclusief voorbeelden)?

- Impact klimaatverandering (neerslag, afvoer, golfbelasting zeespiegelstijging, temperatuur, CO₂) op functioneren van de SVK
 - Waar is de kering voor ontworpen / bij welke verandering moet nog eens goed naar de kering gekeken worden?
 - Voorbeeld Ramspolkering: hoger peil IJsselmeer (om te kunnen blijven afvoeren op zee onder vrij verval) en toename afvoer IJssel.
 - Hoeveel ruimte zit er in het ontwerp van de SVK / stresstesten?
 - Voorbeeld Ramspolkering: sluiten onder hogere stroomsnelheden is getest dan de ontwerpwaarde voor die parameter.
 - Voorbeeld OSK: de OSK heeft relatief weinig ruimte in het ontwerp bij veranderende randvoorwaarden. Bij (sterke) zeespiegelstijging zal het ontwerppeil vaker gehaald worden en de kering vaker sluiten.
 - Voorbeeld Hartelkering: deze is ontworpen voor overslag en overtopping om waterstand westen voldoende laag te houden, (grote) zeespiegelstijging zorgt mogelijk voor zwaardere belasting op de omringende bodem en in potentie tot een grotere impact op ongewenste trillingen van de schuif.
 - Voorbeeld MLK: de MLK is niet ontworpen voor heel veel sluitingen.
 - Voorbeeld HIJK: bij (grote) zeespiegelstijging zal de HIJK vaker moeten sluiten, met invloed op faalkans, scheepvaart en ecologie.
 - Kan de kering anders ingezet worden bij veranderingen in hydraulische belastingen als gevolg van klimaatverandering?
 - Kennis van de motivatie voor huidige/oorspronkelijk inzetwijze nodig.
 - Kennis van de werking van de achterliggende beslis- en besturingssoftware nodig.
 - Voorbeeld Haringvlietsluizen: aangepaste sluisbediening bij vaker optreden (hogere) golfbelasting op de schuiven of hogere rivierafvoeren.
 - Voorbeeld MLK: kan er ruimte gezocht worden in bv sluitcriteria, accepteren overtopping, eventueel in combinatie met aanpassingen aan de kering?
 - Passende en voldoende nauwkeurige weergave van SVK in numerieke hydrodynamische gebiedsmodellen, ook bij extreme omstandigheden. Eerdere schaalmodeltesten van bv de Hartelkering kunnen hierbij gebruikt worden als uitgangspunt.
 - In hoeverre kan schade tijdens extreme situaties geaccepteerd worden?
 - Bijvoorbeeld bodembescherming bij overtopping, mogelijk is dit te herstellen en zal dit niet direct leiden tot falen van de gehele kering.

12.2.3.2 Oorspronkelijke ontwerpaannames voor zeespiegelstijging

Recentelijk is in het kader van Deltires-project 11206797 ('KPP HV06 2021 – Kustbeleid') uitgezocht wat de toeslagen voor zeespiegelstijging zijn geweest die ingezet zijn bij het ontwerp van de Maeslantkering, de Haringvlietsluizen en de Oosterscheldekering. In de context van de huidige taak, en vanwege de potentiële grote impact van zeespiegelstijging, is die uitwerking hier uitgebreid voor alle in voorgaande hoofdstukken besproken SVKs. De uitkomsten en brondocumenten zijn verzameld in Tabel 12.1. Deze informatie zal uitgangspunt zijn voor vraagstukken rondom zeespiegelstijging en hoe de bestaande Nederlandse keringen in de toekomst met mogelijk versnelde zeespiegelstijging om moeten zullen gaan.

Tabel 12.1: Overzicht van de in het ontwerp van de keringen ingezette waarde als toeslag voor zeespiegelstijging inclusief vermelding van de brondocumenten.

Kering	Ontwikkeld-, ontwerp en bouwperiode tot aan ingebruikname	Ontwerpwaarde kerende hoogte (m NAP / local)	Toeslagwaarde voor zeespiegelstijging opgenomen in oorspronkelijke ontwerp (m)	Bron van waarde / referentie
Oosterscheldekering	1973-1986	5.80 (Roompot & Schaar), 5.60 (Hammen)	0.3-0.4, als buffer voor voorzespiegelstijging én mogelijke zetting van de pijlers, ontwerplevensduur 200 jaar	Rijkswaterstaat (1986)
Haringvlietsluizen	1958-1970	5.0	Mogelijk niet explicet meegenomen, want oorspronkelijk ontworpen als lozingmiddel en niet als SVK (pas vanaf 2018 status SVK)	Geen expliciete vermelding gevonden
Hartelkering	1993-1997	3.0	0.1 icm ontwerplevensduur 50 jaar (verwijzend naar 'Deltawet') → minder relevant nav bewust lage kerende hoogte? >+6 m NAP meegenomen in ontwerp? (schaalmodeltesten bodembescherming tot aan +7.2 m NAP) (alternatief: aanpak zss mogelijk icm MSK, 0.5 m?)	Tracénota Europoortkering – Hoofdstuk 7 – pagina 80, Q1500 Deltares (WL Delft Hydraulics), Project Q1522 Deltares (WL Delft Hydraulics)
Maeslantkering	1989-1997	5.0	0.25 m in 50 jaar, de 'planperiode' volgens bouwcontract 100 jaar in contract aangenomen levensduur voor onvervangbare delen → 0.5 m toegepast	Basisdocumentatie MSK M00-ALG-01-NL, aanlegcontract BMK en RWS (BD001B, 27-10-1989), 'Belastinggids, Natuurrandvooraarden' A-13-0013, waarde toegelicht in 'Rapportage Commissie Studie SVK NW-A-00-5017'
Hollandsche IJsselkering	1954-1958	5.0	Niet explicet? Impact vooral in frequenter moeten gaan sluiten in de toekomst. Door toevoeging van keringen westwaarts minder kritisch?	Geen bron gevonden, ook niet na navraag bij huidige beheerdersteam
Ramspolkering	1996-2002	3.55	Niet van toepassing vwb autonome zeespiegelstijging; mogelijk in de toekomst wel bewuste keuze voor hoger beheerpeil IJsselmeer t.b.v. blijven lozen onder vrij verval	Aanbeveling toekomstig meerpeil in rapport van de Deltacommissie (2008)
Venice Barrier	2003-2020	3.0	0.6 (voor 100 jaar, 2100 als referentie)	Information found only in public sources, e.g. https://www.mosevenezia.eu/mose/
St. Petersburg Barrier	1984-2011	4.55	0.6 m (corresponding to 10,000 yr flood of 5.15 m) Year 2110 as end design lifetime	Project Z2962: St. Petersburg Flood Protection Barrier - Technical feasibility study (2002), NEDECO

