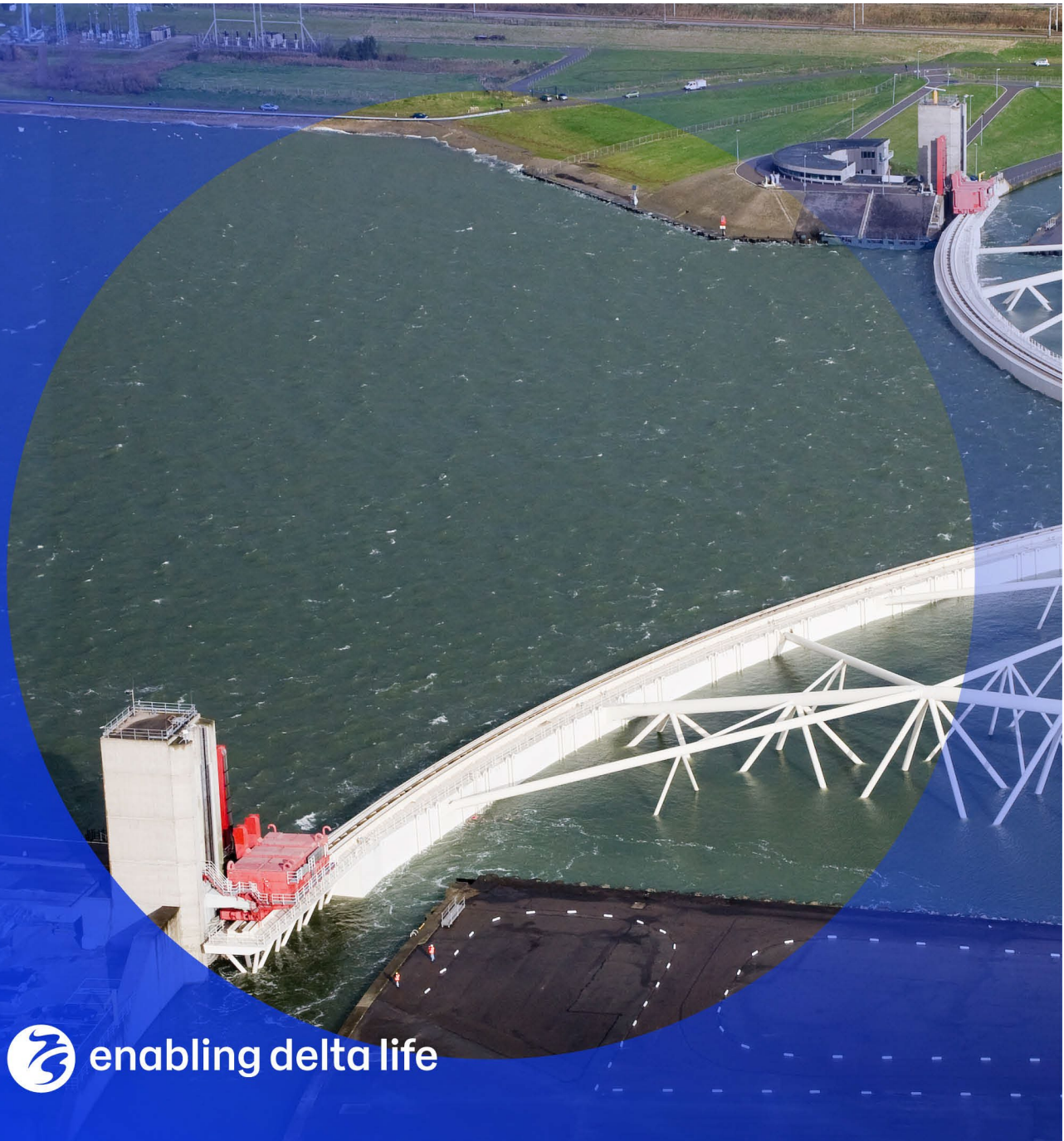


Seiche-statistiek Maeslantkering

Overzicht van voorgaande studies, toepassing vergrote meetdataset en vooruitblik



Seiche-statistiek Maeslantkering

Overzicht van voorgaande studies, toepassing vergrote meetdataset en vooruitblik

Auteur(s)

M.P.C. de Jong

Bron achtergrondafbeelding kافت: <https://beeldbank.rws.nl>,
Rijkswaterstaat / Joop van Houdt,
Verificatiesluiting Maeslantkering 09-11-2007

Seiche-statistiek Maeslantkering

Overzicht van voorgaande studies, toepassing vergrote meetdataset en vooruitblik

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	M.C. Borgdorff
Referenties	Initieel SITO-PS IenW Projectplan 2024 – Seiches MLK, programmeren onderwerp (eind 2023) Gedetailleerd projectplan SITO-PS – Seiches MLK, vastleggen uitvoeringsafspraken (2024)
Trefwoorden	Seiches, havenresonanties, Maeslantkering, Maeslant, Kering, statistiek, opzet

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	28-10-2024
Projectnummer	11210307-000
Document ID	11210307-000-HYE-0001
Pagina's	91
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	M.P.C. de Jong	

Samenvatting

Deze rapportage beschrijft een studie naar de statistiek van seiches in het Rotterdamse havengebied en hun uitwerking op de gesloten Maeslantkering (MLK). Seiches zijn lange staande golven in (half-)afgesloten waterdelen, zoals in havens. Ook in Rotterdam treden zij op, vooral in het westelijke deel van de haven, met slingerperiodes in de orde van een uur. Seiches hebben een cruciale invloed op de hydrodynamische belastingen die op de gesloten MLK optreden. Die invloed bestaat vooral uit het kunnen veroorzaken van een groot negatief verval over de gesloten kering, dat wil zeggen met een hogere waterstand aan de rivierzijde. Een dergelijke belasting kan dit type stormvloedkering maar beperkt opnemen. Als onderdeel van het ontwerp van de MLK is dit ondervangen in het operationele proces door via de aansturing van de kering er voor te zorgen dat die vervalsituatie beperkt wordt door de kering direct op te laten drijven zodra er een negatief verval begint te ontstaan.

De seiches in Rotterdam zijn tijdens de ontwerpfase van de MLK en daarna in meerdere studies onderzocht. Beperkte databeschikbaarheid is doorgaans de belangrijkste limiterende factor daarbij gebleken. Zo kon er tijdens het ontwerp van de MLK slechts maximaal 13 jaar aan meetgegevens worden ingezet voor het afleiden van seiche-statistiek. Seiches vormen een complex fenomeen waar inmiddels veel meer over bekend is geworden, maar waar ook nog vele aspecten onbekend van zijn of nog niet goed vastgesteld konden worden.

De reden om nu het onderwerp seiches (mogelijk meerjarig) te programmeren onder SITO-PS, is de wens van Rijkswaterstaat (RWS) om een herijking van de kennis en inzichten rondom seiches te maken. De meest recente voorgaande studie op dit onderwerp voor de MLK is namelijk van 2007. Daarin kon destijds 17 jaar aan nieuwe meetgegevens ingezet worden voor het afleiden van vernieuwde seiche-statistiek voor de MLK. Naast de inzet van meer meetgegevens zal als aanvullend aspect nu worden nagaan of er met nadere achtergrondkennis over seiches mogelijkheden zijn om het analyse-proces van seiches te optimaliseren.

Voor de analyse van de seiches in Rotterdam worden, ook in alle voorgaande studies, waterstandsmetingen van een vast meetpunt nabij het gesloten einde van het Calandkanaal gebruikt, namelijk Rozenburgse Sluis (ROZ). Daar treden de seiches in dit gebied het sterkst op, onafhankelijk van of de MLK gesloten is of niet. In de 18 jaar aan nieuwe meetgegevens op die locatie (2006-2023) zijn in deze studie 170 seiche-events geïdentificeerd, die nu kunnen worden toegevoegd aan de dataset van de studie uit 2007 (de 'oorspronkelijke dataset'). In die eerdere studie werden 127 events geïdentificeerd in de 17 voorafgaande jaren (1989-2005).

Naast die data-analyses is het uit acht stappen bestaande analyse-proces van de seiches voor de MLK in kaart gebracht, startend met gemeten waterstanden tot aan de (operationele) impact van seiches op de MLK. Voor het bijeenbrengen van inzichten uit voorgaande seiche-studies voor de haven van Rotterdam is bovendien een beknopt literatuuroverzicht aangemaakt. Die overzichten bevatten aanknopingspunten voor mogelijke vervolgstudies onder SITO-PS, indien door RWS gewenst. De hoofddoelstelling van de hier beschreven studiefase in 2024 was het updaten van de seiche-statistiek voor de MLK, uitgaande van de inmiddels tot aan eind 2023 beschikbare meetgegevens. Effectief betekent dat er een update en evaluatie is gemaakt van de eerste vier analyse-stappen, te weten:

1. verwerken van meetgegevens en identificeren van seiches op vaste meetlocatie ROZ
2. bepalen van de maximale scheve opzet tijdens een event waarin een seiche optreedt
3. afleiden gecombineerde statistiek scheve opzet & seiche-amplitude op de vaste locatie
4. vertalen van seiche-statistiek naar locatie van de gesloten MLK

Om die stappen uit te voeren zijn binnen deze studie seiche-events gekwantificeerd. Hiervoor is bij elk event de maximale seiche-amplitude en maximale opzet afgeleid. Vervolgens hebben wij de consistentie van de dataset van seiche-amplituden geverifieerd, gebruikmakend van dezelfde statistische test als is ingezet in voorgaande seiche-studies door Deltares voor de MLK (voor het laatst in 2007). Die test gaf aan dat de data consistent zijn. Echter, inmiddels raden wij aan om die verificatie uit te breiden met een ander type consistentietest.

In deze studie is een nieuwe rekenwaarde voor de seiche-amplitude voor de MLK berekend op basis van de aanpak zoals ingezet voor het ontwerp van de MLK. Gebruikmakend van de oorspronkelijke en nieuwe dataset gecombineerd wordt daarmee een vergelijkbare uitkomst gevonden als oorspronkelijk is vastgesteld tijdens het ontwerp van de MLK. Daarbij hebben wij ook een analyse gemaakt van de verandering in de seiche-response als gevolg van de aanleg van Maasvlakte 2 (2012).

Merk op dat de nieuwe uitkomst weliswaar vergelijkbaar is met de oorspronkelijk ingezette ontwerpwaarde voor de seiche-amplitude voor de gesloten MLK, maar deze is dan ook gevonden op basis van dezelfde statistische aanpak. De hier gemaakte uitwerkingen en overzichten geven aan dat er in die oorspronkelijke (data-)aanpak vele onzekerheden, beperkingen en aannames zitten die inmiddels opnieuw afgewogen en mogelijk aangepast kunnen worden. Bovendien is de statistische afleiding van de seiche-amplitude, zoals hier gemaakt in relatie tot negatief verval, iets anders dan de statistiek van vervalwaarden over de kering. Dat laatste vraagt een ander soort analyse en aanpak.

De drie operationele sluitingen van de MLK tot nu toe (2007, 2018, 2023) gaven in deze studie voor het eerst de mogelijkheid om de verhouding tussen de seiche-amplitudes op locatie ROZ en die voor de gesloten MLK op een directe manier te vergelijken. Die verhouding zou in principe gelijk moeten zijn aan de eerder theoretisch afgeleide vertaalfactor tussen beide locaties. Die sluitingen lieten een verhouding in seiche-amplitude (hoogte) zien van circa 0.54. Dat is daarmee een onderbouwing van de oorspronkelijk ingezette 0.64, inclusief enig conservatisme.

In de hier beschreven studiefase is een eerste update en evaluatie gemaakt van de eerste vier van de totaal acht stappen van het analyseproces van de seiches voor de MLK. De werkzaamheden hebben veel resultaten en inzichten opgeleverd, waaronder een nadere verificatie van de oorspronkelijke ontwerpwaarde van de seiche-amplitude. Maar de uitkomsten geven ook aan dat de bestaande inzetwijze van de dataset en de oorspronkelijke analyse-aanpak meerdere beperkingen, aannames en onzekerheden in zich hebben. Dat is daarmee de belangrijkste reden voor een eventueel gewenst vervolgonderzoek. Op zijn minst zou dat een verdere verificatie en onderbouwing geven van de bestaande operationele werkwijze van de MLK en mogelijk dat er kansen ontstaan voor het vereenvoudigen van de aansturing van de kering. Dat zou kunnen bijdragen aan het verlagen van de faalkans van de MLK.

Summary

This report describes a study of the seiche statistics in Rotterdam port basins and the impact of seiches on the Maeslant Barrier under closed conditions (in Dutch: Maeslantkering, MLK). Seiches are long, standing waves in (partially) enclosed water bodies, such as port basins. They also occur in Rotterdam, primarily in the western port area, with oscillation periods in the order of one hour. Seiches have a crucial impact on the hydrodynamic loads that act on the MLK in its closed position. That influence consists primarily of potentially triggering a large negative head difference over the closed barrier, which means a higher water level on the river side (east) than on the North Sea Side (west). This type of storm surge barrier can only take such a loading type to a limited extent. For the MLK this has been solved by implementing a specific operational process, in which a negative head difference is minimised in practice by floating up the retention walls of the barrier as soon as such a loading situation starts to arise.

Seiches in Rotterdam have been studied during the design phase of the MLK and also in multiple studies since. Sparsely available data has generally been the limiting factor in those studies. As an example: during the design of the MLK only 13 years of measurement data (of water levels) was available for deriving local seiche statistics. Even though much more has become known about this specific type of waves, seiches still represent a complex phenomenon. This is because several aspects remain unclear or could not be determined yet.

The reason for including the subject of seiches (possibly for multiple years) under SITO-PS, is the aim of Rijkswaterstaat (RWS) to re-establish the knowledge and insights of seiches for the MLK. The most recent previous study into this subject dates from 2007. Back then, 17 years of new measurement data were available for updating the seiche statistics for the barrier. In the present study more measurement data will be applied, in addition to considering whether further background information and knowledge of seiches may create possibilities to simplify and optimise the analysis approach used for this type of waves.

As in all previous studies of seiches in Rotterdam, the present study considered water level measurements at a fixed location near to the closed end of the Caland Canal, called Rozenburgse Sluis (ROZ). That is the location within the Rotterdam port area where seiches occur with the largest amplitudes, whether the MLK is closed or not. In the 18 year of new measurement data (2006-2023) we have identified 170 seiche events, which now can be added to the dataset of 2007 ('original dataset'). A total of 127 events were identified in that previous study based on the 17 years prior (1989-2005, 'new dataset').

The eight steps that make up the analysis process of seiches for the MLK have been summarised to form a starting point for the study phase in 2024, described here. This process starts with measured water levels and goes up to the (operational) impact of seiches on the MLK. This has been supplemented with a concise literature overview of earlier seiche studies for the port of Rotterdam. Those overviews illustrate key points that may ask for a follow-up study under SITO-PS, if selected by RWS. The main aim of the study phase in 2024 – described in the present report – was updating the seiche statistics for the MLK, now based on measurement data (at ROZ) available up to the end of 2023. Effectively, this means that an update and partial re-assessment has been made of the first four process steps:

1. processing measurement data and identifying events at a fixed location (ROZ)
2. determine the maximum surge that occurred during each identified seiche event
3. derive combined statistics of surge and seiche amplitudes at reference location
4. translate seiche statistics to the location of the closed MLK

These steps involved quantifying seiche-events, which consisted of deriving the maximum seiche amplitude and surge for each of the seiche episodes identified. We have verified and confirmed the consistency of the dataset of seiche-amplitudes, using the same test method used in earlier seiche studies by Deltares for the MLK (most recently 2007). However, we now recommend extending that analysis by applying another type of consistency test.

The original approach as used during the design of the MLK was applied in the present study to calculate an updated (design) value of the seiche-amplitude for the barrier. Using the original and the new dataset combined this resulted in a value for that parameter that is comparable to the value as calculated and applied for the original design of the barrier. As part of that approach we have also analysed the change in seiche-response caused by the major port geometry change as a result of the land reclamation 'Maasvlakte 2' (in 2012).

Note that the new outcome may be similar to the originally applied value, but a large change in outcome may also not be expected, considering that we re-used the original calculation method. The overviews made as part of this study indicate that the original calculation method contains multiple uncertainties, limitations and assumptions, that by now may be re-considered. Moreover, the statistical calculation of the seiche amplitude, as considered here in the context of negative head difference, differs from deriving statistics of head differences that will apply to the MLK during a closure. Determining those statistics will require a different approach.

The three operational closures of the MLK up to now (2007, 2018, 2023) have made it possible to analyse within the present study, for the first time, the actual ratio between the seiche amplitudes at ROZ and at the closed MLK. That ratio in principle should be equal to the theoretically derived translation factor between those two locations. The closures in practice showed a ratio of the seiche amplitudes (heights) of around 0.54. This appears to be a confirmation of the originally derived and applied value of 0.64, including some conservatism.

The study phase described here consisted of an update and assessment of the first four of a total of eight steps that are part of the analysis process of seiches in relation to the MLK. The study tasks have provided many results and insights, including a further verification of the originally applied design value of the seiche amplitude. However, the outcomes also indicate that the existing way of using the dataset of seiche events and the original analysis approach come with multiple limitations, assumptions and uncertainties. That would be the primary reason for a possible follow-up study. As a minimum, that would give a further verification of and possibly further support for the existing operational use of the barrier. It may also show possibilities for simplifying the operational control of the barrier. That could contribute to lowering the operational failure probability of the MLK.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Summary	6
1	Inleiding	10
1.1	Context en aanleiding	10
1.2	Studiedoel	10
1.3	Studie-inhoud en rapportopbouw	11
1.4	Projectteam	12
2	Processtappen inzet seiche-statistiek	13
3	Overzicht voorgaande studies seiche-statistiek	16
4	Beschikbare gegevens	18
4.1	Meetgegevens uit het veld	18
4.2	Gegevens en informatie uit eerdere studies van Deltares	18
5	Verwerking gegevens en identificatie events	19
5.1	Aanpak gevolgd voor identificatie seiche-events	19
5.2	Voorbeelden wavelet-spectra	20
6	Consistentiecheck seiche-amplituden	26
6.1	Inleiding	26
6.2	Aanpak consistentiecheck	26
6.3	Overzicht basis-kenmerken dataset met seiche-amplituden	27
6.4	Invloed van afgeronde waarden	28
6.5	Uitkomsten – Run-tests uitgevoerd op sets van seiche-amplituden	29
6.5.1	Zonder weergave van pre-afrondingsvariatie	29
6.5.2	Met weergave van pre-afrondingsvariatie	30
6.6	Conclusie consistentie-check dataset seiche-amplituden	31
7	Check op vertaalfactor ROZ – MLK	32
7.1	Vertaalfactor op basis van versterkingsspectra	32
7.1.1	Oorspronkelijke afleiding en inzet vertaalfactor	32
7.1.2	Inzet meest recent berekende versterkingsspectra voor afleiden vertaalfactor	33
7.1.3	Aanvullende observaties naar aanleiding inzet versterkingsspectra uit Deltares (2014b)	35
7.1.4	Nadere analyse oorzaken verschil oorspronkelijke en nieuwe waarde vertaalfactor	36
7.2	Vertaalfactor op basis van operationele sluitingen MLK	38
7.3	Afsluiting check vertaalfactor	39

8	Update van seiche-statistiek MLK	40
8.1	Uitgangspunten	40
8.2	Oorspronkelijke en nieuwe dataset	42
8.3	Voor en na openen van doorgang naar MV2	43
8.4	Totale dataset	44
9	Conclusies en vooruitblik	46
9.1	Samenvatting context en doel	46
9.2	Belangrijkste conclusies	46
9.2.1	Overzicht analyse-stappen seiches en hun impact op de MLK	46
9.2.2	Beknopt overzicht voorgaande seiche-studies	46
9.2.3	Werkzaamheden voor Stap 1 – 4	47
9.3	Potentiële aanknopingspunten voor vervolganalyses en her-evaluaties	50
	Referenties	53
A	Seiches en hun relevantie voor de MLK	55
B	Samenvatting statistische methode a_{seiche}	56
B.1	Omschrijving principe	56
B.1.1	Twee hoofddelen van de methode	56
B.1.2	Deel 1: Regressie opzet en seiche-amplitude	56
B.1.3	Deel 2: Tweedimensionale kansdichtheidsfunctie opzet en seiche-amplitude	57
B.2	Berekening van seiche-statistiek op basis van 2D-kdf	58
B.3	Rekenprogramma	61
C	Beschrijving Run-test data-consistentie	62
D	Data oorspronkelijk ingezet voor ontwerp MLK	63
E	Data uit WL Delft Hydraulics (2005a)	67
F	Data uit WL Delft Hydraulics (2007)	75
F.1	Ruwe data/alle geïdentificeerde seiche-gevallen	75
F.2	Selectie seiche-gevallen voor toevoegen aan dataset seiche-statistiek	76
G	Nieuwe dataset seiche-events 2006-2023	77
H	Versterkingsspectra PHAROS (Deltares, 2014b)	83

1 Inleiding

1.1 Context en aanleiding

Deze studie heeft betrekking op de seiches in de haven van Rotterdam en hun invloed op de inzet van de Maeslantkering (MLK). In Bijlage A staat een korte toelichting over het fenomeen seiches en op welke wijze zij de hydrodynamische belastingen op de MLK op een kritieke wijze beïnvloeden. Het gaat daarbij vooral om het versterken van een negatief verval over de kering, dus een hogere waterstand aan de rivierzijde dan aan de zeezijde. Het keringstype van de MLK kan een kracht in die richting in veel beperktere mate opnemen dan een hogere waterstand vanaf zee. Bij een zeer grote negatieve vervalkracht zouden de bolscharnieren zelfs uit hun kassen getrokken kunnen worden. Seiches hebben daarmee een significante en directe invloed op het constructieve falen van de MLK.

Vanaf de start van plannen voor een afsluitbare kering in de Nieuwe Waterweg zijn studies uitgevoerd om het fenomeen seiches te doorgronden en om de impact van seiches op de stormvloedkering te bepalen, gecombineerd met ontwikkelen van maatregelen om die te mitigeren. Ook na ingebruikname van de MLK zijn er meerdere seiche-studies uitgevoerd (Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van voorgaande studies). Opvallend is dat ten tijde van het ontwerp van de MLK in de definitieve analyse van seiches slechts 13 jaar gearchiveerde meetdata ingezet kon worden om statistiek van seiche-amplituden af te leiden (RWS, 1999). In vervolgstudies (WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a, 2006, 2007) is gekeken naar meer jaren met nieuwe meetgegevens uit de Rotterdamse haven en is uiteindelijk 17 jaar aan digitale gegevens ingezet voor het updaten van de seiche-statistiek. Inmiddels zijn we 18 jaar verder, en kunnen de meetgegevens uit die jaren aan de statistische analyse worden toegevoegd.

In de beoordeling LBO-1 (RWS-Ontwerpt, 2022) is door RWS geconstateerd dat het gewenst is de kennis over seiches te actualiseren voor de huidige situatie en status van de MLK (constructieve betrouwbaarheid), maar ook dat het met het oog op de toekomstige instandhoudings- en vervangingsopgave zinvol is om te kijken of er voldoende grond is voor wijziging of optimalisatie van het functioneren van de kering, zoals in relatie tot besturing of onderhoud.

1.2 Studiedoel

De onderliggende overall doelstelling voor dit onderwerp, en de reden om het onderwerp seiches op dit moment (meerjarig) te programmeren onder SITO-PS, is het maken van een update (herijking) van de kennis en inzichten rondom het fenomeen seiches. Als aanvullend aspect kan dan ook worden nagegaan of met nadere achtergrondkennis over seiches het mogelijk is om de modellering van de invloed van seiches op de MLK te vereenvoudigen. Op die manier kan mogelijk ook de aansturing van de kering minder complex worden, al is dat geen hoofddoel van deze studie. Indien dat toch mogelijk blijkt, dan zou dat naar verwachting bijdragen aan een lagere faalkans van de kering (kans op niet sluiten bij sluitvraag) en het zou de inzet van operationele expertteams efficiënter maken.

De hoofddoelstelling van de hier beschreven studiefase in 2024 is het updaten van de statistiek van seiches uitgaande van de inmiddels tot aan eind 2023 beschikbare meetgegevens uit de haven van Rotterdam. Daarnaast is een overzicht gemaakt van de stappen in het analyseproces van gemeten waterstanden tot aan (operationele) impact op de MLK, grofweg: verwerken van meetdata, seiche-events identificeren en kwantificeren, seiche-statistiek afleiden (alle op locatie Rozenburgse Sluis, ROZ), vertaling van deze statistiek maken naar locatie MLK, vaststellen van inwerking op de kering en impact op de aansturing van de kering.

Bij dat overzicht is aangegeven waar in de voorgaande studies en aanpakken de meest invloedrijke en mogelijk conservatieve aspecten en keuzes zitten. Zo zijn aanknopingspunten geïdentificeerd voor nadere analyses en her-evaluaties, indien door RWS gewenst.

1.3 Studie-inhoud en rapportopbouw

De hier beschreven studie bestaat uit twee hoofdonderdelen:

1. beknopte verkenning van de stappen in het proces van veldmetingen tot aan de complexe aansturing van de MLK, aangevuld met een beknopt literatuuroverzicht;
2. vernieuwing van de seiche-statistiek voor de gesloten MLK op basis van een vergrote dataset van seiche-amplituden en waarden voor de scheve opzet¹.

In Hoofdstuk 2 wordt een samenvattend overzicht gegeven van de hoofdstappen om te komen van meetreeksen van waterstanden in de Rotterdamse haven naar de (complexe) aansturing van de MLK voor seiches. Die oorspronkelijke aanpak is opgezet tijdens de ontwerpfase van de MLK, mede naar aanleiding van de betrekkelijk late signalering van de invloed van seiches op het negatieve verval over de kering (Rijkswaterstaat, 1999, Bijlage A). Het nu gemaakte overzicht benoemt de belangrijkste onderliggende aannames, (model)keuzes en parameterinstellingen. Die kunnen in aankomende jaren onder SITO-PS nader worden geanalyseerd en her-geëvalueerd. In de huidige studiefase in 2024 is gewerkt aan de eerste vier van de totaal acht hoofdstappen (Hoofdstuk 2). De uitkomsten van die werkzaamheden staan beschreven in de latere hoofdstukken van deze rapportage. Daarbij wordt vooral nog veelal voortgebouwd op de bestaande aanpakken en instellingen. Mogelijke grotere updates en aanpassingen vallen niet binnen de huidige studie.

Hoofdstuk 3 beschrijft de uitkomst van een korte literatuurstudie en geeft een overzicht van eerdere studies naar de seiches in het Rotterdamse havengebied, voor de Maeslantkering en/of studies gelinkt aan methodes ingezet voor de analyse van de seiches binnen het Rotterdamse havengebied. Dat overzicht beslaat het interval van de oorspronkelijke ontwerpfase van de MLK tot aan het moment van deze rapportage. Voor de studies waarin specifiek naar statistiek van seiche-amplitudes is gekeken wordt een aanvullend overzicht gegeven van de ingezette jaartallen met data en het aantal daarbinnen geïdentificeerde events.

De beschikbare (meet)gegevens voor de huidige studie staan opgesomd in Hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft het proces van de identificatie van seiche-events in het interval met beschikbare nieuwe meetgegevens (2005-2023) en het afleiden van de maximale seiche-amplitude en bijbehorende hoogste opzet per event. Een eerste verificatie van de consistentie van de nieuwe set van seiche-amplitudes (2006-2023) ten opzichte van de eerder afgeleide dataset (1989-2005, WL | Delft Hydraulics, 2007) staat beschreven in Hoofdstuk 6. In dat hoofdstuk wordt ook een eerste verificatie gedaan van de consistentie van die dataset van voor en na de aanleg van de doorgang naar Maasvlakte 2 (MV2, 25 november 2012).

De vertaling van seiche-amplituden van ROZ naar de gesloten MLK wordt in Hoofdstuk 7 op basis van eerder aangemaakte (Deltares, 2014b) versterkingspectra van die locaties geverifieerd. Daarin is voor het eerst de invloed van MV2 meegenomen. De afleiding van nieuwe statistiek van seiche-amplituden voor de gesloten MLK staat in Hoofdstuk 8. De rapportage sluit af in Hoofdstuk 9 met daarin een overzicht van de belangrijkste conclusies uit deze studie. Daarnaast bevat dat laatste hoofdstuk een lijst met geïdentificeerde

¹ De scheve opzet is het verschil tussen een gemeten hoogwater en het bijbehorende (voorspelde) astronomische hoogwater. Door interactie van de getijdeweg met de wind-geïnduceerde opzet is het tijdstip van het gemeten hoogwater en die van het bijbehorende voorspelde hoogwater doorgaans niet gelijk en daarom wordt er over 'scheve' opzet gesproken. De 'rechte' opzet is het momentane verschil tussen gemeten waterstand en astronomisch getij. Vanwege de genoemde interactie van de getijdeweg met de opzet zit in de rechte opzet het effect van zowel de 'echte' opzet als van de faseverschuiving van het getij. Dat maakt de scheve opzet een zuiverdere weergave van de opzet.

aanknopingspunten voor mogelijke vervolgonderzoeken, deels op basis van de acht hoofdstappen van de bestaande aanpak voor seiches voor de MLK (Hoofdstuk 2) en deels op basis van de uitkomsten en inzichten uit de hier beschreven studiefase 2024.

De rapportbijlagen geven achtergrondinformatie over seiches (Bijlage A), over de ingezette methode voor het afleiden van seiche-statistiek (Bijlage B) en over de methode die ingezet is voor de consistentie-check van seiche-amplituden (Bijlage C). Verdere bijlagen bevatten ten bate van vastlegging overzichten van datasets van seiche-events (seiche-amplituden en opzet) geïdentificeerd en ingezet in voorgaande (Bijlage D–F) en in de huidige studie (Bijlage G). De versterkingspectra uit Deltares (2014b), die in Hoofdstuk 7 worden ingezet, zijn hier ter volledigheid uit die eerdere rapportage overgenomen en opgenomen in Bijlage H.

1.4 Projectteam

De volgende medewerkers waren betrokken bij de hier beschreven studie.

Deltares projectteam:

- M.P.C. de Jong, Expert Adviseur – projectleider, analyses, rapportage
- S.P. Reijmerink, sr. Adviseur/Onderzoeker – expert data-analyse, golven
- J. Groeneweg, Expert Adviseur – expert golven, coördinator BOI-werkzaamheden (QA)

RWS-medewerkers:

- M.C. Borgdorff (coördinator vanuit RWS)
- S.G. van den Berg (adviseur waterbouw)
- A.M.R. Bakker (adviseur risicoanalyse)

2 Processtappen inzet seiche-statistiek

Het proces om te komen van waterstandsmetingen, via statistiek van seiches en uiteindelijk naar hoe de invloed van seiche opgevangen wordt bij de operationele inzet van de MLK bestaat uit een complexe set van acht hoofdstappen, of hoofdonderdelen. Als uitgangspunt voor de werkzaamheden binnen dit (meerjarig) onderdeel van SITO-PS wordt in dit hoofdstuk eerst een overzicht gegeven van die stappen.

Stap 1 – 4 van het proces zijn op de volgende pagina opgenomen in Tabel 2-1 en beslaan primair de inzet van meetdata en aanmaak van statistiek van seiche-amplituden ter plaatse van de gesloten MLK. Tabel 2-2 (op Pagina 15) beschrijft Stap 5 – 8. Die tweede set van stappen gaat vooral over het weergeven van de invloed van seiches naast andere soorten (hydrodynamische) belastingen op de MLK, de invloed van seiches op het negatieve verval en hoe dat in de operationele inzet en aansturing van de MLK ten tijde van het ontwerp van de kering is opgelost.

Bij elk van de acht stappen zijn de belangrijkste aannames, instellingen en (model)keuzes vermeld. De gedetailleerde achtergrond van die parameters is veelal uitgebreid en complex en is om die reden hier niet integraal opgenomen, maar is terug te vinden in de rapporten die in Hoofdstuk 3 in het literatuuroverzicht zijn opgenomen. Veel van die uitgangspunten en aannames zullen nog steeds opgaan, maar mogelijk dat andere onderdelen in vervolgstudies her-geëvalueerd kunnen worden. Aanleiding daarvoor kan bestaan uit voortschrijdende inzichten rondom het fenomeen seiches, zoals verkregen in de hier beschreven studiefase 2024, of bijvoorbeeld ervaring met inzet van de MLK in de praktijk. De aspecten die mogelijk her-geëvalueerd zouden kunnen worden staan in Paragraaf 9.3 bijeengebracht.

In de tabellen staan ook meerdere aspecten van het rekenmodel RASFLOW (of R/Flow) genoemd. Dat is het simulatiemodel dat oorspronkelijk door de bouwcombinatie van de MLK (BMK, BouwcombinatieMaeslantKering) is ontwikkeld en ingezet voor ontwerp, bouw en optimaliseren van de operationele inzet van de kering. De code van dat model is in slapend beheer bij Deltares in opdracht van RWS. De software is niet eenvoudig meer in te zetten aangezien het een oudere Windows-versie vereist. Bovendien is de codetaal waarin het model is geschreven verouderd. Meer details staan beschreven in Deltares (2019) en referenties daarin vermeld. In dat project voor RWS heeft Deltares een deel van de functionaliteit van RASFLOW opnieuw aangemaakt in 'levende' softwarepakketten van Deltares.

Zoals geïntroduceerd in Paragraaf 1.3, is in het hier gerapporteerde eerste jaar van SITO-PS 'Seiches MLK' primair gewerkt aan Stap 1 – 4 (Tabel 2-1), beschreven in de volgende hoofdstukken. In die hoofdstukken (en in Bijlage B) staat een nadere beschrijving van die stappen, waar in dit hoofdstuk enkel kernpunten vermeld worden.