De oorspronkelijke Deltacommissie (1960) vermeldt in hun rapportage: “..., schijnt het op het ogenblik niet mogelijk te zijn betrouwbare schattingen te geven van de zeespiegelstijging in de toekomst.”. Zij noemden het fenomeen dus al wel, maar hebben geen kwantificering kunnen geven. Het rapport van de nieuwe Deltacommissie, uit 2008, vermeldt: “Bij het ontwerp van de stormvloedkeringen in Oosterschelde en Nieuwe Waterweg is destijs rekening gehouden met een zeespiegelstijging van respectievelijk 20 en 50 cm per eeuw.”. Beide bronnen zijn tekenend voor het verloop en ontwikkeling van inzichten in de mate (en snelheid) van zeespiegelstijging. Om die reden is in Tabel 12.1 ook het interval aangegeven van de jaren waarin het ontwerp van elke kering is gemaakt, om zo de voor elke kering andere aangehouden waarde in de juiste historische context te zien.

Voor de Maeslantkering is het van belang om op te merken dat de mate van zeespiegelstijging voor die kering werd uitgedrukt per 50 jaar (0.25 m/50 jaar), maar dat de uiteindelijk toegepaste waarde van de toeslag voor een destijs aangenomen levensduur van 100 jaar geldt (0.5 m). In het contract met het bouwconsortium wordt gesproken over een planperiode (50 jaar) en een levensduur (100 jaar). Het onderwerp zeespiegelstijging heeft betrekking op niet-vervangbare delen van de kering en is dus op basis van de voorziene levensduur uitgewerkt.

Voor de Oosterscheldekering wordt opgemerkt dat een waarde van 0.4 m is aangehouden als buffer voor zeespiegelstijging en zettingen, gecombineerd met de ontwerpwaterstand die geldt als gemiddelde over de keringslengte en onder de aanname van een gelijke aanleghoogte voor de gehele OSK. Die toeslagwaarde wordt doorgaans genoemd als ‘de zeespiegelstijgingstoeslag’ zoals ingezet voor de OSK. Echter, die waarde is alleen geldig als gemiddelde, ter hoogte van het midden van de keringslengte. Vanwege een verlopend extreme ontwerpwaterstand, en het uiteindelijk 0.2 m lager aanleggen van het meest noordelijke deel van de kering (Hammen), is de effectieve toeslag op locaties meer richting het noordelijke en meer richting het zuidelijke deel van de kering 0.3 m (zie ook Paragraaf 3.4.4).

12.2.4 Redesign the delta

Welke kennis is nodig?

Beslismomenten in de tijd voor grote investeringen aan de SVKs: wanneer zal investering plaats moeten vinden en sluit deze investering voldoende aan bij de openstaande opties (in de tijd) voor de nieuwe inrichting van de delta bij toenemende zeespiegelstijging. Dit kan helpen om de urgentie te laten zien van besluitvorming rond de nieuwe inrichting van de delta – misschien liggen beslispunten wel eerder in de tijd dan nu gedacht wordt – en helpt het om de nieuwe inrichting te realiseren door deze te koppelen aan de VenR opgave. Zie ook ‘Afwegingen voor BenO en VenR SVK’. Ook is ontwerpkenis en advies over mogelijkheden van SVK benodigd bij de nieuwe ontwerpopties van de delta.

Wat zou gedaan moeten worden om verdere toepassing voor de diverse opgaven te realiseren?

- Welke nieuwe ‘eisen’ komen op de SVK af?
- Hoe de nieuwe inrichting te realiseren en de rol van (nieuwe) SVK?
- Hoe adaptief bewegen richting een (onzekere) nieuwe inrichting van de delta?

12.2.5 Beoordeling (BOI), HWBP / hoogwaterbescherming

De rol van SVKs in de context van hoogwaterbescherming is sterk gelinkt aan de Waterwet en de eisen aan maximale overstromingskansen die daarin vermeld staan. In 2021 is in een parallelle SO-taak een uitwerking gemaakt van de rol en positie van SVKs bij het garanderen van hoogwaterveiligheid. Die uitwerking is in een losse rapportage opgenomen (projectnummer 11206877-018).

12.2.6 Vernieuwen van beslis- en besturingssystemen

Bij de recente projecten voor de Acceptatie-testomgevingen (projectnummers 1230119, 1123532) en bij de recente update van het BOS-systeem (projectnummer 11206112) is gebleken dat het essentieel is om kennis van het grootschalige watersysteem te koppelen aan kennis van de werking van de SVKs, de sluitcriteria en wijze van operationele inzet van (hydrodynamische) gegevens.

Voor het beoordelen van de geschiktheid van een vernieuwd voorspellend hydrodynamisch model is het bijvoorbeeld van belang om goed te weten welke gegevens de kering op welke wijze en tijdens welk deel van het sluitproces inzet. Van elke aangeleverde gesimuleerde parameter (uiteraard hoogwaterstanden, maar mogelijk ook detailaspecten gerelateerd aan het kunstwerk) moet goed bekend zijn waarom die parameter benodigd is en hoe die ingezet wordt. Pas na het volledig valideren van de nieuwe hydrodynamische software kan die ingezet worden voor operationele voorspellingen.

Bij het vervangen van besturingssystemen moet de nieuwe software getest en geaccepteerd kunnen worden door RWS voorafgaand aan installatie op de echte kering.

Welke kennis is nodig (inclusief voorbeelden)?

- Hoe kunnen we SVKs het beste in gebiedsmodellen opnemen?
- Hoe kunnen we kennis over kunstwerken, en SVKs in het bijzonder, koppelen aan de kennis en modellen van grootschalige watersystemen?
- Hoe kunnen we de operationele modellen voor waterstandsvoorspellingen verder verbeteren en toespitsen op de inzet voor SVKs, zoals in het BOS-systeem?