Vooraf de eerste set van vier stappen kan ogenschijnlijk zeer uitgebreid overkomen. Dat is primair omdat de statistiek van seiche-amplituden bij ROZ via een vertaalfactor omgezet wordt naar statistiek van die parameter op de locatie van de gesloten MLK. Dat is echter onvermijdelijk. Op die manier wordt namelijk gebruik gemaakt van de locatie waar de seiches in het Rotterdamse havengebied het meest uitgesproken optreden en daarmee het meest duidelijk te meten en te identificeren zijn. Bovendien wordt op die manier een oplossing gevonden voor het enkel sporadisch gesloten zijn van de MLK, en daarmee dus een zeer beperkt beschikbare set van lokaal gemeten seiche-signalen aan de zeezijde van de gesloten MLK. Op basis van alleen die events zou er sowieso onvoldoende informatie beschikbaar zijn om betrouwbare seiche-statistiek voor de gesloten MLK af te kunnen leiden.

Tabel 2-1: Overzicht processtappen seiches, van waterstandsmetingen naar de aansturing van de MLK, inclusief bijzonderheden, aannames en instelparameters. Stap 1-4.

Processtap	1	2	3	4
Aspect/ bijzonderheid	Afleiden seiche-amplituden uit meetdata ROZ	Opzoeken scheve opzet tijdens events	Afleiden seiche-statistiek ROZ	Vertaling seiche-statistiek ROZ → MLK
Algemene beschrijving	Seiche-amplituden afleiden uit tijdreeksen gemeten waterstanden locatie ROZ. Maximale waarde per event.	Maximale opzetwaarde per event.	Opstellen van een 2D-kdf als functie van opzet en seiche-amplitude	Vertaling seiche-statistiek op basis van verhouding versterkingsspectra
Bijzonderheden	<ul style="list-style-type: none"> Seiches zijn sterk in-stationair dus Fourier-spectrum niet geschikt voor analyse. Identificatie events obv Wavelet-spectra Event-identificatie leunt sterk op expert-interpretaties; invloed getij tot in seiche-frequentie-bereik (0.1-2 mHz). Seiche-periodes bij ROZ: 90, 50, 20 minuten. Seiche-periodes bij MLK: 30 en 17 minuten. 	<ul style="list-style-type: none"> Scheve en niet de rechte opzet als meest zuivere weergave van wind-geïnduceerde opzet. Opzet bij Hoek van Holland (HvH). Alleen events ≥ 0.3 m opzet worden geselecteerd. 	<ul style="list-style-type: none"> 'Methode Vrouwenvelder' uit TNO Bouw (1994,1995) O.b.v. discrete integratie (Riemann) (Janssen, 1995). Omgezet in Matlabscript (WL Delft Hydraulics, 2005a) Events bestaan uit maximale seiche-amplitude en maximale scheve opzet tijdens een interval met significant/detecteerbare seiche-slingering bij ROZ Marginale kansverdeling seiches door integratie 2D-kdf over opzet >2.5 m; relevante (sluit-)situaties. 	<ul style="list-style-type: none"> Energie-aanbod aan ingang haven veelal onbekend. Spectrum ROZ voor gemeten condities zonder hoge waterstand (en geen onderlopende kades) Spectrum MLK voor hogere waterstanden Gevalideerd op basis van één andere meetlocatie (Europahaven) (De Jong, 2004)
Specifieke aannames	<ul style="list-style-type: none"> Alleen events ≥ 0.3 m scheve opzet. ROZ als locatie met hoogste seiches (na vertaling) representatief voor gehele havengebied + consistent in de tijd. Top-dal-waarden af te leiden o.b.v. gefilterde tijdreeks 0.1-2 mHz. Seiche-amplitude is helft van top-dal-waarde Events binnen 48 uur van elkaar samengevoegd t.b.v. onafhankelijke events 	<ul style="list-style-type: none"> Opzet bij HvH ook representatief voor elders in de haven. Verschil met opzet op andere locaties (ROZ) kan 1-2 dm bedragen. 	<ul style="list-style-type: none"> Seiche-amplituden ROZ en gelijktijdig opgetreden scheve opzet bij HvH worden gecombineerd tot events Lineaire regressietrend tussen seiche-amplitude en scheve opzet in gemeten events. Verdeling seiche-amplitudes (conditioneel voor gegeven opzetwaarde) rondom lineaire trend is Gamma-verdeling icm constante variatiecoëfficiënt. Verschillende instelparameters en omrekenfactoren Ontwerpwaarde a_{seiche} bij 10^{-7}/jaar (RWS, 1999) Bij gebruik alle data: veranderingen in lay-out als minder doorslaggevend gezien dan terug moeten vallen op een zeer beperkt aantal jaren met data. 	<ul style="list-style-type: none"> Spectra uit PHAROS inclusief bodemwrijving en intreeverliezen Benaderde beschrijving van demping als gevolg van ondergelopen kades in geval van hogere waterstanden Bepalend voor MLK: lagere waterstanden, zonder buffer van positieve opzet, aan het begin of aan het eind van de storm → i.c.m. hogere seiches toch onderlopen kades? Vorm energie-aanbod aan haveningang volgens f^x met x tussen 1 en 2 (De Jong, 2004).
Instelparameters/ (model)keuzes	<ul style="list-style-type: none"> Inzet continue of discrete kleurschaal wavelet-plots. Bij continue kleurschaal vallen kleinere events meer op, maar ook twijfelgevallen die mogelijk uiteindelijk geen seiche blijken te zijn. 	<ul style="list-style-type: none"> Geen verdere bijzonderheden. 	<ul style="list-style-type: none"> 24 toppen per event t.b.v. relatie maximale seiche-amplitude en seiche-intensiteit $c=0.25$, aangenomen waarde (TNO Bouw, 1994, 1995) als weergave van 1) sluitduur MLK korter dan de stormduur (gebruikt voor afleiden seiche-intensiteit), 2) alleen ongunstige fase seiche. Correctie $R=0.17$ op variatiecoëfficiënt als weergave van spreiding maximale amplitude bij gegeven intensiteit (TNO Bouw, 1994, 1995) Alleen opzet >2.5 m meenemen voor integratie 2D-kdf Geen correctie voor afwezigheid seiches tijdens sommige stormen 	<ul style="list-style-type: none"> Condities waarvoor specifieke versterkingsspectra worden ingezet (lagere of hogere waterstand; wel/geen invloed demping ondergelopen kades) Frequentiebereik waarover de vertaalfactor wordt bepaald: 0.1-2.0 mHz, gelijk aan filterbereik tijdsignaal seiches (De Jong, 2004) Weergave demping op kades in PHAROS via reflectiefactor <1 op randen van bassins en in combinatie met fase-verschuiving (Deltares, 2014a,b).

Tabel 2-2: Als Tabel 2-1, nu voor Stap 5-8.

Processtap	5	6	7	8
Aspect/ bijzonderheid	Weergave seiches in een belastingsmodel	Invloed seiches op ontstaan negatief verval	Seiche-Invloed opvangen in inzetwijze MLK	Complexe aansturing MLK
Algemene beschrijving	Weergave van seiches in tijdsdomein-simulaties van hydrodynamische belastingen; ten tijde van ontwerp MLK in R/Flow (Rasflow)	Invloed seiche op negatief verval via dal van een seiche, ter grootte van de seiche-amplitude	Toepassen van 'Dynamisch Voorspanbeheer'	Continue monitoren van verval en direct opdrijven van kerende wanden zodra negatief verval gedetecteerd wordt
Bijzonderheden	<ul style="list-style-type: none"> Op basis van 32 seiche-componenten en een versterkingsspectrum (manual Rasflow) Random fase per component Amplitudes geschaald volgens versterkingsspectrum uit PHAROS Ongunstige combinatie van fases, leidend tot gelijktijdig een dal voor alle 32 componenten, is niet uit te sluiten 	<ul style="list-style-type: none"> Seiches tijdens de piek van de storm en samenvallend met de hoogste opzet zijn niet kritiek omdat er dan voldoende positieve opzetbuffer is om ook het dal van een seiche niet tot een negatief verval te laten leiden. De kritieke invloed van seiches op het negatieve verval over de MLK is betrekkelijk laag in het ontwerpproces in volle omvang herkend. Vervolgens is de invloed van seiches opgevangen in de operationele inzetwijze van de MLK. 	<ul style="list-style-type: none"> De kerende wanden worden niet volledig geballast maar zij worden continue met een klein netto gewicht op de drempel gehouden. Benodigde ballast wordt aangepast in lijn met (het verloop in) de gemeten momentane waterstand voor en achter de kerende wanden. 	<ul style="list-style-type: none"> Tijdens afzinken is grenswaarde 0.05 m negatief verval. In de fase met de kerende wanden op de drempel is de grens 0.00 m De inclinometers (op de vakwerkarmen) van beide kerende wanden worden ingezet om de verticale positie van de kering te monitoren Uit de inclinometers, waterstanden voor en achter de kering en de waterniveaus in de ballasttanks wordt per kerende wand continue de krachtsbalans berekend. Aansturing MLK monitort die balans en maakt zo nodig aanpassingen in de ballastniveaus. In geval van (begin van) een negatief verval worden de wanden direct opgedreven door alle compartimentspompen te activeren.
Specifieke aannames	<ul style="list-style-type: none"> 4 seiche-amplituden bij monding (0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m) Elke situatie 10x om verschillende realisaties in tijdreeksen te hebben Exponentieel of uniform spectrum als energie-aanbod bij haveningang Aangezien meest ongunstige combinatie van alle 32 seiche-componenten niet uit te sluiten is dient die situatie als meest kritieke mogelijkheid beschouwd worden (kans op die situatie?) 	<ul style="list-style-type: none"> Het optreden van (groot) negatief verval is te allen tijde te vermijden De invloed van seiches op het negatieve verval moet uitgesloten worden. Aangezien op elk moment een dal van een seiche niet uit te sluiten is, is de seiche-amplitude voor dit proces de kritieke parameter (in tegenstelling tot seiche-studies voor BOI en waarin naar het netto seiche effect op het hoogwater wordt gekeken). 	<ul style="list-style-type: none"> Door het leegpompen van de compartimenten zodra er een negatief verval ontstaat (dreigt te ontstaan) wordt de kracht op de kering direct kleiner en zal een eventueel seiche niet sterk op kunnen slingeren De kering kan een beperkt negatief verval aan (ontwerpwaarde -1.5 m, zie referenties genoemd in Bijlage A), maar het is naar verwachting vooral de onzekerheid rondom hoe snel een negatief verval op zal lopen die heeft geleid tot de huidige inzetwijze. 	<ul style="list-style-type: none"> Krachtenbalans en positie-berekening binnen aansturing MLK op basis van inputdata wordt geacht voldoende gelijkend de werkelijkheid te zijn De risico's geassocieerd met tussentijds opdrijven worden als acceptabel gezien en blijkbaar kleiner geacht dan risico's gekoppeld aan negatief verval, inclusief de invloed van seiches, indien er niet zou worden opgedreven
Instelparameters/ (model)keuzes	<ul style="list-style-type: none"> Factor 1.5 tussen gewenste amplitude bij MLK en inkomende randvoorwaarde Rasflow 10^{-7}/jaar seiche-amplitude (gesloten MLK): 1.8 m ingezet t.b.v. ontwerp MLK 	<ul style="list-style-type: none"> Een eventueel verloop in de sterkte van een seiche in de loop van een storm wordt niet expliciet meegenomen (is onbekend en/of eerder niet als algemeen gedrag vastgesteld worden), afgezien van via $c=0.25$ in Stap 3. 	<ul style="list-style-type: none"> De buffer in het ontwerp voor negatief verval wordt in de huidige inzetwijze geheel niet voor seiches aangesproken. Dat is in relatie tot een praktische ontwerp-aanpak de meest zekere keuze. 	<ul style="list-style-type: none"> Grenswaarden voor negatief verval als criterium voor start opdrijven

3 Overzicht voorgaande studies seiche-statistiek

Een inventarisatie van voorgaande studies heeft aangegeven dat rapportages van de volgende relevante studies beschikbaar zijn:

- Parapludocument seiches, samenvatting werkzaamheden 1995-1999 (RWS, 1999):
 - Meerdere onderzoeken door de aannemerscombinatie (BMK)
 - Studies in PHAROS en in TRISULA (voorloper D3D) (oa WL | Delft Hydraulics)
 - Analyse meetdata ten bate van statistiek (RWS, Hans Janssen)
 - Afleiden en inzetten statistische methode (TNO, Ton Vrouwenvelder)
 - Analyse vertaalwijze statistiek ROZ naar locatie MLK, bepaling vertaalfactor, eerst op basis van standaardafwijking spectra, toen op basis van pieken in versterkingsspectra, later door gewogen energie in gehele seiche-bereik van spectra, uiteindelijk factor 0.64 ingezet (RWS, Hans Janssen)
- Promotiestudie Martijn de Jong (De Jong, 2004)
- Data-analyse en seiche-statistiek (WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a, 2006, 2007)
- Analyse extreme seiche-events ten bate van MV2 (WL | Delft Hydraulics, 2005b)
- Seiche-berekeningen voor HR Rotterdam² (Deltares, 2010, Alkyon, 2010)
- Statistiek seiches buitenhaven IJmuiden voor ontwerp nieuwe zeesluis (gebaseerd op seiche-statistiek Rotterdam en inclusief afleiden nieuwe weergave demping op kades later ook voor HR Rotterdam ingezet) (Deltares, 2013, 2014a)
- Update seiche-toeslagen in Rotterdam voor WTI/BOI (Deltares, 2014b)
- Interpretatie potentiële impact voorgenomen verdieping Nieuwe Waterweg op seiches en op hun inwerking op de MLK, onderdeel van MER (Deltares, 2015)
- Grootschalige slingeren alle grote wateren in Nederland (Deltares, 2015, 2016, 2017a)
- Expert-interpretatie seiches Tuimelkade Rotterdam (Deltares, 2017b)
- Expert-interpretatie potentiële invloed seiches op Blankenburgtunnel (Deltares, 2020)

De kentallen van de studies naar statistiek van seiche-amplituden uit de bovenstaande lijst staan bijeengebracht in Tabel 3-1. Aangegeven is welke jaartallen aan veldmeetdata beschikbaar waren, data van welke jaartallen ingezet zijn en hoeveel events er daarin geïdentificeerd zijn. De waarde voor a_{seiche} in de meest rechterkolom en is hier enkel bedoeld als eenduidige graadmeter van de stand van inzichten³. Die waarde is de uitkomst van de oorspronkelijk ontwikkelde aanpak voor het berekenen van de seiche-statistiek voor de gesloten MLK (TNO, 1994, 1995, hier samengevat in Appendix B). Dat resultaat wordt in die aanpak verkregen via een marginale verdeling van de seiche-amplituden, die is afgeleid op basis van integratie van een opgestelde 2D-kansdichtheidsfunctie (kdf) voor combinaties van seiche-amplitude en opzet. Uit die marginale verdeling wordt de 10^{-7} /jaar waarde afgelezen als de toe te passen waarde voor a_{seiche} .

In het resterende deel van deze rapportage wordt met 'oorspronkelijke dataset' de data uit WL | Delft Hydraulics (2007) bedoeld en met 'nieuwe dataset' de set van seiche-events afgeleid in de huidige studie.

² In 2009 heeft Deltares een rapportage aangemaakt met een eerste hernieuwing van de berekeningen voor de seiches in het Rotterdamse havengebied. Echter, in de hier geciteerde rapportage uit 2010 zijn die berekeningen verder uitgewerkt en geanalyseerd. Daarmee kwamen de resultaten en voorlopige interpretaties uit de studie van 2009 te vervallen. Om die reden is de rapportage uit 2009 ook niet opgenomen in de referentielijst.

³ Ondanks dat vanaf het Parapludocument van RWS (1999) de onzekerheid in de 2D-kdf als onderdeel van de statistische berekening meegewogen is in de waarde van a_{seiche} (zie ook Bijlage B) zal die enkele waarde niet een totaalbeeld van de inzichten op dat moment kunnen geven. In de verschillende geciteerde rapportages staan vermeldingen van resterende onderliggende onbekenden en onzekerheidsmarges die daar bij horen.

Tabel 3-1: Overzicht van kenmerken van eerdere seiche-studies voor het Rotterdamse havengebied vanaf ontwerpfase MLK

Rapportage, jaartal	Interval beschikbare meetdata (ROZ)	Jaartallen data ingezet	Grootte dataset (jaren)	Grootte dataset (aantal events)	Bijzonderheden	a_{seiche} (m) (10 ⁻⁷ /jaar)
TNO Bouw (1994, 1995)	dec. 1971 – dec. 1983	1971–1983	13	64 + 77 dummy's (Bijlage D)	<ul style="list-style-type: none"> alle beschikbare events met opzet ≥ 0.3 m ingezet t.b.v. kleinst mogelijke statistische onzekerheid (13 jaar aan meetdata) geen correctie toegepast voor opzetwaarden ter compensatie van interval met toevallig betrekkelijk lage opzetwaarden elke opzetsituatie ≥ 0.3 m zonder in de meetdata identificeerbaar seiche kreeg dummywaarde 0.13 m als seiche-amplitude toegekend (aangenomen ondergrens amplitude) TNO 1994: 2.0 m TNO 1995: 1.8 m 	1.8
Parapludocument RWS (1999)	dec. 1971 – dec. 1983	1976–1983	8	??	<ul style="list-style-type: none"> data deels afkomstig van afgelezen plots van tijdreeksen waterstanden vermeldt inzet van slechts 8 jaren aan meetdata en +0.48 m opzet voor compensatie van toevallig interval van lage opzet → lijkt niet consistent met rapportages TNO (1994,1995), welke ook zijn opgenomen in het studieoverzicht in RWS (1999) 	1.8
WL Delft Hydraulics (2004)	30 jan. 1989 – 31 mrt 2004	1989–2004	15.5	177	<ul style="list-style-type: none"> data van voor 1995 in ander format en van mindere kwaliteit alleen data-analyse en identificatie van events, geen statistiek afgeleid 	n.v.t.
WL Delft Hydraulics (2005a)	30 jan. 1989 – 31 mrt 2004	1989–2004	15.5	110 + 250 dummy's (Bijlage E)	<ul style="list-style-type: none"> alleen gemeten events met opzet ≥ 0.3 m geselecteerd dummywaarden 0.05 m toegepast voor opzetsituaties zonder in de meetdata identificeerbaar seiche (aangenomen ondergrens amplitude) berekening van a_{seiche} voor meerdere data-selectie-scenario's 	1.2-3.5
WL Delft Hydraulics (2006)	Datasets uit van TNO (94/95) en WL Delft Hydraulics (2005a), gecombineerd en afzonderlijk				<ul style="list-style-type: none"> analyse op basis van alle data, oud en nieuw gecombineerd analyse op basis van alle nieuwe data analyses op basis van oud + nieuwe data voor $a_{\text{seiche}} > 0.25$ m en opzet ≥ 0.3 m analyses op basis van alleen nieuwe data voor $a_{\text{seiche}} > 0.25$ m en opzet ≥ 0.3 m uiteindelijke dataselectie: alleen dataset WL (2005a), geen drempelwaarde a_{seiche} (opzet ≥ 0.3 m uitgangspunt dataset), geen dummywaarden, geen correctie voor uitblijven seiches tijdens sommige opzetsituaties 	2.1
WL Delft Hydraulics (2007)	dataset WL Delft Hydraulics (2005a) + apr. 2004 – aug. 2007	30 jan. 1989 – 2005	17	127 (110+17) (Bijlage F)	<ul style="list-style-type: none"> selectie van events op basis van opzet ≥ 0.3 m en events binnen 48 uur samengevoegd o.b.v. hoogste amplitude (17 in 1.5 jaar extra data) bijzonder sterk event met $a_{\text{seiche}} = 1.06$ m op 16 dec. 2005 → grote impact op regressielijn en daarmee op a_{seiche} (+0.2 m) 	2.37

4 Beschikbare gegevens

4.1 Meetgegevens uit het veld

De volgende meetgegevens zijn beschikbaar gesteld aan Deltares voor de huidige studie:

- Waterstandsmetingen bij Rozenburgse Sluis (ROZ) met een bemonsteringsinterval van 1 minuut. Gegevens van januari 2006 tot en met december 2023 zijn ingezet. Deze gegevens zijn eigendom van het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn door hen beschikbaar gesteld specifiek voor inzet in de huidige studie⁴.
- Waarden van de scheve opzet bij HvH voor 2006 tot en met 2023. Tot 2020 zijn dit reeksen met scheve opzet per hoog- en laagwater (typisch vier waarden per dag). Vanaf 2020 zijn dit reeksen met gemeten en berekende (astronomische) hoog- en laagwaters (typisch vier waarden per dag, in twee reeksen), waaruit voor de huidige studie door Deltares de scheve opzet afgeleid is voor dagen met een seiche-event. RWS is eigenaar van deze gegevens⁵.
- Waterstanden direct voor de MLK (uit de WMO, WaterMeetOpstelling, aan de zeezijde van de MLK) tijdens de Verificatiesluiting (V-sluiting⁶) van januari 2018 en de Stormsluiting (S-sluiting) van december 2023. Deze gegevens zijn van RWS en zijn door HVR Engineering⁷, in overleg met RWS, aan Deltares voor deze studie beschikbaar gesteld. De overeenkomstige metingen voor de V-sluiting van november 2007 waren eerder door RWS voor een voorgaande studie aan Deltares beschikbaar gesteld (Deltares, 2016a, 2019).

4.2 Gegevens en informatie uit eerdere studies van Deltares

Voor de huidige studie zijn primair de rapportages en uitkomsten ingezet van voorgaande seiche-studies zoals opgenomen in het overzicht in Hoofdstuk 3. Daarnaast zijn specifiek de volgende gegevens ingezet:

- Versterkings-spectra uit het mild-slope golfmodel PHAROS van Deltares, zoals eerder berekend voor seiche-studies in het kader van de Hydraulische Randvoorwaarden en het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) (Deltares, 2014b), hier ter volledigheid overgenomen binnen Bijlage H.

⁴ Met dank aan Wendy Janssen (HbR).

⁵ Met dank aan de medewerkers van de data-servicedesk van RWS.

⁶ Een Verificatiesluiting (of V-sluiting) is een sluiting van de MLK tijdens een stormseizoen met een tijdelijk verlaagd sluitpeil. Daartoe wordt door RWS overgegaan nadat circa zeven jaar een sluiting op basis van het reguliere sluitpeil niet heeft plaatsgevonden. Het doel van een V-sluiting is onder andere om de ervaring met de sluitingen in de operationele teams op peil te houden en opleiding van nieuwe teamleden mogelijk te houden.

⁷ Met dank aan Jeroen Ligthart (HVR) voor het aanleveren van deze meetgegevens, in overleg met RWS.

5 Verwerking gegevens en identificatie events

5.1 Aanpak gevolgd voor identificatie seiche-events

De verwerking van de tijdreeksen van gemeten waterstanden bij ROZ voor het interval 2006-2023 en de identificatie van seiche-events is uitgevoerd via de volgende stappen:

- Gaten in ruwe data waterstanden ROZ (bestanden '*.raw') zijn opgevuld door middel van lineaire interpolatie. Dat deel van de tijdreeks geeft dan duidelijk geen informatie over waterstanden en seiches, maar lineaire invulling beïnvloedt niet de rest van de data, en daarmee ook niet de uitkomsten van de wavelet-plots (tijdsafhankelijke energiespectra) voor de goede data-delen. De meetdata bleek van bijzonder hoge kwaliteit en er is sprake van een zeer klein percentage uitval (over alle hier beschouwde jaren: 1.66% van de tijd). Vervolgens zijn jaarbestanden ten bate van praktische verwerkbaarheid opgesplitst naar tijdreeksen per maand, resulterende in 'processed' databestanden (*.pro').
- Processed databestanden zijn vervolgens gefilterd voor de seiche-frequentieband in Rotterdam: 0.1-2 mHz (500 s–10000 s). Dit levert een gefilterde tijdreeks op met alleen het seiche-signaal (bestanden '*.flt'). Om randeffecten in de wavelet-plots bij de start en eind van de tijdreeks te vermijden wordt als onderdeel van de dataverwerking een 'taper-window' toegepast, waarmee de tijdreeks aan de start en aan het eind geleidelijk naar 0 wordt teruggebracht. Dit vraagt een extra check op eventuele events die toevalligerwijs opgetreden zijn rondom een maandgrens⁸.
- Per maand is een wavelet-analyse gemaakt en de resulterende wavelet-plots zijn opgenomen in een afbeelding in combinatie met de tijdreeks van de totale waterstand (processed) en van het seiche-signaal (gefilterd).
- De wavelet-plots zijn vervolgens op basis van expert-interpretatie geanalyseerd en er is gezocht naar energiepieken rondom de bekende lokale seiche-perioden (locatie ROZ). Dit resulteerde in de identificatie van datum van het optreden van elk seiche in de beschouwde jaren. Seiches binnen 48 uur van elkaar worden als hetzelfde event gezien en alleen de maximum-amplitude binnen dat interval wordt meegenomen (onafhankelijke events; aanpak conform oorspronkelijke aanpak tijdens ontwerp MLK en de studies 2004-2007). Net als in voorgaande studies waarin seiche-karakteristieken uit gemeten waterstanden zijn afgeleid, blijkt er sprake van een mix van zeer duidelijke seiche-gevallen, duidelijke (zomer)maanden zonder seiches en twijfelgevallen (zie voorbeelden in Paragraaf 5.2).
- In de gefilterde tijdreeks (seiche-signaal) is de maximale top-dal-waarde tijdens elk event opgezocht (een opeenvolgend top en dal of dal en top) en vervolgens opgenomen in de dataset. De seiche-amplitude is daarbij aangenomen als de helft van de top-dal-waarde en afgerond op hele cm (als in eerdere seiche-studies door Deltares).
- Voor elk geïdentificeerd seiche is de gelijktijdig opgetreden scheve opzet opgezocht en is de maximale waarde van die parameter gedurende het event in de dataset opgenomen. Tot en met 2019 is die informatie direct uit de beschikbare data opgehaald; vanaf 2020 is de scheve opzet als nabewerking per event door Deltares handmatig afgeleid door het voorspeld hoogwater af te trekken van het corresponderende gemeten hoogwater. Vervolgens is een selectie gemaakt van alle events met opzet ≥ 0.3 m om op te nemen in de verzamelde set van seiche-events om statistiek mee af te leiden. Ook dit is conform de aanpak in eerdere seiche-studies voor de MLK.

⁸ Bij de controle van de in maanden opgeknipte meetreeksen bleek er in twee gevallen sprake van een seiche toevallig op de maandgrens: oktober-november 2006 en november-december 2020. Voor die twee events is per event een aanvullende tijdreeks van twee aaneengesloten maanden gemaakt om er een wavelet-plot van te maken, met het te analyseren event in het midden van de tijdreeks. Vervolgens zijn die events alsnog opgenomen in de dataset.

Merk op dat vooral voor lage seiches in veel gevallen de identificatie van seiches een expert-interpretatie vraagt. Daarmee krijgt de data-interpretatie deels een subjectief karakter. Dit is echter niet te vermijden. De invloed van het getij in de frequentieband van de seiches 'ademt' mee met de spring-doodtij-cyclus en is dus doorgaans als patroon goed te herkennen (Paragraaf 5.2), maar geeft in de wavelet-plots wel 'overlap' met energiepieken van de seiches die de identificatie van events compliceert. Die getij-invloed is vooral het gevolg van niet-lineaire effecten die in het getijverloop optreden, waaronder aggers. Een agger is een korte toename in de waterstand rondom laagwater, waarna de waterstand eerst weer daalt voordat de vloed echt opkomt. Aggers worden primair veroorzaakt door ondiep-water-effecten in de voortplanting van de getijgolf, eventueel gecombineerd met een lokale geometrie-invloed. Hierdoor treden zij alleen in specifieke kustgebieden op. In Rotterdam treden aggers primair rondom laagwater op maar op andere locaties kunnen dat ook andere momenten in het getijverloop zijn.

Om een meer precieze identificatie van seiche-events te kunnen doen zijn in de huidige studie eerst wavelet-plots op basis van een continue kleurenschaal aangemaakt en doorgenomen. In de uiteindelijk in het digitale projectarchief van Deltares opgeslagen en met RWS gedeelde set van plots is voor duidelijke aftekening van events gebruik gemaakt van een kleurenschaal op basis van discrete stappen (0:0.1:1), overeenkomstig de aanpak zoals gevolgd in WL | Delft Hydraulics (2004, 2005a, 2006, 2007). Voordeel van een continue kleurenschaal is dat ook zwakkere events beter zichtbaar zijn, maar daardoor komen potentieel ook meer twijfelgevallen naar voren (Paragraaf 5.2). Aan de andere kant zullen die twijfelgevallen veelal samenvallen met een lage opzet (<0.3 m), waardoor de meest-twijfelachtige gevallen sowieso niet in de uiteindelijke selectie van events opgenomen wordt.

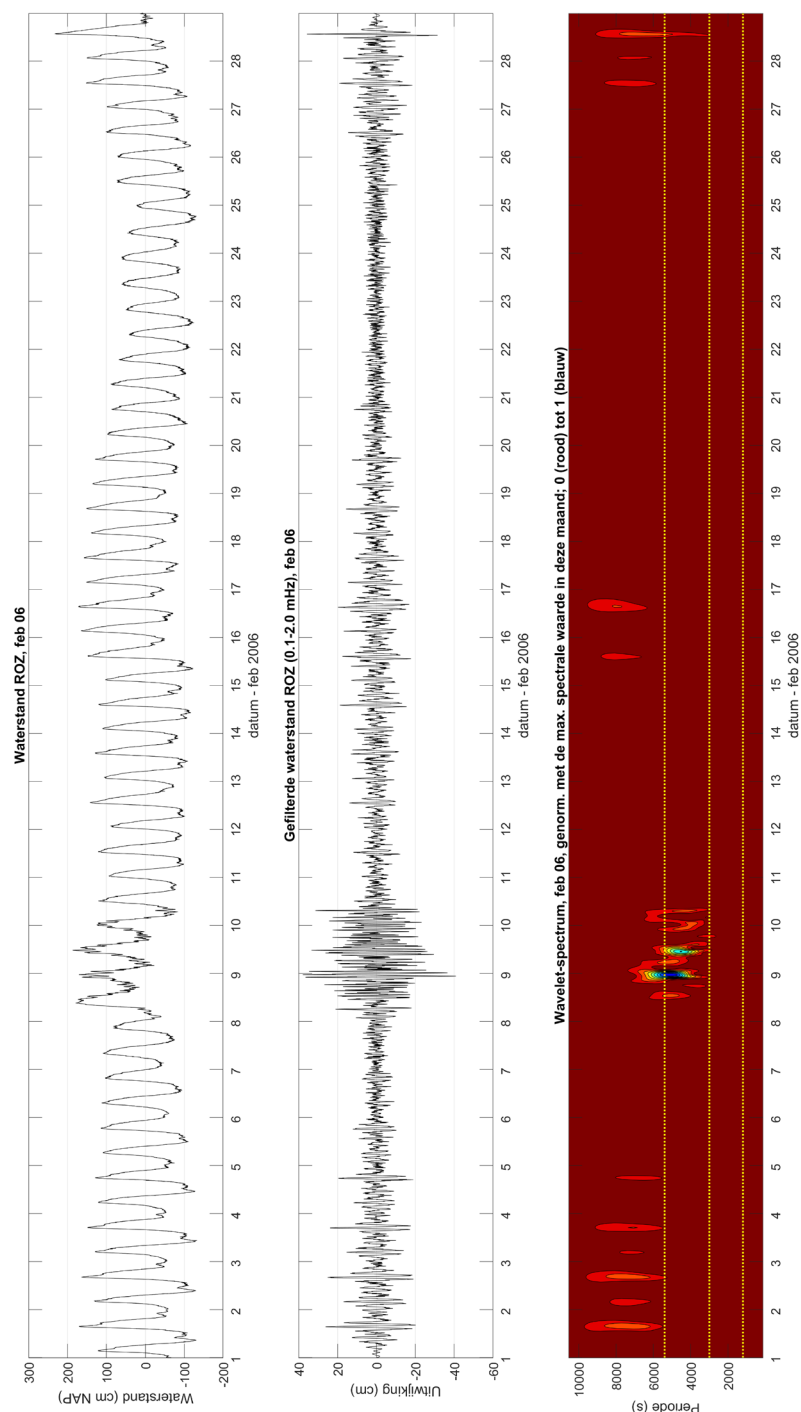
5.2 Voorbeelden wavelet-spectra

Alle aangemaakte en geïnterpreteerde wavelet-plots (18 jaar maal 12 maanden = 216 maandplots) zijn ter vastlegging opgeslagen in het digitale projectarchief van Deltares. De gehele set aan bestanden is ook aan RWS opgeleverd. Hier worden alleen enkele representatieve voorbeelden getoond en besproken.