12.2.7 Nederlandse waterbouwkundige kennis in het buitenland

Voor het exporteren van Nederlandse waterbouwkundige kennis vanuit Deltares naar het buitenland zal vooral gewerkt moeten worden aan:

- (sterkere) Aansluiting zoeken op internationale netwerken zoals I-STORM.
- Zichtbaarheid/exposure vergroten van Deltares expertise en uitgebreide ervaring met SVKs.
- Aantonen dat de zeer uitgebreide ervaring van Deltares met alle grote SVKs in Nederland, inclusief unieke schaalmodelprojecten, uniek is en van zeer grote waarde, ondanks dat die projecten al geruime tijd geleden zijn uitgevoerd; er worden in de wereld nu eenmaal niet jaarlijks dergelijke constructies gebouwd.

12.3 Bredere context en aansluiting bij kennisagenda's

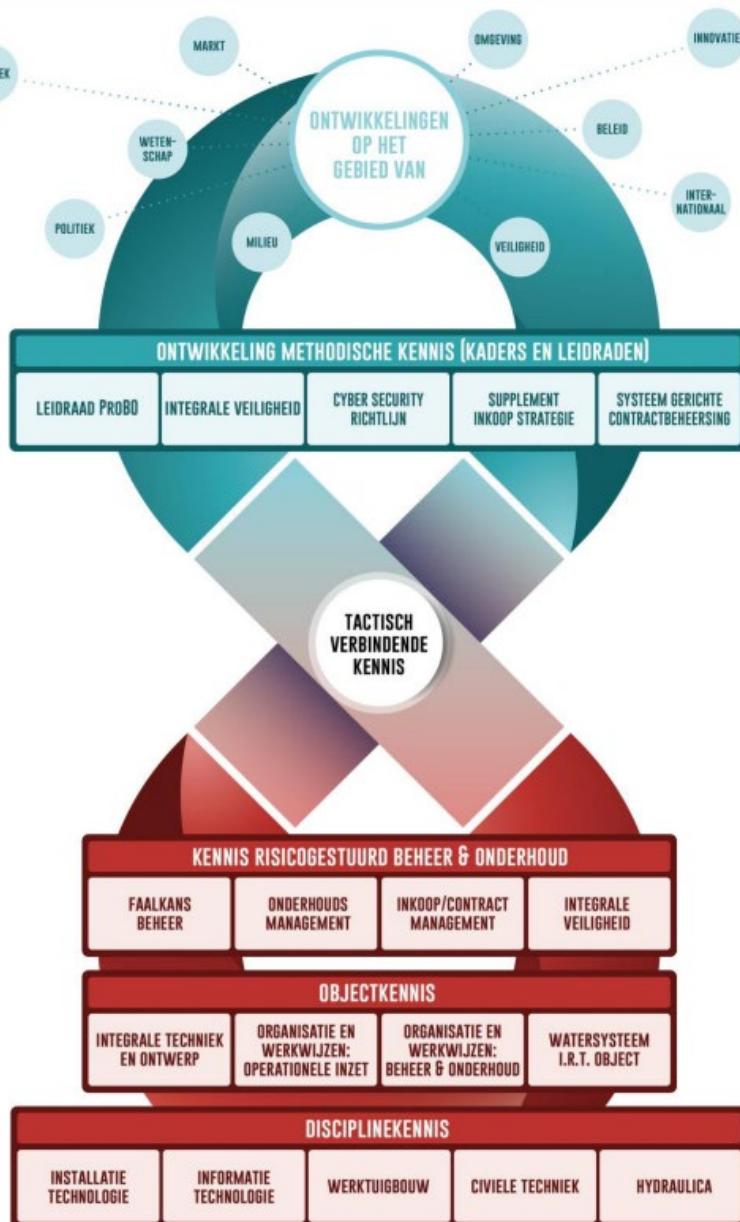
In deze paragraaf wordt aangegeven hoe de kennis van vroeger en de kennis van nu kan helpen bij het realiseren van kennisstrategieën en agenda's. Hierbij wordt gerefereerd naar de uitgangspunten uit de kennisstrategie

12.3.1 Kennisstrategie SVK van RWS (2018)

In deze paragraaf wordt aangegeven hoe Deltares bijdraagt aan de uitgangspunten uit de kennisstrategie SVK van RWS (2018). In die agenda wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten kennis en vaardigheden, zie Figuur 12.1. De technisch inhoudelijke kennis van Deltares zal vooral relevant zijn voor de rode delen van dat schema. Een bredere rol voor Deltares is mogelijk bij de blauwe delen van het schema.

- SVKs zijn unieke objecten, de bijzondere karakteristieken²⁰ van de SVKs zijn niet altijd reeds bekend, maar zijn wel bepalend in de specifieke kennisopgave. Een kennisbasis inclusief mogelijke ‘vergeten’ kennis en inclusief state-of-the-art technologieën en modellen helpt bij het identificeren en beantwoorden van de kennisvragen van nu. Deze kennis moet ook bij Deltares, als partner van RWS, aanwezig zijn als basis voor verdieping, onderzoek en advies.
- RWS maakt in hun kennisagenda onderscheid tussen:
 - Make → welke kennis dient RWS zelf te hebben
 - Buy → welke kennis kan belegd worden bij derden (incl. Deltares)
 - Share → welke kennis is in een samenwerkingsverband
- In de nieuwe samenwerking tussen I&W (inclusief RWS) en Deltares wordt steeds meer toegepast naar afstemming tussen strategisch / lange-termijn onderzoek en kennisontwikkeling, kortere termijn kennisontwikkeling en kennisdoorwerking. Het Share-principe past hier goed bij, waarbij afspraken over kennisborging nodig zijn en kennisopbouw in samenwerking tussen RWS en Deltares plaatsvindt.
- De natuurlijke langdurige relatie tussen RWS en Deltares maakt het mogelijk om deze samenwerking vanuit het verleden ook in het heden en de toekomst goed te houden. En biedt de mogelijkheid om vanuit het kennisecosysteem in Nederland een belangrijke rol te spelen in het buitenland rondom SVKs.
- Deltares werkt aan een kennisbasis die toegankelijk is, waarbij kennis en netwerken zoveel mogelijk bij meerdere personen liggen en bronnen toegankelijk zijn. Dit wordt georganiseerd vanuit het Team SVKs, als onderdeel binnen Team Kunstwerken.
- De kennisstrategie van RWS voor SVKs levert een bijdrage aan beheer, onderhoud en operationele inzet van de keringen ('de hele keten'). De kennisbasis en kennisontwikkeling van Deltares draagt bij aan de verschillende delen van die keten, bijvoorbeeld met kennis over het voorspellen van kritische waterstanden (update BOS), kennis over asset management van kunstwerken in het algemeen (Kennisprogramma Natte Kunstwerken), en kennis over interactie tussen kering en watersysteem (Acceptatie-testomgevingen).
- Deltares kan de kennisbasis en kennisontwikkeling koppelen aan kennis voor andere natte kunstwerken en SVKs in het buitenland. De kennisbasis SVKs in Nederland is onderdeel van deze bredere kennisbasis.