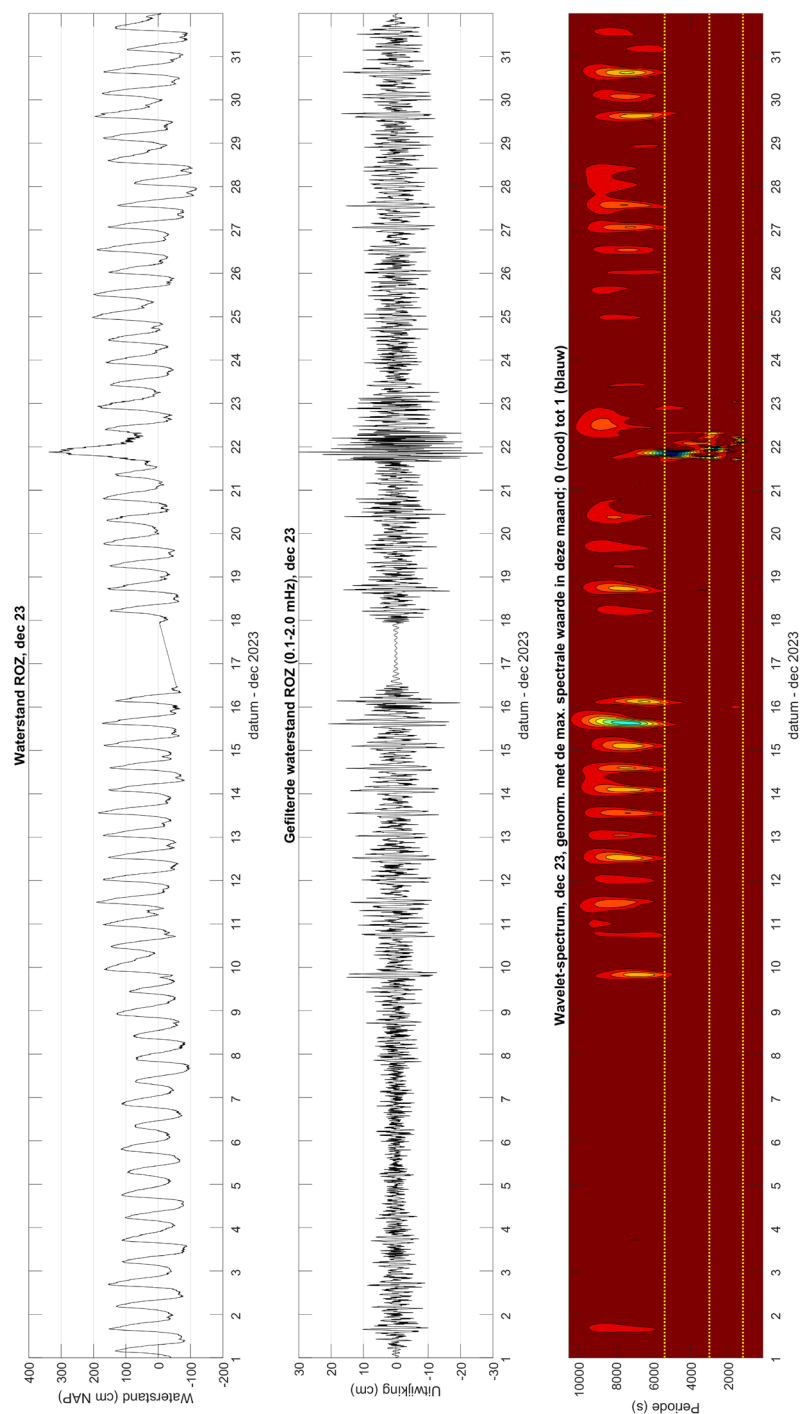
Ter ondersteuning van de identificatie van de seiche-events staan in de waveletplots de voor ROZ bekende seiche-periodes aangegeven met gele stippellijnen: 20, 50 en 90 minuten. Die slingerperiodes zijn eigenlijk afhankelijk van de waterstand, met iets kortere periodes voor hoge waterstanden. Dit verklaart waarom de seiche-response niet altijd precies op de typische seiche-periodes zoals opgenomen in de plots zal liggen.

Figuur 5-1 (Pagina 21) geeft een voorbeeld van een maand waarin een zeer duidelijk seiche-event is opgetreden. In de tijdreeksen (totaal en gefilterd, in respectievelijk het bovenste en middelste paneel) is de seiche-slingering goed herkenbaar als een snellere slingingering bovenop het meer geleidelijke getijverloop. In de wavelet-plot (onderste paneel) is de piek van seiche-energie rondom een bekende slingerperiode bij ROZ goed identificeerbaar.

Een ander opvallend voorbeeld staat in Figuur 5-2 (Pagina 22), waarin de analyse van de metingen van de maand met de enige S-sluiting tot nu toe wordt getoond (december 2023). Tijdens die sluiting is een duidelijk seiche-event op locatie ROZ opgetreden (ook bij de MLK, nader beschouwd in Paragraaf 7.2). In de wavelet-plot is in dit geval ook de invloed van het getij goed zichtbaar, met meerdere pieken bij betrekkelijk lange periodes binnen het seiche-bereik. Zoals eerder in deze rapportage vermeld ademt die invloed mee met de spring-doodtij-cyclus, al is dat 'mee-adem'-effect nu juist in deze afbeelding wat minder uitgesproken.



Figuur 5-1: Voorbeeld van een maand met een duidelijk seiche-event (februari 2006).

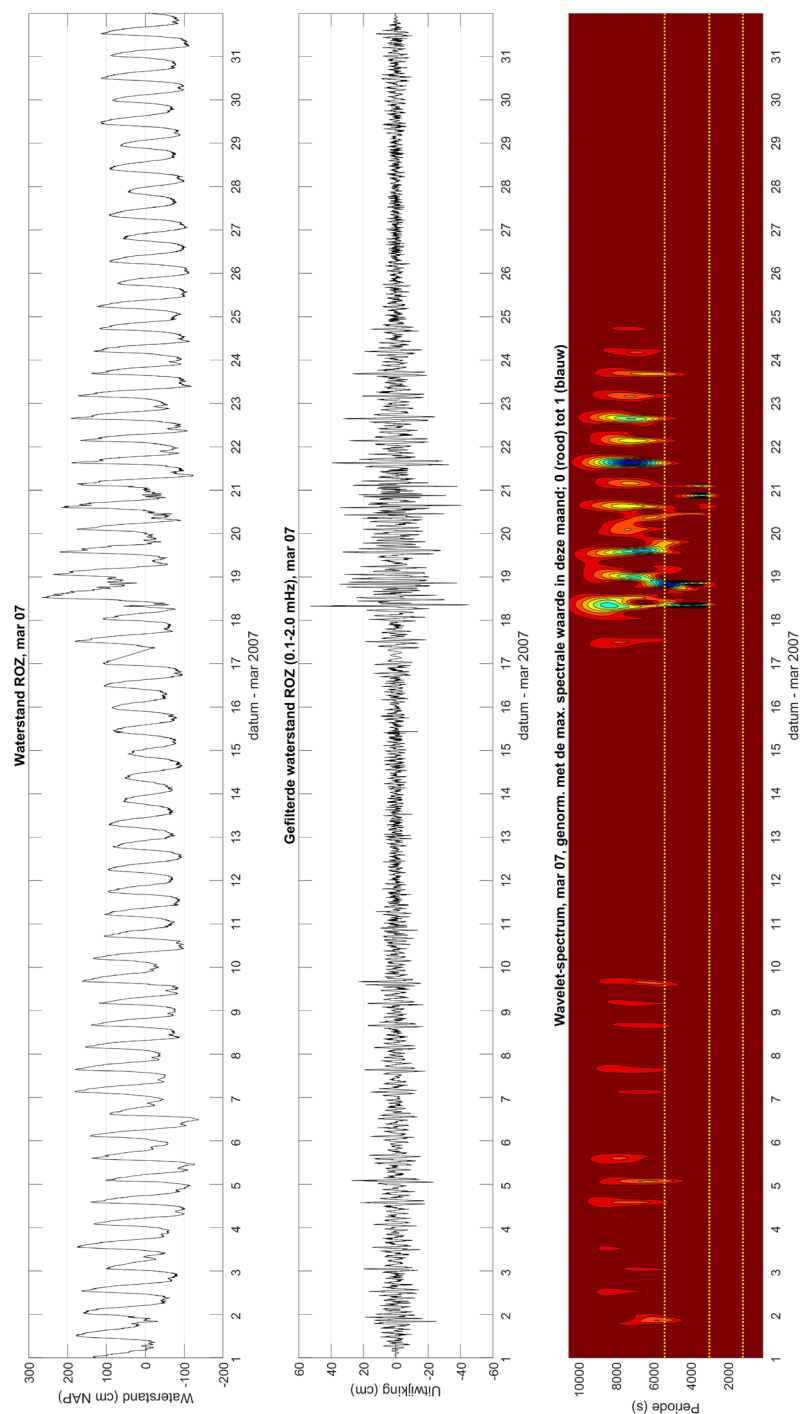


Figuur 5-2: Analyse van de metingen uit december 2023, de maand van S-sluiting.

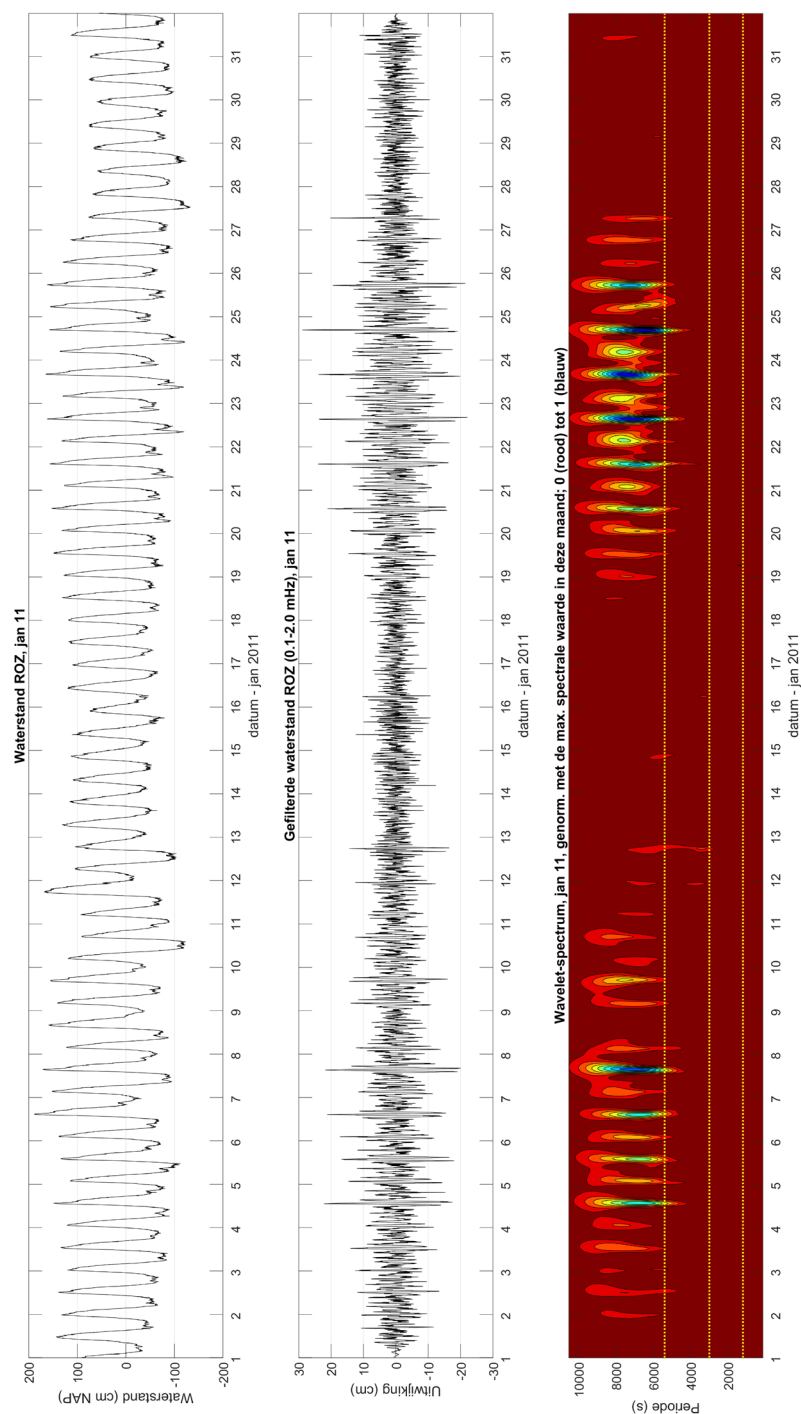
Figuur 5-3 (Pagina 24) toont een voorbeeld van een maand met complexe situatie in de wavelet-plot (maart 2007). In dit geval is in de wavelet-plot een combinatie te zien van getij-invloeden en van pieken die overeen (kunnen) komen met een seiche, dat wil zeggen: rondom de bekende response-periodes van ROZ. In dit geval zijn het juist ook de tijdreeksen (totaal, gefilterd) die duidelijkheid bieden en die een uitgesproken seiche-slingering laten zien (18 – 21 maart). Dit event is dus opgenomen in de dataset.

Figuur 5-4 (Pagina 25) is een voorbeeld van een maand (januari 2011) met een twijfelgeval (op 12 januari) dat uiteindelijk niet als seiche-event is geïdentificeerd. Juist veel van dergelijke twijfelgevallen vertonen een minder symmetrische waarde voor top en dal, wat consistent zou zijn met het afwezig zijn van een echt seiche (slingerbeweging). En mocht een twijfelgeval zoals in Figuur 5-4 niet op basis van de interpretatie van de tijdreeksen en/of wavelet-plot uitgesloten zijn als seiche-event, dan bleek – zoals eerder genoemd – de ondergrens van 0.3 m opzet veelal reden om een potentieel event uit te sluiten.

De interpretatie van alle 216 maandplots overeenkomstig de nieuwe set van meetgegevens (2006-2023) liet een bijzondere ontwikkeling zien ten opzichte van voorgaande seiche-studies. In wavelet-plots van de oorspronkelijke dataset (1989-2005) was er bij ROZ eigenlijk bij alle seiche-events een dominante response bij 90 minuten te zien (De Jong, 2004, WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a, 2006, 2007). Dat responsegedrag bij ROZ was voor de hogere events in veel gevallen nog het meest duidelijk. In de nieuwe dataset blijkt dat veel minder uitgesproken het geval. Sterker nog, in verscheidene seiche-events in de nieuwe dataset is een andere piek dan de response bij 90 minuten dominant. Dit kan van invloed zijn op de (statistische) consistentie van de dataset, beschouwd in Hoofdstuk 6. Daarnaast wordt in Hoofdstuk 7 nader ingegaan op de verandering in seiche-response bij ROZ op basis van verstekingsspectra voor verschillende fasen in de ontwikkeling van de havengeometrie.



Figuur 5-3: Voorbeeld van een maand met complexe situatie in wavelet-plot (maart 2007).



Figuur 5-4: Voorbeeld van een maand met een twijfelgeval (op 12 januari) dat uiteindelijk niet als seiche-event is geïdentificeerd (januari 2011).

6 Consistentiecheck seiche-amplituden

6.1 Inleiding

Naar aanleiding van grote aanpassingen in de havengeometrie, waaronder bijvoorbeeld de aanleg van MV2, kan de dataset met seiche-events minder consistent zijn. Dat zou die dataset als geheel minder geschikt maken voor het afleiden van betrouwbare seiche-statistiek. De consistentie van de dataset met seiche-amplituden⁹ is hier geverifieerd met de Run-test, zoals in eerdere seiche-statistiek-studies voor de MLK (WL | Delft Hydraulics, 2005a) is toegepast.

Ongeacht de uitkomst van consistentie-testen is het de vraag of in een praktische context een zeer strikte consistentie-eis aan de seiche-data gesteld zou moeten worden, omdat daardoor alleen een zeer korte tijdreeks met ongewijzigde havengeometrie geselecteerd zou kunnen worden met daarin een beperkt aantal events. Daarmee wordt de statistische onzekerheid, via andere redenen, alsnog erg groot. Om een soortgelijke reden is ten tijde van het ontwerp van de MLK uiteindelijk ook alle destijds beschikbare jaren seiche-data ingezet¹⁰, ondanks dat ook in die jaren aanpassingen aan de havengeometrie waren gemaakt.

6.2 Aanpak consistentiecheck

De Run-test checkt of de hypothese dat twee deeldatasets uit dezelfde bron/kansverdeling komen 'TRUE' of 'FALSE' is. Een nadere beschrijving van die test is hier opgenomen in Bijlage C. De essentie van de Run-test is dat na samenvoegen van de waarden uit beide sets en op oplopende grootte sorteren, er een minimale gemixtheid moet zijn met afwisselend waarden uit de ene en dan weer uit de andere deelset (runs), willen beide deelsets uit dezelfde bron/verdeling afkomstig zijn. Voor de testen is gebruik gemaakt van $\alpha = 0.05$, zijnde een 5% kans op het onterecht verwerpen van de hypothese. Met andere woorden, als de onderliggende gegevens in het echt consistent zijn, dan accepteren we een 5% kans dat we de verkeerde conclusie trekken.

Tijdens het interval van de dataset (1989-2005) toegepast in de voorgaande studie-serie naar seiche-amplituden in Rotterdam (WL | Delft Hydraulics, 2004-2007) zijn meerdere aanpassingen in de haven-layout gemaakt, waarbij in dat tijdsinterval het doorgraven van de Beerdam de meest ingrijpende aanpassing was. In de genoemde eerdere studies bleek de data van de seiche-amplituden in het toen beschouwde interval, zeker voor hogere seiche-amplituden, volgens de ingezette Run-test voldoende consistent om toch de gehele dataset te kunnen beschouwen (WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a). De interne consistentie van die dataset wordt hier niet opnieuw beschouwd en er wordt alleen gekeken of die oorspronkelijke dataset en de nieuwe dataset uit de huidige studie onderling (voldoende) consistent zijn.

In het hier beschouwde nieuwe interval aan meetgegevens (2006-2023) zijn er opnieuw meerdere aanpassingen in de layout van de Rotterdamse haven gedaan. In relatie tot seiches waren de meest ingrijpende veranderingen tijdens dit interval: 1) de aanleg van MV2, en de daarbij behorende doorgraving van het oorspronkelijk gesloten eind van de Yantzehaven (november 2012), en 2) de verdieping van de Nieuwe Waterweg (april 2018 – oktober 2019). Van die twee wordt de eerste aanpassing als meest kritisch voor de karakteristieken van

⁹ De lokale opzet die in Rotterdam optreedt wordt primair gedictieerd door de opzet vanaf zee en in veel mindere mate door (details van) de havengeometrie; de opzet vanaf zee heeft veel langere tijd- en ruimteschalen dan de delen van de havengeometrie. Dat betekent dat de set van opzetwaarden sowieso consistent is, zeker voor locatie Hoek van Holland zoals hier ingezet.

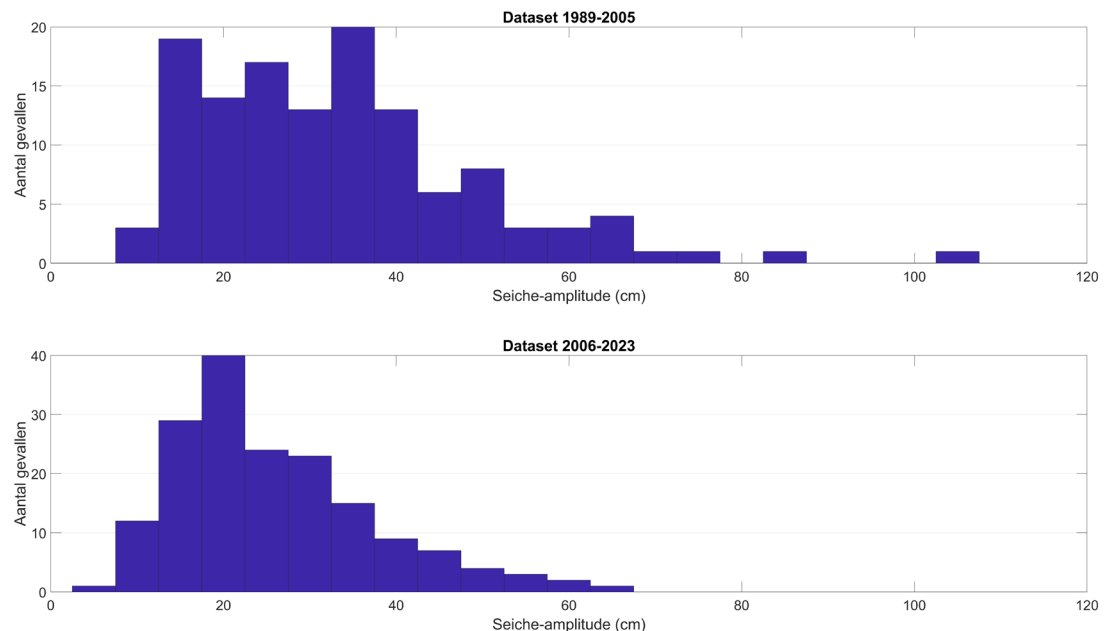
¹⁰ In totaal 13 jaar data in plaats van een meer zuivere selectie van slechts acht jaar, zie Tabel 3-1.

seiches gezien. Daarom is er ook een consistentiecheck uitgevoerd voor het interval tot en na november 2012 (uitkomsten beschreven in Paragraaf 6.5). De invloed van de verdieping van de Nieuwe Waterweg op de seiches in het Rotterdamse havengebied is eerder beschouwd in compacte expert-studies door Deltares (Deltares, 2015a,b). Die studies zijn uitgevoerd ten bate van de MER van de toen nog voorgenenom verdieping. Op basis van die uitwerking werd de invloed van de voorgenenom verdieping op de seiches bij de MLK als beperkt ingeschat. Die (geleidelijk aangelegde) geometrie-aanpassing is daarom hier niet afzonderlijk beschouwd.

Merk op dat er naast geometrie-invloeden ook andere invloeden zijn die een verschil tussen de oorspronkelijke dataset tot aan 2005 en de nieuwe dataset veroorzaakt kunnen hebben. Beide datasets zijn met dezelfde technieken opgezet en door dezelfde persoon afgeleid, maar wel met 18 jaar ertussen. Bovendien is in de huidige studie meer ingezoomd op ook de lagere events door eerst wavelet-plots met continue kleurschaal in te zetten en pas later plots met discrete kleurschaal (Hoofdstuk 5). In principe zouden alleen al daardoor in de nieuwe dataset gemiddeld meer events geïdentificeerd kunnen zijn dan voor de oorspronkelijke dataset. Door consistentie van de dataset (Paragraaf 6.5), en uiteindelijk de afleiding van de statistiek van seiche-amplituden (Hoofdstuk 8), ook na te gaan voor deelselecties met alleen hogere seiche-amplituden worden veel van die invloeden weggenomen. Ter illustratie: al bij een ondergrens van 0.2 m voor de seiche-amplitude is er in beide datasets sprake van een redelijk vergelijkbaar gemiddeld aantal events per jaar (Paragraaf 6.4). En bij hogere ondergrenzen zijn er in de nieuwe dataset zelfs minder events geïdentificeerd, ook al zal dat naar verwachting primair gekoppeld zijn aan een inherente/natuurlijke variatie van jaar tot jaar.

6.3 Overzicht basis-kenmerken dataset met seiche-amplituden

Hier wordt een overzicht gegeven van de basis-kenmerken van de verschillende delen van de dataset (zoals in WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a). Figuur 6-1 toont de histogrammen van de oorspronkelijke en nieuwe dataset van seiche-amplituden op basis van 5 cm data-intervallen. Afgaande op deze beschrijving zijn de verdelingen van de datasets betrekkelijk verschillend en daarmee een indicatie dat de beide dataset-delen niet consistent zijn.



Figuur 6-1: Histogrammen van datasets met seiche-amplitude voor de oorspronkelijke dataset (bovenste paneel) en voor de nieuwe dataset (onderste paneel).

Voor een nadere vergelijking geeft Tabel 6-1 een overzicht van de belangrijkste statistische kenmerken per deel-set. Ook hieruit blijken verschillen tussen beide dataset-delen, met in de

nieuwe dataset over het algemeen lagere waarden dan in de oorspronkelijke dataset. Echter, op basis van enkel deze kenmerken is niet a priori een definitieve conclusie te trekken over (in-)consistentie tussen beide delen.

Tabel 6-1: Overzicht van basiskennmerken van de oorspronkelijke en nieuwe dataset met seiche-amplituden

Parameter	dataset 1989-2005	dataset 2006-2023
Aantal gevallen	127	170
Gemiddeld aantal gevallen per jaar	7.5	9.4
Gemiddelde (cm)	33	26
Standaarddeviatie (cm)	16.3	11.7
Skewness	1.3	1.04
25% kwantiel (cm)	20	18
Mediaan (cm)	31	23
75% kwantiel (cm)	40	32

6.4 Invloed van afgeronde waarden

Voorafgaand aan het beschrijven van de uitkomsten van de Run-tests in Paragraaf 6.5 wordt hier eerst een toelichting gegeven op de potentiële invloed van afgeronde waarden op de uitkomst van de Run-tests. Reeds in WL | Delft Hydraulics (2004) werd vermeld dat de afronding van waarden op hele centimeters een significante invloed zou kunnen hebben op de uitkomsten van de Run-tests. Die invloed ontstaat omdat er in de dataset door afronding sprake zal zijn van veel waarden die meermaals voorkomen. De specifieke volgorde waarop die identieke waarden vervolgens in de automatisch gesorteerde totaalset wordt opgenomen kan een grote invloed hebben op het effectieve aantal runs dat gevonden wordt, en daarmee op de uitkomst van de Run-test (Appendix C). In WL | Delft Hydraulics (2004) is getracht dit te ondervangen door als gevoeligheidstest in aanvullende Run-tests de top-dal-waarden te beschouwen in plaats van de seiche-amplitudes. Naar aanleiding van die analyse werd destijds geen reden gevonden om de uitkomsten van de Run-test te heroverwegen. Maar zoals in Paragraaf 6.5 mede op basis van de nieuwe dataset wordt gekwantificeerd is de invloed van dubbele waarden – naar huidige inzichten – destijds onderschat.

In de huidige studie is de invloed van afgeronde waarden anders ondervangen. De waarden voor de seiche-toppen en -dalen en voor de seiche-amplitudes zoals hier afgeleid uit de meetwaarden (Hoofdstuk 5) zijn nog steeds afgerond op hele centimeters. Dit is gedaan omdat een grotere nauwkeurigheid van de analyse van events niet realistisch is om aan te nemen. Om toch een spreiding rondom de afgeronde waarden weer te geven is in een aanvullende serie Run-tests (Paragraaf 6.5) bij elk van de afgeronde waarden van de seiche-amplituden een random variatie opgeteld binnen het bereik $-0.5 - 0.5$ cm (grenzen niet meegenomen). Hierbij is uitgegaan van een uniforme kansverdeling binnen dat bereik. Dit levert een indirecte weergave op van de oorspronkelijke niet-afgeronde waarden. Merk op dat de overall karakteristieken van de set van seiche-amplitudes, bijvoorbeeld het gemiddelde, hierdoor niet veranderen.¹¹

Voorafgaand aan het beschrijven van de uitkomsten van de Run-tests in Paragraaf 6.5 wordt hier eerst een toelichting gegeven op de potentiële invloed van afgeronde waarden op de uitkomst van de Run-tests. Reeds in WL | Delft Hydraulics (2004) werd vermeld dat de afronding van waarden op hele centimeters een significante invloed zou kunnen hebben op de uitkomsten van de Run-tests. Die invloed ontstaat omdat er in de dataset door afronding sprake zal zijn van veel waarden die meermaals voorkomen. De specifieke volgorde waarop die identieke waarden vervolgens in de automatisch gesorteerde totaalset wordt opgenomen kan een grote invloed hebben op het effectieve aantal runs dat gevonden wordt, en daarmee op de uitkomst van de Run-test (Appendix C). In WL | Delft Hydraulics (2004) is getracht dit te ondervangen door als gevoeligheidstest in aanvullende Run-tests de top-dal-waarden te beschouwen in plaats van de seiche-amplitudes. Naar aanleiding van die analyse werd destijds geen reden gevonden om de uitkomsten van de Run-test te heroverwegen. Maar zoals in Paragraaf 6.5 mede op basis van de nieuwe dataset wordt gekwantificeerd is de invloed van dubbele waarden – naar huidige inzichten – destijds onderschat.

¹¹ Merk ook op dat de toevoeging die gedaan wordt om de niet-afgeronde oorspronkelijke waarden weer te geven, toegepast op alle amplitude-waarden, geen invloed heeft op de gesorteerde volgorde van de niet-meermaals voorkomende (unieke) waarden in de dataset, omdat die sowieso minstens 1 cm uiteen liggen.

test (Paragraaf 6.5). Juist de lagere waarden treden vaker op en zullen daarmee ook vaker leiden tot meerdere events met (afgerond) dezelfde seiche-amplitude. Hogere waarden treden minder vaak op en hebben doorgaans meer variatie in waarden, al is het maar omdat ze met een kleiner aantal events effectief een breder databereik aan amplituden beschrijven (er is meer resolutie in de data ten opzicht van de gemaakte afronding). Tabel 6-2 en Tabel 6-3 geven, voor verschillende ondergrenzen voor de seiche-amplitude, voor respectievelijk de oorspronkelijke en de nieuwe dataset het totale aantal events en het aantal unieke waarden daarbinnen. Deze tabellen bevestigen de trend dat voor selecties met alleen hogere seiches er een groter percentage unieke waarden in de dataset zit en dat het effect van afgeronde waarden op de Run-test juist het grootst zal zijn bij inzet van een lagere of geen ondergrens voor de seiche-amplitude. Om die reden worden ook in de volgende paragraaf bij de controle op data-consistentie meerdere ondergrenswaarden voor $a_{\text{seiche, ROZ}}$ beschouwd.

Tabel 6-2: Overzicht totale aantal seiche-events en unieke waarden in oorspronkelijke dataset (1989-2005).

selectie events \ Parameter	Gemiddeld aantal events per jaar	Totale aantal events	Aantal unieke waarden	Percentage unieke waarden t.o.v. totaal
Alle gevallen	7.5	127	49	39
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	5.5	94	39	41
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	4.7	80	35	44
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	3.9	67	30	45
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	2.5	43	25	58
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	1.8	31	20	65

Tabel 6-3: Als Tabel 6-2, nu voor de nieuwe dataset (2006-2023)

selectie events \ Parameter	Gemiddeld aantal events per jaar	Totale aantal events	Aantal unieke waarden	Percentage unieke waarden t.o.v. totaal
Alle gevallen	9.4	170	47	28
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	5.9	106	35	33
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	4.1	74	30	41
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	2.8	51	25	49
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	1.7	31	20	65
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	1.2	21	15	71

6.5 Uitkomsten – Run-tests uitgevoerd op sets van seiche-amplituden

6.5.1 Zonder weergave van pre-afrondingsvariatie

Tabel 6-4 geeft een overzicht van de uitkomsten van de Run-test voor de oorspronkelijke en nieuwe dataset en Tabel 6-5 voor deelsets van voor en na de aanleg van de toegang naar MV2 (25 november 2012). De uitkomsten in deze tabellen laten zien dat de trend in de gevonden test-uitkomsten gelijk is voor beide typen van deelsets. In beide gevallen leidt de hypothese van een voldoende gemixte set tot acceptatie bij waarden van $a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$ (aantal runs in totale reeks > minimum aantal runs, zie Bijlage C). Voldoende consistentie op basis van de Run-tests kan – uitgaande van de afgeronde seiche-amplituden – alleen worden bevestigd voor deelselecties met hogere seiche-events. Zij volgen daarmee in hoofdlijnen de trend die ook werd gevonden in de voorgaande studies (WL | Delft Hydraulics, 2004, 2005a). Overall geeft dit aan dat de invloed van de aanpassing van de aanleg van de doorgang naar MV2 niet doorslaggevend lijkt te zijn voor de gevonden mate van consistentie van de dataset met seiche-

amplituden en daarmee op de overall karakteristieken van de datasets. Echter, volgens huidige inzichten resulteert de afronding van de amplitude-waarden in een significante nuancering op deze testuitkomsten, zoals in de volgende paragraaf op basis van aanvullende testen ook wordt bevestigd.

Tabel 6-4: Uitkomst van de Run-test toegepast op de oorspronkelijke en nieuwe set van seiche-amplituden.

Parameter selectie events	Aantal waarden eerste reeks (1989-2005)	Aantal waarden tweede reeks (2006-2023)	Aantal runs in totaalreeks	Minimaal aantal runs ($\alpha = 0.05$)	Resultaat Run-test
Alle gevallen	127	170	84	132	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	94	106	63	89	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	80	74	55	68	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	67	51	45	50	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	43	31	35	30	TRUE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	31	21	25	20	TRUE

Tabel 6-5: Als Tabel 6-4, nu toegepast op deelsets voor en na aanleg van de toegang naar MV2 (nov. 2012).

Parameter selectie events	Aantal waarden eerste reeks (1989- nov. 2012)	Aantal waarden tweede reeks (dec 2012- 2023)	Aantal runs in totaalreeks	Minimaal aantal runs ($\alpha = 0.05$)	Resultaat Run-test
Alle gevallen	210	87	72	112	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	147	53	49	70	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	119	35	39	48	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	96	22	31	31	FALSE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	63	11	21	16	TRUE
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	45	7	15	10	TRUE

6.5.2 Met weergave van pre-afrondingsvariatie

De uitkomsten van dezelfde tests uit de vorige paragraaf maar nu met opname van een pre-afrondingsvariatie staan bijeengebracht in Tabel 6-6 en Tabel 6-7, voor respectievelijk een opsplitsing in de oorspronkelijke en nieuwe dataset en voor deelsets van voor en na de aanleg van de toegang naar MV2. Het specifieke aantal runs dat gevonden wordt in de Run-test staat hier niet bij vermeld omdat die waarde (beperkt) varieert met de toevallige trekking van de pre-afrondingsvariatie die aan de afgeronde waarden toegevoegd wordt. In plaats daarvan staat hier het percentage van de dominante uitkomst vermeld.