²⁰ Grote gevolgen en lage sluitfrequentie, unieke objecten, statische voorziening in een dynamische omgeving, icoon met hoge reparatiekosten, kering op orde tijdens stormseizoen



Figuur 12.1 Kennisterreinen gespecificeerd voor SVKs (RWS, 2018).

In de kennisstrategie SVKs van RWS worden de verschillende kennisterreinen genoemd die relevant zijn voor SVKs. De noodzaak voor structurele kennisontwikkeling en -borging bij Deltares zien wij op dit moment bij de volgende thema's / onderwerpen vanuit de kennisagenda SKVs van RWS:

1. Probabilistische modellen van het watersysteem
2. Waterloopkundige modellen van het watersysteem (numeriek en fysieke schaalmodellen)
3. Modellen met objectbeschrijving en weergave van de werking van SVK in modellen waaronder bv vul- en ledigsystemen, voor simulaties ten behoeve van besturing, training en opleiding en optimalisatie van sluitcriteria.
4. Afwegingskader voor vervanging- en renovatie
5. Lange-termijn ontwikkelingen van klimaat en de delta

Deze onderwerpen zijn belegd in de strategische kennisprogrammering van Deltares in met name de programma's Infrastructure Renewal and Renovation, Flood Defences en Risk Analysis and Management. De rekenmodellen (gebiedsbeschrijvingen/schematisaties) die Deltares in het verleden voor RWS heeft aangemaakt voor verschillende typen van hydrodynamische modellen worden actief beheerd door Deltares binnen een B&O-raamwerk in het kader van KPP (Kennis Primaire Proces). Doorgaans zijn dat modellen voor oorspronkelijk een ander doel dan de hydrodynamische situatie op de locatie van een kunstwerk beschrijven. Echter, de bestaande modellen vormen een zeer goede basis om een lokaal aangepast model in advieswerk in te zetten. Die aanpak is gevuld voor de ontwikkeling van de Acceptatie-testomgevingen van de Maeslantkering (project 1230119) en Ramspolkering (11203532). De gemaakte aanpassingen en lokale verbeteringen kunnen op termijn 'terugvloeien' en opgenomen in de hoofd-ontwikkellijn van een model/gebiedsbeschrijving.

12.3.2 Kennisambities I-STORM

De ambitie van I-STORM is vooral kennisdelen en delen van ervaringen uit de onderhouds- en beheerpraktijk. Die focus op dagelijks operationeel beheer maakt dat het voor Deltares niet altijd relevant en nuttig zal zijn om bij onderwerpen en activiteiten van I-STORM aan te sluiten. Bijvoorbeeld ervaringen op het gebied van materialen (slijtage, krachtsverlies in de loop van de tijd) zullen minder relevant zijn. Discussie- en expertsessies over conceptuele ontwerpkeuzes zoals het meest geschikte type van beweegbare kering voor een nieuwe locatie zijn zeer relevant. Omdat de kernleden van I-STORM allemaal overheidsinstellingen zijn, wordt er binnen I-STORM doorgaans input en feedback opgehaald 'om niet'. I-STORM is daarmee vooral nuttig om te netwerken en om de kennis en kunde van Deltares zichtbaar te maken. Indirect zou dat, buiten I-STORM om, kunnen leiden tot samenwerkingen met marktpartijen en betaalde adviesopdrachten.

12.3.3 Toetsingswerkzaamheden RWS

In 2021 heeft RWS-ontwerpt gewerkt aan de toetsing van de Maeslantkering. Deltares is hierbij op een enkel detailpunt bij aangesloten geweest. In die toetsing zijn meerdere kennisvragen naar voren gekomen, waaronder de impact van seiches en de wijze van weergave van dat type golven in rekenmodellen. Daarnaast is gesignaleerd dat er een nieuw hydrodynamisch belastingmodel moet worden om zo het instrumentarium dat tijdens het ontwerp is aangemaakt opnieuw operationeel te krijgen. Voor de Acceptatie-testomgeving zijn al twee hoofdmodules van die oorspronkelijke software opnieuw en aangepast aangemaakt in 'levende' software van Deltares. Voorzien is hier op voort te bouwen en de overige modules ook opnieuw aan te maken.

Samenvattend, zullen vragen onder andere betrekking hebben op:

- Impact van seiches op de Maeslantkering en de weergave van die golven in constructieve berekeningen en hydrodynamische modellen.
- Het beschikbaar maken van een 'levend' rekenmodel voor het afleiden van statistische beschrijvingen van hydrodynamische belastingen op de Maeslantkering.
- Bijdragen aan de andere vragen die aan uit de toetsronde in 2021 naar voren zijn gekomen, bijvoorbeeld onderzoek naar de – naar verwachting hydrodynamische – oorzaak van de bron van de onverklaarbare krachten die optreden in onderdelen van de kering (trek-duwstang; de 'mystery force').

Referenties

Algemeen

Rijkswaterstaat (2003), Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde : boek 4: de sluitingsmiddelen, Deel 3, pagina 70.

Rijkswaterstaat (2018), Kennisstrategie Stormvloedkeringen, -Kennisontwikkeling en -borging bij stormvloedkeringen, april 2018, Definitief, Versie 1.0, RWS BEDRIJFSINFORMATIE.