Door inzet van de random afrondingsvariatie is er in de meeste gevallen sprake van het ombuigen van de uitslag van de Run-test van 'False' naar 'True'. Die uitkomst lijkt vervolgens niet sterk afhankelijk van de toevallige trekking voor de weergave van de pre-afrondingsvariatie, die per keer dat de Run-test wordt gedaan opnieuw wordt gedefinieerd. Veelal is het aantal runs dat gevonden wordt ruim (5-10) boven de grenswaarde voor een positieve uitkomst. In een kleiner deel van de testen is het aantal runs gelijk aan, of net onder, de kritieke waarde en is de uitkomst ook met weergave van de afrondingsvariatie dus 'False'. Door veel keren de Run-test uit te voeren op dezelfde twee datasets maar met elke keer een nieuwe trekking voor de pre-afrondingsvariatie is nagegaan hoe dominant de primair voorkomende uitkomst is. In alle gevallen blijkt 'TRUE' de dominante uitkomst en conform

verwachting neemt het percentage voor die uitkomst toe met toenemende ondergrens van de seiche-amplitude bij ROZ, omdat bij de grotere waarden sowieso al meer variatie in amplitude-waarden aanwezig is (meer unieke waarden, zie Paragraaf 6.4).

Tabel 6-6: Als Tabel 6-4, nu met random pre-afrondingsvariatie toegevoegd.

Parameter selectie events	Aantal waarden eerste reeks (1989-2005)	Aantal waarden tweede reeks (2006-2023)	Meest voorkomend resultaat Run-test	Percentage dominante uitkomst (%)
Alle gevallen	127	170	TRUE	78
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	94	106	TRUE	84
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	80	74	TRUE	96
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	67	51	TRUE	97
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	43	31	TRUE	99
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	31	21	TRUE	99

Tabel 6-7: Als Tabel 6-5, nu met random pre-afrondingsvariatie toegevoegd.

Parameter selectie events	Aantal waarden eerste reeks (1989-nov. 2012)	Aantal waarden tweede reeks (dec 2012-2023)	Meest voorkomend resultaat Run-test	Percentage dominante uitkomst (%)
Alle gevallen	210	87	TRUE	77
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	147	53	TRUE	92
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	119	35	TRUE	96
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	96	22	TRUE	98
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	63	11	TRUE	100
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	45	7	TRUE	100

6.6 Conclusie consistentie-check dataset seiche-amplituden

Bij de seiche-events op basis van afgeronde waarden zijn volgens de ingezette Run-test alleen de events met hoge seiche-amplitude consistent. Als ook rekening wordt gehouden met de afronding van de amplitudes op hele centimeters is de meest voorkomende uitkomst uit de hier beschreven consistentietesten dat de dataset van seiche-amplituden consistent is, ongeacht de toegepaste drempelwaarde voor de seiche-amplitude. Echter, de gevoeligheid van de ingezette testmethode voor de aanwezigheid van identieke waarden wordt gezien als een sterk signaal dat de Run-test hier mogelijk niet de best passende consistentietest is. In een mogelijke vervolgstudie zou de consistentie van de dataset met seiche-amplituden met andere methoden geverifieerd moeten worden (Paragraaf 9.3).

Om de gevoeligheid van de uitkomsten voor de verschillende deelsets te illustreren wordt in Hoofdstuk 8 de seiche-statistiek afgeleid voor:

- Oorspronkelijke dataset (1989 – 2005).¹²
- Nieuwe dataset (2005 – 2023)
- Dataset tot aan opening doorgang naar MV2 (1989 – november 2012)
- Dataset vanaf opening doorgang naar MV2 (december 2012 – 2023)
- Gehele dataset (1989 – 2023)

¹² Effectief is dit een check op het kunnen reproduceren van uitkomsten beschreven in WL | Delft Hydraulics (2007).

7 Check op vertaalfactor ROZ – MLK

7.1 Vertaalfactor op basis van versterkingspectra

7.1.1 Oorspronkelijke afleiding en inzet vertaalfactor

Belangrijkste input voor de vertaling ROZ – MLK zijn de versterkingspectra op de bronlocatie ROZ en de doellocatie MLK, dat wil zeggen de relatieve versterking van inkomende lange-golfamplitudes als functie van frequentie. In alle voorgaande studies naar seiches in het Rotterdamse havengebied is het numerieke mild-slope golfmodel PHAROS van Deltares toegepast om die spectra te bepalen (meest recent in Deltares, 2014b, zie Paragraaf 7.1.2).

Tijdens het ontwerp van de MLK is al uitgegaan van een vertaalfactor. Eerst nog op basis van specifieke pieken in de versterkingspectra, maar later voor (effectief) het gehele seiche-frequentiebereik (Janssen, 1995, Parapludocument RWS, 1999). De vertaalfactor wordt afgeleid op basis van de versterkingspectra (R) voor ROZ als bronlocatie (locatie a) en van de doellocatie (locatie b , dus de locatie van de MLK), in combinatie met een aangenomen aanbodspectrum bij de haveningang (S) als functie van de frequentie (f):

$$r_{ab} = \sqrt{\frac{\int S(f) R_b^2(f) df}{\int S(f) R_a^2(f) df}} \quad (7-1)$$

Het frequentiebereik in Vergelijking (7-1) is gelijk aan 0.1 – 2.0 mHz (De Jong, 2004).

Door voor de doellocatie het versterkingspectrum in te zetten voor extreme situaties, inclusief hoge waterstand en demping door ondergelopen kades, wordt bij de vertaling naar andere locaties vanaf ROZ ook meteen de demping zoals die optreedt in extreme situaties verdisconteerd.

Op basis van de tijdens het ontwerp beschikbare informatie over de havengeometrie, daaruit resulterende versterkingspectra uit PHAROS, en de toen aangehouden vorm van het aanbodspectrum is uiteindelijk 0.64 als vertaalfactor voor het ontwerp van de MLK toegepast (Janssen, 1995). Daarbij is toen voor zowel ROZ (noemer in Vergelijking (7-1) als MLK (teller in Vergelijking (7-1) geen demping door ondergelopen kades meegenomen, maar wel bodemwrijving en intree-verliezen (PHAROS-berekening 'Y9', Janssen 1995). Dat laatste effect komt overeen met de energieverliezen die optreden doordat een seiche het bekken in- en uitloopt en daarmee via onder andere wervels energie zal verliezen. Men heeft destijds niet het effect van ondergelopen kades meegenomen omdat de kritieke situatie voor negatief verval, en daarmee voor seiches, voorzien werd bij de start van een storm en wanneer er nog niet veel wind-geïnduceerde opzet is opgebouwd die anders als buffer tegen het optreden van negatief verval beschikbaar zou zijn (hier wordt in Paragraaf 7.1.2 nader op in gegaan). Het spectrum voor ROZ in de noemer is overeenkomstig de meer gemiddelde gemeten situaties en daarom sowieso zonder de invloed van onderlopende kades.

De fundamentele aanpak die destijds is toegepast is succesvol gevalideerd in De Jong (2004), op basis van vertaling van locatie ROZ naar meetlocatie Europahaven (EUR, voorafgaand aan aanleg MV2). De theoretische vertaalfactor uit Vergelijking (7-1) is daarbij vergeleken met de verhouding tussen de gemeten seiche-amplituden bij EUR en ROZ. Hierbij is een middeling toegepast over meerdere seiche-pieken per seiche-event (tot aan 5) om een stabiele schatting van die verhouding uit de metingen te kunnen vaststellen. De trend volgens de metingen sloot zeer goed aan op de theoretische verhouding tussen die beide locaties. Daarmee is de

aangenomen lineaire response van de haven gevalideerd, zij het op basis van een enkel meetpunt (hier wordt nader op ingegaan in Paragraaf 7.1.3).

Een grote onzekerheid in de gevolgde aanpak voor de vertaling is het aanbodspectrum bij de monding van de haven (S). Dat is grotendeels het gevolg van de relatief lage energieniveaus in het seiche-frequentiebereik in de waterstandsignalen op zee ten opzichte van het getij en kortere golven (windgolven en deining). De vertaalfactor zoals ingezet gaat juist uit van een gedeeld/gezamenlijk energie-aanbod, van invloed op teller en noemer in de vertaalfactor, waardoor de absolute grootte van het energie-aanbod geen rol speelt. Daarmee blijft alleen de relatieve vorm van het spectrum als onbekende/onzekere parameter over. Op die manier wordt een deel van de onzekerheid over het aanbodspectrum dus effectief buitenspel gezet. Maar de vorm is van het energieaanbod in het seiche-frequentiebereik resteert nog steeds als onbekende. In voorgaande studies zijn de volgende vormen afgeleid (Paragraaf 7.1.2):

- Veraart (1994), f^{-x} , met $x = 1.2$;
- De Jong (2004): f^{-x} , met x tussen 1 en 2, 1.5 werd destijds als *best estimate* gezien, weliswaar op basis van een beperkt aantal stormen;
- Deltares (2014a): f^{-x} , x gemiddeld 0.88 (K13) en 1.04 (Europlatform), op basis van een totale waardenbereik 0.4-2.6; uiteindelijk is in Deltares (2014a) ook 1.5 ingezet ten bate van consistentie (en beperkt conservatisme).

7.1.2 Inzet meest recent berekende versterkingsspectra voor afleiden vertaalfactor

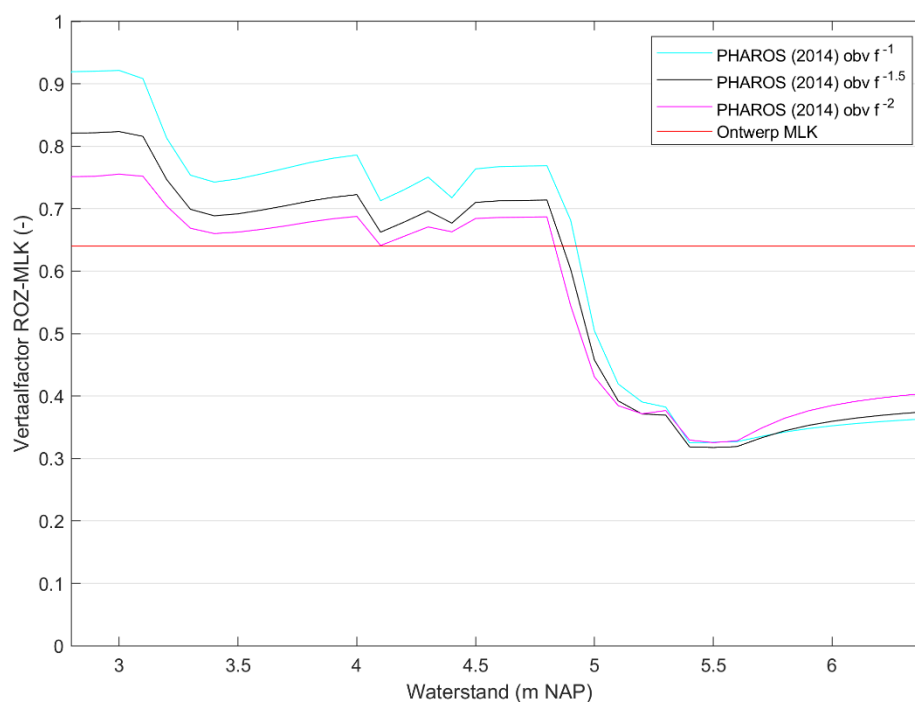
Deltares (2014b) is de meest recente studie waarin versterkingsspectra zijn berekend voor locaties in het westelijke deel van de haven van Rotterdam. Ook in die studie is het mild-slope model PHAROS van Deltares ingezet. De op dat moment meest recente geometrie is daarbij in het model opgenomen, dus inclusief MV2 (2012). In alle berekeningen in Deltares (2014b) is de invloed van bodemwrijving en intreeverliezen meegenomen. Daarnaast is voor extreme waterstanden rekening gehouden met de dempende invloed als gevolg van het onderlopen van kades (details over de toegepaste formulering om die effecten weer te geven staan beschreven in Deltares, 2014b). Juist bij het net onderlopen van een kade wordt volgens de toegepaste formulering de meeste dempende invloed verwacht. Bij een verdere toename van de waterstand zal de demping vanuit die ondergelopen kade volgens de beschrijving iets teruglopen, maar dan kan er weer sprake zijn van de start van onderlopen van een iets hoger gelegen kade elders in het beschouwde havengebied¹³. Merk op dat bij +3 m NAP er overstort zal op treden bij de Hartelkering en bij +5 m NAP bij de MLK. Ook dit is weergegeven in de PHAROS-modellering zoals ingezet in Deltares (2014b).

Er zijn in Deltares (2014b) verschillende berekeningen gemaakt voor een bereik aan waterstanden, met stappen van 0.1 m. Hiermee zijn versterkingsspectra als functie van de waterstand¹⁴ verkregen (Bijlage H). Voor de hier te maken analyse zijn alleen situaties met gesloten MLK relevant, omdat alleen dan seiches de kering via een mogelijk negatief verval zullen beïnvloeden. In de sommen uit Deltares (2014b) betekent dat waterstanden van +2.8 m NAP en hoger beschouwd worden. Die waarde bij Hoek van Holland komt bij benadering overeen met +3.0 m NAP bij Rotterdam centrum (deel van sluitcriterium MLK). De spectra in Bijlage H laten om die reden een relatief grote verandering in de respons-spectra van sommige locaties zien bij de stap van +2.7 m NAP naar +2.8 m NAP, aangezien er met het sluiten van de Hartelkering en de MLK een tijdelijk bekken aan de zeezijde van die keringen wordt gecreëerd met aanvullende lokale seiches. Hierdoor neemt op die locaties de sterkte van de seiche-versterking toe. Een soortgelijke grote verandering treedt op rond +3 m NAP en rond +5 m NAP, waarbij respectievelijk de Hartelkering en de MLK gaan overstorten en waardoor de seiche-versterking juist een grote afname laat zien (verderop nader beschouwd).

¹³ Vanwege het gekoppelde systeem van meerdere havenbekkens kan de dempende invloed van een ondergelopen kade ook buiten een specifiek havenbassin merkbaar zijn.

¹⁴ Het gaat hierbij om de gemiddelde, ongestoorde waterstand, dus zonder de amplitude van de seiche zelf.

Figuur 7-1 toont de uitkomst van de waterstandsafhankelijke vertaalfactor van seiche-statistiek afgeleid voor ROZ naar de locatie van de gesloten MLK. Die vertaalfactor is berekend via Vergelijking (7-1), daarbij gebruikmakend van de versterkingsspectra uit PHAROS volgens Deltares (2014b). Voor ROZ is voor de vertaling in alle gevallen het spectrum overeenkomstig +2.4 m NAP aangehouden, dus zonder onderlopende kades en zonder gesloten MLK, ook al zal de invloed van dat laatste op de response bij ROZ naar verwachting beperkt zijn¹⁵. Die situatie zou het best overeen moeten komen met de typische condities waaronder de gemeten seiche-events zijn opgetreden (brondata die vertaald dienen te worden). Bovendien is dat in lijn met de oorspronkelijk gevolgde aanpak (Paragraaf 7.1.1). De vertaalfactor naar de locatie van de MLK is vervolgens berekend op basis van het versterkingsspectrum voor die doellocatie overeenkomstig elke beschouwde specifieke waterstand op de x-as van Figuur 7-1.



Figuur 7-1: Vertaalfactor ROZ → MLK als functie van de waterstand voor meerdere vormen van het aanbodsspectrum van golfenergie vanaf de Noordzee.

Opvallend in de overall trend in het verloop van de vertaalfactor in Figuur 7-1 is de grote afname in de berekende vertaalfactor bij een waterstand van circa +5 m NAP. Dit wordt toegeschreven aan het optreden van overstort over de MLK vanaf die waterstand (opgenomen in het PHAROS-model). Die overstort resulteert in een grote aanvullende demping van het opslingeren van de seiches in het tijdelijke bekken westwaarts van de gesloten MLK. Hierdoor zullen de pieken in het lokale versterkingsspectrum veel lager blijven. De versterkingsspectra voor de locatie van de MLK in Bijlage H onderbouwen die interpretatie; bij waterstanden +5 m NAP en hoger is er nauwelijks nog sprake van uitgesproken versterkingsspieken in de versterkingsspectra voor die locatie (Paneel 6 in de afbeeldingen opgenomen in Bijlage H).

Indien de oorspronkelijk gevolgde aanpak (Paragraaf 7.1.1) ook nu ingezet zou worden met de nieuwe versterkingsspectra dan zou de vertaalfactor afgeleid moeten worden voor het

¹⁵ Een gevoeligheidsanalyse liet zien dat inzet van het spectrum bij ROZ tot aan die voor +2.8 m NAP (vanaf die waterstand is in de simulatie de MLK gesloten) een vergelijkbaar resultaat gaf. Bovendien is de verwachting dat de response bij ROZ vooral wordt beïnvloed door een specifieke waterstand via het al dan niet onderlopen van kades en veel minder door het al dan niet gesloten zijn van de MLK. Al is dat laatste wel voorwaardelijk willen (lokale) seiches van invloed zijn op de MLK.

versterkingsspectrum bij MLK voor +2.8 m NAP, dus geheel links op de x-as in Figuur 7-1. Die situatie zou daarbij gezien worden als een mogelijke toestand voorafgaand aan de piek van een storm, nog zonder zeer hoge opzetbuffer.¹⁶ Dit komt overeen met een vertaalfactor van 0.82 ($f^{-1.5}$ aanbod spectrum). Daarmee zou de oorspronkelijk ingezette vertaalfactor niet conservatief (lager) zijn, onder de aanname van dezelfde seiche-statistiek bij ROZ.

Echter, uitgaande van de oorspronkelijk afgeleide ontwerpwaarde van de seiche-amplitude ter plaatse van de MLK, namelijk 1.8 m, zou er tijdens de top van een seiche sprake zijn van waterstanden tot aan +4.6 m NAP (+2.8 m NAP als laagste waterstand HVH met gesloten kering +1.8 m seiche-amplitude, vooralsnog zonder rekening te houden met extra demping). Dat geeft aan dat alleen uitgaan van de gemiddelde waterstand voor het afschatten van de vertaalfactor onvolledig kan zijn. De implicatie daarvan wordt hier op basis van een compacte expert-interpretatie verkend door een representatieve, iets hogere gemiddelde waterstand voor die situatie te beschouwen. Op die manier wordt indirect weergegeven dat het seiche zelf ook de waterstand beïnvloedt. Omdat het gaat om een slingering rondom de gemiddelde waterstand zal er grofstoffelijk 'voor de helft van de tijd' sprake zijn van een hogere waterstand en de meeste extra demping. Dat maakt dat het lastig is om daar een enkele representatieve gemiddelde waterstand bij te kiezen. Een andere complicerende factor is dat niet alle locaties in de haven een even grote amplitude-response laten zien en dus zal er niet overal even sterk sprake zijn van een toename in de mate van onderlopen van kades tijdens de top van seiches. Het PHAROS-model kan die aspecten niet (volledig) weergeven en in het model is (stapsgewijs) alleen de gemiddelde waterstand ten opzichte van de kadehoogtes beschouwd (x-as van Figuur 7-1), wat dit aspect betreft overeenkomstig een lineaire benadering¹⁷. Toch kan er een grofstoffelijke interpretatie gemaakt worden als we bij benadering uitgaan van een resulterende seiche-amplitude van minimaal 0.5 m, gecombineerd met een oorspronkelijk stilwaterniveau van +2.8 m NAP. Op basis van dat uitgangspunt is het mogelijk het waterstandsbereik van +3.3 m NAP tot aan +4.6 m NAP te beschouwen. Voor dat bereik aan waterstanden geldt volgens Figuur 7-1 een betrekkelijk constante waarde voor de vertaalfactor. In combinatie met een $f^{-1.5}$ aanbod spectrum komt dat waterstandsbereik overeen met een vertaalfactor rond 0.7. Op basis van deze verkennende aanvullende interpretatie lijkt de oorspronkelijk ingezette vertaalfactor (0.64) nog steeds een redelijk goede schatting van die parameter, zij het deels op basis van een andere redenatie. Een meer volledige analyse en interpretatie vraagt nadere uitwerking en aanvullende berekeningen in een tijdsdomeinmodel van de waterbeweging in de Rotterdamse havenbekkens, inclusief het modelleren van onderlopende kades (Paragraaf 9.3). Daarnaast is de hogere vertaalfactor die nu gevonden wordt zonder rekening te houden met de amplitude van het seiche zelf (0.82) eigenlijk alleen van toepassing op de uitkomsten voor de periode sinds de aanleg van de toegang naar MV2. Hier wordt in Paragraaf 8.3 nader op ingegaan.

7.1.3 **Aanvullende observaties naar aanleiding inzet versterkingsspectra uit Deltares (2014b)**

De in deze rapportage beschreven analyses, onder andere de identificatie van events in Hoofdstuk 5, zijn gemaakt uitgaande van de gefilterde tijdreeksen van waterstanden voor het frequentiebereik 0.1-2.0 mHz (de 'seiche-frequentieband'). Om consistent daarmee te zijn worden in dit hoofdstuk vertaalfactoren voor de seiche-statistiek beschouwd op basis van versterkingsspectra voor datzelfde frequentiebereik. In sommige eerdere studies, bijvoorbeeld Deltares (2014a), is gekeken naar het bereik 0.1-1.6 mHz omdat destijds versterkingsspectra alleen voor dat frequentiebereik beschikbaar waren. Toen al is de verwachting uitgesproken

¹⁶ De kering zal in de praktijk starten met sluiten bij een lagere waterstand en dus verder voorafgaand aan de piek van de storm, maar dit is de laagste waterstand in Deltares (2014b) die voor de situatie met een gesloten MLK is gesimuleerd. Dat heeft vooral te maken met de het achterliggende doel van die studie voor de Hydraulische Randvoorwaarden (BOI) en daarom met focus op betrekkelijk extreme waterstanden.

¹⁷ Dit wil hier zeggen dat de waterstands-veranderende invloed van het seiche zelf niet wordt meegenomen in de berekeningen van het systeemgedrag van de seiches.

dat het toen ontbrekende deel van het seiche-frequentiebereik (1.6-2.0 mHz) geen grote invloed zou hebben. Het afnemende energie-aanbod in de seiche-frequentieband voor toenemende frequenties (negatieve macht in f^x) maakt dat deel van het frequentiebereik van kleinere invloed, ongeacht of daarin versterkingspieken aanwezig zijn. Hier is dat nagegaan in een gevoeligheidstest door de vertaalfactor ook te berekenen op basis het bereik 0.1-1.6 mHz, naast de basisaanpak op basis van het gehele frequentiebereik 0.1-2.0 mHz. De verschillen bleken inderdaad zeer beperkt (uitkomsten niet in detail hier opgenomen) en vallen binnen een praktisch te verwachten rekennauwkeurigheid.

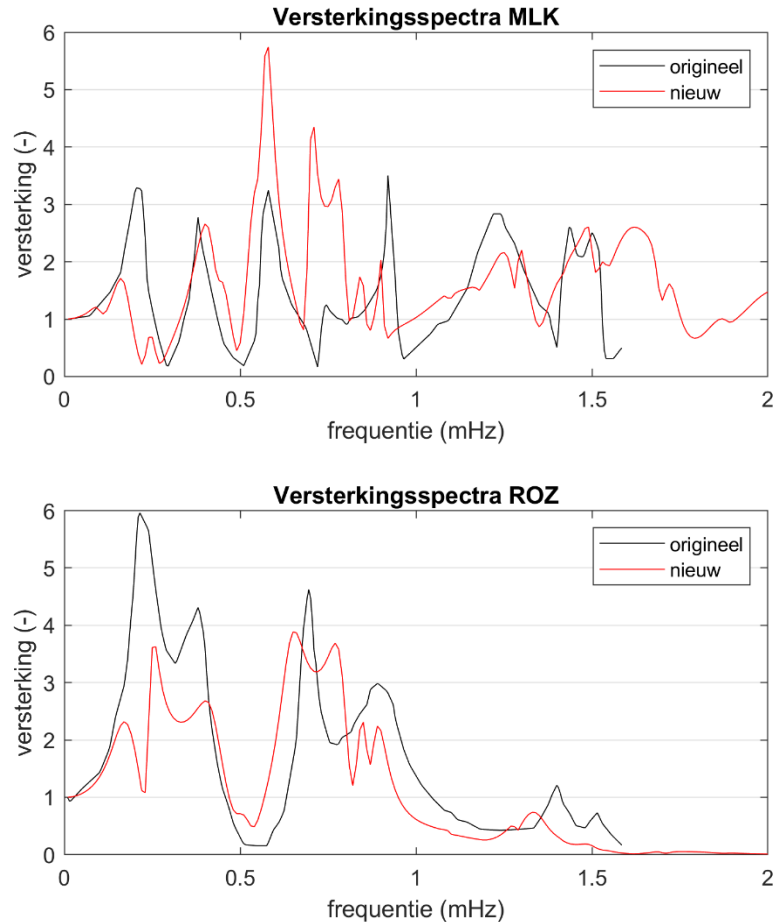
De vertaalfactor tussen ROZ en MLK laat een duidelijke gevoeligheid zien voor vorm van aanbodspectrum (zie de verschillend gekleurde lijnen in Figuur 7-1). In nadere analyses van de vertaling tussen ROZ en EUR, voortbouwend op de validatie-analyse oorspronkelijk beschreven in De Jong (2004), bleek er een betrekkelijk kleine gevoeligheid voor vorm aanbodspectrum te zijn tussen die twee punten (niet-gerapporteerde resultaten verkregen sinds De Jong, 2004). Dat verschil in gevoeligheid in beide vertalingen (ROZ → MLK en ROZ → EUR) wordt hier toegeschreven aan het voortschrijdende inzicht dat de sterkste pieken in de spectra van ROZ en EUR – zoals destijds ingezet en als weergave van de toenmalige havengeometrie – ongeveer in hetzelfde deelbereik binnen de seiche-frequentieband vallen, terwijl de spectra voor ROZ en MLK hun hoogste pieken duidelijk in verschillende delen van dat frequentiebereik hadden (lagen verder uiteen, zie Paragraaf 5.2 en Paragraaf 7.1.4). Alleen als responsepieken verder uit elkaar liggen zullen zij (veel) effect ervaren van een specifieke vorm van het aanbodspectrum op de vertaalfactor tussen die beide locaties. Dit is een extra motivatie om een nadere validatie van de vertaalmethode te doen op basis van meer meetlocaties en met een groter frequentie-verschil in de piekfrequenties (Paragraaf 9.3).

7.1.4 Nadere analyse oorzaken verschil oorspronkelijke en nieuwe waarde vertaalfactor

Het verschil tussen de oorspronkelijk voor het ontwerp van de MLK berekende vertaalfactor (0.64) en de nieuw berekende waarde (0.82, zonder meenemen van de niet-lineaire invloed van de top van een seiche) wordt in deze paragraaf nader geanalyseerd. Hiervoor is gekeken naar de versterkingspectra voor MLK en ROZ zoals oorspronkelijk ingezet en zoals die voor de huidige studie uit Deltares (2014b) beschikbaar zijn, hier opgenomen als Figuur 7-2. Omdat in de oorspronkelijke ontwerpstudies demping door ondergelopen kades niet is beschouwd, zijn voor de hier gemaakte vergelijking spectra uit Deltares (2014b) overeenkomstig +2.8 m NAP ingezet (de laagste waterstand met gesloten MLK) en waarbij er nog geen sprake is van ondergelopen kades.

De originele en nieuwe spectra in Figuur 7-2 laten significante verschillen zien. Dat zou deels veroorzaakt kunnen zijn door andere modelleerkeuzes en instellingen in PHAROS – er zit redelijk veel tijd tussen beide studies – maar naar verwachting zal de grootste invloed afkomstig zijn van aanpassingen in de havengeometrie, onder andere de aanleg van MV2. Indien dat inderdaad zo is, dan zijn de verschillen dus overeenkomstig de werkelijke ontwikkeling in het seiche-gedrag van de haven. Dat zou daarmee een verdere illustratie zijn dat er in de dataset met seiche-events een (gedrags-)verloop zit. Opvallend genoeg leek er bij de identificatie van seiche-events bij ROZ in de nieuwe dataset (Hoofdstuk 5) inderdaad in meerdere gevallen sprake van een minder dominante response bij 90 minuten dan aanwezig was in de events uit de oude dataset, wat ook volgt uit het onderste paneel van Figuur 7-2. Echter, statistisch gezien is enig verloop in seiche-gedrag in het havengebied niet a priori reden om data uit te sluiten. Dit volgt ook uit de analyses beschreven in Hoofdstuk 6, ook al wordt inmiddels aangeraden om de consistentie van de seiche-dataset met andere technieken en methodes te verifiëren (Paragraaf 9.3). Mogelijk speelt ook mee dat in de afleiding van seiche-amplituden het gehele seiche-frequentiebereik wordt beschouwd, via band-gefilterde tijdreeksen voor dat frequentiebereik, waardoor verschuivingen en herverdeling van pieken binnen die band van frequenties deels worden 'weggemiddeld', waardoor een (beperkte) verschuiving van

responsepieken niet direct overeen hoeft te komen met inconsistente karakteristieken van de seiche-amplituden zoals afgeleid.



Figuur 7-2: Versterkingsspectra uit PHAROS voor locatie MLK (bovenste paneel) en locatie ROZ (onderste paneel) zoals ingezet ten tijde van het ontwerp van de MLK ('origineel') en zoals in de huidige studie ingezet ('nieuw', Deltares, 2014b).

De vertaalfactor gaat in de basis uit van een – met het aanbodspectrum gewogen – verhouding in oppervlak van de versterkingsspectra in teller en noemer. Een verandering in die oppervlaktes zal dus via het quotiënt van Vergelijking (7-1) doorwerken in de berekende vertaalfactor. Voor het versterkingsspectrum voor locatie ROZ geldt de oppervlakteverhouding nieuw/origineel: 0.81. Dit geeft aan dat de seiche-versterking (response) op locatie ROZ volgens deze berekeningen is afgenomen. Voor locatie MLK geldt nieuw/origineel: 1.22. Dit geeft aan dat, volgens deze berekeningen, de versterking bij de gesloten MLK is toegenomen. Als de vertaalfactor afzonderlijk wordt beschouwd, dus zonder de invloed op de seiche-statistiek, dan is in Vergelijking (7-1) de noemer afgenomen en de teller toegenomen in de nieuwe situatie. Beide effecten dragen bij aan een hogere waarde van de vertaalfactor en verklaren daarmee de nieuw berekende, hogere waarde.

In werkelijkheid zal in de huidige haven geometrie niet alleen de vertaalfactor hoger zijn, maar zullen de seiche-amplituden bij ROZ doorgaans ook navenant lager zijn (bij gegeven forcerings-sterkte). Daardoor hoeft strikt gesproken een hogere vertaalfactor niet tot een (even grote) toename in de rekenwaarde voor de seiche-amplitude bij de MLK te leiden (zie ook Paragraaf 8.3). In principe zou elk seiche-event vertaald moeten worden met de vertaalfactor die geldig is op het moment van optreden van dat event (in combinatie met statistiek afleiden op basis van die vertaalde waarden ter plaatse van de gesloten MLK in plaats van de

berekende seiche-statistiek voor ROZ te vertalen). In dat geval zou elke fase van de ontwikkeling van de geometrie van de Rotterdamse haven afzonderlijk beschouwd moeten worden. De vraag is of dat een praktische aanpak oplevert.

7.2 Vertaalfactor op basis van operationele sluitingen MLK

De vertaalfactor is effectief de verhouding tussen de grootte van de seiche-respons op twee locaties, uitgedrukt in amplitudes (beschouwd in andere hoofdstukken) of in top-dal-waarden. Die laatste maat voor de grootte van de seiche-response beschouwen we hier op basis van de gemeten waarden tijdens de operationele sluitingen van de MLK tot nu toe¹⁸. Het gaat daarbij om twee V-sluitingen en één S-sluiting. Hiervoor vergelijken we de maximale top-dal-waarde van de seiche op locatie ROZ met die tijdens hetzelfde event aan de zeezijde van de gesloten MLK. Dat is daarmee een praktische 'reality check' op de vertaalfactor.

Tabel 7-1 vat de relevante informatie samen. Uit gefilterde tijdreeksen van waterstanden direct ten westen van de MLK (WMO, WaterMeetOpstelling), operationeel ingezet voor de MLK, is de top-dal-waarde van de seiche-hoogte direct voor de gesloten kering afgeleid. De waarden voor ROZ waren reeds bekend als tussenuitkomst vanuit de identificatie van seiche-events voor die locatie (Hoofdstuk 5). De verhouding in seiche-hoogtes staat in de rechterkolom.¹⁹

Tabel 7-1: Top-dal-waarden seiches MLK en ROZ tijdens de V- en S-sluitingen van de MLK tot nu toe.

Parameter \ Datum	Type sluiting	Scheve opzet (cm)	Maximale top-dal-waarde seiche zeezijde MLK (cm)	Maximale top-dal-waarde seiche ROZ (cm)	Factor MLK/ROZ (-)
9 nov. 2007	V-sluiting	187	0.60	1.09	0.55
3 jan. 2018	V-sluiting	100	0.44	0.62	0.71
21 dec. 2023	S-sluiting	198	0.30	0.57	0.53

De V-sluiting uit 2007 en de S-sluiting laten een soortgelijke verhouding zien van circa 0.54. Uitgaande van die uitkomst is de oorspronkelijk afgeleide en ingezette waarde van 0.64 realistisch en licht conservatief.