Deltacommissie (2008), Samen werken met water - Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst, Bevindingen van de Deltacommissie, september 2008, ISBN/EAN 978-90-9023484-7.

Oosterscheldekering

Broekema, Y.B. (2020). Horizontal shear flows over a streamwise varying bathymetry. PhD dissertation, Delft University of Technology, 2020.

Deltares (2009), Sand demand of the Eastern Scheldt: morphology around the barrier. Projectreferentie Z4581, Maart 2009.

Deltares (2009), Sediment transport through the Eastern Scheldt storm surge barrier. Projectreferentie A1002334, Mei 2009.

Deltares (2012), Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, hoofdrapport. Projectreferentie 1206907-005, November 2012.

Deltares (2013), Golveldmodel voor schuiven van de Oosterscheldekering: model t.b.v. vermoeiingsanalyse schuiven, Projectreferentie 1207853-000, November 2013.

Deltares (2016), Variantentstudie Roggenplaat suppletie, projectreferentie 12202324.

Eelkema, M., Z. B. Wang, A. Hibma, and M. J. F. Stive (2013), Morphological Effects of the Eastern Scheldt Storm Surge Barrier on the Ebb-Tidal Delta, *Coastal Engineering Journal*, 55(03), 1350,010, doi:10.1142/S0578563413500101.

Guit, Kamilla (2018), Impact of tidal energy extraction in the Eastern Scheldt storm surge barrier on basin hydrodynamics and morphology, MSc Thesis, Delft University of Technology.

Rijkswaterstaat (1986), Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde: Boek 1: totaalontwerp en ontwerpfilosofie. Referentie: 231560, PUC_107095_31.

Rijkswaterstaat (1991), Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde: Boek 2: de waterbouwkundige werken.

O'Mahoney, T.S.D., de Fockert, A., Bijlsma, A.C., de Haas, P. (2020). Hydrodynamic impact and power production of tidal turbines in a storm surge barrier. International Marine Energy Journal, Vol. 3 (3), p.127-136. Doi:imej.3.127-136

Van Velzen, G., Raaijmakers, T.C., Hoffmans, G.J.C.M., (2014). Scour development around the Eastern Scheldt storm surge barrier: field measurements and model predictions. Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, 2014, Perth, Australia.

Vroon, J. (1994), Hydrodynamic characteristics of the Oosterschelde in recent decades, *Hydrobiologia*, 282-283(1), 17–27, doi:10.1007/BF00024618.

WL | Delft Hydraulics (1968-1982), Stormvloedkering Oosterschelde - getijmodel Oosterschelde, meerdere volumes, projectreferentie M1000.

WL | Delft Hydraulics (1972-1987), Afsluiting Oosterschelde - detailmodel sluitgaten, meerdere volumes, projectreferentie M1001.

WL | Delft Hydraulics (1975), Tweedimensionaal ontgrondingsonderzoek Oosterschelde, projectreferentie M1321, Oktober 1975.

WL | Delft Hydraulics (1975), Schuifonderzoek stromvloedkering Oosterschelde, projectreferentie M1377, meerdere volumes, december 1975.

WL | Delft Hydraulics (1976), Stormvloedkering Oosterschelde: ontgrondingen bij de putten van de pijleroplossing: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1385, april 1976.

WL | Delft Hydraulics (1976), Stormvloedkering Oosterschelde: invloed drempelvorm op stabiliteit van bestortingen op drempel en stortbed bij de caisondam: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1329, april 1976.

WL | Delft Hydraulics (1978), Belasting in gesloten toestand: diepe en ondiepe sektie systematisch onderzoek bij loodrechte aanval van regelmatige en onregelmatige golven: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1469, juni 1978.

WL | Delft Hydraulics (1978), Krachten en trillingen bij de hefschuiven in de pijlerdam: vooronderzoek met een sektiemodel, schaal 1:40 in een kleine stroomgoot, projectreferentie M1424, oktober 1978.

WL | Delft Hydraulics (1978), Invloed van onregelmatige golven op de stabiliteit van het stortbed en de dorpelbalk, projectreferentie M1477, december 1978.

WL | Delft Hydraulics (1978), Krachten en afvoercoefficienten bij roosterschuiven: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1327, december 1978.

WL | Delft Hydraulics (1980), Stroombeeldonderzoek bouwfases damaanzet Schouwen, projectreferentie M1658 deel I, maart 1980.

WL | Delft Hydraulics (1980), Belasting bij gelosten en weigerende schuif, projectreferentie M1507, meedere volumes, 1980.

WL | Delft Hydraulics (1980), Belasting bij gelosten, sluitende en weigerende schuif, projectreferentie M1516, meedere volumes, 1980.

WL | Delft Hydraulics (1980), Stroom en golfbelastingen op de dorpelbalk bij diverse schuifstanden, projectreferentie M1593, meedere volumes, 1980.

WL | Delft Hydraulics (1981), Stroombeeldonderzoek bouwfases damaanzet Noord-Bevelabbd, projectreferentie M1658 deel II, maart 1981.

WL | Delft Hydraulics (1981), Stroombeeld- en ontgrondingsonderzoek voor bouwfases A3, H1, K1, M1 en N2, projectreferentie M1690 deel I, september 1981.

WL | Delft Hydraulics (1981), Orienterende berekeningen naar de ontgrondingen in de bouwfase, projectreferentie M1690 deel II, september 1981.

WL | Delft Hydraulics (1981), Vooronderzoek met behulp van een stijf sektiemodel naar stroom en golfbelastingen op dorpelbalken, bovenbalken en plaatliggerschuiven, projectreferentie M1494, meerdere volumes, 1981.

WL | Delft Hydraulics (1980), Belasting bij gelosten en weigerende schuif, projectreferentie M1543, meerdere volumes, 1980.

WL | Delft Hydraulics (1981), Stroombeeldonderzoek voor verscheidene bouwfases, meerdere volumes, projectreferentie M1737.

WL | Delft Hydraulics (1982), Bestorting van ontgrondingskuilen, projectreferentie M1774, maart 1982.

WL | Delft Hydraulics (1982), Stormvloedkering Oosterschelde: belasting in gesloten toestand: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1396, meerdere volumes, 1982.

WL | Delft Hydraulics (1982), Kwasistatische golfbelastingen op de plaatliggerschuif sektie R15, loodrechte golfaanval en stroming: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1509, mei 1982.