De uitwerking voor de V-sluiting uit 2018 laat een afwijkende verhoudingswaarde zien. Voor die V-sluiting is de kering maar zeer kort ingezet (minder dan 4 uur) en er is mogelijk geen sprake geweest van een volledig opgebouwde seiche-response op de locatie van de MLK. Bij ROZ zal dat vanwege de constant aanwezige geometrie wel het geval zijn geweest. Dat verklaart echter niet de betrekkelijk hoge verhouding die gevonden wordt, omdat er uit die redenatie juist een lagere verhoudingswaarde volgt. Daarom is er gezocht naar een andere verklaring. Vanwege het betrekkelijk zwakke seiche-event tijdens deze situatie is de invloed van getij-invloeden in het seiche-frequentiebereik (Hoofdstuk 5) juist voor dit event verhoudingsgewijs groot (mede omdat dit event samenviel met de piek van springtij). Die getij-invloed is op beide locaties naar verwachting met een soortgelijke sterkte aanwezig²⁰, wat een verklaring kan zijn van een verhoudingswaarde dichter bij 1.

¹⁸ Merk op dat de jaarlijkse testsluiting (Functioneringssluiting, F-sluiting) in september doorgaans tijdens zeer rustig weer plaatsvindt en er dus in die situaties sowieso geen sprake zal zijn van een seiche.

¹⁹ Naast de eerder genoemde vergelijking tussen ROZ en EUR in De Jong (2004), is ook in Deltares (2014a) al een vergelijking met metingen van de seiche-response op twee locaties gemaakt. In dat laatste geval ging het om de verhouding tussen de gelijktijdig opgetreden seiche-events in Rotterdam (ROZ) en IJmuiden (Noordersluis).

²⁰ Indien de getij-invloed op de seiche-frequentieband voor de locatie van de MLK wordt geschat op basis van de hoogwaters op de dag voor en na de V-sluiting uit 2018, dan zou alleen al het getijeffect in het gefilterde seiche-tijdsignaal ter plaatse van de MLK overeenkomen met een (ogenschijnlijke) top-dalwaarde van circa 0.23 m. Aannemende dat die getij-bijdrage op beide locaties even sterk aanwezig is geweest, dan bedraagt de effectieve

Merk op dat alle sluitingen van de MLK tot nu toe overeenkomen met een scheve opzet < 2.5 m en daarmee niet in het bereik liggen waar de seiche-statistiek vanuit de 2D-kdf voor is afgeleid (Hoofdstuk 2). Dat is begrijpelijk voor de V-sluitingen, want die sluitingen zijn overeenkomstig een tijdelijk verlaagd sluitpeil, maar dit geldt opvallend genoeg ook de S-sluiting van 2023. Dit hoeft inzet van de seiche-statistiek zoals afgeleid niet in de weg te zitten, en met in de toekomst meer sluitingen van de MLK zullen er ook sluitingen bij hogere opzetwaarden plaats gaan vinden, maar het is wel een opvallende constatering.

7.3 Afsluiting check vertaalfactor

In de hierboven beschreven uitwerking zijn meerdere aspecten geanalyseerd van de vertaalfactor die ingezet wordt om te komen tot statistiek van seiche-amplituden bij de gesloten MLK. Dit heeft nadere inzichten opgeleverd, waaronder voor het eerst een vergelijking op basis van de gemeten seiche-waarden tijdens de tot nu toe opgetreden V- en S-sluitingen van de MLK. Die vergelijking onderbouwt voornamelijk de tijdens het ontwerp toegepaste vertaalfactor tussen ROZ en MLK. Echter, de uitwerking geeft ook aan dat de response van de haven in de loop van de tijd redelijk sterk veranderd is, waardoor het aannemen van een constante vertaalfactor voor een gehele statistische set aan events niet zondermeer te verdedigen is. Dit wordt nader beschouwd in het volgende hoofdstuk.

Om in de huidige studie op basis van een grotere set van meetwaarden toch te komen tot een consistente update van de statistiek van seiche-amplituden ter plaatse van de MLK, en om de nieuwe waarden rechtstreeks te kunnen vergelijken met die afgeleid in eerdere studies, wordt in het volgende hoofdstuk initieel de oorspronkelijke vertaalfactor ROZ-MLK aangehouden (0.64, Janssen, 1995).

vertaalfactor MLK/ROZ in dit geval: $(0.44-0.23)/(0.62-0.23) = 0.54$. Op die manier wordt alsnog dezelfde verhouding gevonden als voor de andere twee sluitingen, maar wel op basis van zeer veel aannames en interpretaties. Merk op dat de getij-invloed in de seiche-frequentieband tijdens de andere twee sluitingen relatief klein is geweest, omdat de sterkte van de seiches toen groter was en omdat die events niet samenvielen met de hoogste springtij-condities. De sluiting uit 2023 trad zelfs redelijk dichtbij doodtij-condities op, met de minste getij-invloed in het seiche-signaal.

8 Update van seiche-statistiek MLK

8.1 Uitgangspunten

In de volgende sub-paragrafen staan de uitkomsten van de statistische berekening van a_{seiche} voor de locatie MLK voor:

- oorspronkelijke dataset;
- nieuwe dataset;
- voorafgaand aan aanleg doorgang naar MV2;
- na aanleg doorgang naar MV2;
- gehele dataset.

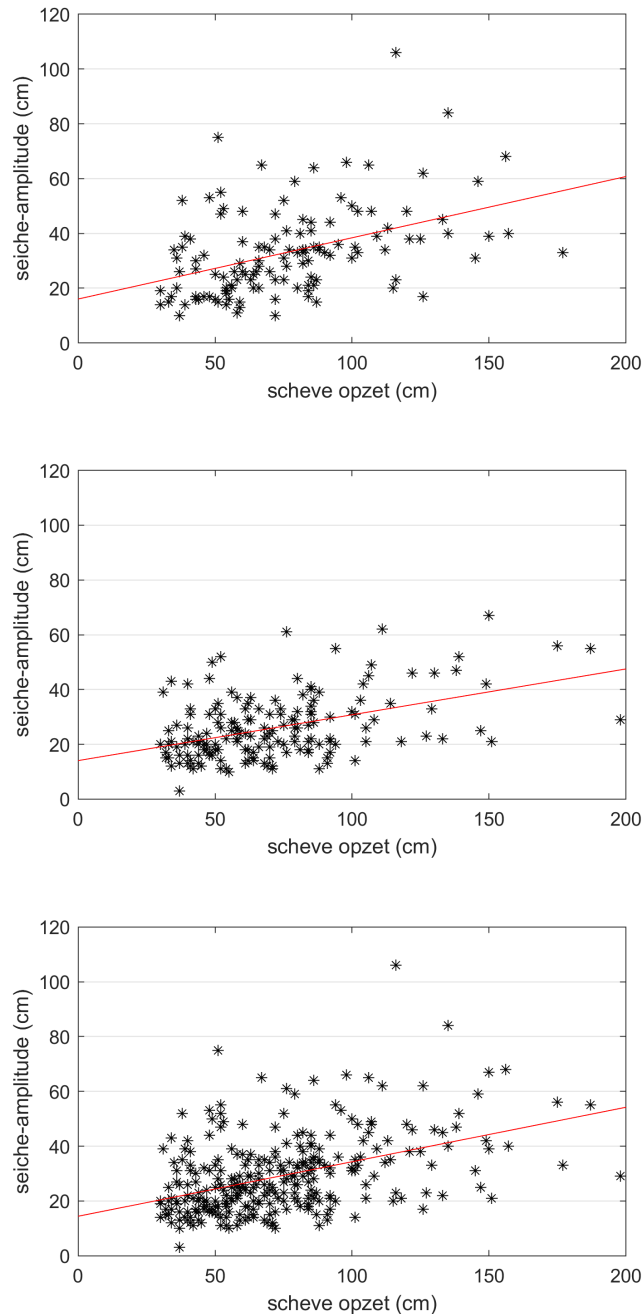
Per dataselectie zijn de beide hoofddelen van de berekening doorlopen (WL | Delft Hydraulics, 2005a, 2006, hier samengevat in Bijlage B):

- 1) regressieanalyse van dataset van geselecteerde seiche-events
- 2) integreren van de 2D-kansdichtheidsfunctie opgesteld op basis van de trendlijn uit 1)

Hierbij is de statistiek van ROZ in eerste instantie vertaald naar de locatie van de gesloten MLK uitgaande van vertaalfactor (r) ROZ \rightarrow MLK van 0.64. De vertaalfactor wordt, net als in voorgaande studies, per analyse-scenario als constante waarde ingezet om alle statistische waarden te schalen. Ook overige instellingen in de berekening zijn gelijk gehouden aan de uiteindelijke berekeningen tijdens het ontwerp van de MLK. Dat betekent dat opzetwaarden boven 2.5 m worden beschouwd en dat een offset in de opzetwaarden voor het afleiden van de regressie-parameters van 1 m is toegepast (WL | Delft Hydraulics, 2005a, 2006, Bijlage B).

In Figuur 8-1, op de volgende pagina, staan enkele voorbeelden met de scatterplots (seiche-amplitudes bij ROZ versus scheve opzet bij HvH) van seiche-events per deelselectie van data, met daarbij in rood weergegeven de voor die data-selectie gevonden trendlijn. De helling van de trendlijn is sterk bepalend voor het opstellen van de 2D-kansdichtheidsfunctie in Rekenstap 2. De verschillen in de gevonden helling in deze voorbeelden geven aan dat de dataselectie²¹ via die weg een grote invloed kan hebben op de uitkomsten. Dat wordt ook bevestigd in de volgende sub-paragrafen. De trendlijnen bevestigen dat in de nieuwe dataset gemiddeld gezien lagere waarden voor de seiche-amplituden opgenomen zijn. Opvallend in de resultaten is ook dat de spreiding in seiche-amplituden rondom de trendlijn in de nieuwe dataset een stuk kleiner is dan in de oorspronkelijke dataset. Een verschil in gemiddelde kan gelinkt zijn aan natuurlijke variatie, maar hier is niet in detail een verklaring gezocht. Een kleinere spreiding kan gekoppeld zijn aan de veranderingen in seiche-response die volgens de berekeningen uit Deltares (2014) is opgetreden met het doorgaven van de toegang naar MV2, en dan vooral de langste eigenperiode van het Calandkanaal. Om dat nader te interpreteren zouden plots met PHAROS-uitkomsten met de responsevormen in de verschillende bekkens geanalyseerd kunnen worden, maar een dergelijke analyse is geen onderdeel van de hier beschreven studie in 2024.

²¹ Een openstaande vraag hierbij is of het toepassen van alleen een ondergrens van de seiche-amplitude gepast is, of dat dan ook een bijbehorende ondergrens voor de opzet toegepast zou moeten worden, zeker indien er een correlatie verwacht wordt. Dit is in een eerdere studie reeds verkend (WL | Delft Hydraulics, 2006), maar ook dit zou in een vervolgstudie nader uitgezocht en her-verwogen kunnen worden (Paragraaf 9.3).



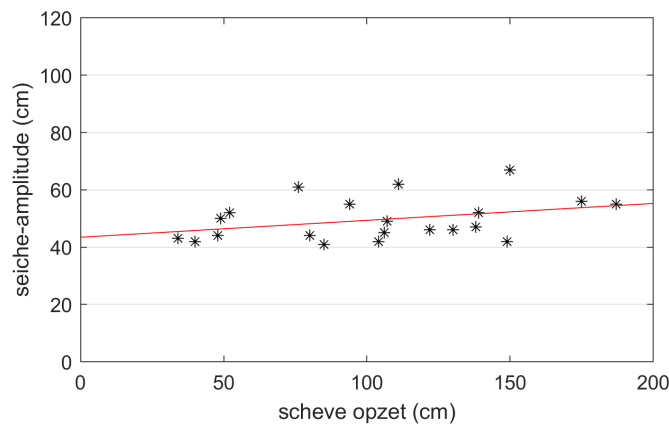
Figuur 8-1: Scatterplots van seiche-events (maximaal opgetreden seiche-amplitude en wind-geïnduceerde opzet per event) en regressieanalyse (rode lijn) van de dataset 1989-2005 (boven), de nieuwe dataset 2006-2023 (midden) en voor de combinatie van beide (onderste paneel).

In de studies rond 2005 ontstond de gedragen conclusie, na discussie met kennishouders en stakeholders, dat geen ondergrens op de seiche-amplitude toepassen gepast was. De vetgedrukte waarden in de tabellen in de hierop volgende sub-paragrafen zijn vanuit die context de hoofdantwoorden (ook nu uitgaande van 10^{-7} /jaar). Waar in die tabellen 'n.v.t.' is opgenomen kwam de berekening niet tot een uitkomst. De reden daarvoor²² is gekoppeld aan de spreiding rondom de trendlijn die in de berekening meegenomen wordt (WL | Delft

²² Andere oorzaken zouden in principe gekoppeld kunnen zijn aan: een onvoldoende groot bereik aan beschouwde opzetwaarden of onvoldoende (discrete) resolutie van de parameters die beschouwd worden (seiche-amplitude, opzetwaarden). Die potentiële oorzaken konden echter met gevoeligheidstesten eenvoudig uitgesloten worden.

Hydraulics, 2005a) en die onbedoeld vooral in geval van een (zeer) flauwe helling tot negatieve hellingen van de trendlijn kan leiden. En dat is niet in lijn met de te beschrijven absolute amplitude (slingeruitwijking) en de daarvoor toegepaste statistische verdelingen. Een voorbeeld van de scatterplot van een dergelijke situatie staat in Figuur 8-2.

Een ondergrens in de spreiding in de parameterwaarden die de trendlijn beschrijven, binnen de berekening weergegeven met discrete waarden (Bijlage B), zou niet-toepasbare hellingswaarden kunnen vermijden, maar dan zou ook de relatieve weging van de verschillende (discrete) deelberekeningen aangepast dienen te worden. Eigenlijk past dan de onderliggende aanname van een normale verdeling van de spreiding rondom die parameterwaarden sowieso niet meer. Eventueel zou ook de onzekerheid rondom de trendlijn in die situaties geheel niet meegewogen kunnen worden, maar daarmee is de berekening weer niet consistent en vergelijkbaar met de uitkomsten van de studies rond 2005 en met de oorspronkelijke analyses ten tijde van het ontwerp de MLK. Om die redenen is uiteindelijk geen aanpassing in de rekencode gemaakt en is 'n.v.t.' in voorkomende gevallen opgenomen.



Figuur 8-2: Voorbeeld van een dataselectie (dataset 2006-2023, $a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.4 \text{ m}$; overeenkomstig onderste rij van Tabel 8-2) waarbij de statistische berekening niet tot een oplossing komt.

8.2 Oorspronkelijke en nieuwe dataset

Tabel 8-1 en Tabel 8-2 bevatten de uitkomsten van de berekening van a_{seiche} voor respectievelijk de oorspronkelijke en de nieuwe dataset. Die eerste tabel is effectief de succesvolle reproductie van resultaten uit WL | Delft Hydraulics (2007). Die uitkomsten zijn inclusief een betrekkelijk hoog seiche (1.06 m) bij betrekkelijk lage opzet (1.16 m), in december 2005, dat een significant verhogend effect heeft op de op basis van die dataset berekende waarde voor $10^{-7}/\text{jaar}$ (+0.2 m, WL | Delft Hydraulics, 2007).

Tabel 8-1: a_{seiche} (m) op locatie gesloten MLK ($r = 0.64$) op basis van oorspronkelijke dataset

selectie events / aantal		herhaal-frequentie (1/jaar)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Alle gevallen		127	1.47	1.91	2.37	2.85
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$		94	1.00	1.24	1.50	1.78
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$		80	0.89	1.09	1.30	1.52
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$		67	0.76	0.93	1.09	1.27
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$		43	0.79	0.95	1.11	1.27
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$		31	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t

Tabel 8-2: als Tabel 8-1, nu voor events in de nieuwe dataset

selectie events / aantal		herhaal- frequentie (1/jaar)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Alle gevallen		170	1.09	1.40	1.73	2.10
a_{seiche, ROZ} >0.20 m		106	0.70	0.85	1.00	1.15
a_{seiche, ROZ} >0.25 m		74	0.70	0.82	0.95	1.08
a_{seiche, ROZ} >0.30 m		51	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
a_{seiche, ROZ} >0.35 m		31	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
a_{seiche, ROZ} >0.40 m		21	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

De uitkomsten in Tabel 8-2 zijn inclusief het seiche-event dat opgetreden is tijdens de tot nu toe enige S-sluiting van de MLK. Doordat er toen een redelijk laag seiche (0.29 m) bij een betrekkelijk hoge opzet (1.98 m) optrad heeft dat event een verlagend effect op de berekende seiche-statistiek. Het is opvallend dat de resulterende hoofduitkomst voor de nieuwe dataset (1.73 m, vetgedrukt in Tabel 8-2) toevallig bijna gelijk is aan de oorspronkelijke ontwerpwaarde voor a_{seiche} (1.80 m).

Opvallend is bovendien dat op basis van de nieuwe dataset een significant lagere waarde voor a_{seiche} wordt gevonden dan voor de oorspronkelijke dataset. Dat die nieuwe dataset gemiddeld lagere seiche-amplituden bevat bleek al uit de algemene dataset-beschrijvingen in Paragraaf 6.3, maar nu ook gecombineerd met de bijbehorende opzetwaarden blijkt de nieuwe dataset tot lagere waarden voor a_{seiche} voor de gesloten MLK bij grote herhaalfrequenties te leiden.

8.3 Voor en na openen van doorgang naar MV2

Het beeld in de vorige sub-paragraaf van de oorspronkelijke en de nieuwe dataset wordt nog sterker teruggevonden in de uitkomsten voor het interval tot aan de aanleg van de doorgang naar MV2 en voor het tijdsinterval sindsdien, opgenomen in respectievelijk Tabel 8-3 en Tabel 8-4.

Tabel 8-3: als Tabel 8-1, nu voor events tot aan opening doorgang naar MV2 (november 2012)

selectie events / aantal		herhaal- frequentie (1/jaar)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Alle gevallen		210	1.44	1.86	2.31	2.81
a_{seiche, ROZ} >0.20 m		147	0.99	1.21	1.46	1.72
a_{seiche, ROZ} >0.25 m		119	0.87	1.05	1.23	1.42
a_{seiche, ROZ} >0.30 m		96	0.76	0.90	1.04	1.20
a_{seiche, ROZ} >0.35 m		63	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
a_{seiche, ROZ} >0.40 m		45	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 8-4: als Tabel 8-1, nu voor events na opening doorgang naar MV2 (vanaf december 2012)

selectie events / aantal		herhaal- frequentie (1/jaar)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Alle gevallen		87	0.96	1.24	1.54	1.87
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$		53	0.55	0.64	0.76	0.87
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$		35	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$		22	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$		11	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$		7	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Waar in Paragraaf 8.2 de nieuwe dataset leidt tot een waarde van a_{seiche} van 73% van die voor de oorspronkelijke dataset, blijkt hier dat de waarde van a_{seiche} gevonden voor het interval sinds de aanleg van de doorgang naar MV2, uitgaande van dezelfde vertaalfactor ROZ – MLK ($r = 0.64$), 65% bedraagt van de waarde gevonden voor de periode tot aan die layout-aanpassing. Die laatste uitkomst versterkt het beeld dat de aanleg van de doorgang naar MV2 een significante (verlagende) invloed heeft gehad op de seiche-amplituden bij ROZ. De daling lijkt te sterk om enkel toe te schrijven te zijn aan natuurlijke variatie van-jaar-tot-jaar, ook al is het aantal events sinds die layout-aanpassing beperkt en komt de statistische berekening al bij een beperkte ondergrens van de seiche-amplitude al niet meer tot een uitkomst. Desondanks lijken de inzichten en hypothesen zoals beschreven in Paragraaf 7.1.4 hiermee vooralsnog bevestigd te worden.

Deze uitkomsten vormen een uitgangspunt voor een eventueel vervolgonderzoek onder SITO-PS (Paragraaf 9.3). Daarbij zou dan ook nader gekeken kunnen worden naar welke vertaalfactor toegepast zou moeten worden op die lagere uitkomst uit de dataset voor a_{seiche} sinds de layout-aanpassing voor MV2. Indien in plaats van de oorspronkelijk aangehouden 0.64 sinds de aanleg van MV2 eigenlijk 0.82 geldt (Paragraaf 7.1.2), dan geldt er eigenlijk als uitkomst voor a_{seiche} (10^{-7} /jaar) voor de situatie na de layout-aanpassing voor MV2: $1.54/0.64 \cdot 0.82 = 1.97 \text{ m}$. En daarmee komt die uitkomst al dicht bij de waarde die afgeleid is voor het interval tot aan die grote geometrieanpassing in de haven van Rotterdam. Bovendien is die resulterende waarde alsnog redelijk vergelijkbaar met de waarde voor a_{seiche} zoals oorspronkelijk aangehouden voor het ontwerp van de MLK (1.80 m)²³.

8.4 Totale dataset

Indien de totale dataset met seiche-events wordt ingezet (1989-2023) dan wordt voor a_{seiche} op de locatie van de gesloten MLK voor 10^{-7} /jaar de waarde 2.08 m gevonden (Tabel 8-5). In voorgaande studies is meermaals aangegeven dat ook in geval van een (beperkte) inbreuk op de consistentie van de dataset met seiche-events een groter aantal events altijd alsnog de voorkeur heeft boven een zeer strikte selectie van een formeel consistente deelset met een betrekkelijk laag aantal events (Hoofdstuk 3). Die redenatie volgend zou de gevonden 2.08 m de hoofduitkomst van deze fase van de studie zijn. Die waarde is beperkt afwijkend van de waarde die voor het ontwerp van de MLK is ingezet (1.80 m) en zal naar verwachting niet direct een groot knelpunt opleveren voor de huidige technische status en voor de inzet van de MLK.

²³ Die waarde is destijds afgeleid op basis van een andere seiche-statistiek bij ROZ en een andere vertaalfactor, al was het maar omdat MV2 toen nog niet aangelegd was. Echter, het is nu wel de waarde waar we de nieuwe uitkomsten mee vergelijken om te zien of een nieuw-berekende waarde sterk afwijkt en of er om die reden aanleiding zou zijn om de aanpak voor seiches voor de MLK sterk te gaan herzien.

Tabel 8-5: als Tabel 8-1, nu voor alle data (originele + nieuwe dataset)

selectie events / aantal	herhaal-frequentie (1/jaar)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Alle gevallen	297	1.29	1.67	2.08	2.52
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.20 \text{ m}$	200	0.84	1.02	1.22	1.43
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.25 \text{ m}$	154	0.79	0.95	1.11	1.27
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.30 \text{ m}$	118	0.73	0.85	0.98	1.12
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.35 \text{ m}$	74	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
$a_{\text{seiche, ROZ}} > 0.40 \text{ m}$	52	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Aan de andere kant lijkt de verandering in het seiche-response-gedrag van de haven, zoals beschouwd bij ROZ, sinds MV2 inmiddels zo ingrijpend dat het de vraag is of het uitgangspunt ‘meer data is altijd beter’ nog steeds op zal gaan. Maar misschien is de impact van een ander response-gedrag van de haven sinds die layout-aanpassing alsnog minder groot, aangezien voor volledige consistentie dan ook de vertaalfactor geldend voor die periode ingezet zou moeten worden. Daarmee wordt er alsnog ook voor dat tijdsinterval een waarde voor a_{seiche} rond 2 m berekend (Paragraaf 8.3).

Indien gewenst zouden nadere analyses uitgevoerd kunnen worden in een mogelijke vervolgstudie op dit onderwerp. Daarnaast kan op termijn, als er opnieuw significant meer jaren met data beschikbaar zijn gekomen, een nadere verificatie gedaan worden van de mogelijke trendbreuk in november 2012 door de aanleg van de opening naar MV2. Op dat moment zullen er ook veel meer events in de periode na die layout-aanpassing beschikbaar zijn gekomen, die het mogelijk maken om de check op een mogelijke trendbreuk betrouwbaarder uit te voeren.

9 Conclusies en vooruitblik

9.1 Samenvatting context en doel

De reden om het onderwerp seiches²⁴ op dit moment (meerjarig) te programmeren onder SITO-PS, is het maken van een update van de kennis en inzichten rondom dit fenomeen. Als aanvullend aspect zal nog worden nagegaan of er met nadere achtergrondkennis over seiches de modellering van de invloed van seiches op de Maeslantkering (MLK) vereenvoudigd kan worden. Op die manier kan uiteindelijk ook de aansturing van de MLK mogelijk minder complex worden, al is dat geen hoofddoel van deze studie. Indien dat toch mogelijk blijkt, dan zou dat naar verwachting bijdragen aan een lagere faalkans van de kering (kans op niet sluiten bij sluitvraag) en mogelijk efficiëntere inzet van operationele expertteams.

De hoofddoelstelling van de hier beschreven studiefase in 2024 was het updaten van de seiche-statistiek voor de MLK, uitgaande van de inmiddels tot aan eind 2023 beschikbare meetgegevens uit de haven van Rotterdam. Daarnaast is, als uitgangspunt voor het herijken van de inzichten en kennis over seiches in relatie tot de MLK, een overzicht gemaakt van de stappen in het proces van gemeten waterstanden tot aan (operationele) impact op de MLK. Voor het bijeenbrengen van inzichten uit voorgaande seiche-studies is bovendien een beknopt literatuuroverzicht aangemaakt. De belangrijkste conclusies die zijn verkregen uit de werkzaamheden in 2024 zijn in de volgende paragrafen bijeengebracht. Paragraaf 9.3 geeft een overzicht van aanknopingspunten voor mogelijke vervolgstudies op basis van het aangemaakte stappen-overzicht, het beknopte literatuuroverzicht en de resultaten uit 2024.

9.2 Belangrijkste conclusies

9.2.1 Overzicht analyse-stappen seiches en hun impact op de MLK

- Het proces om te komen van gemeten waterstanden in de haven van Rotterdam tot de wijze van aansturing van de MLK bestaat uit acht hoofdstappen.
- In Stap 1 – 4 (bijeengebracht in Tabel 2-1) wordt vanaf gemeten waterstanden in de haven van Rotterdam gewerkt naar seiche-statistiek op de locatie van de MLK. De overige werkzaamheden binnen de hier beschreven studie in 2024 hebben primair betrekking op deze vier stappen.
- In Stap 5 – 8 (bijeengebracht in Tabel 2-2) wordt de impact van seiches op de MLK vastgesteld en wordt in de huidige inzetwijze van de MLK de potentiële impact van seiches op de hydrodynamische belasting op de kering praktisch uitgesloten.
- Elk van de acht stappen bevat specifieke aanpakken, aannames en instelparameters, die oorspronkelijk goed onderbouwd gekozen zijn, maar die inmiddels opnieuw beschouwd en afgewogen zouden kunnen worden.

9.2.2 Beknopt overzicht voorgaande seiche-studies

- De seiches in Rotterdam zijn tijdens de ontwerpfase van de MLK en daarna in meerdere studies onderzocht. Daarbij is beperkte databeschikbaarheid doorgaans de belangrijkste limiterende factor gebleken. Seiches vormen een complex fenomeen waar inmiddels veel meer over bekend is geworden, maar waar ook nog vele aspecten onbekend van zijn of nog niet goed vastgesteld konden worden.

²⁴ Een beknopte beschrijving van seiches en van hun relevantie voor de Maeslantkering staat in Appendix A.

- Grootste aandachtspunten in de verschillende voorgaande studies naar de seiches in Rotterdam, en nog steeds, zijn:
 - mogelijke inconsistentie van de dataset van gemeten seiches als gevolg van voortschrijdende aanpassingen in de havengeometrie;
 - impact van de aanpassingen aan de havengeometrie op de verhouding tussen de versterking van seiche-amplituden op een doellocatie en op het ingezette referentie-meetpunt (Rozenburgse Sluis, ROZ), welke wordt ingezet als vertaalfactor van de seiche-statistiek afgeleid bij ROZ naar – in het geval van de huidige studie – de locatie van de MLK;
 - de vorm van het aanbodspectrum van golfenergie in het frequentiebereik van de seiches en de invloed daarvan op de vertaalfactor;
 - weergave van de invloed van demping als gevolg van onderlopende kades op de opslingering van seiches bij zeer hoge waterstand en/of seiche-amplituden.
- Er zijn tijdens de ontwerpfase verschillende afwegingen gemaakt voor selectie van consistente data – een periode met voldoende constante havengeometrie – maar uiteindelijk zijn toen alle gegevens ingezet die men had. Men vond toen blijkbaar het (statistische) nadeel van een zeer klein aantal events in een consistente dataset groter dan een mogelijk minder consistente grotere dataset met events.

9.2.3 Werkzaamheden voor Stap 1 – 4

Inzet nieuwe meetgegevens en identificatie events

- In deze studie zijn 18 jaar aan extra waterstandsmetingen van locatie ROZ succesvol ingezet. De metingen bleken van zeer goede kwaliteit en hadden gemiddeld per jaar minder dan 2% uitval.
- De analyse van die 18 jaar data heeft geleid tot de identificatie van 170 seiche-events. Die events zijn toegevoegd aan de dataset met seiche-events zoals afgeleid voor de seiche-statistiek voor de gesloten MLK in 2007. Toen zijn meetgegevens uit 1989-2005 beschouwd, met daarin 127 events (de 'oorspronkelijke dataset').
- De identificatie van seiche-events is nog altijd grotendeels expert-judgement. Dat proces zal niet eenvoudig geautomatiseerd kunnen worden, onder andere vanwege de invloed van getij-effecten (waaronder aggers²⁵) die reikt tot in het seiche-frequentiebereik.

Check op consistentie van de dataset met seiche-amplituden

- Een consistentiecheck tussen de nieuwe en de oorspronkelijke dataset, met in beide sets waarden voor seiche-amplituden afgerond op gehele centimeters, geeft aan dat voor hogere seiche-amplituden de samengevoegde dataset consistent is volgens de hier ingezette Run-test (Appendix B) en de daarbij toegepaste instellingen.
- Dat type consistentiecheck blijkt echter betrekkelijk gevoelig voor de aanwezigheid van meervoudig optredende waarden in de datasets met op gehele centimeters afgeronde amplitudes. Dit aspect is in voorgaande seiche-studies door Deltares reeds herkend en benoemd, maar is toen ondanks enkele gevoeligheidstesten naar huidige inzichten onderschat.
- Nieuwe gevoeligheidstesten, met een indirecte weergave van niet-afgeronde waarden van de seiche-amplituden, geeft aan dat op basis van die gegevens de Run-test (opnieuw inclusief de hier gekozen testinstellingen) de consistentie van de dataset bevestigt, ongeacht een ondergrens voor de seiche-amplitude.
- Echter, de sterke invloed van de afronding van waarden binnen de hier te beschouwen datasets op de uitkomst van de Run-test (en mogelijk gewenste aanpassingen in de testinstellingen) geeft aan dat inzet van een andere methode voor het doen van een consistentie-check benodigd is.

²⁵ Een agger is een korte toename in de waterstand rondom laagwater, waarna de waterstand eerst weer daalt voordat de vloed echt opkomt.

Vertaalfactor ROZ – MLK

- Berekeningen door Deltares uit 2014 van lokale versterkingspectra voor het gehele westelijke Rotterdamse havengebied, toen gemaakt voor WTI/BOI, waren de eerste en tot nu toe enige berekeningen van die spectra waarin ook de aanwezigheid van Maasvlakte 2 (MV2) is meegenomen. Een in de hier beschreven studie gemaakte nieuwe analyse van die spectra, voor verificatie van de vertaling tussen ROZ en de gesloten MLK, suggereert dat de oorspronkelijk voor het ontwerp van de MLK toegepaste vertaalfactor tussen die locaties – ten opzichte van de huidige haven-layout – een onderschatting bevat (0.64 toen tegenover 0.82 nu).
- Echter, die beschouwing is nog zonder de invloed die de amplitude van de seiche zelf heeft op het onderlopen van kades en of er daardoor sprake is van aanvullende demping van de seiche-opslinging. Indien dat in een benaderde wijze op basis van een compacte expert-interpretatie alsnog wordt gedaan, dan wordt een vertaalfactor van circa 0.7 gevonden. Dat lijkt daarmee bij benadering een bevestiging van de oorspronkelijk ingezette waarde van 0.64. Dit geeft aan dat het in detail weergeven van de invloed van demping van ondergelopen kades op het opslingerproces van de seiches cruciaal is om nader uit te werken. Een aanvullend aandachtspunt is dat de vertaalfactoren eigenlijk gelden voor een bepaalde fase in de ontwikkeling van de havengeometrie en dat die factor strikt genomen alleen kan worden ingezet voor vertalen van seiche-statistiek afgeleid op basis van metingen uit diezelfde periode (verderop nader beschouwd).
- In De Jong (2004) is de inzet van een vertaalfactor gevalideerd, maar voortschrijdend inzicht heeft laten zien dat die niet volledig is geweest. In De Jong (2004) is de verhouding afgeleid tussen gemeten seiche-amplituden voor ROZ en op een andere meetlocatie, die vervolgens vergeleken is met de theoretische vertaalfactor tussen die beide locaties. Daaruit volgde een goede overeenkomst. Op die manier is de lineaire basis-aanname voor het seiche-systeem goed gevalideerd, maar omdat de responsepiek bij ROZ en die op de tweede meetlocatie binnen het seiche-frequentiebereik relatief dicht op elkaar liggen was die verificatie volgens huidige inzichten minder geschikt om ook de aangenomen vorm van het aanbodspectrum te valideren. Dit is nog meer relevant wanneer men zich realiseert dat de response-pieken voor ROZ en MLK (oorspronkelijk²⁶) betrekkelijk ver uit elkaar liggen. In een vervolgstudie zal het daarom nuttig zijn om een soortgelijke validatie te doen als in De Jong (2004), maar dan voor locaties met de hoogste responsepiek bij een sterk afwijkende frequentie ten opzichte van ROZ.
- De drie operationele sluitingen²⁷ van de MLK tot nu toe – twee Verificatiesluitingen²⁸ (november 2007 en januari 2018) en één Stormsluiting (december 2023) – hebben in deze studie voor het eerst de mogelijkheid gegeven om op basis van gemeten seiche-amplituden (of seiche-hoogtes) de verhouding tussen het seiche op locatie ROZ en die gelijktijdig optredend bij de gesloten MLK te analyseren. Ondanks dat tijdens die sluitingen betrekkelijk lage seiches zijn opgetreden, en er daarmee dus niet een verificatie voor hogere seiches gemaakt kan worden, is die verhouding effectief een directe ‘reality check’ op de vertaalfactor tussen die beide locaties. Voor deze sluitingen werd een verhouding van circa 0.54 gevonden. Daarmee lijkt de oorspronkelijk toegepaste vertaalfactor van 0.64 te worden bevestigd, inclusief enig conservatisme.

²⁶ In de meest recent berekende spectra, op basis van de haven-layout inclusief MV2, liggen de grootste responsepieken van beide locaties dicht bij elkaar vanwege een frequentieverschuiving van de hoogste piek bij ROZ.

²⁷ Merk op dat de jaarlijkse testsluiting (Functioneringsluiting, F-sluiting) in september doorgaans tijdens zeer rustig weer plaatsvindt en er dus in die situaties sowieso geen sprake zal zijn van een seiche.

²⁸ Een Verificatiesluiting (of V-sluiting) is een sluiting van de MLK tijdens een stormseizoen met een tijdelijk verlaagd sluitpeil. Daartoe wordt door RWS overgegaan nadat circa zeven jaren een sluiting op basis van het reguliere sluitpeil niet heeft plaatsgevonden. Het doel daarvan is onder andere om de ervaring in de operationele teams met de sluitingen op peil te houden en opleiding van nieuwe teamleden mogelijk te houden.

Seiche-statistiek MLK (a_{seiche})

- De seiche-statistiek voor de MLK zoals afgeleid in de meest recente voorgaande studie op dit onderwerp (WL | Delft Hydraulics, 2007) kon in de huidige studie met de uit het projectarchief van Deltares teruggehaalde rekencodes worden gereproduceerd. Die rekencodes zijn vervolgens ingezet voor statistische berekeningen op basis van de nieuwe dataset van seiche-events. Hierbij is gekeken naar de waarde berekend voor een 10^{-7} /jaar kans op optreden, net als in de oorspronkelijke ontwerpstudies.
- Uitgaande van de oorspronkelijk voor het ontwerp van de MLK ingezette vertaalfactor van ROZ naar de MLK (0.64) is de berekende waarde van a_{seiche} voor de nieuwe dataset (2006-2023) – 1.73 m – significant lager dan die berekend voor de oorspronkelijke dataset (1989-2005) – 2.37 m. Dat beeld wordt versterkt indien de inzet van meetgegevens wordt opgesplitst voor het tijdsinterval voor ($a_{\text{seiche}} = 2.31$ m) en na de aanleg van de doorgang naar MV2 ($a_{\text{seiche}} = 1.54$ m). Het beeld van een lagere seiche-opslingering bij ROZ sinds die grote geometrie-aanpassing wordt nader onderbouwd door de seiche-versterkingsspectra van die locatie van voor en na de layout-aanpassing. Deze conclusies en observaties hebben een link met de mogelijke (in)consistentie van de totale dataset bestaande uit de samenvoeging van beide data-delen. De vraag daarmee is of de uitkomst voor a_{seiche} op basis van de samengestelde dataset (2.08 m) representatief is.
- De lagere waarde voor a_{seiche} op basis van de data sinds de aanleg van MV2 zou eigenlijk ten bate van consistentie gecombineerd moeten worden met de vertaalfactor die voor die periode is afgeleid (0.82 in plaats van 0.64). In dat geval wordt de waarde voor a_{seiche} berekend op basis van dat tijdsinterval: $1.54/0.64*0.82 = 1.97$ m. Die uitkomst komt dichterbij de waarde die gevonden is voor het tijdsinterval voorafgaand aan die grote geometrie-aanpassing, daarbij uitgaande van de oorspronkelijke vertaalfactor²⁹. Dit geeft aan dat het interpreteren van uitkomsten voor a_{seiche} eigenlijk altijd zo veel als (praktisch) mogelijk een combinatie zou moeten zijn van seiche-statistiek en de voor hetzelfde interval geldende vertaalfactor. Gezien de vele aanpassingen aan de haven zal dat niet voor alle situaties een praktische aanpak opleveren. In ieder geval zal rekening gehouden moeten worden met de meest ingrijpende layout-aanpassingen.
- Een beknopte, verkennende analyse van de mogelijke invloed van zeespiegelstijging op de berekening van a_{seiche} liet – conform verwachting – zien dat de overige onzekerheden rondom de statistiek van seiches voor de MLK bepalender lijken te zijn en eerst aangepakt dienen te worden.
- Omdat de seiche-statistiek is gebaseerd op slechts enkele decennia aan meetgegevens kan juist een enkel event dat sterk afwijkt van het (aangenomen) verband tussen opzethoogte en seiche-amplitude, een lage seiche bij hoge opzet of andersom, een betrekkelijk grote invloed hebben op de berekende statistiek. Zo lang er een aanpak toegepast zou kunnen worden die eventuele inconsistente van de meetgegevens door geometrie-aanpassingen kan omzeilen, zou door het steeds verder toevoegen van meetdata de berekende waarde voor a_{seiche} steeds stabielere moeten worden.
- Uiteindelijk zal de betrouwbaarheid en representativiteit van de seiche-statistiek en de verdere inzet van die uitkomsten beschouwd moeten worden binnen de context van de acht hoofdstappen binnen het proces van waterstandsmetingen in de haven tot aan de complexe operationele inzet van de MLK, inclusief het daarin op dit moment operationeel effectief uitsluiten van het optreden van een kritieke invloed van seiches op de kering.

²⁹ Bovendien ligt die uitkomst betrekkelijk dicht bij de waarde zoals oorspronkelijk ingezet voor het ontwerp van de MLK (1.80 m), daarmee aangevend dat deze nieuw-berekende waarde mogelijk een beperkte impact heeft ten opzichte van de oorspronkelijke ontwerp-aanname.

9.3 Potentiële aanknopingspunten voor vervolganalyses en her-evaluaties

De toevoeging van meer meetdata, zoals in eerdere hoofdstukken van deze rapportage beschreven, heeft niet geleid tot een grote aanpassing in de berekende seiche-statistiek. Ondanks geconstateerde ontwikkelingen in de seiche-respons van de Rotterdamse haven, is een grote verandering ook niet direct te verwachten, want er wordt vooralsnog uitgegaan van de oorspronkelijke methode voor het afleiden van die statistiek. Maar die vergelijkbare uitkomst wil niet zeggen dat daarmee alle onzekerheden en potentiële optimalisaties van de inzet van data en gemaakte berekeningen opgelost en verwerkt zijn. De oorspronkelijk ingezette methode kent veel onzekerheden, aannames en expert-keuzes die opnieuw beschouwd zouden moeten worden, wil men de kwantificering van statistiek van seiche-amplitudes voor de MLK met meer zekerheid uitwerken. Dat zou ook kunnen betekenen dat er een geheel andere aanpak voor de uitwerking van de seiche-statistiek benodigd zal zijn. Bovendien is de statistiek van de seiche-amplitudes bij de MLK iets anders dan vervalstatistiek voor de kering. Dat laatste is een ander vraagstuk en vergt een andere aanpak en modelinstrumentarium.

Hieronder zijn per hoofdstap in het analyse-proces van de seiches voor de MLK de onderwerpen bijeengebracht die geïdentificeerd zijn voor mogelijke nadere uitwerking en analyse in vervolgstudies. Die lijst is gebaseerd op de in deze rapportage beschreven nieuwe resultaten, gecombineerd met de aannames en werkwijzen beschreven in het overzicht van de originele acht hoofdstappen (Tabel 2-1 en Tabel 2-2).

Bijeengebracht vormen de verschillende onderwerpen een betrekkelijk lange lijst. In overleg tussen RWS en Deltares of vervolgonderzoek op korte termijn gewenst is en zal worden nagegaan welke onderwerpen de meeste urgentie en prioriteit hebben, mede op basis van verwachte impact en uitbreidbaarheid van de benodigde studies. Hierbij wordt ook aangeraden om de experts betrokken bij het oorspronkelijke ontwerp en de beheerder van de MLK te raadplegen op (operationele) toepasbaarheid van de verschillende onderstaande suggesties en bij het maken van een prioritering van eventueel gewenste vervolgonderzoeken.

- Stap 1 (Afleiden seiche-amplituden uit meetdata ROZ):
 - keuzes voor selectie van events (onder andere: opzet \geq 0.3 m), mogelijke subjectieve aspecten van expert-interpretatie van situaties.
- Stap 2 (Opzoeken scheve opzet tijdens events):
 - verschil opzetwaarden bij HvH ten opzichte van andere locaties in de haven;
 - maximale opzet bij HvH per event aanhouden (in plaats van opzet tijdens max. seiche-amplitude)
 - timing tussen opzetverloop en moment van maximale seiche-amplitude.
- Stap 3 (Afleiden seiche-statistiek ROZ):
 - maximale seiche-amplitude per event aanhouden (invloed verloop in amplitude gedurende een event?);
 - instelparameters 'Methode Vrouwenvelder' (onder andere: c, opzet $>$ 2.5 m);
 - check consistentie van seiche-data met behulp van andere methoden dan de vooralsnog ingezette Run-test, die betrekkelijk gevoelig blijkt voor afgeronde meetwaarden en daardoor veel meermaals voorkomende waarden (Hoofdstuk 7);
 - keuze voor ondergrens seiche-amplitude en mogelijk bijbehorende opzetsdrempel;
 - nagaan van de onzekerheidsbanden die het gevolg zijn van de huidige aanpak voor het afleiden van seiche-statistiek;

- ontwikkelen van een andere statistische methode voor het afleiden van a_{seiche} , bijvoorbeeld gebruikmakend van copula's³⁰, onder andere beter passend bij de context van (het vermijden van) negatief verval³¹.
- Stap 4 (Vertaling seiche-statistiek ROZ → MLK):
 - gevoeligheid vertaalfactor vorm spectrum energieaanbod;
 - verificatie van aanpak vertaling (lineair) op basis van validatie voor meerdere meetlocaties, met betrekkelijk groot verschil in dominante seiche-periode;
 - nagaan van de mogelijkheid om per event de amplitude bij ROZ te vertalen naar de MLK op basis van de vertaalfactor die op dat moment gold en vervolgens statistiek afleiden op de vertaalde dataset voor locatie MLK, in combinatie met daarna in rekening brengen van de dempende invloed van ondergelopen kades in extreme situaties;
 - kwantificering van onzekerheden in de vaststelling van vertaalfactoren;
 - berekening spectra in PHAROS, inclusief invloed onderlopende kades in combinatie met validatie van die aanpak op basis van berekeningen in ander type rekenmodel (tijdsdomein) voor een selectie aan condities.
- Stap 5 (Weergave seiches in een belastingsmodel):
 - nieuw hydrodynamisch belastingsmodel voor statistische weergave van vervallen over de MLK, hernieuwen van RASFLOW, R/Flow (groter dan voorzien voor SITO-PS; als los initiatief door RWS voorzien), waarbij ook afstemming met en aansluiting bij andere initiatieven benodigd zal zijn (Kennis voor Keringen, BOI);
 - aannahme van 32 componenten gecombineerd met een versterkingsspectrum;
 - invloed spectrumvorm energie-aanbod, gecombineerd met vier amplituden aan de monding;
 - invloed van fases voor 32 componenten en kans van voorkomen van meest ongunstige situatie;
 - invloed van een her-berekende waarde voor a_{seiche} indien die sterk afwijkt van de oorspronkelijk in het ontwerp aangehouden waarde.
- Stap 6 (Invloed seiches op ontstaan negatief verval):
 - optreden van meest ongunstige timing van een diep dal van een seiche, dus op momenten tijdens de keringsinzet waarbij de opzet nog laag is;
 - onbekendheid van snelheid van opbouw van negatief verval en het nu geheel vermijden van negatief verval;
 - verkennen van inzet ontwerpwaarde 1.5 m negatief verval;
 - verkennen of ontwerpwaarde 1.5 m negatief verval door nadere uitwerking en verdieping oorspronkelijke analyses vergroot kan worden.
- Stap 7 (Seiche-Invloed opvangen in inzetwijze MLK):
 - verkennen haalbaarheid en wenselijkheid van aanspreken van ontwerpwaarde negatief verval.
- Stap 8 (Complexe aansturing MLK):
 - grenswaarden voor negatief verval (0.05 m tijdens afzinken en 0 m tijdens rusten op de drempel), nagaan of die minder strikt kunnen;
 - controle op krachtbalans zoals ingezet bij de aansturing van de MLK, onder andere in relatie tot die op basis van RASFLOW door Deltares zijn ingezet in bijdragen aan de Acceptatie-test-omgeving van de MLK (zie Deltares, 2019, en referenties daarin vermeld);

³⁰ Een copula is een gecombineerde verdelingsfunctie waarvan de marginale verdelingen uniform zijn. Door die copula te combineren met de afzonderlijke specifieke marginale verdelingen van de beschouwde parameters kan statistiek worden afgeleid.

³¹ In de bestaande methode worden hoge maximale opzetwaarden per event beschouwd, terwijl eigenlijk de situaties aan het begin of eind van de storm – met beperkte opzet – naar verwachting maatgevend zijn voor het kunnen optreden van negatief verval.

- welke kans hoort bij de meest extreme, worst-case seiche-conditie indien uitgedrukt in het meest ongunstig samenvallen van de voor het ontwerp van de MLK beschouwde 32 seiche-componenten?

De inzet van het netto seiche-effect, zoals uitgebreid toegepast binnen BOI (Deltares, 2014b), is nog niet opgenomen in de bovenstaande lijst omdat inzet van die parameter in zijn huidige vorm niet gepast is binnen de hier beschreven context van negatief verval over de MLK. Het netto seiche-effect, zoals gedefinieerd binnen de context van BOI, beschrijft de waterstandsverhogende invloed van een seiche rondom een hoogwater. De inzet van de seiche-amplitude blijft in de hier beschreven studie mogelijk echter van toepassing omdat op elk gegeven moment, ongeacht bij welke waterstand, die amplitude een plotselinge verlaging van de waterstand aan de zeezijde van de kering kan opleveren, met daardoor (extra) kans op een groot negatief verval. Dit in tegenstelling tot de aanpak binnen BOI, waarbij naar de bijdragen van seiches aan de hoogste waterstanden is gekeken om zo de invloed van seiches op de vaste waterkeringen in het westelijke Rotterdamse havengebied te kwantificeren (Deltares, 2014b). Echter, er zou verkend kunnen worden of de aanpak uit BOI aangepast zou kunnen worden om zo ook de invloed van seiches op negatief verval over de MLK te beschrijven.

Referenties

- Alkyon (2010), Actualisatie Seiches Europoort, C04011.002451R2r1, 15 Oktober 2010.
- Deltares (2010), Update of the seiche allowances for the Rotterdam Europoort area - WTI 2009/2010, input for the Hydraulic Boundary Conditions 2011, 1200103-052-ZWS-0005, 10 November 2010, final.
- Deltares (2013), Toetsing nota HR Nieuwe Zeesluis IJmuiden - Evaluatie seiche-toeslag, 1208138-000-HYE-0004, 11 juli 2013.
- Deltares (2014a), Statistiek seiches buitenhaven IJmuiden voor ontwerp nieuwe zeesluis, 1209945-000-HYE-0002, 23 juli 2014, definitief.
- Deltares (2014b), Actualisatie seiches Rotterdam WTI2017 - Waterstandsafhankelijke seiche-waarden, 1209433-006-HYE-0002, 16 december 2014.
- Deltares (2015a), Expert-beoordeling invloed verdieping Nieuwe Waterweg op seiches, memo, 1220363-000-HYE-0002, 19 mei 2015.
- Deltares (2015b), Expert-interpretatie invloed verdieping Nieuwe Waterweg op Maeslantkering, memo, 1221262-000-HYE-0002, 30 november 2015 (inclusief aanvulling op seiche-analyse Deltares, 2015a).
- Deltares (2015c), Inventarisatie van potentiële seiche-locaties in Nederland – Verkenning en Plan van Aanpak, 1220039-010-VEB-0001, 22 september 2015.
- Deltares (2016a), Beknopte analyse seiche-signaal waterstanden zeezijde tijdens Verificatiesluiting 2007, 1230119-000-HYE-0018, 10 juni 2016. Ten bate van verzamelde vastlegging later opgenomen in Bijlage B van Deltares (2019).
- Deltares (2016b), Seiches - Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen, 1230042-007-ZWS-0001, 17 november 2016.
- Deltares (2017a), Seiches – Analyse waterstandsmetingen en invloed opwekkingsmechanismen tijdens extremen, 11200537-009-ZWS-0001, Versie 1, 6 oktober 2017.
- Deltares (2017b), Expert-interpretatie seiches Tuimelkade Rotterdam, 11201269-002-HYE-0001, 20 november 2017.
- Deltares (2018), Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning, rapport 11202230-005-0002, M. Haasnoot, L. Bouwer, F. Diermanse, J. Kwadijk, A. van der Spek, G. Oude Essink, J. Delsman, O. Weiler, M. Mens, J. ter Maat, Y. Huismans, K. Sloff, E. Mosselman.
- Deltares (2019), Overkoepelende rapportage bijdragen Deltares aan A-omgeving Maeslantkering BesW, 1230119-000-HYE-0033, 28 juni 2019.
- Deltares (2020), Expert-interpretatie potentiële invloed seiches op Blankenburgtunnel, 11203721-050-GEO-0001, 20 oktober 2020
- De Jong, M.P.C. (2004). Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins. ISBN 90-9017925-9: Delft University of Technology.

- Janssen , J.P.F.M. (1990), Optimalisatie verdelingen van max opzet als functie van de faseverdeling, SVKW-TOC-90.016.
- Janssen , J.P.F.M. (1995), Collectie van seiche-memo's en notities, SVKW_TOC_95xxx.
- Rijkswaterstaat (zonder datum, z.d.), Basisdocumentatie Maeslantkering - Handboek 2: Kerende wand en vakwerkarmen v3.0. M00-ALG-04-NL.
- Rijkswaterstaat (1987), Toetsingsplan Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, Nota 1: Analyse alternatieven, SW2-N-87300, Reeuwijk, 30 September 1987, Werkgroep Techniek SVKW (SW2)
- Rijkswaterstaat (1995), Evaluatie SVKW: bolscharnier, Bouwdienst Rijkswaterstaat, documentnummer 39872.
- Rijkswaterstaat (1999), Parapludocument seiches, een overzicht en verantwoording van de activiteiten van de projectgroep seiches 1995-1999, documentnummer: A-14-0021.
- Rijkswaterstaat (2002), Maeslantkering, Verbetering scharnierconstructie Fase 1 onderzoek en analyse, PPS-nummer 7077, PRL-2002-022.
- Rijkswaterstaat (2022), Wettelijke beoordeling Europoortkering I, Dijktraject 208, Hoofdrapport, 13 juni 2022, Versie 2.2, Status Definitief.
- RWS Ontwerpt (2022). Beoordeling Europoortkering I Dijktraject 208.
- TNO Bouw (1994), Statistisch model voor seichehoogten ten behoeve van de kering in de Nieuwe Waterweg, 4.21.3.8581 (A.C.W.M. Vrouwenvelder), 17 p.
- TNO Bouw (1995), Statistisch model voor seichehoogten ten behoeve van de kering in de Nieuwe Waterweg (aanvullende berekeningen), 5.21.3.8887 (A.C.W.M. Vrouwenvelder), 34 p.
- Veraart, C. (1994), Events of long waves in the North Sea, RIKZ-94.034, Rijkswaterstaat/RIKZ en TU Delft.
- WL | Delft Hydraulics (2004), Statistiek seiches Rotterdam, Deel 1, Identificatie seiche-gevallen Rozenburgse Sluis 1989-2004, december 2004 (H4540).
- WL | Delft Hydraulics (2005a), Seiche Statistiek Rotterdam, Deel 2, Beschrijving methode voor ontwerp SVKW en toepassing van nieuwe meetgegevens, november 2005 (H4678).
- WL | Delft Hydraulics (2005b), Invloed seiches op benodigde terreinhoogte MV2 – Studie naar het gedrag van seiches in de haven van Rotterdam tijdens extreme stormen, mei 2005 (H4592).
- WL | Delft Hydraulics (2006), Seiche Statistiek Rotterdam, Deel 3, Selectie dataset metingen en bepaling nieuwe ontwerpwaarde seiche-amplitude SVKW, juli 2006 (H4678).
- WL | Delft Hydraulics (2007), Analyse en advies seiche-voorspellingen en methodiek seiche-statistiek, december 2007 (H5038).

A Seiches en hun relevantie voor de MLK

Seiches zijn zeer lange golven die in een haven, of op een meer, door resonantie versterkt worden. Het zijn staande golven, die in een havenbekken zich vooral manifesteren als een op-en-neergaande waterstand. De grootste uitwijking treedt op 'achterin' de haven bij het gesloten einde van een bekken en de laagste uitwijking nabij de ingang van het havenbekken. Deze beweging treedt op naast de getijbeweging en de mogelijk aanwezige korte golven.

Omdat het water in het gehele bekken als gevolg van het seiche op-en-neer beweegt is dit type golven niet zo zichtbaar als reguliere windgolven of deining. Ook is hun amplitude (waterstandsuitwijking) ten opzichte van hun golflengte betrekkelijk gering. Zij hebben dus een zeer lage golfsteilheid. De tijdschalen van dit type golven hangen primair af van de dimensies van het betreffende havenbekken (horizontale afmetingen en waterdiepte). In Rotterdam vallen de seiches in een periodebereik van circa 10 minuten tot meerdere uren.

Ondanks dat de seiches in Rotterdam dus niet 'met het blote oog' zichtbaar zijn kunnen zij een grote invloed hebben op processen in de haven. De grootste praktische invloed hebben seiches in Rotterdam op de MLK. Tijdens het sluiten van die kering wordt een tijdelijk bekken aan de zeezijde van de kering gecreëerd waarin lokale seiches op kunnen treden en waarin ook seiches vanuit andere bekkens merkbaar zullen zijn (als gevolg van uitstraling). Een top van een seiche kan door een hogere waterstand aan de zeezijde een toename in het verval over de kering veroorzaken (positief verval). Een dal van een seiche kan juist bijdragen aan de grootte van een negatief verval over de kering, dat wil zeggen met een hogere waterstand aan de rivierzijde van de kering. Het risico daarop is het grootst aan het begin (of eind) van een storm en zolang er nog niet (of niet meer) door stormopzet een buffer van positief verval over de kering aanwezig is. Het keringstype van de MLK heeft meerdere voordelen, waaronder het bieden van een grote doorvaaropening. Echter, een groot nadeel van dit keringstype is dat deze slechts een beperkt negatief verval op kan nemen; bij een groter negatief verval bestaat het risico dat de kering uit zijn bolscharnieren wordt getrokken. Dat zou het falen van de kerende functie betekenen, naast het overall technisch falen van de kering.

De kering is primair ontworpen voor een hoge waterstand vanaf zee (250 MN, 4 m positief verval, maximaal 300 MN tot 350 MN, Rijkswaterstaat, z.d., 1987, 1995, 2002). Het beeld is doorgaans dat de MLK geheel geen negatief verval aankan, maar de ontwerpwaarde van de kering voor negatief verval is -50 MN tot -65 MN, overeenkomstig -1.5 m (Rijkswaterstaat, z.d., 1987, 1995, 2002). Echter, vooral als gevolg van seiches is het met name onzeker *hoe snel* een negatief verval opbouwt, indien dat zou optreden. Om die reden wordt in de huidige operationele keringsinzet de waterstand aan beide zijden van de kering continue gemonitord en wordt de kering gedurende een sluiting met slechts een klein netto gewicht op de drempel gehouden (dit proces noemt men 'dynamisch voorspanbeheer', zie Bijlage B van Rijkswaterstaat, 2022). Tijdens het afzinken wordt een grens van 0.05 m negatief verval aangehouden en met de kerende wanden op de drempel is de grens 0.0 m (waardoor het beeld kan ontstaan dat de kering geheel geen negatief verval aan kan). Zodra die waarde optreedt, en er een (groter) negatief verval dreigt op te gaan treden, wordt de kering direct opgedreven. Dat wil zeggen: de pompen worden direct aangezet om het beperkte netto gewicht uit de kerende wanden te verwijderen. Het opdrijven heeft twee effecten: 1) de krachten op de kerende wanden van de MLK nemen direct af omdat die minder diep in het water steken en 2) de seiche zal minder sterk opslingeren omdat een deel van de waterbeweging onder de inmiddels drijvende kering door zal gaan. Effectief wordt zo het optreden van een (groot) negatief verval in de praktijk vermeden. Nadeel van deze aanpak is echter dat de aansturing van de kering juist vanwege de seiches betrekkelijk complex is en daarmee faalgevoelig.

B Samenvatting statistische methode a_{seiche}

B.1 Omschrijving principe

B.1.1 Twee hoofddelen van de methode

De oorspronkelijk gehanteerde methode voor de berekening van de (ontwerp)waarde voor a_{seiche} voor de MLK wordt in deze appendix samengevat op basis van een beschrijving die oorspronkelijk is opgenomen in WL | Delft Hydraulics (2005a). De methode wordt de 'Methode Vrouwenvelder' genoemd, naar de oorspronkelijke auteur van deze aanpak (TNO Bouw, 1994, 1995).

De Methode Vrouwenvelder is opgesplitst in twee hoofddelen. Het eerste deel bestaat uit analyse van de beschikbare gegevens van waarden van seiche-amplituden en corresponderende opzet³² en het vinden van een lineaire trend in deze data met behulp van een regressieanalyse. Het tweede deel bestaat uit het bepalen van een tweedimensionale kansdichtheidsfunctie voor opzet en seiche-amplitude op basis van de in Stap 1 geschatte trend. Uit deze tweedimensionale kansdichtheidsfunctie wordt vervolgens de marginale verdeling voor de seiche-amplitude afgeleid.

In de huidige studie wordt dezelfde methode ingezet en wordt nagegaan wat de invloed is van het toevoegen van meer seiche-events uit een langere tijdreeks met waterstanden en opzetwaarden uit de Rotterdamse haven.

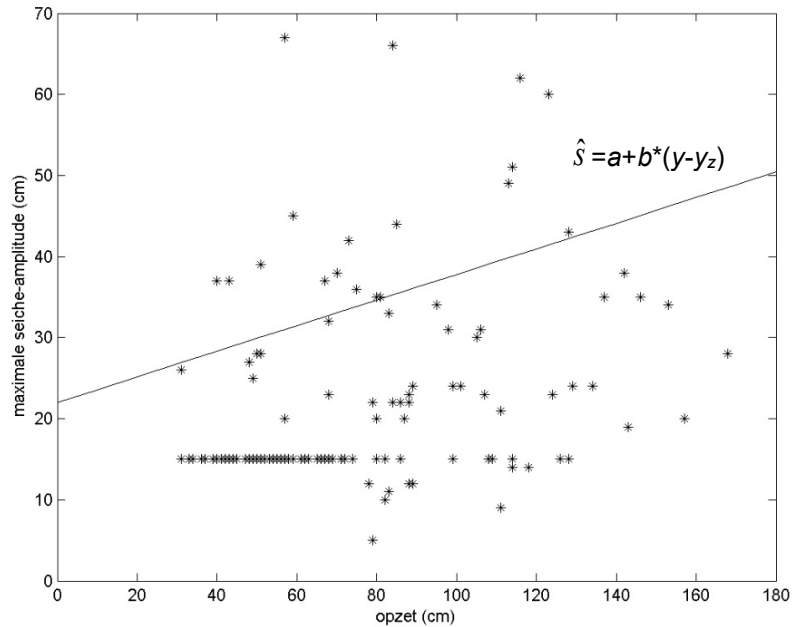
B.1.2 Deel 1: Regressie opzet en seiche-amplitude

De Methode Vrouwenvelder (TNO Bouw, 1994, 1995) gaat uit van de hoofdaanname dat er een (significante) correlatie bestaat tussen de maximaal optredende seiche-amplitude (\hat{s}) en de grootte van de met het seiche-event samenvallende opzet (y). Dit uitgangspunt is op basis van de destijds beschikbare kennis en inzichten aangehouden, aangezien de data aangaven dat seiches doorgaans optreden tijdens stormen, en dus tijdens intervallen met veel wind en relatief hoge opzetten.

Op basis van een Maximum Likelihood (MLH)³³ methode is een schatting gemaakt van de verwachtingswaarde (μ_a en μ_b) van de parameters a en b die de lineaire trend door de data vormen (dit is geïllustreerd in Figuur B-1): $\hat{s}=a+b*(y-y_z)$, met y de opzet, \hat{s} de maximale seiche-amplitude en y_z = zwaartepunt (gemiddelde) van de opzetwaarnemingen. Voor deze laatste parameter is uiteindelijk een waarde van 1.0 m aangehouden. De verwachtingswaarde voor a en b in de analyse komen overeen met de *least-squares* schatting van deze parameters. Daarnaast is ook de spreiding (de onzekerheid: σ_a en σ_b) van de parameters van de trendlijn in deze methode geschat. Voor de verdere analyse is in de Methode Vrouwenvelder aangenomen dat a en b een normale verdeling hebben en onafhankelijk zijn. De spreiding in die parameters wordt in de volgende stap meegenomen bij het vaststellen van de marginale verdeling van de seiche-amplituden (de onzekerheid in a en b wordt uitgeïntegreerd).

³² Waar in deze bijlage 'opzet' vermeld staat wordt bij de praktische inzet van de methode de scheve opzet bedoeld, zie de hoofdtekst van deze rapportage.

³³ Volgens de interpretatie beschreven in WL | Delft Hydraulics (2005a), aangezien dit niet expliciet in de rapportage van de oorspronkelijke afleiding van de methode vermeld is.



Figuur B-1: Voorbeeld lineaire regressieanalyse.

B.1.3 Deel 2: Tweedimensionale kansdichtheidsfunctie opzet en seiche-amplitude

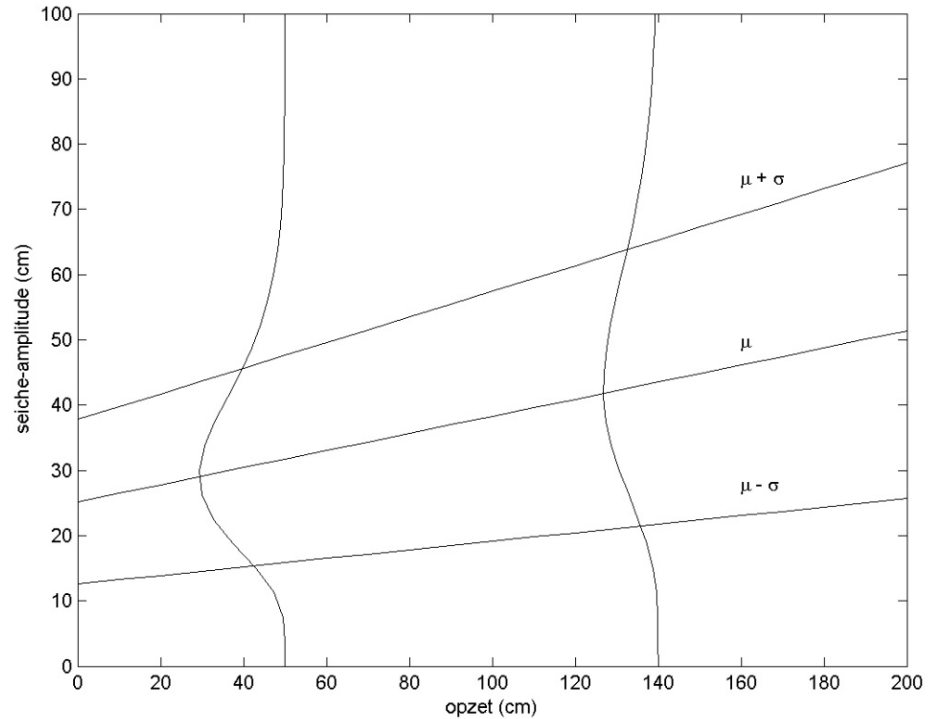
Voor de kansverdeling van de combinaties van opzetten en seiche-amplituden wordt de lineaire trend gebruikt om een tweedimensionale kansdichtheidsfunctie te bepalen. Hiervoor is aangenomen dat de spreiding in de waarden van de seiche-amplitudes (en dus ook in de kansdichtheidsfunctie) rond de lineaire trend, voor een gegeven opzet, een gammaverdeling volgt. Het gemiddelde (μ) van deze verdeling wordt gegeven door de waarde op de lineaire trend (toenemend voor toenemende opzetwaarden) en de spreiding van de verdeling is aangenomen op basis van een constante variatiecoëfficiënt (algemeen gedefinieerd als: $V = \sigma/\mu$). Deze aanname is in TNO Bouw (1994,1995), op basis van de destijds beschikbare inzichten en meetgegevens, op fysische gronden gedaan. Deze aanpak betekent dat bij toenemende waarden van de opzet een grotere spreiding in de verdeling wordt aangenomen, zoals geïllustreerd in Figuur B-2. In deze illustratie is de Gamma-verdeling voor twee gegeven waarden van opzet schetsmatig weergegeven (geprojecteerd in het platte vlak).