WL | Delft Hydraulics (1982), Stroombeeldonderzoek bij drie gesloten schuiven in de Roompot, projectreferentie M1786, juli 1982.

WL | Delft Hydraulics (1982), Reduktie van de ontgrondingen ten gevolge van aanvoer van bodemmateriaal, projectreferentie M1657, november 1982.

WL | Delft Hydraulics (1982), Stroombeeldonderzoek bij een aantal gesloten schuiven, projectreferentie M1878, december 1982.

WL | Delft Hydraulics (1983), Systematisch stroombeeldonderzoek rond bouwfronten, projectreferentie M1898, april 1983.

WL | Delft Hydraulics (1983), Stabiliteit staalslak op blokkenmat, projectreferentie M1245, augustus 1983.

WL | Delft Hydraulics (1983), Stroombeeldonderzoek rond extreme bouwfronten, projectreferentie M1929, november 1983.

WL | Delft Hydraulics (1984), Orienterend stabiliteitsproef en turbulentiemeting negatieve overlap, projectreferentie M1916, februari 1984.

WL | Delft Hydraulics (1984), Stroombeeldonderzoek bij een omgekeerd weigerende schuif, projectreferentie M1945, februari 1984.

WL | Delft Hydraulics (1984), Systematisch stroombeeldonderzoek naar bouwfasefactoren, projectreferentie M1982, mei 1984.

WL | Delft Hydraulics (1984), Bouwfase stabiliteit breukstenen dammen bij stroomaanval, projectreferentie M2028, augustus 1984.

WL | Delft Hydraulics (1984), Stabiliteit bodemverdediging, projectreferentie M2010, december 1984.

WL | Delft Hydraulics (1985), Stabiliteit stortsteen 60/300 kg rondom de damaanzet van Noordland, projectreferentie M1982 deel II, februari 1985.

WL | Delft Hydraulics (1984), Systematisch stroombeeldonderzoek rond schuiffronten, projectreferentie M2037, november 1984.

WL | Delft Hydraulics (1985), Stroomkrachten op Macoma, Taklift 4 en dorpelbalk, projectreferentie M2131, september 1985.

WL | Delft Hydraulics (1985), Stroombeeldonderzoek voor laatste fasen van dorpelbalkplaatsingen, projectreferentie M2135, november 1985.

WL | Delft Hydraulics (1987), Stroombeeldonderzoek rond extreme bouwfronten, projectreferentie Q225, september 1987.

WL | Delft Hydraulics (1987), Gevoeligheidsonderzoek naar de stabiliteit van de toplaat van de overgangskonstuktie aan de zeezijde, projectreferentie Q520, mei 1987.

WL | Delft Hydraulics (1987), Aanvullend stabiliteitsonderzoek voor verschillende bouwfases in de stroomgeul Roompot van het detailmodel Oosterschelde, projectreferentie Q455, december 1987.

WL | Delft Hydraulics (1988), Detailmodel sluitgaten Oosterschelde: overzicht verslagen van het modelonderzoek van de afsluiting tot aan de stormvloedkering, projectreferentie Q0170, januari 1988.

WL | Delft Hydraulics (2007), Zandhonger Oosterschelde: maatregelen ter vergroting van doorstroomcapaciteit en zanddoorvoer stormvloedkering Oosterschelde. Projectreferentie Q4264-3, November 2007.

WL | Delft Hydraulics (1982), Stabiliteit van de randen van de bodemverdedigingen, projectreferentie R1775, februari 1982.

WL | Delft Hydraulics (1984), Stabiliteit van de randen van de bodemverdedigingen: verslag modelonderzoek, projectreferentie R1431, april 1984.

WL | Delft Hydraulics (1983), Inventarisatie ontgrondingsonderzoek – verslag speurwerk, projectreferentie S0562, januari 1983.

Haringvlietsluizen

Deltares (2014), Bijstelling LPH84: Mogelijkheden inzet Haringvlietsluizen ten behoeven van broedvogelbescherming, projectreferentie 1208788-000, januari 2014.

Deltares (2014), Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, projectreferentie 1207941-002, juli 2014.

Deltares (2019), Data-analyse kierproef Haringvliet, projectreferentie 11203735, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1956), Spuisluizen Haringvliet: onderzoek naar de vorm van de vloer en het stortbed: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0506, juni 1956.

WL | Delft Hydraulics (1956), Modelonderzoek afsluiting Haringvliet, projectreferentie M0515, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1959), Voorhaven schutsluis Haringvliet: golddiffraactie: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0629, februari 1959.

WL | Delft Hydraulics (1960), Overbrugging Haringvliet: Situering landhoofden: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0581, Oktober 1960.

WL | Delft Hydraulics (1960), Trillen stuw Haringvliet: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0620, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1960), Tangentiele belasting van de segmentschuiven van de uitwateringsluis in het Haringvliet: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0621, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1960), Golfaanval Haringvlietsluizen, projectreferentie M0399, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1960), Methode voor geleid zinken van de stortbedden van de Haringvlietsluizen: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0765, Oktober 1961.

WL | Delft Hydraulics (1960-1968), Haringvlietsluizen: vormgeving van de sluis en vaststelling van de bodembescherming, projectreferentie M0505, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1966), Systematisch onderzoek ontgronding Haringvlietsluizen, projectreferentie M0715, februari 1966.

WL | Delft Hydraulics (1968), Haringvliet: geleidelijke sluiting: verslag modelonderzoek, projectreferentie M0731, Oktober 1968.

WL | Delft Hydraulics (1970), Afvoerbepaling Haringvlietsluizen: verslag modelonderzoek, projectreferentie M1081, juni 1970.

WL | Delft Hydraulics (1977), buitenmeting spuisluis Haringvliet, projectreferentie M0754, meerdere volumes.

WL | Delft Hydraulics (1991), Case-study beleidsanalyse beheer Haringvlietsluizen, projectreferentie Z0342, juli 1991.

WL | Delft Hydraulics (1994), 3D-numerieke modellering Haringvlietsluizen, projectreferentie Z0686, juli 1994.

WL | Delft Hydraulics (1995), MER Haringvlietsluizen, projectreferentie T1628, december 1995.

Hartelkering

WL | Delft Hydraulics (1992), Bodemverdediging van de stormvloedkering in het Hartekanaal, projectreferentie Q1522, november 1992.

WL | Delft Hydraulics (1993a), Europoortkering met Open Beerdam - stormvloedkering Hartekanaal : trillingsonderzoek met behulp van een sekiemodel, projectreferentie Q1500, april 1993.

WL | Delft Hydraulics (1993b), Aanvaarconstructie Hartelkering: voorstudie hydrodynamische haalbaarheid varianten, projectreferentie Q1500, december 1993.

WL | Delft Hydraulics (1994), Aanvaarconstructie Hartelkering - vol. 1 : techniek en personeel, projectreferentie Q1880, februari 1994.

Maeslantkering

Bakker, A.D., T.H.G. Jongeling, P.A. Kolkman, Yan Shi Wu (1991), Self-excitated oscillations of a floating gate related to the gate discharge characteristics, Uit: XXIV IAHR Congress (Madrid, September 9-13, 1991).

De Jong, R.J. and T.H.G. Jongeling, In-flow vibrations in hydraulic structures, In: Flow-induced vibration: proceedings of the 6th International conference on flow-induced vibration (London, 10-12 April 1995); p. 667-673.

Deltares (2015a), Expert-beoordeling invloed verdieping Nieuwe Waterweg op seiches, projectreferentie 1220363, mei 2015

Deltares (2015b), Expert-interpretatie invloed verdieping Nieuwe Waterweg op Maeslantkering, projectreferentie 1221262, november 2015.

Deltares (2016-2021), A-omgeving Maeslantkering – meerdere volumes, projectreferentie 1230119.

Jongeling, T.H.G. A.D. Bakker, J.M. Nederend (1995), Oscillation of a sector-gate barrier caused by fluid resonance, In: Flow-induced vibration: proceedings of the 6th International conference on flow-induced vibration (London, 10-12 April 1995); p. 131-138

Kerssens, P.J.M.A., J.H. van Oorschot, B. van der Pot (1988), Storm surge barrier in the Rotterdam Waterway: a new approach, from: 6th congress of the Asian and Pacific Regional Division of the IAHR (Kyoto, Japan, July 20-22, 1988). - p. 335-342

WL | Delft Hydraulics (1989), vooronderzoek responsiegedrag sectordeuren, stabiliteit toplaat bodembescherming en drukken in 2D, Q0958, maart-april 1989.

WL | Delft Hydraulics (1989), Onderzoek naar het responsiegedrag van de sectordeuren in een overzichtsmodel, Q0969, juni 1989.

WL | Delft Hydraulics (1990a), Responsieonderzoek sectordeuren, meerdere volumes, Q1140, april-juni 1990.

WL | Delft Hydraulics (1990b), Responsieonderzoek sectordeuren - verbetering vormgeving sectordeuren Q1190, april-november 1990.

WL | Delft Hydraulics (1991), Maeslant Kering - aanvullend onderzoek naar de stabiliteit van het stortbed in een sectiemodel, Q1421, november 1991.

WL | Delft Hydraulics (1992a), Analyse van het responsiegedrag van de sectordeuren met behulp van een rekenmodel, Q1271, mei 1992.

WL | Delft Hydraulics (1992b), Vervolgonderzoek naar stroomsnelheden en stroombeelden in een overzichtsmodel, Q1146, september 1992.

WL | Delft Hydraulics (1992c), Maeslant Kering - detailonderzoek in een sectiemodel voor deurvarianten 6-20, Q1293, september 1992.

WL | Delft Hydraulics (1992-1994) Maeslant Kering, meerdere volumes met uitzoekwerk ter ondersteuning van het ontwerp van de Maeslantkering, projectreferentie: Q1278, februari 1992 – september 1994.

WL | Delft Hydraulics (1994), Maeslant Kering: radiale trillingen in sectordeuren : onderzoek in een sectiemodel, projectreferentie Q1796, april 1994.

WL | Delft Hydraulics (1994-1995), Seiches Europort : analyse en betrouwbaarheid van seiches-berekeningen met PHAROS en TRISULA, meerdere volumes, projectreferentie Z0568, juli 1994 – februari 1995.

Hollandsche IJsselkering

WL | Delft Hydraulics (1954), Stuw in de Hollandse IJssel, Verslag modelonderzoek, projectreferentie M479, januari 1954.

WL | Delft Hydraulics (1980), Trillingsmetingen aan de hefschuit noord van de stormvloedkering te Krimpen a/d IJssel – beknopte studie m.b.t. horizontale trillingen in onderranden van schuiven – verslag buitenmetingen en bureaustudie, projectreferentie R1304, juli 1980.

Balgkering Ramspol

PIANC (2018), Inflatable structures in hydraulic engineering, InCom WG Report n° 166 – 2018, ISBN 978-2-87223-254-3.

Stikvoort, B.C.N. (2020), Ship collision on inflatable weirs - Case study: weirs in the Meuse, MSc Thesis, Delft University of Technology.

WL | Delft Hydraulics (1967), Balgstuw Berkelse Zwet, projectreferentie M912, schaalmodelonderzoek, 1967.

WL | Delft Hydraulics (1989a), Spinakerkering, oriënterend onderzoek, projectreferentie Q0920, schaalmodelonderzoek, februari 1989.

WL | Delft Hydraulics (1989b), Balgstuw, oriënterend onderzoek, projectreferentie Q1025, schaalmodelonderzoek, 1989.

WL | Delft Hydraulics (1993), Balgstuw Ramspol, projectreferentie Q1545, schaalmodelonderzoek, januari 1993.

WL | Delft Hydraulics (1996), Balgstuw Ramspol, projectreferentie Q2099, literatuuronderzoek en bureaustudie, juni 1996.

WL | Delft Hydraulics (1997a), Balgkering Kampen: gedrag van de kering in golfomstandigheden, projectreferentie Q2263, meerdere volumes, schaalmodelonderzoek, juni 1997.

WL | Delft Hydraulics (1997b), Golfcondities Balgstuw Ramspol, projectreferentie H3185, bureaustudie, april 1997.

WL | Delft Hydraulics (1997c), Balgkering Ramspol. Functioneren van de kering in gebruiksomstandigheden, projectreferentie Q2258A, schaalmodelonderzoek, december 1997.