Op basis van deze aanpak wordt de tweedimensionale kansverdeling voor opzet en seiche-amplitude opgespannen door de voorwaardelijke kansverdelingen voor de seiche-amplitude voor gegeven opzetwaarde te vermenigvuldigen met de marginale verdeling van de opzet, oftewel: $P(s, y) = P(s|y) \cdot P(y)$, met $P(s | y)$ een Gammaverdeling.

Uit de tweedimensionale kansverdeling wordt de marginale verdeling van de seiche-amplituden afgeleid door integratie over de opzetwaarden. Hierbij is voor het afleiden van de seiche-statistiek voor de MLK een drempelwaarde van de opzet aangehouden van 2.5 m (aannemende dat de MLK voor die opzetwaarden gesloten zal zijn). Dit betekent dat voor het bepalen van de marginale verdeling van de seiche-amplituden alleen kans-massa boven deze drempelwaarde van de opzet is meegenomen. Voor een vastgestelde/gekozen overschrijdingsfrequentie (overschrijdingskans) kan op basis van de marginale kansverdeling de bijbehorende seiche-amplitude worden bepaald.

Opgemerkt wordt dat het toepassen van een constante variatiecoëfficiënt (in plaats van bijvoorbeeld een constante standaarddeviatie) een significante invloed heeft op de resultaten. Hierdoor wordt de verdeling van de seiche-amplituden voor gegeven waarde van opzet breder voor oplopende opzetwaarden, waardoor relatief veel kans-massa bij hogere seiche-

amplituden gevonden wordt. Dit resulteert in een conservatieve aanpak omdat voor een gegeven (opgelegde) overschrijdingsfrequentie een hogere seiche-amplitude gevonden wordt.



Figuur B-2: Illustratie tweedimensionale kansdichtheidsfunctie, geprojecteerd in het platte vlak.

B.2 Berekening van seiche-statistiek op basis van 2D-kdf

De beschikbare meetgegevens beschrijven seiche-maxima tijdens seiche-gevallen. De tweedimensionale kansdichtheidsfunctie zoals beschreven in de vorige paragraaf is in TNO (1994, 1995) opgezet in twee fasen: eerst voor de opzet in combinatie met een seiche-intensiteit (s_i), /welke vervolgens omgezet is naar de ontwerpwaarde van de seiche-amplitude voor gegeven overschrijdingsfrequentie (s_d) (details beschreven in de oorspronkelijke rapportages van TNO).

Om de tweedimensionale kansdichtheidsfunctie uit de vorige paragraaf te bepalen voor opzet en seiche-intensiteit moet eerst het verband tussen de verwachtingswaarde van de grootste seiche-amplitude (\hat{s}) en de seiche-intensiteit (s_i) bepaald worden. Onder de aanname dat de seiche-toppen Rayleigh verdeeld zijn, wordt dit verband gegeven door:

$$\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\hat{s}}{s_i}\right)^2\right) = \frac{1}{n} \quad (\text{B-1})$$

met n het aantal toppen per waarnemingsperiode. Aangenomen is in TNO Bouw (1994) dat een waarnemingsperiode 24 seiche-toppen bevat. Dit betekent dat de seiche-intensiteit als volgt samenhangt met de maximale seiche-amplitude tijdens een seiche-geval:

$$s_i = \frac{\hat{s}}{\sqrt{2 \ln(n)}} \approx \frac{\hat{s}}{2.5} \quad (\text{B-2})$$

In TNO Bouw (1994) is opgemerkt dat de gevoeligheid voor de 'keuze' van n in deze formulering relatief gering is.

Op basis van dit verband kan de seiche-statistiek worden afgeleid. Aangezien het doel van de studie destijds de statistiek bij de kering was, is een analyse gemaakt op basis van de te accepteren faalkans van de kering (P = faalkans per jaar) voor wat betreft seiches. Voor de seiches is destijds een kans van 10^{-7} /jaar aangehouden (praktisch gezien is de faalkans gelijk aan de overschrijdingsfrequentie). Aangenomen wordt dat één seiche-uitwijking al belastend werkt. De faalkans van de kering kan dan als volgt worden beschreven:

$$P(\text{falen}) = P(\text{"sluiten" en "seiche} > s_d \text{ tijdens sluiten"}) = \iint_{y > y_s} cP(s > s_d | s_i) f(s_i | y) f(y) ds_i dy \quad (\text{B-3})$$

met:

c	een empirische (expert-judgement) reductiefactor (0.25) die aangenomen is aangezien de maximale seiche-amplitude in de sluitingsduur van de kering lager zal zijn dan die in de totale stormduur (de waarden voor \hat{s} zijn uit de meetdata afgeleid op basis van de gehele stormduur)
s_i	intensiteit (standaardafwijking) van het seiche-proces
s	individuele seiche-amplitude
s_d	ontwerpwaarde ('design') van de individuele seiche-amplitude
y	opzet
y_s	opzet overeenkomstig het sluitpeil (uiteindelijk is 2.5 m toegepast, deze waarde wordt ook in de huidige studie gehanteerd)
$P(s > s_d s_i)$	een Rayleigh-verdeling
$f(s_i y)$	kansdichtheidsfunctie van s_i bij gegeven opzet y (Gammaverdeling)
$f(y)$	de marginale kansdichtheidsfunctie van de opzet

De marginale kansdichtheidsfunctie voor de opzet is destijds (TNO Bouw, 1994,1995) gebaseerd op een gefitte verdeling die beschreven staat in Janssen (1990). De gehanteerde verdeling wordt gegeven door:

$$P(y > y_s \text{ per jaar}) = 10^{\left(\frac{y-1.80}{0.7}\right)} \quad (\text{B-4})$$

Voor $f(s_i | y)$ wordt het gemiddelde en variatiecoëfficiënt van de verdeling van de seiche-amplituden voor gegeven opzet gegeven door (afgeleid uit de regressieanalyse van opzet en seiche-amplitude):

$$\mu(s_i) = \frac{\mu(\hat{s})}{2.5} = (a + b(y - y_z))/2.5, V(\hat{s}) = \frac{\sigma}{\mu} = \text{std}(\ln \hat{s}) \quad (\text{B-4a,b})$$

De factor 2.5 in de verwachtingswaarde van s_i (4a) volgt uit (B-2). De waarde voor de variatiecoëfficiënt van de Gammaverdeling is destijds gelijk genomen aan de standaarddeviatie van $\ln(\hat{s})$. De variatiecoëfficiënt voor de verdeling van de seiche-intensiteit rondom het gemiddelde wordt aangepast voor het feit dat een deel van de variatie die waargenomen is in de verzameling maximale seiche-amplituden per geval het gevolg is van de spreiding in de maximale top bij gegeven seiche-intensiteit, dit resulteert in een reductie van de variatiecoëfficiënt (V) volgens $V(s_i)^2 = V(\hat{s})^2 - V(R)^2$, met $R = 0.17$ (afgeleid op basis van de Rayleigh-verdeling voor de seiche-toppen). Uiteindelijk is de gecorrigeerde waarde voor $V(s_i)$ in de berekeningen toegepast.

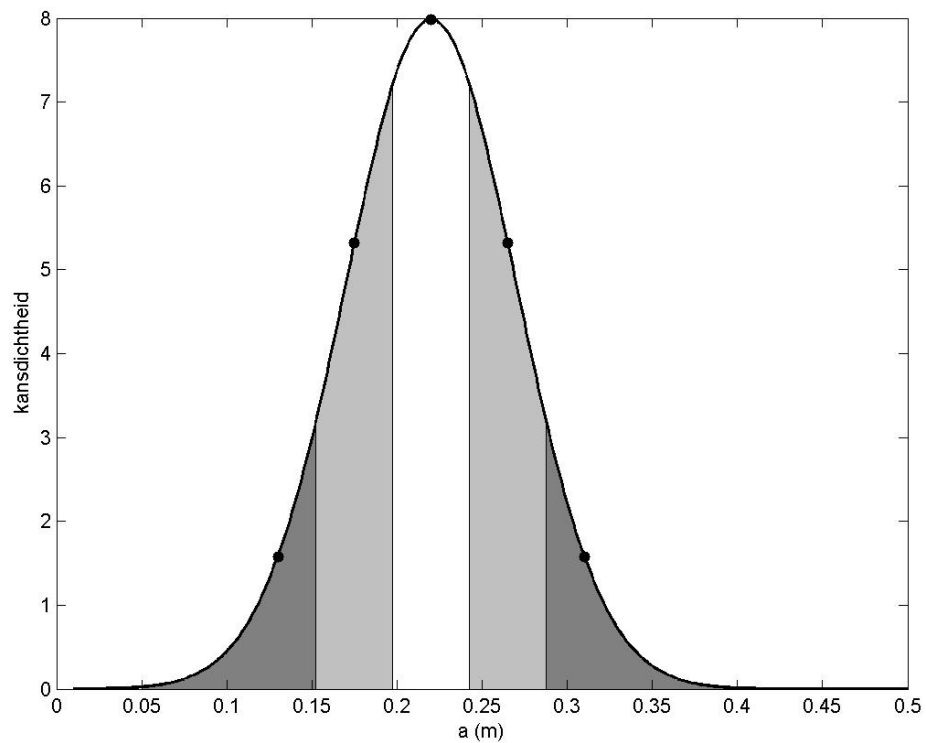
Opgemerkt wordt dat de Gamma-verdeling, die gebruikt wordt voor de verdeling van de seiche-amplituden, doorgaans niet gekarakteriseerd wordt door gemiddelde (μ) en standaarddeviatie (σ), maar door twee constanten, A en B . De verwachtingswaarde en de variantie van de Gamma-verdeling hangen als volgt samen met deze constanten:

$$\mu = AB, \sigma^2 = AB^2 \quad (\text{B-5a,b})$$

Omgeschreven betekent dit voor de constanten van de Gamma-verdeling:

$$A = \frac{1}{V^2}, B = \mu V^2 \quad (\text{B-6a,b})$$

In de berekening wordt vervolgens ook de onzekerheid in de parameters a en b van de lineaire trend meegenomen. De meest gedetailleerde manier om dit te doen is het uitvoeren van een *Monte Carlo* simulatie. In praktisch opzicht is aangenomen dat het voldoende is om voor a en b elk 5 discrete waarden te selecteren (pers. overleg J.P.F.M. Janssen): het gemiddelde en op twee vaste intervallen rondom het gemiddelde (op $0.75 \cdot \sigma_a$ en $1.50 \cdot \sigma_a$). De afzonderlijke resultaten voor elke combinatie van a en b worden gewogen met de corresponderende kans-massa van elk van de geselecteerde waarden van de parameters. Dit principe is geïllustreerd in Figuur B-3, waarbij de verschillend gearceerde oppervlakten de kans-massa voor elk van de geselecteerde waarden voorstelt.



Figuur B-3: Schets van weging van discreet gekozen waarden voor parameter a .

Deze benadering is in WL | Delft Hydraulics (2005a) geverifieerd. Na een berekening op basis van een *Monte Carlo* simulatie (tot 100 waarden voor a en voor b afzonderlijk, resulterend in 10000 combinaties) werden slechts relatief kleine verschillen tussen de resultaten van beide methoden gevonden.

B.3 Rekenprogramma

Door TNO Bouw (1994, 1995) is met een aantal probabilistische rekenpakketten de Methode Vrouwenvelder doorgerekend (Niveau II berekeningen). Daarnaast heeft J.P.F.M. Janssen in een *Quattro Pro* spreadsheet de seiche-statistiek bij ROZ/SVKW volgens de Methode Vrouwenvelder in een statistische Niveau III berekening uitgewerkt van Vergelijking (B-3). De integralen zijn hierbij benaderd door gebruik te maken van Riemann-integralen (dus op basis van discrete sommaties).

De Niveau III berekening van J.P.F.M. Janssen is in het kader van WL | Delft Hydraulics (2005a) in Matlab opnieuw geprogrammeerd (inclusief de optie voor een Monte Carlo simulatie voor de variatie in a en b). Ook de methode voor het afschatten voor de parameters voor a en b (inclusief hun spreiding) overeenkomstig de lineaire trend is in Matlab geprogrammeerd. Deze laatste methode is in WL | Delft Hydraulics (2005a) geverifieerd aan de hand van standaardmethoden zoals deze in bijvoorbeeld Excel beschikbaar zijn, waarbij beide methoden identieke resultaten opleverden voor de verwachtingswaarden van a en b .

C Beschrijving Run-test data-consistentie

Om de consistentie van de datasets te controleren is een statistische test uitgevoerd op de (deel)reeksen met seiche-amplituden. De formeel te toetsen hypothese is dat beide deelreeksen uit dezelfde verdeling afkomstig zijn.

Voor de controle van de hypothese is, net als in de eerdere seiche-studies rond 2005, gekozen voor het uitvoeren van een Run-test. Deze test is speciaal geschikt voor het verifiëren van de consistentie van twee deelreeksen. Een voordeel van deze methode is dat het een non-parametrische test is, dat wil zeggen dat de test niet afhangt van de statistische verdeling van de deelreeksen (die in dit geval juist onbekend is).

Voor de test worden de beide reeksen samengevoegd en gesorteerd op toenemende hoogte. Hierbij wordt bijgehouden welke waarden uit welke reeks afkomstig zijn. Een run vervolgens is gedefinieerd als een aaneengesloten deel in deze gesorteerde totaalreeks dat bestaat uit waarden uit één deelreeks. Runs uit beide delen staan dus om en om in de gesorteerde reeks (waarbij een run ook de lengte kan hebben van één getal). Indien de data van de deelreeksen uit dezelfde verdeling afkomstig zijn, dan zullen de waarden voldoende goed verdeeld/gemixt zijn en moeten dus relatief veel van deze individuele runs gevonden worden.

Voor een gegeven kans (α) op het onterecht verwerpen van de nulhypothese (een Type 1 fout) kan een kritische, minimaal benodigde waarde van het aantal runs worden bepaald (zie WL | Delft Hydraulics, 2005a, en referenties daarin vermeld). Deze minimale waarde voor het aantal runs is afhankelijk van het aantal waarden in de deelreeksen ten opzichte van het totale aantal waarden in de samengevoegde dataset en het aantal combinaties van run-uitkomsten dat daarbinnen mogelijk is. Indien het aantal runs in de waargenomen totale dataset boven de kritische waarde ligt dan wordt de hypothese geaccepteerd.

Het in deze studie opnieuw ingezette script is oorspronkelijk aangemaakt door Deltares ten tijde van de studies rond 2005 (WL | Delft Hydraulics, 2004-2007). Dat script voert de Run-test uit via de volgende stappen:

- samenvoegen van beide te checken datareeksen om een totaalreeks te vormen, waarbij van welk getal bijgehouden wordt uit welke deelset afkomstig³⁴;
- sorteren van de totaalreeks op oplopende grootte;
- bepalen van het aantal runs in de totaalreeks;
- de ondergrens bepalen van het minimaal benodigde aantal runs voor een bevestiging van de hypothese;
- verifiëren of het aantal runs in de totaalreeks minimaal even groot is als het minimaal benodigde runs om zo de hypothese van een consistente dataset te controleren.

Voor de testen beschreven in Hoofdstuk 6 van de hoofdtekst is gebruik gemaakt van $\alpha = 0.05$ (5% kans op het onterecht verwerpen van de hypothese). Deze waarde is een gangbare waarde voor dit soort testen. Een keuze voor een andere waarde voor α kan in principe resulteren in een andere uitslag, maar de vraag daarbij is of een strenger of minder streng criterium te onderbouwen is.

³⁴ Hiervoor wordt één van beide deelsets omgevormd tot complexe getallen (met zelfde (absolute) grootte) en wordt de gehele set op grootte van de (complexe) getallen gesorteerd. Vervolgens kan aan het wel/niet complex zijn van de gesorteerde data afgelezen worden uit welke deelreeks elke waarde afkomstig is.

D Data oorspronkelijk ingezet voor ontwerp MLK

Overzicht seiche-gevallen december 1971 t/m december 1983, overgenomen uit de meest recente voorgaande beschrijving, uit WL | Delft Hydraulics (2005a).

Oude dataset, toegepast voor ontwerp van SVKW, inclusief correcties door J.PF.M Janssen. Aanvullende gevallen (dummywaarden) hebben een amplitude van 0.13 m toegewezen gekregen. Deze zijn in onderstaande overzichten cursief weergegeven.

Opzet >0.75 m

Datum	opzet (cm)	a _{seiche} (cm)
720127	88	12
721113	157	20
730212	86	13
730403	128	13
731021	107	23
731106	82	13
731113	106	31
731119	129	24
731125	109	13
731206	143	19
731214	146	35
740116	118	14
741028	108	13
741128	126	13
741205	84	22
741211	114	13
741218	114	13
741230	89	24
751026	111	21
751120	99	13
760103	168	28
760115	82	10
760121	142	38
761130	87	20
771001	75	36
771112	137	35
771124	124	23
771229	116	62
780911	79	22
780917	79	5
790111	98	31
790309	105	30
791106	86	22
791218	114	14
800419	128	43
801118	78	12

801206	84	66
801231	124	55
810114	114	51
810322	88	23
811011	88	22
811124	134	24
811203	95	34
820311	99	24
820408	85	44
820819	80	15
820920	80	35
821116	83	33
821210	81	35
821216	101	24
830101	80	20
830118	113	49
830202	153	34
830321	123	60
830912	89	12
831019	83	11
831127	111	9

Opzet tussen 0.3 m en 0.75 m

Datum	opzet (cm)	a _{seiche} (cm)
720120	30	13
720212	41	13
721021	73	42
721121	40	37
721202	47	13
721214	53	13
730127	45	13
730223	67	37
740111	50	13
740129	56	13
740206	71	13
740212	68	13
740223	31	13
741006	50	13
741023	49	13
741110	31	13
741119	44	13
741224	68	13
750107	49	25
750118	44	13
750218	44	13
750307	39	13
751003	62	13
751128	58	13
751208	70	38
751224	39	13
760213	63	13
760301	55	13
761007	62	13
761102	42	13
761123	40	13
761204	45	13
761211	44	13
761226	48	27
770102	43	37
770126	66	13
770204	36	13
770220	47	13
770305	57	13
770312	33	13
771103	45	13
780112	62	13
780125	57	67
780228	33	13
780309	41	13
780315	37	13
781116	47	13
781127	43	13

781213	55	13
790102	57	20
790208	59	13
791018	43	13
791205	65	13
791231	51	39
800201	62	13
800303	31	26
800312	34	13
801002	52	13
801008	51	28
801018	65	13
801029	74	13
801128	59	45
801215	67	13
801226	42	13
810204	59	13
810210	69	13
810311	52	13
811020	50	13
811104	50	28
811114	68	32
811214	68	23
811218	34	13
820105	48	13
820129	51	13
820207	40	13
820214	61	13
820304	72	13
821009	33	13
821015	61	13
821027	54	13
821228	49	13
830115	67	13
830211	48	13
830228	58	13

E Data uit WL | Delft Hydraulics (2005a)

Overzicht seiche-gevallen januari 1989 t/m maart 2004 (overgenomen uit WL | Delft Hydraulics, 2005a).

Geüpdatete dataset, alle gevallen met opzet ≥ 0.3 m. Aanvullende gevallen hebben in de studie uit 2005 een amplitude van 0.05 m toegewezen gekregen (cursief weergegeven). In vervolgstudies is een dataset zonder die dummywaarden ingezet (zie Appendix F).

Jaar	maand	dag	opzet (m)	seiche-amplitude (m)
1989	2	5	38	5
1989	2	14	177	33
1989	2	19	32	5
1989	2	27	55	5
1989	3	1	61	5
1989	3	8	32	5
1989	3	13	63	5
1989	3	23	80	33
1989	4	14	31	5
1989	5	12	32	5
1989	5	30	31	5
1989	6	27	34	5
1989	7	31	54	5
1989	8	1	46	5
1989	10	22	37	5
1989	10	30	36	5
1989	11	5	31	5
1989	11	9	46	5
1989	12	15	62	5
1989	12	19	78	5
1989	12	26	45	5
1990	1	17	62	5
1990	1	24	76	5
1990	1	29	49	5
1990	2	3	95	36
1990	2	11	116	23
1990	2	20	81	5
1990	3	2	135	40
1990	3	9	80	20
1990	3	25	76	41
1990	4	3	43	5
1990	4	11	54	5
1990	4	15	36	5
1990	7	1	31	5
1990	7	6	64	5
1990	7	10	33	5
1990	8	20	57	5
1990	9	20	95	5

1990	9	21	88	34
1990	10	7	72	10
1990	10	29	46	5
1990	11	3	42	5
1990	11	19	72	5
1990	12	12	157	40
1990	12	21	44	5
1990	12	26	86	64
1991	1	6	77	5
1991	1	10	38	35
1991	2	16	45	5
1991	3	20	31	5
1991	4	7	45	5
1991	4	17	46	17
1991	4	22	30	19
1991	6	16	37	5
1991	9	22	41	5
1991	10	2	85	5
1991	10	18	102	33
1991	11	5	62	5
1991	11	13	75	31
1991	12	18	107	48
1991	12	24	88	35
1992	1	4	39	5
1992	2	3	66	28
1992	2	16	53	49
1992	2	23	43	5
1992	2	28	33	5
1992	3	12	84	30
1992	3	21	51	5
1992	3	26	36	31
1992	4	16	80	5
1992	4	25	34	5
1992	5	1	32	5
1992	5	9	39	5
1992	7	14	31	5
1992	8	14	37	5
1992	9	4	38	5
1992	10	15	46	32
1992	10	26	41	5
1992	11	3	59	13
1992	11	11	89	5
1992	11	19	87	15
1992	11	26	90	5
1992	12	3	64	20
1992	12	12	40	5
1993	1	11	70	5
1993	1	16	67	5
1993	1	25	133	45
1993	2	21	146	59
1993	3	17	38	5

1993	4	7	40	5
1993	8	6	47	5
1993	9	27	37	26
1993	10	12	35	5
1993	10	21	65	26
1993	11	14	121	5
1993	12	9	95	5
1993	12	16	71	5
1993	12	20	68	5
1993	12	31	39	5
1994	1	1	35	5
1994	1	14	39	5
1994	1	23	66	30
1994	1	28	145	31
1994	1	31	71	5
1994	2	2	57	5
1994	2	10	40	5
1994	3	5	37	5
1994	3	14	70	5
1994	3	19	30	5
1994	3	26	47	5
1994	4	4	72	38
1994	4	14	34	5
1994	6	4	32	5
1994	8	12	39	5
1994	9	16	92	32
1994	9	27	35	5
1994	10	3	43	27
1994	11	1	41	5
1994	11	15	46	5
1994	12	9	45	5
1994	12	16	49	5
1994	12	31	57	5
1995	1	2	135	84
1995	1	10	150	39
1995	1	19	49	5
1995	1	26	90	33
1995	1	30	53	5
1995	2	2	58	5
1995	2	7	42	5
1995	2	12	32	5
1995	2	20	63	5
1995	2	23	48	17
1995	2	28	43	5
1995	3	3	66	5
1995	3	20	79	59
1995	3	27	98	66
1995	4	7	56	21
1995	4	18	36	5
1995	5	17	40	5
1995	6	8	37	10

1995	6	15	34	5
1995	8	26	52	55
1995	9	28	83	34
1995	10	18	39	14
1995	11	3	63	23
1995	11	17	51	75
1995	12	26	59	5
1996	2	17	66	5
1996	3	28	39	5
1996	5	27	34	5
1996	6	21	34	5
1996	7	24	52	5
1996	8	29	67	65
1996	9	12	60	37
1996	9	27	30	5
1996	9	30	34	5
1996	10	4	31	5
1996	10	21	44	5
1996	10	29	109	5
1996	11	1	59	5
1996	11	6	84	19
1996	11	13	34	17
1996	11	20	60	5
1996	11	26	63	5
1996	11	30	57	26
1996	12	2	83	5
1997	2	4	35	5
1997	2	13	64	5
1997	2	19	77	34
1997	2	20	85	24
1997	2	26	60	5
1997	3	2	50	25
1997	3	19	45	5
1997	3	27	45	5
1997	4	6	52	47
1997	4	11	65	5
1997	4	29	44	5
1997	5	6	57	5
1997	6	14	40	5
1997	6	23	57	5
1997	6	30	38	5
1997	9	9	30	5
1997	9	13	40	5
1997	10	2	62	5
1997	10	10	75	52
1997	12	12	52	5
1997	12	25	54	14
1997	12	29	30	5
1998	1	2	46	5
1998	1	5	87	23
1998	1	19	100	31

1998	2	3	59	29
1998	2	7	36	5
1998	2	16	38	5
1998	2	21	32	5
1998	2	28	72	16
1998	3	5	80	5
1998	3	11	58	23
1998	4	13	65	5
1998	6	11	31	5
1998	6	16	30	5
1998	7	8	33	5
1998	7	14	53	5
1998	8	24	45	5
1998	9	16	101	35
1998	10	10	51	5
1998	10	12	72	23
1998	10	20	62	5
1998	10	25	108	5
1998	10	29	93	5
1998	11	6	52	5
1998	11	10	65	5
1998	11	27	33	5
1998	12	5	60	48
1998	12	13	61	25
1998	12	19	38	5
1998	12	27	59	15
1998	12	31	31	5
1999	1	8	47	5
1999	1	16	76	5
1999	1	27	37	5
1999	2	5	126	62
1999	2	9	43	16
1999	2	17	102	48
1999	2	22	121	38
1999	2	26	34	5
1999	3	1	40	5
1999	3	22	62	5
1999	4	7	30	5
1999	4	13	54	20
1999	5	22	39	5
1999	6	20	36	5
1999	7	22	46	5
1999	8	15	36	20
1999	8	19	40	5
1999	9	28	33	5
1999	10	1	57	5
1999	10	31	33	5
1999	11	2	43	5
1999	11	6	126	17
1999	11	18	38	52
1999	11	29	30	5

1999	12	4	125	38
1999	12	12	82	29
1999	12	17	101	5
1999	12	27	62	5
2000	1	4	81	5
2000	1	9	42	5
2000	1	22	67	5
2000	1	29	115	20
2000	2	9	86	21
2000	2	17	76	28
2000	2	28	52	5
2000	3	2	53	24
2000	3	9	52	5
2000	3	14	72	47
2000	4	4	48	5
2000	4	13	36	5
2000	5	28	56	5
2000	6	14	41	5
2000	7	11	64	5
2000	7	16	35	5
2000	9	2	54	5
2000	9	6	54	19
2000	9	16	34	5
2000	10	6	38	5
2000	10	21	32	5
2000	10	31	44	5
2000	11	3	43	17
2000	11	19	39	5
2000	12	2	32	5
2000	12	8	37	5
2000	12	15	80	5
2000	12	30	75	23
2001	1	3	53	5
2001	1	27	50	5
2001	2	8	40	5
2001	2	12	41	5
2001	2	23	48	53
2001	3	13	51	5
2001	4	1	33	5
2001	4	5	44	16
2001	4	18	48	5
2001	5	3	39	5
2001	5	17	50	16
2001	5	29	31	5
2001	6	3	66	5
2001	7	11	35	5
2001	8	9	39	5
2001	9	4	83	5
2001	9	8	88	5
2001	9	16	49	5
2001	10	2	38	5

2001	10	26	30	5
2001	11	1	72	5
2001	11	8	100	50
2001	11	13	42	5
2001	11	22	106	65
2001	11	28	54	5
2001	12	6	46	5
2001	12	21	82	45
2001	12	29	64	25
2002	1	24	83	5
2002	1	29	62	5
2002	2	4	66	35
2002	2	8	67	5
2002	2	18	35	5
2002	2	22	113	42
2002	2	27	79	5
2002	3	7	65	5
2002	3	19	51	5
2002	4	27	79	5
2002	5	1	30	5
2002	5	5	30	5
2002	5	21	34	5
2002	6	4	30	5
2002	6	18	44	5
2002	6	28	51	5
2002	7	3	48	5
2002	9	22	41	38
2002	10	6	46	5
2002	10	17	45	5
2002	10	26	84	21
2002	11	7	60	5
2002	11	14	46	5
2002	12	28	38	5
2002	12	29	44	5
2003	1	3	65	5
2003	1	16	54	5
2003	1	23	47	5
2003	1	28	81	40
2003	2	4	79	5
2003	3	12	54	5
2003	4	2	82	34
2003	6	8	30	5
2003	6	20	35	34
2003	7	2	47	5
2003	8	22	32	5
2003	8	30	30	5
2003	9	23	68	35
2003	10	7	92	44
2003	10	11	46	5
2003	11	3	56	20
2003	11	19	31	5

2003	11	30	38	5
2003	12	14	96	53
2003	12	21	156	68
2003	12	28	43	5
2004	1	6	30	5
2004	1	13	79	5
2004	1	20	54	5
2004	1	24	38	5
2004	1	29	112	34
2004	2	2	44	5
2004	2	8	120	48
2004	2	11	54	5
2004	2	22	70	34
2004	2	26	66	20
2004	3	15	30	5
2004	3	21	57	5

F Data uit WL | Delft Hydraulics (2007)

Overzicht geïdentificeerde seiche-gevallen april 2004 – augustus 2007 in aanvulling op dataset uit WL | Delft Hydraulics (2005a), Appendix E. De resulterende totale dataset is in WL | Delft Hydraulics (2007) ingezet zonder toepassing van dummywaarden.

F.1 Ruwe data/alle geïdentificeerde seiche-gevallen

Jaar	maand	dag	opzet (cm)	a_{seiche} (cm)	begintijd begindatum (uur)	eindtijd einddatum (uur)
2004	5	15	1	19	15-05-2004 10	15-05-2004 16
2004	8	19	18	22	19-08-2004 8	19-08-2004 14
2004	9	14	25	25	14-09-2004 14	14-09-2004 20
2004	9	21	84	17	21-09-2004 18	22-09-2004 16
2004	9	23	70	17	23-09-2004 9	25-09-2004 0
2004	10	4	6	20	04-10-2004 13	04-10-2004 21
2004	10	6	18	16	06-10-2004 6	07-10-2004 12
2004	10	21	-25	13	21-10-2004 13	22-10-2004 4
2004	10	24	20	10	24-10-2004 9	25-10-2004 6
2004	11	5	33	15	03-11-2004 18	08-11-2004 0
2004	11	12	85	44	12-11-2004 18	14-11-2004 0
2004	11	19	82	33	18-11-2004 23	20-11-2004 17
2004	12	23	58	11	21-12-2004 18	24-12-2004 22
2004	12	30	55	16	29-12-2004 2	30-12-2004 9
2005	1	8	54	18	08-01-2005 12	09-01-2005 10
2005	1	21	85	21	20-01-2005 12	21-01-2005 6
2005	1	23	77	41	23-01-2005 16	24-01-2005 23
2005	2	1	20	15	01-02-2005 5	01-02-2005 18
2005	2	14	86	35	13-02-2005 10	14-02-2005 23
2005	2	19	43	30	19-02-2005 8	20-02-2005 18
2005	3	11	70	26	11-03-2005 18	12-03-2005 12
2005	4	9	60	26	09-04-2005 2	09-04-2005 10
2005	6	3	-15	15	03-06-2005 10	03-06-2005 20
2005	6	29	0	16	29-06-2005 0	29-06-2005 10
2005	7	17	-7	11	17-07-2005 7	17-07-2005 13
2005	9	13	-22	11	13-09-2005 2	13-09-2005 12
2005	9	16	30	14	16-09-2005 5	17-09-2005 4
2005	10	25	51	15	24-10-2005 13	26-10-2005 21
2005	11	14	2	14	14-11-2005 18	15-11-2005 9
2005	11	16	39	39	16-11-2005 8	17-11-2005 2
2005	11	24	109	39	24-11-2005 17	25-11-2005 21
2005	12	16	116	106	16-12-2005 21	17-12-2005 21
2005	12	26	-6	16	26-12-2005 7	28-12-2005 11

Tijdstippen op basis van MET.

F.2 Selectie seiche-gevallen voor toevoegen aan dataset seiche-statistiek

Geselecteerde gevallen met opzet ≥ 0.3 m en gevallen opgetreden binnen twee dagen samengevoegd (op basis van de hoogste amplitude). Deze selectie is in WL | Delft Hydraulics (2007) toegevoegd aan de dataset uit WL | Delft Hydraulics (2005a) uit Bijlage E.

Jaar	maand	dag	opzet (cm)	a_{seiche} (cm)
2004	9	21	84	17
2004	11	5	33	15
2004	11	12	85	44
2004	11	19	82	33
2004	12	23	58	11
2004	12	30	55	16
2005	1	8	54	18
2005	1	23	85	41
2005	2	14	86	35
2005	2	19	43	30
2005	3	11	70	26
2005	4	9	60	26
2005	9	16	30	14
2005	10	25	51	15
2005	11	16	39	39
2005	11	24	109	39
2005	12	16	116	106

G Nieuwe dataset seiche-events 2006-2023

Alle gevallen opzet \geq 0.3 m en events binnen 48 uur van elkaar samengevoegd op basis van maximale waarde a_{seiche} en van de opzet.