WL | Delft Hydraulics (1997d), Hydraulic aspects of the dimensioning of geosystems, project reference H3214, December 1997.

WL | Delft Hydraulics (1998a), Balgkering Ramspol: modified design of abutments, projectreferentie Q2258B, schaalmodelonderzoek, februari 1998.

WL | Delft Hydraulics (1998b), Ribbelvloer van de Balgstuw Ramspol, projectreferentie Q2239, schaalmodelonderzoek, juni 1998.

WL | Delft Hydraulics (1998), Balgkering Ramspol: modified design of abutments; big fold option, projectreferentie Q2258C, schaalmodelonderzoek, april 1998.

WL | Delft Hydraulics (2000a), Balgkering Ramspol: nylonrubberdoek in combinatie met ‘small wave’ option, projectreferentie Q2547, schaalmodelonderzoek, mei 2000.

WL | Delft Hydraulics (2000b), Stromingsgeïnduceerde trillingen in balgstuwen, projectreferentie Q2624/Q2677, speurwerk, juni 2000.

Bouwdienst Rijkwaterstaat en WL | Delft Hydraulics (2005), Hydraulische aspecten van balgstuwen en balgkeringen, projectreferentie Q3864, december 2005.

De Jong, M.P.C. (2004), Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins, Delft University of Technology ISBN 90-9017925-9.

Deltares (2020), Waterstandsslingeringen en meervoudig sluiten Balgkering Ramspol - Expert-interpretatie van oorzaken en oplossingen meervoudig sluiten SVKR, 11205263-004-GEO-0001, 1 december 2020.

Deltares (2021), A-omgeving SVKR – meerdere volumes, projectreferentie 11203532.

Jongeling, T.H.G. and N.H. Rövekamp (1999), Wave-induced response of inflatable barrier, Hydraulic engineering for sustainable water resources management at the turn of the millennium: proceedings of the XXVIII IAHR biennial congress (22-27 August 1999, Graz, Austria), theme B: Hydraulic structures; paper B067.

Storm surge barrier Venice (MOSE)

Jongeling, T.H.G. (1993), Wave-induced resonance of a flap-gate barrier, from: Structural Dynamics, Proceedings of the Second European Conference on Structural Dynamics, EURODYN '93, Trondheim, Norway, 21-23 June 1993.

Jongeling, T.H.G. and P.A. Kolkman (1995), Subharmonic standing cross waves leading to low-frequency resonance of a submersible flap-gate barrier, Proceedings of the 6th international Conference on flow-induced vibration, 1995, London, United Kingdom.

WL | Delft Hydraulics (1988), Study on the influence of the inclination angle and the gate side shape on gate response – report on scale model investigation, project reference Q0744, November 1988.

WL | Delft Hydraulics (1990), Study on gate response, forces in the gate supports and leakage discharge – report on scale model investigations, Project Reference Q1033, November 1990.

WL | Delft Hydraulics (1992-1993), Difesa della Laguna di Venezia dalle acque alte, multiple volumes, project reference Q0020, August 1992 – February 1993.

WL | Delft Hydraulics (1999), Venice Barriers – assessment of the impact of alternative measures, multiple volumes, project reference H3617, December 1999.

WL | Delft Hydraulics (2003), Venice Flood Barrier – 2nd opinion, project reference H4248, December 2003.

Deltares (2018), Overview storm surge barriers. Project reference 11201883.

Tosi, L., Teatini, P., Strozzi, T. (2013). Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Sci. Rep.* 3, 2710; DOI:10.1038/srep02710.

Ungiesser, G. Bajo, M. Ferrarin, C., Cucco, A., Lionello, P., Zanchettin, D., Papa, A., Tosoni, A., Ferla, M., Coraci, E., Morucci, S., Crosato, F., Bonometto, A., Valentini, A., Orlic, M., Haigh, I.D., Woge, Nielsen, J.W., Bertin, X., Fortunato, A.B., Gómez, B.P., Fanjul, E.A., Paradis, D., Jourdan, D., Pasquet, A., Mourre, B., Tintoré, J., Nicholls, R.J. (2020) The prediction of floods in Venice: methods, models and uncertainty. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-361>, in review, 2020.

Storm surge barrier St. Petersburg

Deltares (2008), Hydrodynamic modelling for the St. Petersburg flood protection barrier: scenario analysis for reducing the width of the D3 temporary navigation passage, project reference Z4666, June 2008.

Gerritsen, H., R.R. Mikhailenko, M. Vis, M. Hiltunen (2005), Flood protection, environment and public participation - case study St Petersburg flood protection barrier, included in: Flooding and environmental challenges for Venice and its lagoon: state of knowledge / ed. by C.A. Fletcher and T. Spencer (2005). - Chapter 41; p. 341-351

Villars, M.T., H. Gerritsen, K.V. Heynert, B. Kleiss, K. Koster (2007), A demonstrator for management of the St. Petersburg flood protection barrier, Harmonizing the demands of art and nature in hydraulics : proceedings of the 32nd Congress of IAHR (Venice, Italy, July 1 - 6, 2007).

WL | Delft Hydraulics (2001-2002), Saint Petersburg flood protection barrier: final environmental impact assessment report, multiple volumes, project reference Z3194.

WL | Delft Hydraulics (2002), Completion of Saint Petersburg flood protection barrier: Technical feasibility study, multiple volumes, project reference Z2962, September 2002.

WL | Delft Hydraulics (2004), Hydraulic modelling for the St. Petersburg Flood Protection Barrier: numerical model simulations of scenarios for closing and opening of the gates, project reference Q3393, July 2004.

WL | Delft Hydraulics (2005), Operational management of the Saint Petersburg flood protection barrier: report on the International Workshop, 19-20 May 2005, Saint Petersburg, Russia, July 2005.

WL | Delft Hydraulics (2007), St. Petersburg Demonstrator: functional description and specifications, project reference Z4190, July 2007.

Other barriers

Deltares (2018), Quickscan of Boston Barrier plan of University of Boston, Deltares document reference: I1000141-000-HYE-0001, project reference 11202795.

ISTORM (Rijkswaterstaat and Deltares) (2018), Overview storm surge barriers, document reference 11201883-002-ZKS-0001, 11 January 2018.