#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top-dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
1	2006	1	20-22	33	32	65	33	41	n.v.t.	n.v.t.
2		2	8-10	38	41	79	40	85	n.v.t.	n.v.t.
3		3	5-7	26	27	53	27	36	n.v.t.	n.v.t.
4		5	20	9	12	21	11	54	n.v.t.	n.v.t.
5		5	30	24	18	42	21	44	n.v.t.	n.v.t.
6		10	31-02	49	55	104	52	139	n.v.t.	n.v.t.
7		11	11-12	30	25	55	28	86	n.v.t.	n.v.t.
8		12	4	16	16	32	16	40	n.v.t.	n.v.t.
9		12	30-31	19	16	35	18	81	n.v.t.	n.v.t.
10	2007	1	2	20	21	41	21	84	n.v.t.	n.v.t.
11		1	10-12	36	29	65	33	129	n.v.t.	n.v.t.
12		1	18	50	40	90	45	106	n.v.t.	n.v.t.
13		1	27	36	42	78	39	31	n.v.t.	n.v.t.
14		3	2	19	17	36	18	61	n.v.t.	n.v.t.
15		3	18-21	53	45	98	49	107	n.v.t.	n.v.t.
16		5	8-9	16	17	33	17	32	n.v.t.	n.v.t.
17		7	24	11	10	21	11	42	n.v.t.	n.v.t.
18		9	9-11	24	27	51	26	58	n.v.t.	n.v.t.
19		9	24-26	25	25	50	25	33	n.v.t.	n.v.t.
20		11	6	29	32	61	31	70	n.v.t.	n.v.t.
21		11	9-11	61	48	109	55	187	n.v.t.	n.v.t.
22		11	23-26	34	38	72	36	86	n.v.t.	n.v.t.
23		12	3	13	20	33	17	92	n.v.t.	n.v.t.
24		12	7	22	20	42	21	92	n.v.t.	n.v.t.
25		12	10-11	21	18	39	20	44	n.v.t.	n.v.t.

#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top-dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
26		12	29-30	19	15	34	17	64	n.v.t.	n.v.t.
27	2008	1	26	35	31	66	33	50	n.v.t.	n.v.t.
28		2	1-2	21	21	42	21	105	n.v.t.	n.v.t.
29		2	22-23	45	28	73	37	58	n.v.t.	n.v.t.
30		3	3-4	43	44	87	44	48	n.v.t.	n.v.t.
31		3	12	25	38	63	32	80	n.v.t.	n.v.t.
32		3	17-19	20	21	41	21	34	n.v.t.	n.v.t.
33		4	5-6	18	22	40	20	33	n.v.t.	n.v.t.
34		10	1-4	32	17	49	25	56	n.v.t.	n.v.t.
35		10	24-26	15	18	33	17	48	n.v.t.	n.v.t.
36		11	21-23	63	60	123	62	111	n.v.t.	n.v.t.
37		12	18-24	17	24	41	21	73	n.v.t.	n.v.t.
38		2009	1	18-19	23	21	44	22	54	n.v.t.
39	3		8-9	25	31	56	28	51	n.v.t.	n.v.t.
40	3		23-24	64	58	122	61	76	n.v.t.	n.v.t.
41	5		25-26	40	43	83	42	40	n.v.t.	n.v.t.
42	7		17-18	43	43	86	43	34	n.v.t.	n.v.t.
43	8		28-29	17	14	31	16	49	n.v.t.	n.v.t.
44	9		4	18	22	40	20	47	n.v.t.	n.v.t.
45	10		3-4	28	17	45	23	69	n.v.t.	n.v.t.
46	10		11-12	17	20	37	19	70	n.v.t.	n.v.t.
47	10		16-17	31	30	61	31	48	n.v.t.	n.v.t.
48	11		22-24	21	22	43	22	92	n.v.t.	n.v.t.
49	12		27-28	15	10	25	13	40	n.v.t.	n.v.t.
50	2010	1	28-30	30	46	76	38	82	n.v.t.	n.v.t.
51		6	18-20	23	25	48	24	59	n.v.t.	n.v.t.
52		8	29-30	64	46	110	55	94	n.v.t.	n.v.t.
53		9	14-15	22	18	40	20	46	n.v.t.	n.v.t.
54		9	25-26	30	27	57	29	78	n.v.t.	n.v.t.
55		10	19-21	36	42	78	39	56	n.v.t.	n.v.t.

#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top_dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
56		11	11-12	30	21	51	26	105	n.v.t.	n.v.t.
57		12	9-12	39	30	69	35	51	n.v.t.	n.v.t.
58		12	15-17	44	55	99	50	49	n.v.t.	n.v.t.
59	2011	2	4	22	17	39	20	50	n.v.t.	n.v.t.
60		2	7-8	11	18	29	15	32	n.v.t.	n.v.t.
61		7	14-15	15	15	30	15	64	n.v.t.	n.v.t.
62		7	23-24	11	13	24	12	69	n.v.t.	n.v.t.
63		8	8-9	18	14	32	16	48	n.v.t.	n.v.t.
64		9	6-7	12	11	23	12	69	n.v.t.	n.v.t.
65		10	6-7	36	34	70	35	62	n.v.t.	n.v.t.
66		10	19-20	15	16	31	16	49	n.v.t.	n.v.t.
67		11	25-30	50	33	83	42	104	n.v.t.	n.v.t.
68		12	4-5	20	20	40	20	94	n.v.t.	n.v.t.
69		12	7-10	47	45	92	46	130	n.v.t.	n.v.t.
70		12	13-14	18	18	36	18	47	n.v.t.	n.v.t.
71		12	17-18	18	30	48	24	47	n.v.t.	n.v.t.
72		12	29-30	30	28	58	29	108	n.v.t.	n.v.t.
73	2012	1	3-6	75	58	133	67	150	n.v.t.	n.v.t.
74		1	12-14	31	35	66	33	66	n.v.t.	n.v.t.
75		1	19-23	36	24	60	30	92	n.v.t.	n.v.t.
76		2	13-15	20	15	35	18	51	n.v.t.	n.v.t.
77		2	19-20	28	20	48	24	61	n.v.t.	n.v.t.
78		5	15-17	17	15	32	16	44	n.v.t.	n.v.t.
79		6	24	15	19	34	17	32	n.v.t.	n.v.t.
80		8	29-30	23	29	52	26	52	n.v.t.	n.v.t.
81		9	14-15	19	17	36	18	62	n.v.t.	n.v.t.
82		9	18-19	14	15	29	15	33	n.v.t.	n.v.t.
83		11	21-22	27	24	51	26	68	n.v.t.	n.v.t.
84		12	2-3	21	17	38	19	36	n.v.t.	n.v.t.
85		12	9-11	35	22	57	29	79	n.v.t.	n.v.t.

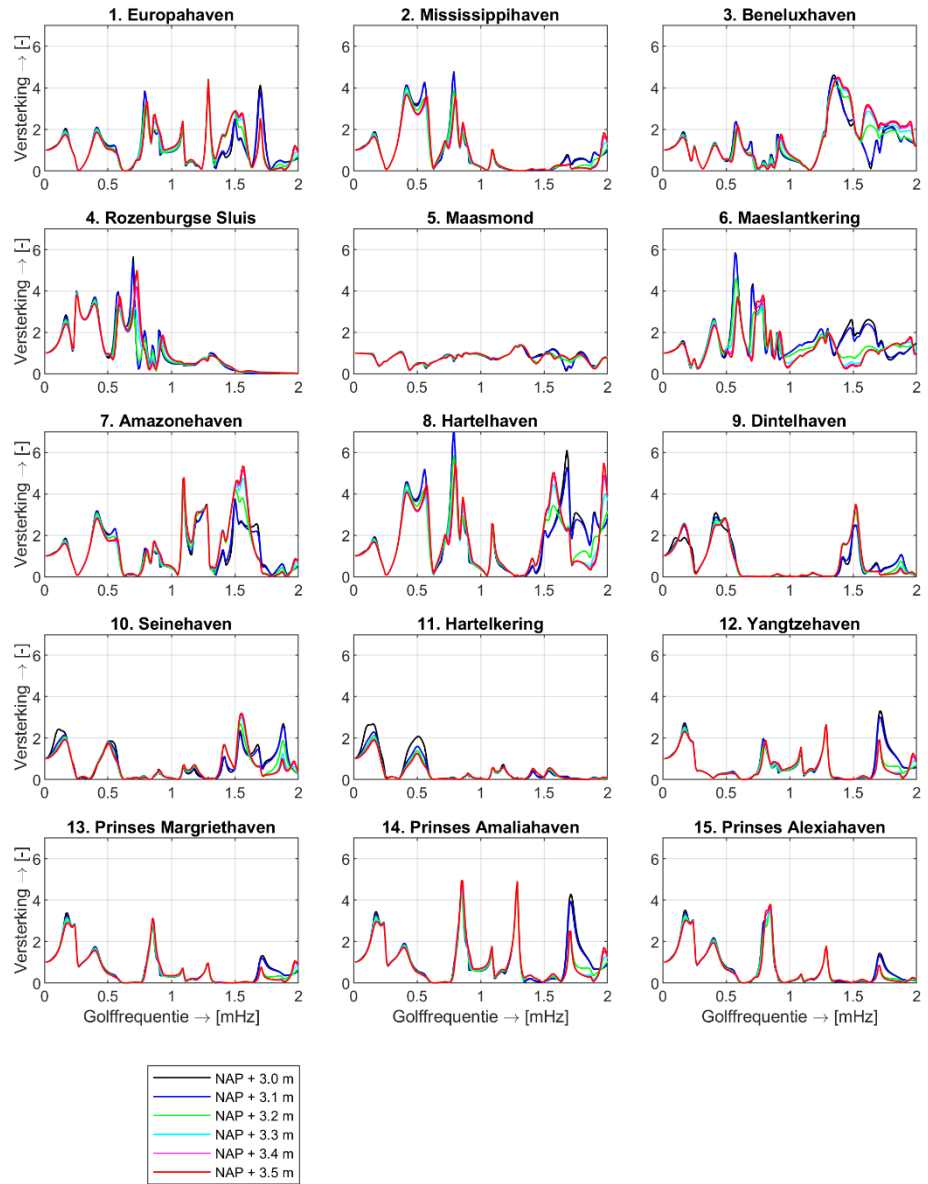
#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top-dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
86	2013	2	5-7	46	28	74	37	63	n.v.t.	n.v.t.
87		10	9-11	30	35	65	33	61	n.v.t.	n.v.t.
88		10	28-29	15	11	26	13	91	n.v.t.	n.v.t.
89		11	29-30	42	45	87	44	80	n.v.t.	n.v.t.
90		12	5-7	58	54	112	56	175	n.v.t.	n.v.t.
91	2014	4	8-9	22	21	43	22	40	n.v.t.	n.v.t.
92		5	9-10	33	23	56	28	51	n.v.t.	n.v.t.
93		10	21-22	20	30	50	25	147	n.v.t.	n.v.t.
94		12	8-12	26	31	57	29	62	n.v.t.	n.v.t.
95	2015	1	10-11	62	30	92	46	122	n.v.t.	n.v.t.
96		1	28	38	34	72	36	103	n.v.t.	n.v.t.
97		4	2	19	22	41	21	42	n.v.t.	n.v.t.
98		9	5-7	20	15	35	18	50	n.v.t.	n.v.t.
99	2016	1	15-16	40	31	71	36	72	n.v.t.	n.v.t.
100		1	30-31	13	21	34	17	76	n.v.t.	n.v.t.
101		3	2	32	17	49	25	58	n.v.t.	n.v.t.
102		11	6	13	15	28	14	52	n.v.t.	n.v.t.
103		12	24-27	18	16	34	17	84	n.v.t.	n.v.t.
104	2017	1	4-5	25	29	54	27	84	n.v.t.	n.v.t.
105		1	13-15	48	45	93	47	138	n.v.t.	n.v.t.
106		2	24	11	10	21	11	88	n.v.t.	n.v.t.
107		4	25	14	14	28	14	41	n.v.t.	n.v.t.
108		9	9	3	3	6	3	37	n.v.t.	n.v.t.
109		9	14-15	9	16	25	13	61	n.v.t.	n.v.t.
110		10	5-6	29	32	61	31	52	n.v.t.	n.v.t.
111		10	29-30	21	19	40	20	88	n.v.t.	n.v.t.
112		11	10-13	22	30	52	26	79	n.v.t.	n.v.t.
113		11	18-19	26	19	45	23	63	n.v.t.	n.v.t.
114		12	8-9	15	26	41	21	118	n.v.t.	n.v.t.
115	2018	1	3	38	25	63	32	100	n.v.t.	n.v.t.

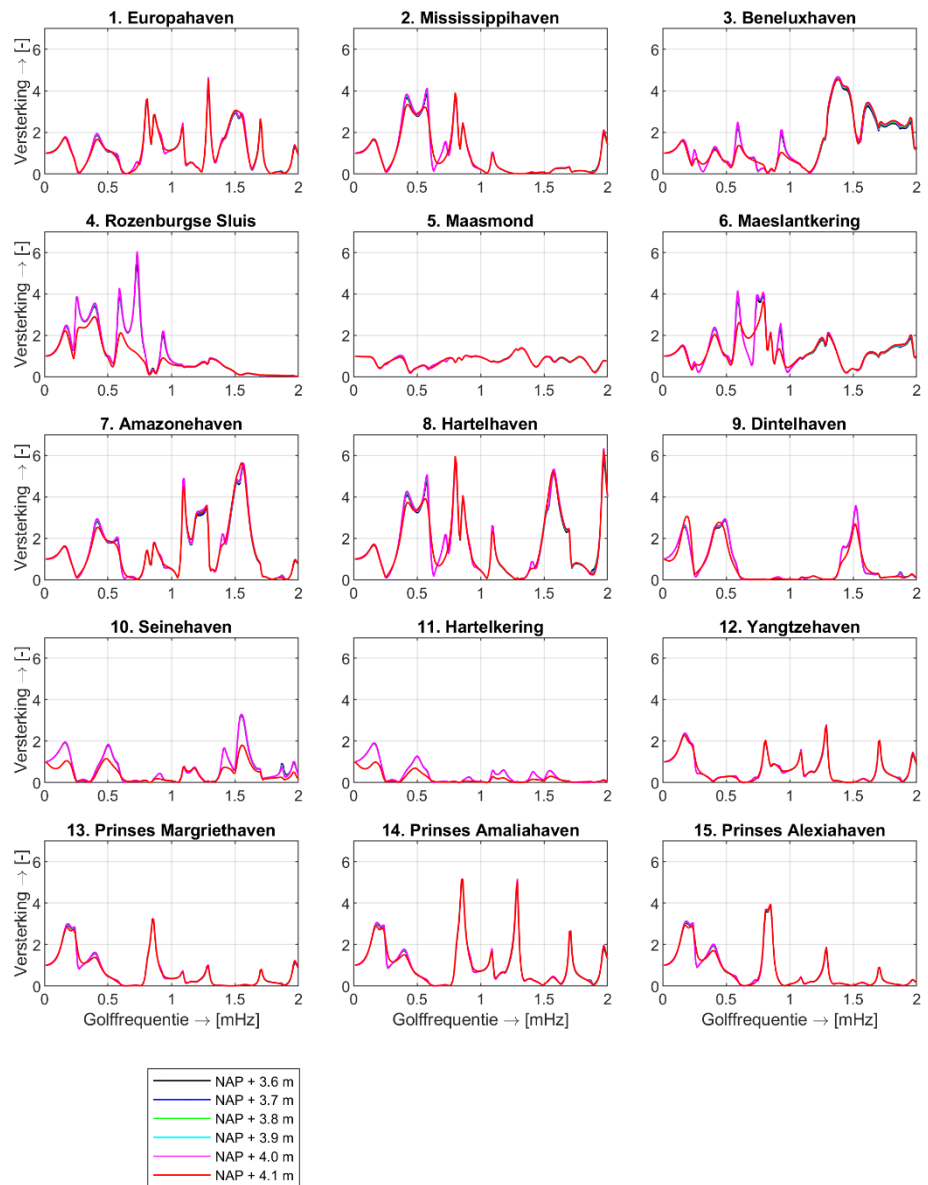
#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top-dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
116		1	16	22	22	44	22	85	n.v.t.	n.v.t.
117		9	21	19	21	40	20	75	n.v.t.	n.v.t.
118		10	26-27	20	24	44	22	58	n.v.t.	n.v.t.
119		12	6-7	26	19	45	23	44	n.v.t.	n.v.t.
120		12	9-10	30	31	61	31	85	n.v.t.	n.v.t.
121		12	29-30	13	10	23	12	41	n.v.t.	n.v.t.
122		2019	1	1-2	36	19	55	28	57	n.v.t.
123	1		8-9	23	18	41	21	151	n.v.t.	n.v.t.
124	1		14	15	9	24	12	71	n.v.t.	n.v.t.
125	1		17-18	30	23	53	27	75	n.v.t.	n.v.t.
126	1		28-29	13	15	28	14	101	n.v.t.	n.v.t.
127	3		10-11	22	19	41	21	79	n.v.t.	n.v.t.
128	5		4-5	33	29	62	31	41	n.v.t.	n.v.t.
129	10		8-9	27	25	52	26	40	n.v.t.	n.v.t.
130	12		9+10	22	21	43	22	133	n.v.t.	n.v.t.
131	2020		1	8-9	13	14	27	14	62	170
132		1	18-22	32	25	57	29	63	161	98
133		2	9-11	50	27	77	39	88	237	149
134		2	20-21	30	38	68	34	85	183	98
135		9	25-27	33	30	63	32	85	186	101
136		11	19-20	18	18	36	18	84	227	143
137		11	30-01	12	18	30	15	91	223	132
138	2021	4	5-7	52	51	103	52	52	151	99
139		5	4-6	16	12	28	14	64	161	97
140		8	16-17	11	11	22	11	52	156	104
141		9	29-30	10	14	24	12	45	138	93
142		10	20-22	32	25	57	29	63	198	135
143		12	1-2	36	25	61	31	74	212	138
144	2022	1	5-6	38	24	62	31	101	251	150
145		1	19-21	42	24	66	33	74	189	115

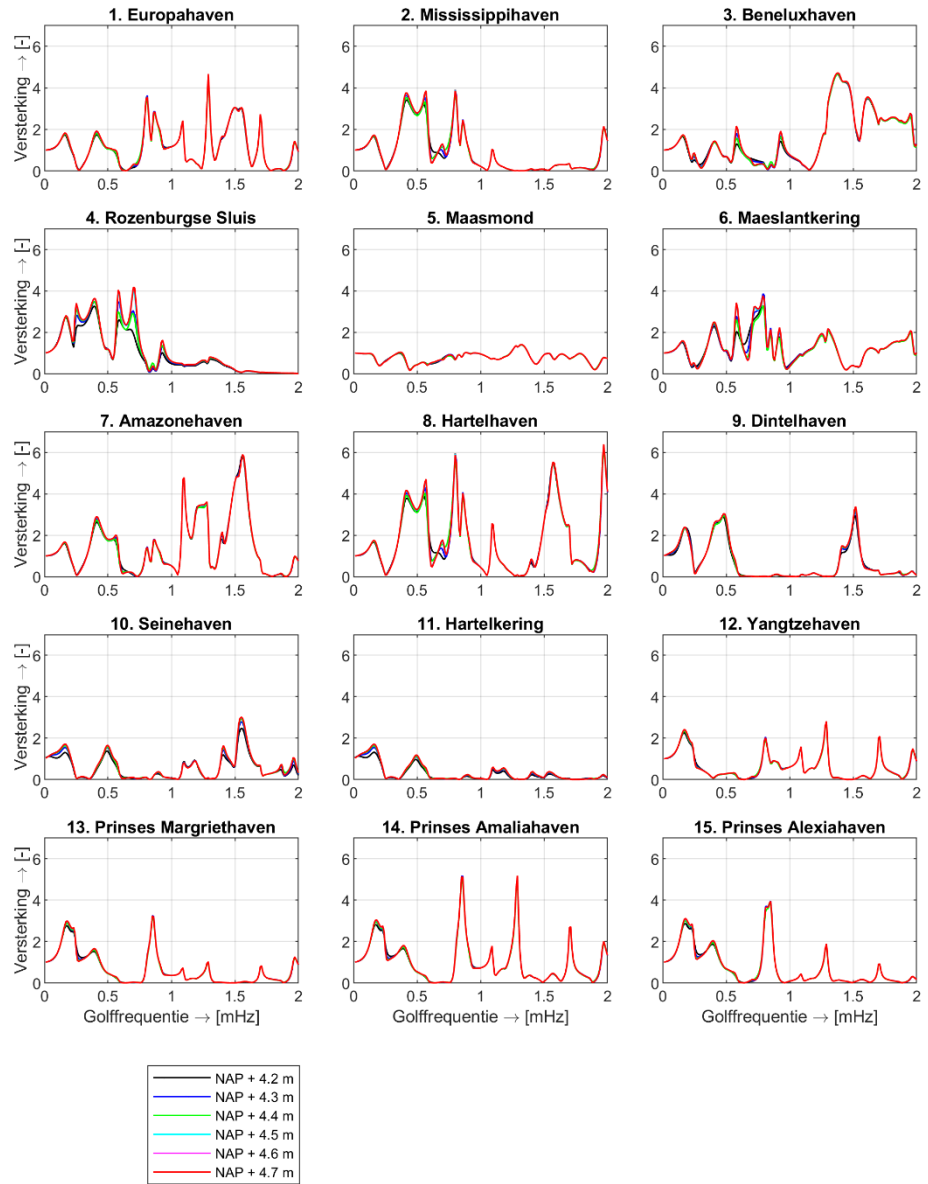
#	Jaar	maand	dag	a_top (cm)	a_dal (cm)	top-dal (cm)	a_seiche (cm)	scheve opzet HvH (cm)	waterstand gemeten (cm)	waterstand berekend HvH (cm)
146		1	27-30	23	23	46	23	127	230	103
147		2	6-7	41	40	81	41	85	199	114
148		2	10-11	13	12	25	13	37	114	77
149		2	20-21	47	36	83	42	149	267	118
150		2	24	24	27	51	26	80	180	100
151		4	7-9	18	22	40	20	94	187	93
152		6	19-20	18	21	39	20	30	151	121
153		7	6-7	22	18	40	20	39	147	108
154		9	16-19	21	26	47	24	70	193	123
155		9	26-27	22	22	44	22	68	215	147
156		10	5-6	22	19	41	21	58	161	103
157		11	1-2	18	18	36	18	46	137	91
158		1	14	29	21	50	25	71	181	110
159		1	18-19	12	14	26	13	68	175	107
160		1	30-31	29	16	45	23	79	176	97
161		2	17-18	22	15	37	19	66	156	90
162		2	24-25	10	10	20	10	55	181	126
163		3	10	31	24	55	28	56	189	133
164	2023	3	26-27	14	9	23	12	34	164	130
165		7	4-5	17	15	32	16	37	176	139
166		10	14-15	10	11	21	11	71	207	136
167		11	23-25	36	33	69	35	114	237	123
168		11	28-30	15	14	29	15	70	196	126
169		12	9-10	15	10	25	13	44	161	117
170		12	21-23	30	27	57	29	198	313	115

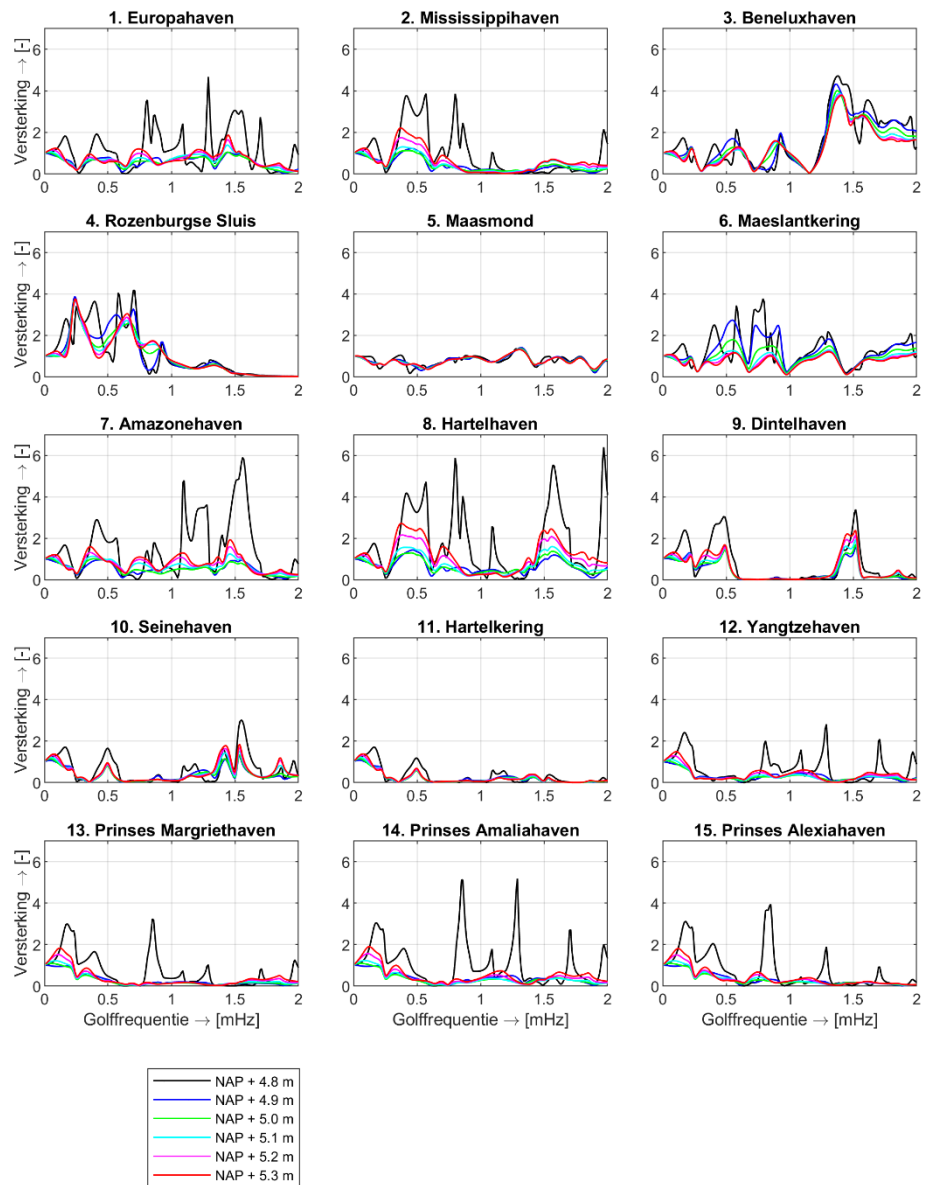
H Versterkingspectra PHAROS (Deltares, 2014b)

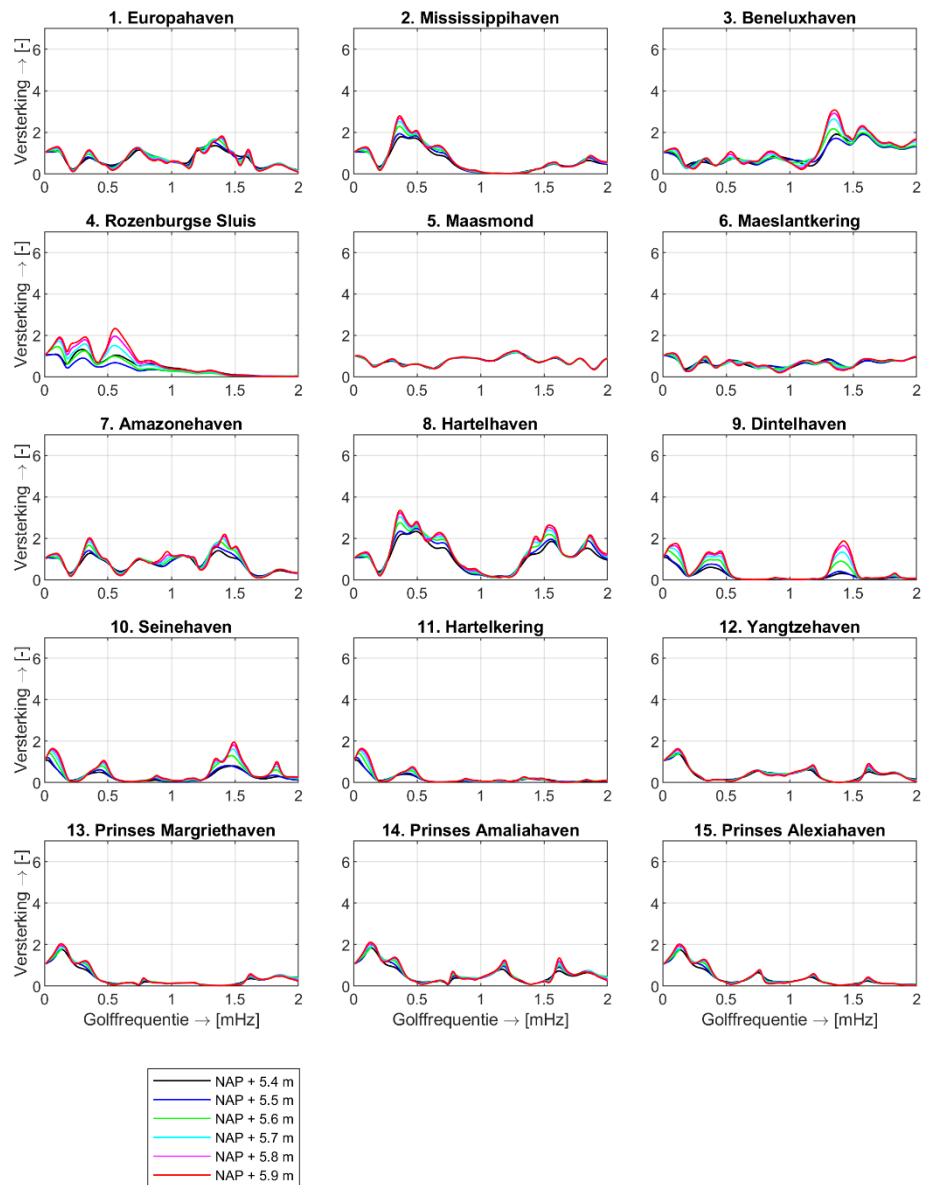


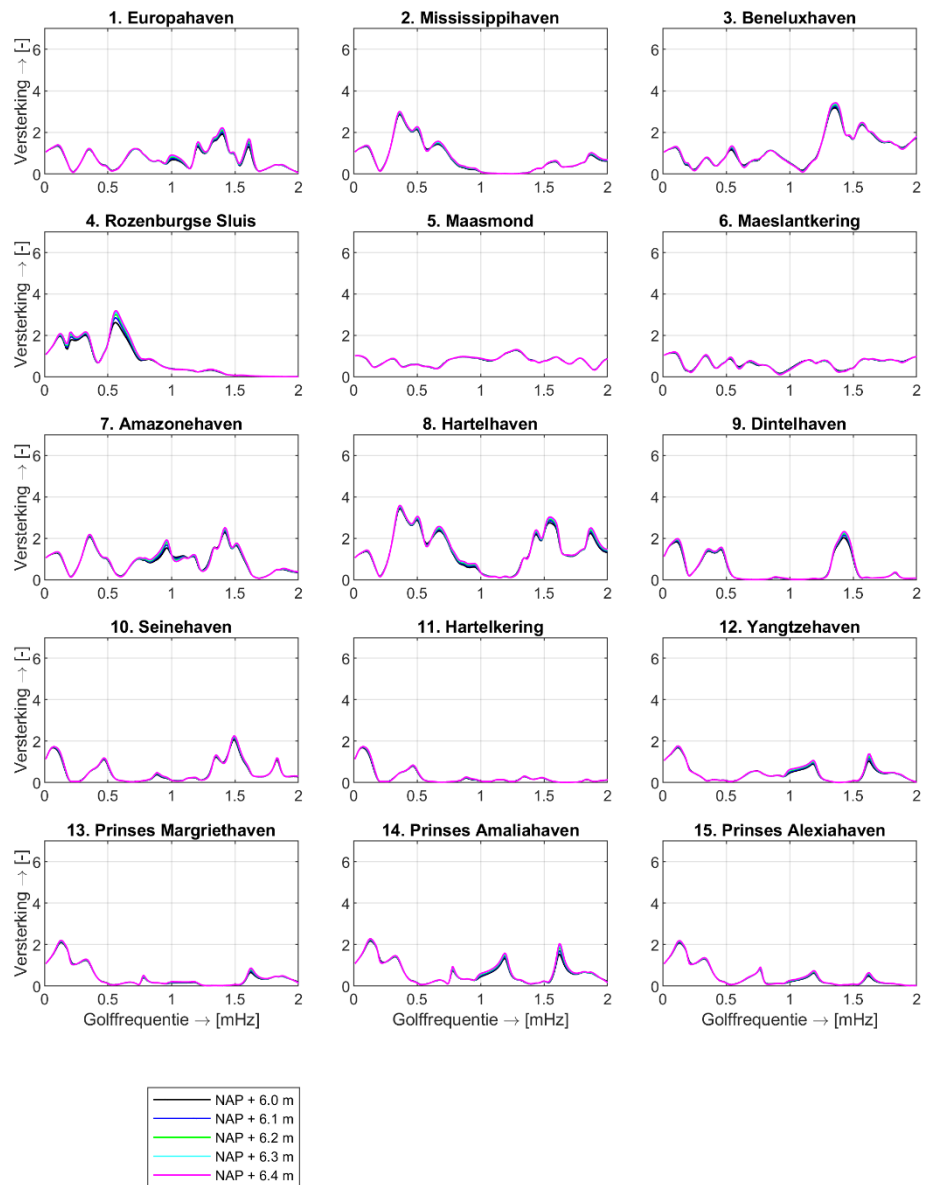












Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl