

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, RIZA

Verkenning seiches in WAQUA

Studie naar waterstandslingeren in het IJsselmeergebied

november 2004

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, RIZA

Verkenning seiches in WAQUA

Studie naar waterstandslingeren in het IJsselmeergebied

M.P.C. de Jong en C. Stolker

november 2004

Inhoud

Lijst met figuren.....	iii
Lijst met tabellen	iii
1 Inleiding.....	1
1.1 Situatieschets/probleemomschrijving	1
1.2 Doelstelling.....	1
1.3 Opzet van het onderzoek.....	2
1.4 Indeling Rapport	4
2 Seiches in het IJsselmeergebied en mogelijke opwekkingsmechanismen	5
2.1 Inleiding.....	5
2.2 Meteorologische opwekkingsmechanismen	5
2.3 Karakteristieken seiches IJsselmeer.....	6
3 Analyse meetdata	8
3.1 Case A (7 t/m 9 februari 2004).....	8
3.1.1 Inleiding.....	8
3.1.2 Meetlocaties.....	8
3.1.3 Meteorologische situatie en waterstandfluctuaties	10
3.1.4 Wavelet-analyse meetgegevens Case A	11
3.1.5 Aanvullende opmerkingen opwekkingsmechanisme.....	11
3.2 Case B (23 februari 2002).....	13
3.2.1 Inleiding.....	13
3.2.2 Meetlocaties.....	13
3.2.3 Meteorologische situatie en waterstandfluctuaties	14
3.2.4 Wavelet-analyse meetgegevens Case B	16

4	WAQUA simulaties	19
4.1	Omschrijving WAQUA modelschematisatie	19
4.1.1	Inleiding.....	19
4.1.2	Beschrijving van het IJsselmeermodel in WAQUA.....	19
4.2	Analyse resultaten.....	22
4.2.1	Case A.....	22
4.2.2	Case B.....	28
4.2.3	Case C.....	33
5	Conclusies	37
5.1	Algemeen.....	37
5.2	Conclusies per case.....	37
5.3	Adviezen t.a.v. onderzoeksvragen	39
	Referenties	42
A	Wavelet-analyse waterstandmetingen Case B.....	A-1
B	Wavelet-analyse gesimuleerde waterstanden Case B	B-1
C	Informatie uitvoerlocaties Case C	C-1

Lijst met figuren

Figuur 1: voorbeeld waterstandmeting met seiche (locatie Lemmer).....	7
Figuur 2: overzicht meetlocaties voor Case A (bron originele afbeelding: RWS).....	9
Figuur 3: overzicht meetgegevens op de locatie van de Balgstuw Ramspol.	9
Figuur 4: tijdreeksen van wind en waterstand voor Case A.....	10
Figuur 5: resultaten wavelet-analyse van meetgegevens Case A.....	12
Figuur 6: Overzicht meetlocaties Case B (beschreven in hoofdtekst).	14
Figuur 7: overzicht wind- en waterstandmeting Case B.	15
Figuur 8: wavelet-analyse van wind- en waterstandmetingen Case B.....	17
Figuur 9: bodemschematisatie IJsselmeer.....	20
Figuur 10: rekenrooster, gebiedsenclosure (rode lijn) en overlaten (zwarte lijnen).	20
Figuur 11: gemeten en gesimuleerde waterstand voor locatie Ramspolbrug (Case A).....	23
Figuur 12: wavelet-spectra van gemeten en gesimuleerde waterstanden locatie Ramspol....	24
Figuur 13: dubbel-as plot met windsnelheid (links) en waterstand Urk (rechts).	26
Figuur 14: waterstand langs raai in lengterichting van het IJsselmeer (Case A).	26
Figuur 15: overzicht van de gemeten en gesimuleerde waterstanden (Case B).....	29
Figuur 16: in WAQUA gereproduceerde seiche-vormen op het IJsselmeer.....	31
Figuur 17: waterstand IJsselmeer tijdens top seiche bij Lemmer.	31
Figuur 18: waterstanden langs een raai van Enkhuizen (0 km) naar Lemmer (ca. 32 km)....	32
Figuur 19: overzicht maximale waterstanden in Case C.....	34
Figuur 20: overzicht overshoot voor de beschouwde locaties in Case C.....	35
Figuur 21: voorbeelden van gesimuleerde tijdreeksen (Lemmer en Enkhuizen).	35

Lijst met tabellen

Tabel 1: sluitings- en openingstijdstippen van de Balgstuw Ramspol.....	2
Tabel 2: overzicht overheersende eigenperiode en maximale top-dal waarde per locatie.	18
Tabel 3: overzicht overheersende eigenperiode in gesimuleerde en gemeten waterstanden.	30

I Inleiding

I.1 Situatieschets/probleemomschrijving

In het IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer en Gooi- en Eemmeer) treden waterstandslingeren op die regelmatig de karakteristieken vertonen van seiches. De amplitude van deze waterstandslingeren moet worden gezien als toeslag op de lokale maatgevende waterstanden. Dit is onder andere van belang voor de Hydraulische Randvoorwaarden voor toetsing van primaire waterkeringen, die Rijkswaterstaat elke vijf jaar moet opleveren. Bovendien zijn deze waterstandslingeren van belang voor de Waarschuwingsdienst Dijken IJsselmeergebied (WDIJ) van Rijkswaterstaat. Deze dienst zorgt ervoor dat de dijkbeheerders worden gewaarschuwd in geval van een zware storm en geeft informatie over actuele waterstanden en golfoploophoogten.

Rijkswaterstaat, RIZA verwacht dat waterstandslingeren ook de inzet van de Balgstuw bij Ramspol beïnvloeden. Zo is deze kering op 7 t/m 9 februari 2004 vijf keer open en dicht gegaan gedurende één episode met stormachtig weer (windkracht 7 Beaufort), terwijl een gemiddelde inzet van eens per jaar verwacht werd. Dit veelvuldig sluiten kan het gevolg zijn geweest van een waterstandslinging op het Ketelmeer, die samenhangt met een slinging op het IJsselmeer.

Om meer inzicht te krijgen in de waterstandslingeren in het IJsselmeergebied heeft Rijkswaterstaat, RIZA in een brief op 30 september 2004 (kenmerk/opdrachtnummer 8041522) WL | Delft Hydraulics opdracht gegeven voor het uitvoeren van een verkennende studie naar het simuleren van waterstandslingeren (waaronder seiches) met het stromingsmodel WAQUA, zoals omschreven in de offerte met briefkenmerk MCI-06313/H4531/MDJ.

I.2 Doelstelling

In deze studie zal nagegaan worden of het model WAQUA geschikt is voor het simuleren van waterstandslingeren/seiches. De hoofddoelstelling van het project is het uitvoeren van een eerste verkenning (met WAQUA) naar het opwekken van waterstandslingeren in het IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer en Gooi- en Eemmeer).

Op basis van de resultaten van deze verkennende studie zal een advies gegeven worden over:

- de geschiktheid van WAQUA voor het correct simuleren van waterstandslingeren (analyseren/vergelijking met metingen);
- mogelijke opwekkingsmechanismen van de waterstandslingeren (meteorologisch, windcondities);
- en het belang van de waterstandslingeren voor de praktijk.

1.3 Opzet van het onderzoek

In dit onderzoek wordt eerst een literatuuroverzicht gemaakt van mogelijke opwekkingsmechanismen. Aangezien verwacht wordt dat de waterstandfluctuaties op het IJsselmeer een meteorologische oorsprong hebben, zal dit overzicht vooral gericht zijn op dit type opwekkingsmechanismen. Hiervoor zal gebruik gemaakt worden van het literatuuroverzicht en de kennis die opgedaan is tijdens de promotiewerkzaamheden van De Jong (2004). Op basis van deze beknopte literatuurstudie zullen de mogelijke opwekkingsmechanismen voor de waterstandslingeren in het IJsselmeer beschouwd worden. Hierbij zal onderscheid gemaakt worden tussen seiches en waterstandfluctuaties in het algemeen. Gezien mogelijke verschillen tussen de opwekkingsmechanismen van deze fluctuaties en seiches is het van belang dit onderscheid te maken.

In dit rapport wordt onder een seiche een beweging bij een eigenperiode van een bekken verstaan, terwijl waterstandfluctuaties ook bij andere perioden/tijdschalen op kunnen treden.

De onderzoeksvragen zoals omschreven in Paragraaf 1.2 zullen vervolgens geanalyseerd worden op basis van drie stormsituaties (*cases*). De eerste twee cases zijn gebaseerd op gemeten stormen en de derde case is gebaseerd op een kunstmatig verloop van een storm. Hieronder worden de cases in meer detail omschreven. In het vervolg van het rapport zullen de analyse van meetgegevens, de simulaties en de analyse van de simulatieresultaten worden besproken aan de hand van deze cases.

Case A

Omschrijving

De eerste case is gebaseerd op de weersomstandigheden tijdens het weekend van 7 en 8 februari 2004. Op deze dagen trekt een aantal storingen (koufronten, oclusies en troggen) over het IJsselmeergebied. Deze situatie van stormachtig weer was niet extreem: globaal traden windsnelheden rond 7 Beaufort op (vanuit zuidwest tot noordnoordwest), terwijl officieel pas over een storm wordt gesproken als een situatie met windkracht 9 optreedt. Desondanks, ging gedurende dit interval van stormachtig weer de balgstuw bij Ramspol vijf maal dicht en open (zie Tabel 1, bron: Waterschap Groot Salland).

Datum		tijdstip start sluiten	tijdstip start openen
zaterdag	07-02-2004	13:21	14:36
zondag	08-02-2004	08:50	12:00
		15:45	16:48
		20:44	23:18
maandag	09-02-2004	02:51	03:52

Tabel 1: sluitings- en openingstijdstippen van de Balgstuw Ramspol.

In de bovenstaande tabel wordt uitgegaan van tijdstip start sluiten en tijdstip start openen aangezien de duur van het sluiten en openen van de kering verschillend is per situatie (onder andere afhankelijk van de waterstand). Het sluiten en openen van de kering gebeurt in een tijdsbestek van 30 minuten tot een uur (pers. overleg Dhr. Put, Waterschap Groot Salland). De kering sluit automatisch indien de locale waterstand bij Ramspol het peil van 50 cm + NAP overschrijdt en er een stroming optreedt vanaf het Ketelmeer richting het Zwarte Meer (gemeten op locatie Ramspolbrug). Gezien de definitie van deze criteria wordt verwacht dat tijdens deze episode met stormachtig weer een waterstandslinging op het IJsselmeer en het Ketelmeer de locale waterstand bij de stuw meerdere malen boven het criterium uit heeft laten komen en op die manier de balgstuw meerdere malen heeft geactiveerd.

Onderzoekselementen Case A:

- analyse correlaties windforcering en uitvoer van waterstanden voor de locatie van de Balgstuw;
- mogelijk leggen van verbanden forcering-uitvoer voor de locatie van de Balgstuw;
- analyse oorzaak veelvuldig sluiten Balgstuw.

Case B

Omschrijving

De tweede case is gebaseerd op het stormachtige weer dat optrad tijdens 23 februari 2002. Ook in dit geval was er sprake van windkracht 7, nu in combinatie met een zeer variabele en buiige westenwind. Op deze dag zijn waterstandslingeren gemeten op het midden van het IJsselmeer (ca. 15 cm top-dal) en aan de randen van het IJsselmeer (30 cm tot 70 cm top-dal). Op de verschillende meetlocaties worden verschillende overheersende perioden van de waterstandfluctuaties gevonden. Opgemerkt wordt dat de Balgstuw Ramspol gedurende deze case nog niet operationeel was.

Onderzoekselementen Case B:

- analyse correlaties windforcering en uitvoer van waterstanden;
- analyse kwaliteit reproductie door WAQUA van de gemeten slingeren;
- analyse van berekende eigenperioden op sleutellocaties.

Case C

Omschrijving

Voor de laatste case bestaat de forcering uit een schetsmatig verloop van de windsnelheid tijdens een storm. Hierbij wordt het effect van een hypothetische, kleinschalige storm gesimuleerd. De windrichting wordt constant aangenomen, vanuit westzuidwest.

Voor deze case zal voornamelijk de maximaal optredende waterstanden langs de oevers van het IJsselmeer worden beschouwd. Daarnaast zal de 'overshoot' worden bepaald. Met overshoot wordt de tijdelijke, kortdurende piek bedoeld die optreedt voordat een (lager) evenwicht zich instelt als na een interval met toenemende windsnelheid een constante (maximale) windsnelheid optreedt.

Onderzoekselementen Case C:

- globale beschrijving van de resultaten;
- globale analyse van gebieden met mogelijke overlast als gevolg van opwaaiing;

- globale omschrijving gevolgen voor de praktijk (waar treden grote amplituden op en kan overlast optreden?).

Geselecteerde, relevante meetgegevens voor cases A en B zullen worden geanalyseerd. Hiervoor zal wavelet-analyse ingezet worden. Deze analysemethode levert informatie over de verdeling van energie over de frequenties (tijdschalen) en het verloop van deze verdeling in de tijd (zie voor details over deze methode en verdere referenties De Jong, 2004). Gezien het episodische, niet-stationaire karakter van de waterstandfluctuaties is deze methode uitermate geschikt voor het analyseren van dit fenomeen. Standaard energiespectra, die geen informatie geven over het verloop van de energie in de tijd, leveren voor de analyse van de waterstandfluctuaties weinig toegevoegde waarde. Ook *Short-Time Fourier Transformations* leveren minder informatie op, aangezien voor deze analysemethode de tijdreeks in constante delen wordt opgesplitst, waarna een standaard energiespectrum per deel wordt gemaakt. Daarentegen past wavelet-analyse de lengte van het beschouwde ‘venster’ aan op basis van de tijdschaal waarop gekeken wordt. Dit levert een zo optimaal mogelijk oplossend vermogen in de tijd op, dat voor kortere tijdschalen hoger is dan voor langere tijdschalen.

De hierboven omschreven cases worden met behulp van WAQUA nagerekend. De numerieke simulaties in het onderzoek zullen gericht zijn op het analyseren van de effecten van temporele variaties van de wind (snelheid en richting). De treksnelheid van de weersystemen zal niet beschouwd worden in de huidige studie. Voor een hieraan gerelateerd resonantieverschijnsel, zoals beschreven in de dissertatie van De Jong (De Jong, 2004), is het IJsselmeer te ondiep: de treksnelheid van de weersystemen zal veel groter zijn dan de ondiepwater-fasesnelheid. Daarom wordt verwacht dat juist temporele variaties in de wind (in snelheid en/of in richting) de belangrijkste factoren zijn in de opwekking van de waterstandfluctuaties. Indien deze hypothese juist is, dan zal voor het analyseren van mogelijke opwekkingsmechanismen in deze verkennende studie het toepassen van homogene, tijdsafhankelijke windvelden voldoende zijn.

Gezien het verkennende karakter van de studie, wordt verwacht dat de hierboven beschreven aanpak een goede inschatting zal geven van de mogelijkheid om met WAQUA waterstandslingeren/seiches te simuleren. Daarnaast kunnen adviezen aangedragen worden op basis van de in de huidige studie uitgevoerde analyse van metingen en verkregen modelresultaten, onder andere over het opwekkingsmechanisme van de waterstandfluctuaties.

De simulaties in WAQUA zijn uitgevoerd door C. Stolker. De analyse van de gegevens en de rapportage is uitgevoerd door M. de Jong (C. Stolker is auteur van Paragraaf 4.1).

1.4 Indeling Rapport

De indeling van het resterende deel van dit rapport is als volgt. In Hoofdstuk 2 zal op basis van een beknopt literatuuronderzoek een overzicht worden gegeven van de opwekkingsmechanismen van waterstandslingeren. De analyse van de metingen van waterstanden en wind voor cases A en B staan beschreven in Hoofdstuk 3. In Hoofdstuk 4 is een omschrijving opgenomen van de simulaties en de analyse van de simulatieresultaten. Ten slotte bespreekt Hoofdstuk 5 de conclusies en adviezen.

2 Seiches in het IJsselmeergebied en mogelijke opwekkingsmechanismen

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft op basis van de literatuurkennis die opgedaan is tijdens het promotieonderzoek van De Jong (zie De Jong, 2004), en een beknopt aanvullend literatuuronderzoek, een overzicht van mogelijke opwekkingsmechanismen van de waterstandslingeren en seiches in het IJsselmeergebied. Deze laatste treden op bij eigenperioden van het meer (deze definitie wordt ook aangehouden in dit rapport), terwijl waterstandslingeren ook bij andere perioden/tijdschalen op kunnen treden. Als laatste wordt op basis van een recent artikel in *Meteorologica* (Bottema, 2004) een overzicht gegeven van de karakteristieken van de seiches die waargenomen worden op het IJsselmeer.

Voor havenbekkens is een groot aantal mechanismen bekend dat waterstandslingeren (waaronder seiches) kan opwekken. Hierbij valt te denken aan interne golven, tsunami's, surfbeat en meteorologische verschijnselen. Wilson (1972) en vooral Korgen (1995) geven een duidelijk en uitgebreid overzicht van deze mogelijke bronnen van seiches.

De waterstandslingeren en seiches zoals die waargenomen worden in het IJsselmeergebied worden vermoedelijk door een beperkter aantal mechanismen opgewekt. Aangezien de slingeren samenvallen met relatief ruw weer en passages van koufronten is het waarschijnlijk dat de waterstandslingeren in dit gebied een meteorologische oorsprong hebben. Daarom zal dit literatuuronderzoek vooral op dit type mechanismen gericht zijn.

2.2 Meteorologische opwekkingsmechanismen

Zowel fluctuaties in de luchtdruk als in de wind (snelheid en/of richting) kunnen seiches opwekken. Studies naar fluctuaties in luchtdruk richten zich in het algemeen op passerende koufronten. Deze hebben in die situaties veelal een treksnelheid die nabij de ondiepwater-fasesnelheid van de lange golven ligt. Een voorbeeld van een dergelijke studie kan gevonden worden in Donn (1959). De frontpassage die door hem werd bestudeerd wekte een seiche op in Lake Erie. Een soortgelijk fenomeen werd bestudeerd door Hibiya en Kajiura (1982), waarin een luchtdruksprong die optreedt tijdens een koufrontpassage een seiche opwekt. Ook hier is de treksnelheid van het koufront ongeveer gelijk aan de ondiepwater-fasesnelheid van de golven, waardoor een resonante koppeling optreedt tussen forcering en respons.

Andere studies richten zich op seiches die opgewekt worden door windinvloeden. Door een langdurige wind kan een windopzet ontstaan, die een seiche kan veroorzaken indien de windsnelheid plotseling afneemt of van richting verandert. In Raichic *et al.* (1999) worden seiches op de Adriatische Zee beschreven. Deze worden toegeschreven aan passerende lage drukgebieden en koufronten. De wind zorgt in die gevallen voor een opwaaiing naar het

noorden. Na de frontpassage waait de wind niet langer vanuit het zuiden, maar vanuit het westen. Hierdoor start een seiche-beweging op de Adriatische Zee.

In Luettich *et al.* (2002) worden seiches in een lagune aan de kust van Argentinië beschreven. De seiches die daar optreden worden ook toegeschreven aan veranderingen in de windsnelheid of –richting. In een soortgelijke studie (Suursaar *et al.* 2002), gericht op de Golf van Riga, worden simulaties gemaakt op basis van ruimtelijk uniforme windvelden. De tijd en ruimteschalen van de Golf van Riga zijn in dezelfde orde van grootte als die van het IJsselmeer. Op basis van de simulaties wordt een seiche met een eigenperiode van 5 uur bestudeerd.

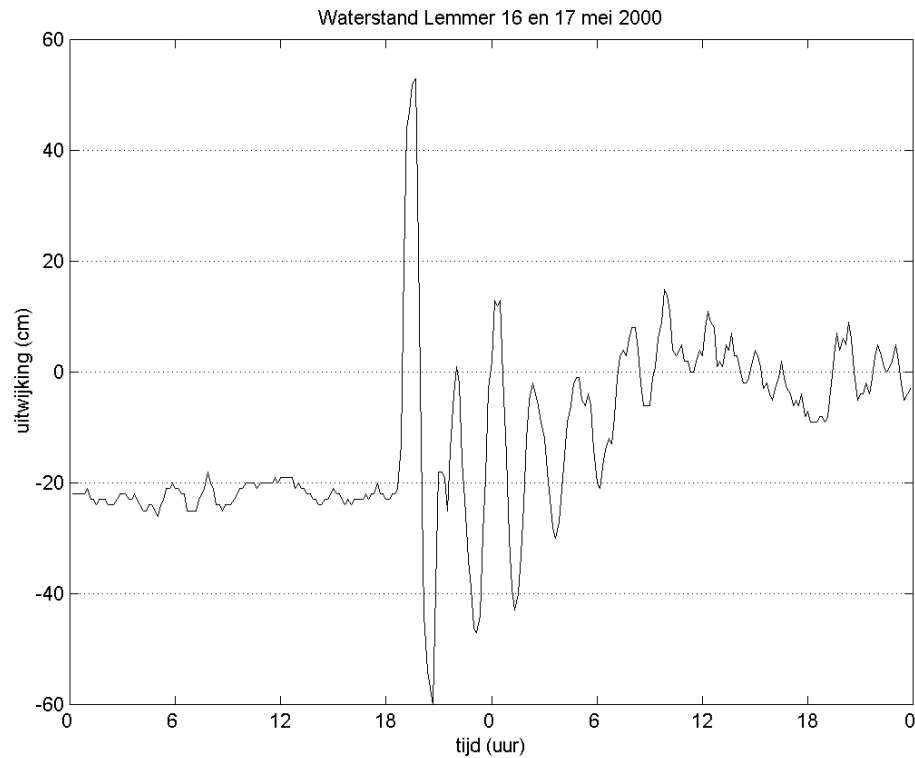
De Jong (2004) heeft laten zien dat de seiches in de haven van Rotterdam samenvallen met fluctuaties in de windsnelheid en met fluctuaties in de luchtdruk. In het deel van de Noordzee nabij de kust kan de treksnelheid van de weersystemen overeenkomen met de ondiepwater-fasesnelheid. Door de resonantiesituatie die ontstaat wordt de effectiviteit van deze mechanismen versterkt.

Voor wat betreft tijd- en ruimteschalen bevindt het IJsselmeergebied zich tussen de grote gebieden zoals de Adriatische Zee en de bekkens in de haven van Rotterdam. Zoals in Hoofdstuk 1 al werd vermeld, wordt een resonante koppeling tussen de treksnelheid van een koufront (of fluctuaties in windsnelheid en atmosferische druk) en de respons van het IJsselmeer niet verwacht gezien de geringe diepte van het meer. Daarentegen zal vanwege deze geringe diepte de windschuifspanning een relatief grote invloed hebben op de waterstand in het IJsselmeergebied. Dit impliceert dat juist veranderingen in de wind (snelheid en richting) de belangrijkste factor in de opwekking van waterstandfluctuaties en seiches zal zijn. Ook hier zal namelijk als gevolg van de wind een opwaaiing op kunnen treden. Als de wind vervolgens plotseling wegvalt of van richting verandert kan een seiche optreden. Daarnaast kunnen plotselinge veranderingen in de windrichting (mogelijk in combinatie met een sprong in de luchtdruk), die bijvoorbeeld opreden bij de passage van een koufront, een seiche initiëren. Bovendien zullen fluctuaties in de windsnelheid door de geringe diepte op een effectieve wijze kunnen zorgen voor fluctuaties in de windopzet. Deze hypothesen zullen in deze verkennende studie verder onderzocht worden.

2.3 Karakteristieken seiches IJsselmeer

Het aantal studies dat tot nu toe specifiek gericht is geweest op seiches op het IJsselmeer is beperkt. Een recent artikel van Bottema (2004) beschrijft een aantal karakteristieken van de seiches op het IJsselmeer.

De amplituden van de waterstandslingeren/seiches op het IJsselmeer verschillen sterk van geval tot geval. De grootste top-dal waarde (113 cm) is tot nu toe gemeten op 16 en 17 mei 2000. In Figuur 1 staat de waterstandregistratie bij Lemmer voor deze dagen. De periode van de seiche is ca. 2.5 uur (zoals beschreven in Bottema, 2004). Dit zou overeen kunnen komen met een seiche in de breedterichting van het IJsselmeer (zuidwest-noordoost), waarbij de breedte van het IJsselmeer overeenkomt met de halve lengte van de seiche (de grondtoon, met één knoop in het midden van het IJsselmeer). Deze situatie zou kunnen worden opgewekt door plotselinge veranderingen in windrichting of –snelheid.



Figuur 1: voorbeeld waterstandmeting met seiche (locatie Lemmer).

Op basis van de zogenaamde wet van Merian (zie bijvoorbeeld Defant, 1961) kan een globale schatting gemaakt worden van de periode die in dit geval op zou treden:

$$T = \frac{2L}{\sqrt{gh}}$$

waarbij T (s) de golfperiode is, L (m) de lengte van het bekken in de beschouwde richting, g (m/s^2) de zwaartekrachtsversnelling en h (m) de diepte. Voor typische waarden van het IJsselmeer ($L \approx 30$ km, $h \approx 5$ m) volgt hier uit $T = 2.4$ uur, hetgeen nabij één van de waargenomen perioden ligt.

In Bottema (2004) wordt verder beschreven dat er kortere eigenperioden worden waargenomen op andere locaties langs het IJsselmeer. Bij Enkhuizen bijvoorbeeld wordt een eigenperiode van 50 minuten gevonden. Een hypothese voor het ontstaan van deze beweging is dat dit het gevolg kan zijn van een lokale invloed van opwekkingsmechanismen. Opvallend is dat de overheersende eigenperiode die waargenomen wordt op locaties langs de oostelijke oever van het IJsselmeer (bijvoorbeeld Lemmer) overwegend in de buurt van 2.5 uur liggen en dat afwijkende eigenperioden, voor zover bekend, overwegend aan de zuidwest zijde van het meer worden waargenomen.

De mogelijkheid van WAQUA om de waterstandfluctuaties, inclusief de hierboven omschreven ‘lokaal’ waargenomen (eigen)perioden, te reproduceren is onderdeel van de huidige studie.

3 Analyse meetdata

3.1 Case A (7 t/m 9 februari 2004)

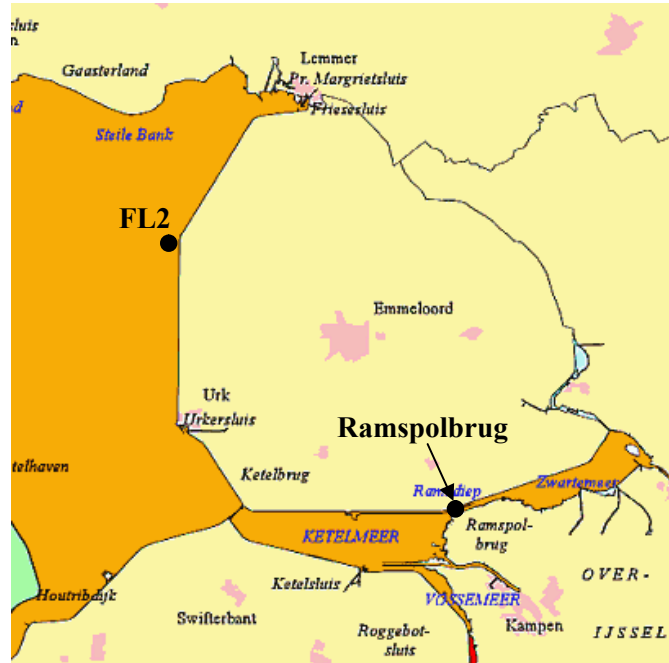
3.1.1 Inleiding

Het veelvuldig sluiten van de Balgstuw bij Ramspol wordt vooral nog toegeschreven aan waterstandfluctuaties op het IJsselmeer en het Ketelmeer. Gezien de verwachte meteorologische oorsprong van deze waterstandslingeren wordt nagegaan of er een verband kan worden gevonden tussen veranderingen in de wind en de gemeten waterstandfluctuaties.

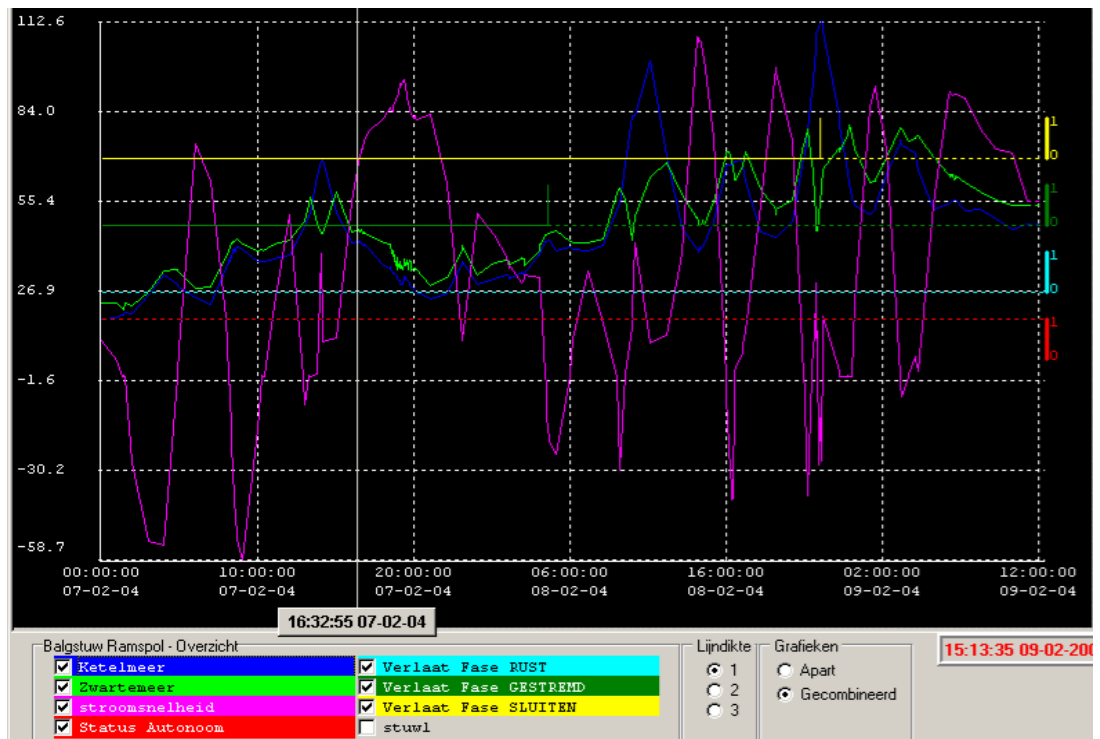
3.1.2 Meetlocaties

De focus van deze case is op de locatie van de Balgstuw Ramspol. De windmetingen voor de analyse van deze case zijn daarentegen afkomstig van de meetlocatie 'FL2' van Rijkswaterstaat IJsselmeergebied, gelegen nabij de 'Rotterdamse Hoek', ten westen van de Noordoostpolder (zie Figuur 2). Deze zullen gebruikt worden voor de analyse van de situatie bij de Balgstuw. Deze aanpak is toegepast aangezien er geen representatief windveld voor het hele IJsselmeergebied beschikbaar is. Gezien de tijd- en ruimteschalen van de bestudeerde fenomenen wordt hier geen probleem mee verwacht: de relevante schalen zijn dusdanig groot dat de mechanismen die de waterstandslingeren bij de kering kunnen veroorzaken ook op locatie FL2 meetbaar zullen zijn.

De beschikbare waterstandmetingen zijn afkomstig van locatie 'Ramspolbrug' (zie Figuur 2). Deze locatie ligt ca. 250 m achter de Balgstuw van Ramspol. Uiteraard zal het sluiten van de kering invloed hebben op het waterstanden op deze locatie. Toch zijn de gegevens op deze locatie goed bruikbaar in de huidige studie. Dit kan als volgt worden onderbouwd. In verhouding tot de tijdschalen van de waterstandfluctuaties is de kering gedurende 7 t/m 9 februari 2004 in de meeste gevallen relatief kort gesloten geweest. Figuur 3 laat voor deze dagen onder andere de gemeten waterstanden zien direct aan de oost- en de westzijde van de Balgstuw (bron: Waterschap Groot Salland). (Deze meetgegevens zijn alleen in de vorm van deze figuur beschikbaar en konden niet op korte termijn door Waterschap Groot Salland als digitale waarden beschikbaar worden gemaakt.) Op basis van deze figuur kan gesteld worden dat de fluctuaties in de waterstand die de kering meerdere keren geactiveerd hebben aan beide zijden van de balgstuw worden waargenomen (uiteraard zijn de amplituden groter aan de kant van het Ketelmeer, de 'voorkant'/westkant van de kering). Dit betekent dat ook een meetlocatie achter de stuw geschikt is voor de huidige studie.



Figuur 2: overzicht meetlocaties voor Case A (bron originele afbeelding: RWS).

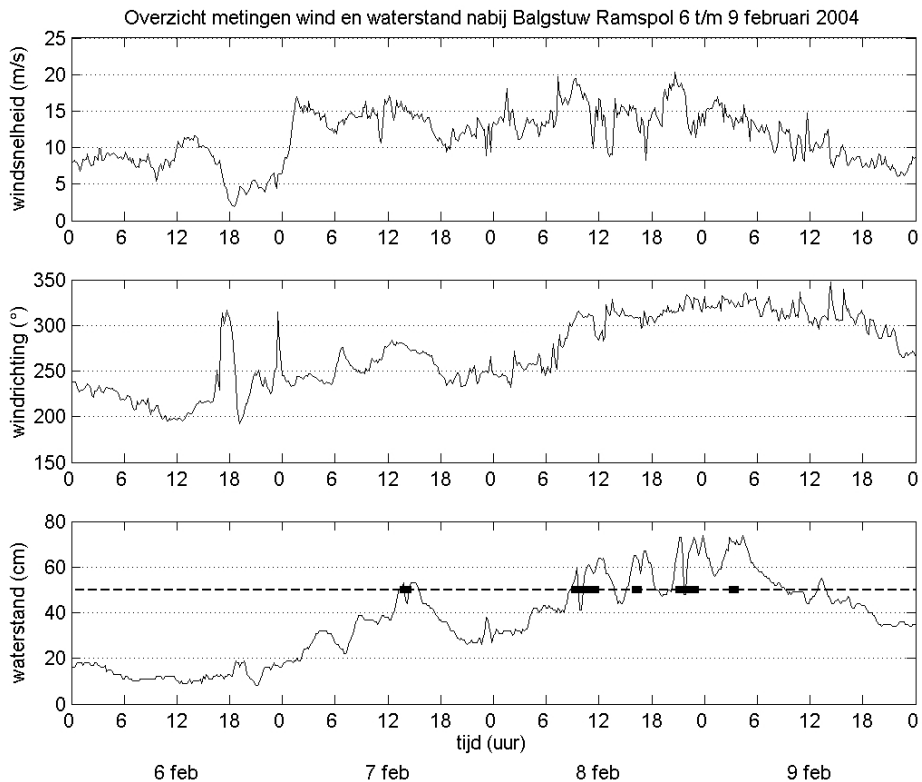


Figuur 3: overzicht meetgegevens op de locatie van de Balgstuw Rampol.

3.1.3 Meteorologische situatie en waterstandfluctuaties

Om een goed beeld te krijgen van de mogelijke interactie tussen windfluctuaties en de waterstand bij de balgstuw bij Ramspol worden eerst de meteorologische condities beschouwd, in combinatie met de tijdstippen waarop de kering is gesloten.

Rond middernacht (van 6 op 7 februari) passeert een koufront in oostelijke richting. Hierna neemt de windsnelheid snel toe en draait de wind van zuidwest naar west (zie Figuur 4). Door het draaien van de windrichting naar westnoordwest wordt de invloed van de wind op de waterstanden op het Ketelmeer steeds groter. De opwaaiing die hier uiteindelijk het gevolg van is zorgt ervoor dat rond 13:30 uur (op 7 februari) het criterium voor de waterstand (en stroming) wordt overschreden en de balgstuw sluit. Vervolgens draait de windrichting iets meer naar westzuidwest en neemt de windsnelheid enigszins af, waardoor de waterstand bij Ramspol weer daalt tot onder het criterium.



Figuur 4: tijdreeksen van wind en waterstand voor Case A.

In de loop van de ochtend van 8 februari passeert opnieuw een koufront. Vervolgens draait de wind van westzuidwest naar noordnoordwest. De windsnelheid vertoont vervolgens fluctuaties rondom een gemiddelde waarde van 15 m/s (windkracht 7 Beaufort). Het resultaat voor de waterstand bij Ramspol is een toenemende windopzet, met daarop gesuperponeerd een fluctuerende component. Door deze fluctuatie verandert de momentane waarde van de opwaaiing en de stroomrichting, waardoor meerdere keren aan de sluitcriteria wordt voldaan. In het onderste deel van Figuur 4 staan de tijdintervallen van ‘start sluiten’ tot ‘start openen’ van de Balgstuw Ramspol (dikke zwarte lijnen op de gestippelde lijn die het criterium aangeeft van 50 cm + NAP). Op 8 februari zorgt het sluiten van de kering enkele keren voor een kortdurende, relatief scherpe daling van de waterstand bij de

Ramspolbrug. Bij andere sluitingen is deze daling kleiner en rond de sluiting op 9 februari is er geen significante daling te zien. Het feit dat in deze gevallen een kleinere daling in de waterstand optreedt (of nagenoeg ontbreekt) wordt toegeschreven aan de relatief korte tijd tussen de opdracht “start sluiten” en “start openen” in die situaties (slechts één uur in de situatie op 9 februari). Voor het optreden van een zeer sterke daling van de waterstand is een langere tijdsduur benodigd.

3.1.4 Wavelet-analyse meetgegevens Case A

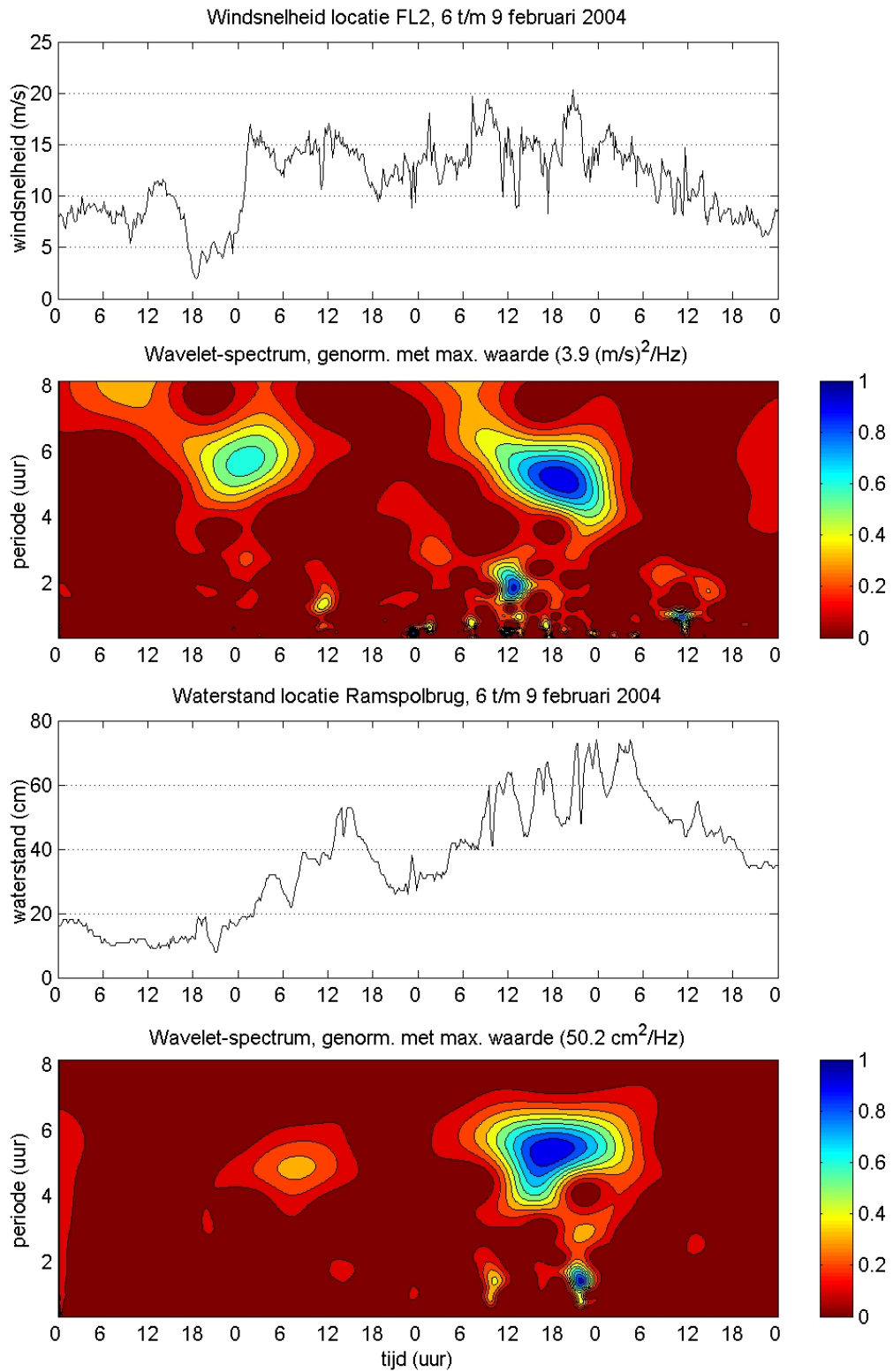
Figuur 5 laat de geanalyseerde signalen en de corresponderende wavelet-spectra voor Case A zien. Gezien de relatief langzaam veranderende windrichting tijdens het tijdinterval waarin de kering meerdere malen is gesloten zullen deze sluitingen niet het gevolg zijn van plotselinge veranderingen in de windrichting en kan dus volstaan worden met het bestuderen van de windsnelheid, zonder de windrichting op te nemen in de analyse. De geanalyseerde tijdreeks van de windsnelheid staat in het eerste paneel. Uit het wavelet-spectrum van dit signaal (tweede paneel) blijkt dat windsnelheidfluctuaties zijn gemeten met een periode van rond de 5.3 uur (aangezien er niet noodzakelijkerwijs sprake hoeft te zijn van een oscillerend fenomeen, kan wellicht beter gesproken worden over een tijdschaal van 5.3 uur.)

In het derde paneel staat de gemeten waterstand bij Ramspolbrug. Het is bijzonder treffend dat het wavelet-spectrum van de waterstand (onderste paneel) voor ongeveer dezelfde tijdsintervallen en tijdschalen energiepieken laat zien als in het spectrum van de windsnelheidmeting. De vertraging die te zien is in de respons van de waterstand op de fluctuaties in de windsnelheid die optreden in de nacht van 6 op 7 februari wordt toegeschreven aan de windrichting die pas later draait naar een richting waarbij opwaaiing richting het Ketelmeer kan optreden. Rond sommige andere tijdstippen is een verstoring te zien in het wavelet-spectrum met een kortere tijdschaal. Deze verstoringen (een scherpe daling in de waterstand) zijn het gevolg van het sluiten van de Balgstuw.

Het gebruik van wavelet-analyse laat duidelijk zijn meerwaarde zien. Zonder dat de signalen vooraf bewerkt hoeven te worden geven de spectra van beide signalen aan dat er specifieke pieken (gedurende dezelfde tijdintervallen en bij dezelfde tijdschalen) in energie gevonden worden in zowel de wind- als in de waterstandsignalen. Op deze manier is de correlatie tussen de windsnelheidfluctuaties en de waterstandfluctuaties erg goed inzichtelijk te maken. Het resultaat geeft duidelijk aan dat het veelvuldig sluiten en openen van de Balgstuw Ramspol tijdens de episode van stormachtig weer van 7 t/m 9 februari 2004 het gevolg is geweest van waterstandfluctuaties die opgewekt zijn door fluctuaties in de windsnelheid over het IJsselmeergebied.

3.1.5 Aanvullende opmerkingen opwekkingsmechanisme

Op basis van de analyse van de metingen wordt verwacht dat de waterstandfluctuaties zoals in deze situatie gemeten zijn in de strikte zin niet het gevolg zijn van een seiche (die optreden bij een eigenperiode), maar een geforceerde beweging die de periode van de windfluctuatie volgt. Dit wordt bevestigd door de wavelet-spectra, waarin de belangrijkste tijdschaal van de waterstandfluctuatie zoals opgetreden op 8 februari (5.3 uur) nagenoeg identiek is aan de tijdschaal van de fluctuaties in de windsnelheid (5.2 uur), duidend op een geforceerde beweging.



Figuur 5: resultaten wavelet-analyse van meetgegevens Case A.

Aangezien deze tijdschaal nabij een geschatte eigenperiode van het IJsselmeer ligt (ca. 5 uur, in de lengterichting van het meer) zal in Hoofdstuk 4 hier nader op ingegaan worden. Verwacht wordt dat er geen sprake is van een seiche in het Ketelmeer, aangezien de langste eigenperiode ver onder een tijdschaal van 5 uur zal liggen.

Het verschil tussen een waterstandfluctuatie en een seiche lijkt wellicht op het eerste gezicht alleen een kwestie van definitie, maar het is zeker van belang voor de karakteristieken van het opwekkingsmechanisme. Indien een seiche de stuw meerdere malen zou hebben geactiveerd, dan moet energie door de wind bij een bepaalde eigenfrequentie worden overgedragen aan het IJsselmeer-systeem wil dit zich nogmaals op een identieke manier voordoen. Aangezien verwacht wordt dat de waterstandfluctuaties niet het gevolg zijn van een seiche zal ook een toename van energie bij andere (relatief grote) tijdschalen voldoende zijn om de kering tijdens episoden met stormachtig weer meerdere keren te activeren.

Indien de bovenstaande hypothesen juist zijn, dan zou dit betekenen dat deze situatie geen ‘toevalstreffer’ was, maar een situatie die waarschijnlijk vaker op kan gaan treden. Zolang de fluctuaties in de windsnelheid optreden bij een tijdschaal die groot genoeg is zodat de waterstand in voldoende mate kan reageren op de veranderende windsnelheid, dan zal deze situatie opnieuw op kunnen treden. Dit geeft aan dat dit een belangrijk vraagstuk is en dat aanvullend onderzoek naar dit onderdeel meer duidelijkheid zou kunnen verschaffen over hoe vaak deze situatie zich voor zal kunnen doen.

In WAQUA zal nagegaan worden of dit model op basis van een uniforme windforcering dit type waterstandfluctuaties kan reproduceren (zie Paragraaf 4.2.1). Ook zullen op basis van numerieke resultaten de karakteristieken van het opwekkingsmechanisme verder beschouwd worden.

3.2 Case B (23 februari 2002)

3.2.1 Inleiding

Zoals aangegeven in Paragraaf 2.3 worden op het IJsselmeer tijdens stormachtig weer op meerdere locaties verschillende dominante perioden gemeten. De tweede case (21 t/m 24 februari 2002) is gericht op het analyseren van een dergelijke situatie. Waterstandmetingen van vijf locaties zullen worden geanalyseerd om de verschillende eigenperioden te identificeren.

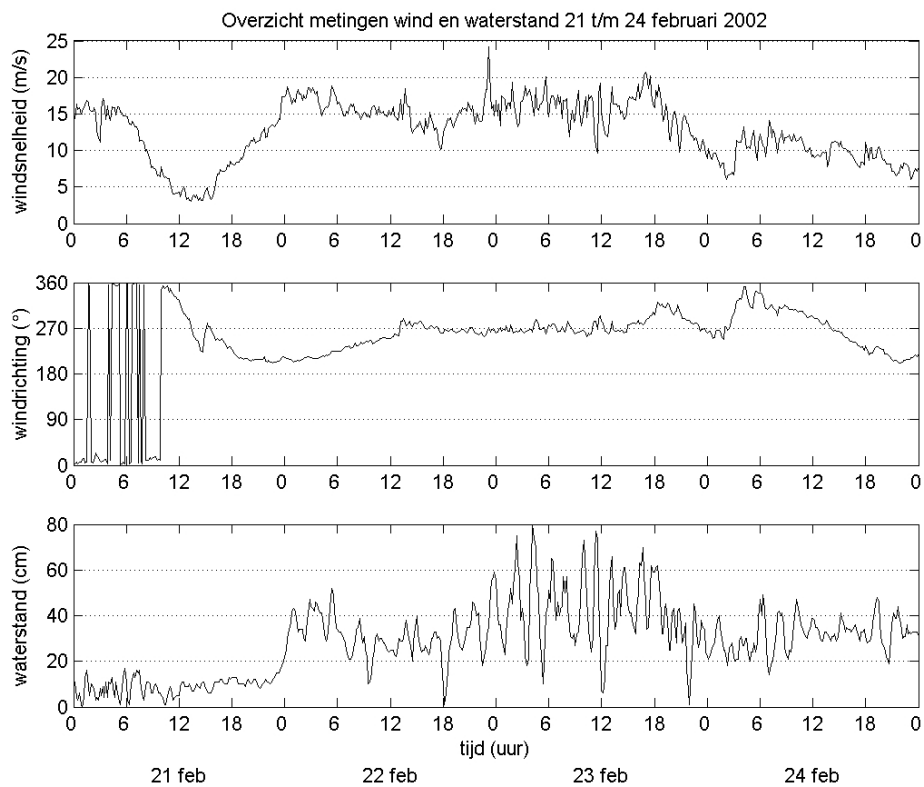
3.2.2 Meetlocaties

Op basis van een eerste, globale beschouwing van de beschikbare meetreeksen wordt voor deze case gebruik gemaakt van waterstandmetingen afkomstig van de volgende selectie van meetlocaties:

1. Lemmer
2. Kornwerderzand (binnen)
3. Den Oever (binnen)
4. Enkhuizen (Krabbersgatsluizen noord)
5. Houtribsluizen (noord)

fluctuaties in de windsnelheid relatief klein zijn. Daarnaast zouden variaties in de windrichting van invloed kunnen zijn of de eerdere passage van een verstoring.

Rond middernacht van 21 op 22 februari 2002 passeert een warmtefront in oostelijke richting. Dit zorgt ervoor dat de windsnelheid in een relatief korte tijd sterk toeneemt. Vervolgens gaat de windsnelheid fluctueren rond een gemiddelde waarde van ca. 15 m/s. Dit heeft tot gevolg dat de waterstand bij Lemmer toeneemt tot 40 cm + NAP. De fluctuaties in de waterstand bij Lemmer hebben op dit tijdstip nog een relatief kleine amplitude, $O(20 \text{ cm})$. Vervolgens neemt de windsnelheid iets af, waardoor ook de waterstand bij Lemmer iets daalt.



Figuur 7: overzicht wind- en waterstandmeting Case B.

Rond middernacht van 22 op 23 februari passeert een koufront in zuidoostelijke richting. De windsnelheid laat tijdens de passage van dit koufront een scherpe toename zien. Vervolgens vertoont de waterstand in Lemmer waterstandfluctuaties met een top-dal waarde van 60-70 cm.

Achter dit front wordt gedurende 23 februari koude lucht aangevoerd. Met deze koude lucht worden buien aangevoerd en blijft de windsnelheid fluctuaties vertonen rondom een gemiddelde waarde van ca. 15 m/s. De windrichting blijft relatief constant vanuit het westen (in de loop van de dag geleidelijk draaiend naar het noordwesten). Ook de waterstand blijft significante fluctuaties vertonen tot 24 februari.

Opgemerkt moet worden dat de waterstand bij Ramspol ook in dit geval een aantal keer 50 cm + NAP overschrijdt. De Balgstuw bij Ramspol is officieel in gebruik sinds december 2002 (eerste automatische sluiting vond plaats op 27 oktober 2002). Indien de kering tijdens

deze episode van stormachtig weer operationeel geweest was, dan was waarschijnlijk ook in dit geval de Balgstuw meerdere malen dichtgegaan. (Een aanvullende beschouwing van de resultaten van de numerieke simulatie van deze case, beschreven in Hoofdstuk 4, geeft aan dat ook meerdere keren aan het criterium van de richting van de stroming is voldaan.) Dit geeft aan dat de situatie zoals die opgetreden is tijdens Case A geen opzichzelfstaand geval is.

3.2.4 Wavelet-analyse meetgegevens Case B

Opwekkingsmechanisme

In Figuur 8 staan de wavelet-spectra voor de analyse van het opwekkingsmechanisme op basis van de meetgegevens van Case B. De spectra zijn niet zo duidelijk als voor Case A, maar er kunnen nog steeds verbanden uit afgeleid worden. Ook in dit geval zijn er geen scherpe verandering in de windrichting opgetreden. Vooral in het tijdinterval waarin de grootste seiche-amplituden bij Lemmer worden waargenomen is de windrichting relatief constant. Daarom wordt ook in Case B volstaan met de analyse van de windsnelheid, zonder de windrichting in de beschouwing in te brengen.

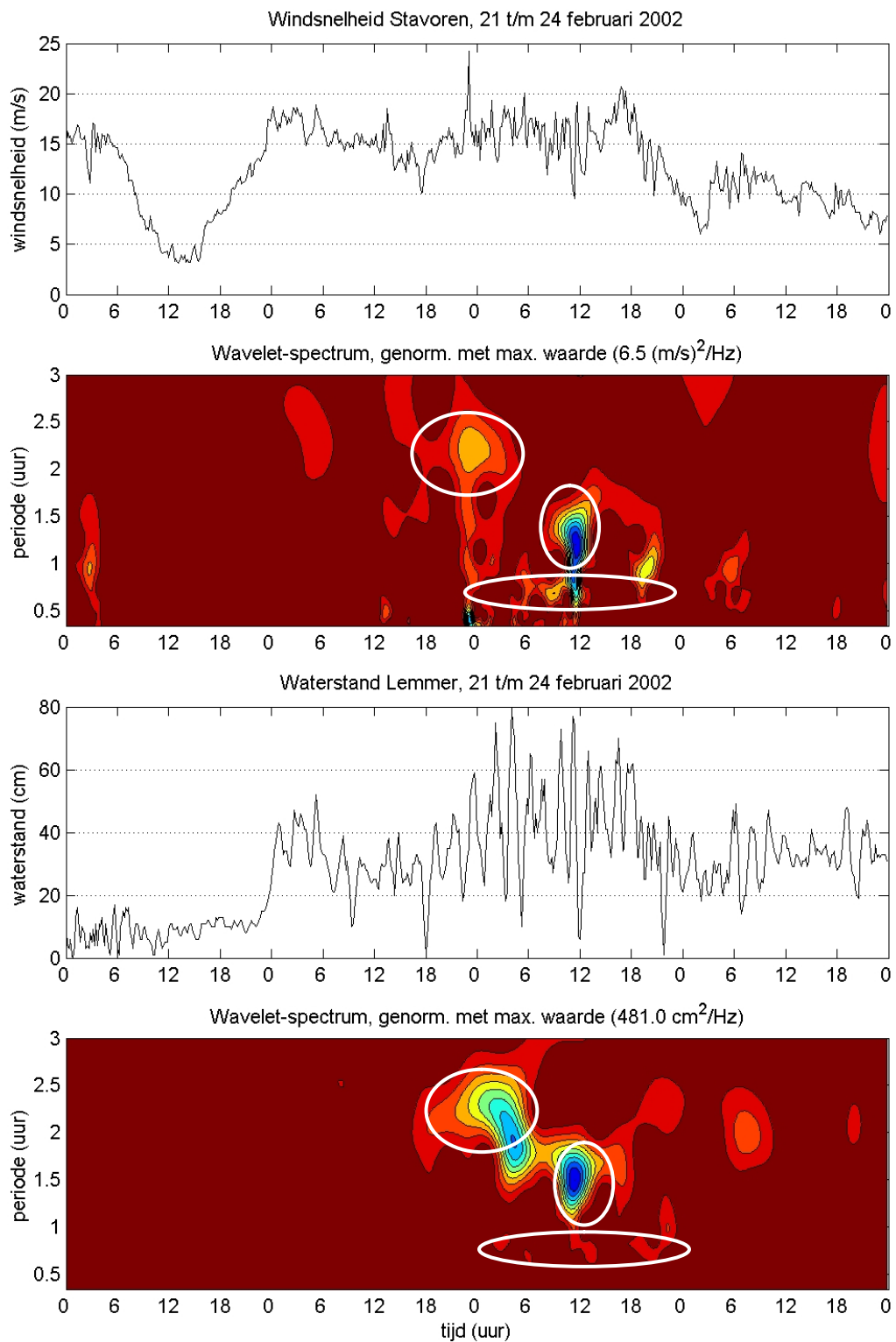
Het bovenste deel van de figuur laat de gemeten windsnelheid op de locatie Stavoren-Haven zien. Het tweede paneel geeft het corresponderende wavelet-spectrum weer. De relevante pieken zijn aangegeven in dit spectrum. Relatief hoge energieniveaus worden gevonden tijdens de frontpassage van 22 op 23 februari (onder andere rond een tijdschaal van 2.5 uur) en gedurende het daaropvolgende interval met buiige koude luchttoevoer vanuit het noordwesten (rond een tijdschaal van 0.5-1.5 uur).

De tijdreeks van de waterstandmeting bij Lemmer staat in het derde paneel van Figuur 8. Het bijbehorende wavelet-spectrum is weergegeven in het onderste paneel. Ook in dit spectrum zijn de relevante energiepieken aangegeven (duur en tijdschaal). Bij Lemmer treden waterstandfluctuaties op bij een periode van 2.5 uur, 1.5 uur en 0.75 uur. Vooral de eerste twee schalen komen duidelijk overeen met energiepieken in het spectrum voor de windsnelheid. Ondanks dat de resultaten minder uitgesproken zijn dan voor Case A, geven deze spectra aan dat ook in dit geval de wind een belangrijke (en mogelijk de belangrijkste) factor is in de opwekking van de waterstandfluctuaties/seiches op het IJsselmeer.

Dominante (eigen)perioden

Met behulp van wavelet-analyse worden de gemeten waterstanden op alle vijf geselecteerde locaties geanalyseerd. Op basis van de resulterende wavelet-spectra kunnen de tijdintervallen met waterstandfluctuaties en de overheersende eigenperiode(n) van de verschillende locaties worden bepaald. De wavelet-spectra voor de vijf locaties staan in Bijlage A. Gezien de omschreven eigenperioden in Bottema (2004) is hierbij gekeken naar tijdschalen tussen 1200 s (kleinste schaal mogelijk in verband met de bemonsteringsinterval van 600 s) en 3 uur.

In Tabel 2 staat een overzicht van de dominante perioden die uit de spectra zijn afgeleid. De vetgedrukte tijdschalen zijn de perioden waarbij de maximale waarde in het wavelet-spectrum wordt gevonden.



Figuur 8: wavelet-analyse van wind- en waterstandmetingen Case B.

Deze waarden komen overeen met de waarden die genoemd worden in Bottema (2004), waarin een geheel andere meteorologische situatie wordt beschreven (de passage van een onweerfront). Het feit dat in deze verschillende situaties dezelfde perioden worden gevonden geeft aan dat waarschijnlijk in beide gevallen eigenperioden zijn aangeslagen en dat er dus seiches op het IJsselmeer zijn opgetreden.

Op basis van de gegevens in Tabel 2 valt een aantal zaken op. De meest voorkomende tijdschalen liggen rond 1.5 uur en 2.3 uur. De laatste treedt op rond de frontpassage, de eerste in het interval na de frontpassage, als koude lucht vanuit het westen wordt aangevoerd met buien.

Locatie \ parameter	perioden waterstandfluctuaties en/of seiches (uur)	schatting maximale top-dal hoogte seiche (cm)
Lemmer	0.75, 1.5 en 2.3	70
Kornwerderzand (binnen)	1.4, 2.4	35
Den Oever (binnen)	0.75, 1.8-2.0	30
Krabbersgatsluizen (noord)	0.75, 1.4	65
Houtribsluizen (noord)	0.75, 1.3, 1.8, 2.2	45

Tabel 2: overzicht overheersende eigenperiode en maximale top-dal waarde per locatie.

Aan de zuidwestkant van het IJsselmeer (vooral bij Enkhuizen, Krabbersgatsluizen) worden kortere tijdschalen waargenomen en worden geen significante energiepieken gevonden voor een periode van 2.5 uur. Opvallend is dat dit omgekeerd wel het geval is. Aan de oostkant van het IJsselmeer worden de grootste energiepieken gevonden bij 2-2.5 uur, maar indien de bovengrens van het wavelet-spectrum beperkt wordt tot 1 uur, dan worden fluctuaties gevonden gedurende dezelfde tijdintervallen en bij nagenoeg dezelfde periode/tijdschaal als voor bijvoorbeeld de Krabbersgatsluizen (rond 0.75 uur). Normaal gesproken zijn deze niet duidelijk zichtbaar in het signaal, aangezien de langere tijdschalen overheersen. In het wavelet-spectrum in Figuur 8 is deze korte periode al aangegeven in zowel de tijdreeks van de windsnelheid als in de waterstandmeting.

De hierboven omschreven resultaten geven aan dat de fluctuaties in de windsnelheid waterstandfluctuaties en seiches op het IJsselmeer kunnen opwekken. Op verschillende locaties worden verschillende dominante perioden gevonden. Deze case wordt doorgerekend met WAQUA om te analyseren of de verschillende perioden van de waterstandslingeren (seiches) door dit simulatieprogramma gereproduceerd kunnen worden (zie Paragraaf 4.2.2).

4 WAQUA simulaties

4.1 Omschrijving WAQUA modelschematisatie

4.1.1 Inleiding

Het rekenpakket WAQUA is toegepast voor simulaties van de lange-golfbeweging op het IJsselmeer. WAQUA is een zogenaamd tweedimensionaal (2DH) model dat voor een rekengebied de ondiep-watervergelijkingen oplost. Het pakket wordt gebruikt voor hydrodynamische simulaties van rivieren, meren en kusten en het kan naast waterbeweging als gevolg van een verval, ook de waterbeweging berekenen onder invloed van een forcering als wind. Binnen deze studie is hier in belangrijke mate gebruik van gemaakt.

Deze paragraaf beschrijft globaal het op WAQUA gebaseerde model van het IJsselmeer. Dit model is in het kader van dit project door Rijkswaterstaat RIZA aan WL | Delft Hydraulics ter beschikking gesteld. Bovendien worden de aanpassingen besproken die zijn verricht aan de beschikbaar gestelde schematisatie ten behoeve van de drie uitgevoerde simulaties. Deze, relatief beperkte, aanpassingen zijn vooraf met de opdrachtgever besproken en overeengekomen.

4.1.2 Beschrijving van het IJsselmeemodel in WAQUA

WAQUA-versie en rekencluster

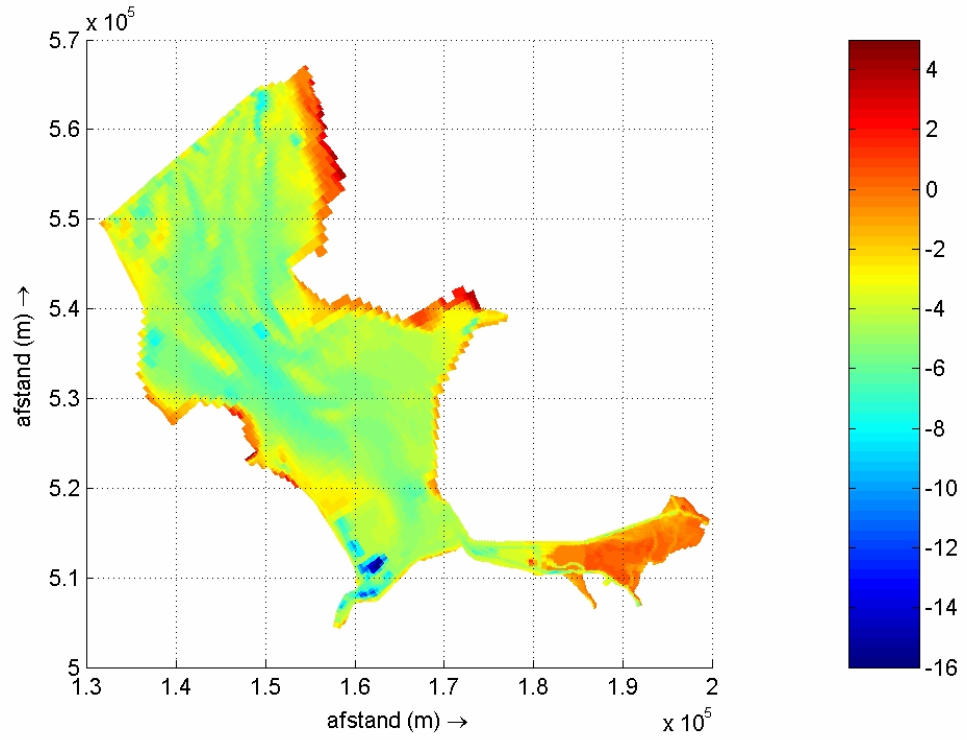
Voor dit onderzoek is WAQUA-versie 9.09.00 toegepast. Alle berekeningen zijn uitgevoerd op het LINUX-cluster van WL | Delft Hydraulics.

Bathymetrie

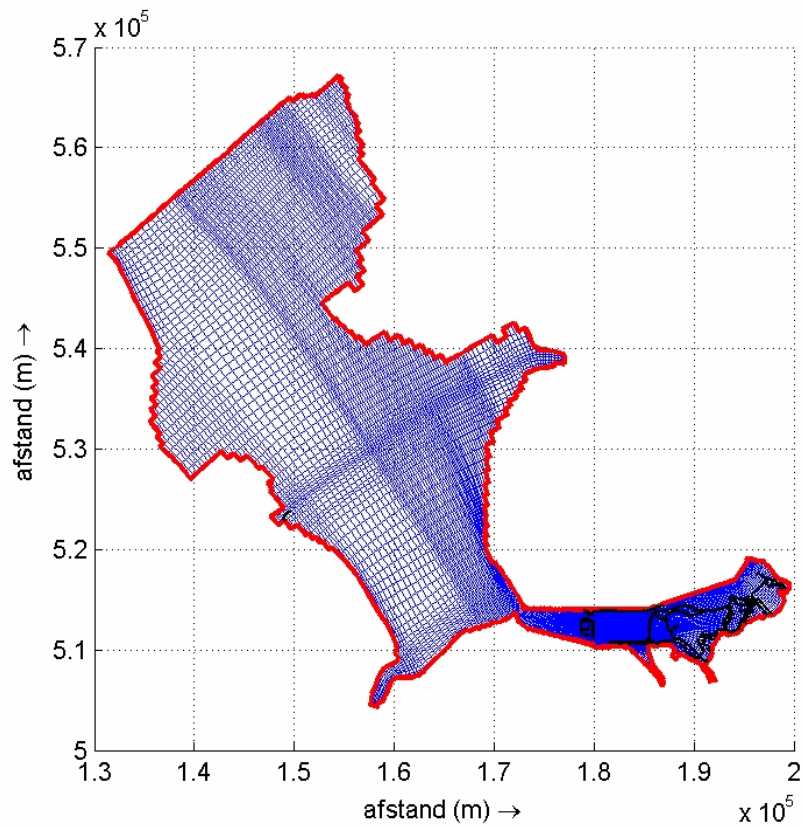
De bathymetrie wordt getoond in Figuur 9. Gemiddeld bedraagt de diepte van het IJsselmeer 5 m. De pijlers van de Ketelbrug zijn als permanent droge punten in het model gedefinieerd.

Waterkeringen ('Barriers')

De Balgstuw Ramspol bevindt zich in het model, maar de sturing is zo ingesteld dat deze tijdens de berekeningen niet werd gesloten (zie Paragraaf 4.2.1).



Figuur 9: bodemschematisatie IJsselmeer.



Figuur 10: rekenrooster, gebiedsenclousure (rode lijn) en overlaten (zwarte lijnen).

Meerpeil

Het meerpeil wordt als initiële voorwaarde aan het model opgegeven. Per case is een constante waarde aangehouden, die voor cases A en B werd bepaald op basis van metingen. Voor Case C is een globale seizoensgemiddelde waarde gebruikt. De uiteindelijk gebruikte waarden zijn: Case A: 0.175 m + NAP; Case B: 0.15 m + NAP; Case C: -0.20 m + NAP.

In- en uitstroom

Toevoer van water naar het IJsselmeergebied geschiedt voornamelijk via de IJssel en de Vecht. Uitwatering geschiedt bij Den Oever en bij Kornwerderzand. In verband met het oriënterende karakter van deze studie is gebruik gemaakt van een constant meerpeil en vindt er geen aan- en afvoer van water plaats.

Rekenrooster

Het rekenrooster van het IJsselmeer is een kromlijinig, niet-equidistant rooster (zie Figuur 10). Voordeel van een dergelijk rooster is dat er in de interessegebieden waarin meer detail nodig is, fijnere roosterafmetingen kunnen worden toegepast. Een dergelijke verfijning is aanwezig in het gebied rond de Balgstuw Ramspol. De roostergrootte is ca. 50 -100 m voor delen van het Ketelmeer, oplopend tot ca. 900 m in het noord-westelijke deel van het IJsselmeer. Figuur 10 toont ook de gebiedsbegrenzing (de zgn. *enclosure*) en de aanwezige overlaten in het gebied. Deze overlaten liggen vooral in de uiterwaard ten zuiden van het Ramsdiep, dat tevens een hoger liggend gebied is.

Rekentijdstap

Voor de definitieve berekeningen is de rekestijdstap gesteld op $\Delta t = 1$ minuut. Een vergelijkingsberekening met een tijdstap van $\Delta t = 5$ minuten liet minimale verschillen zien. Aangezien de rekestijd van het model beperkt was, en er een relatief beperkt aantal simulaties gemaakt is in deze studie, is een rekestijdstap van $\Delta t = 1$ minuut aangehouden. Voor operationeel gebruik van het model, waarvoor meer productiematig berekeningen benodigd zullen zijn, zal waarschijnlijk volstaan kunnen worden met een rekestijdstap van 5 minuten.

Windforcering

WAQUA biedt de mogelijkheid tijdafhankelijk een uniform windveld (constant in ruimte) of een ruimtelijk variërend windveld in rekening te brengen. Voor deze studie is gebruik gemaakt een uniform windveld. Hiertoe zijn de door Rijkswaterstaat RIZA beschikbaar gestelde metingen van de wind (op 10 meter hoogte gemeten: U_{10} in m/s) en windrichtingen (graden, volgens de nautische conventie) als functie van de tijd opgegeven. Voor elke simulatie is gebruik gemaakt van een meting van één locatie (een beschrijving van de locaties staat in Paragraaf 3.1.2 en 3.2.2). Daarenboven moet een zogenaamde C_d -waarde (windschuiwspanningcoëfficiënt) worden opgegeven. In deze C_d -coëfficiënt ligt ook de vertaling van de windsnelheid op 10 m hoogte naar het wateroppervlak opgesloten. In het

beschikbaar gestelde model van het IJsselmeer was al een windsnelheidafhankelijke C_d -coëfficiënt gedefinieerd, volgens:

$$\begin{aligned} U_{10} \leq 7,7886 \text{ m/s} & \quad C_{dA} = 1.36673 \cdot 10^{-3} \\ 7,7886 < U_{10} < 50 \text{ m/s} & \quad \text{Lineaire interpolatie tussen } C_{dA} \text{ en } C_{dB} \\ U_{10} \geq 50 \text{ m/s} & \quad C_{dB} = 3.9 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Deze waarden liggen in een gebruikelijk bereik. Gezien het oriënterende karakter van de huidige studie (nagaan of het model de waargenomen seiche-perioden/vormen kan reproduceren) is geen reden gezien om van deze waarden af te wijken.

Hydraulische ruwheid

De ruwheid van de IJsselmeerbodem is geschematiseerd volgens Manning (n_m) met een uniforme waarde $n_m = 0,0263$ m.

Eddy-viscositeit

Voor laterale uitwisseling van impuls speelt een eddy-viscositeit (ν) een belangrijke rol. Deze ligt normaal gesproken tussen $\nu = 0,5$ en $\nu = 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$. De eddy-viscositeit voor het IJsselmeerbekken bedraagt in het WAQUA model $\nu = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$.

Coriolis

Op basis van de aan het rooster toegekende breedtegraadwaarde wordt binnen WAQUA een globale Corioliscoëfficiënt gebruikt in de bewegingsvergelijking ten behoeve van de Coriolis-kracht.

4.2 Analyse resultaten

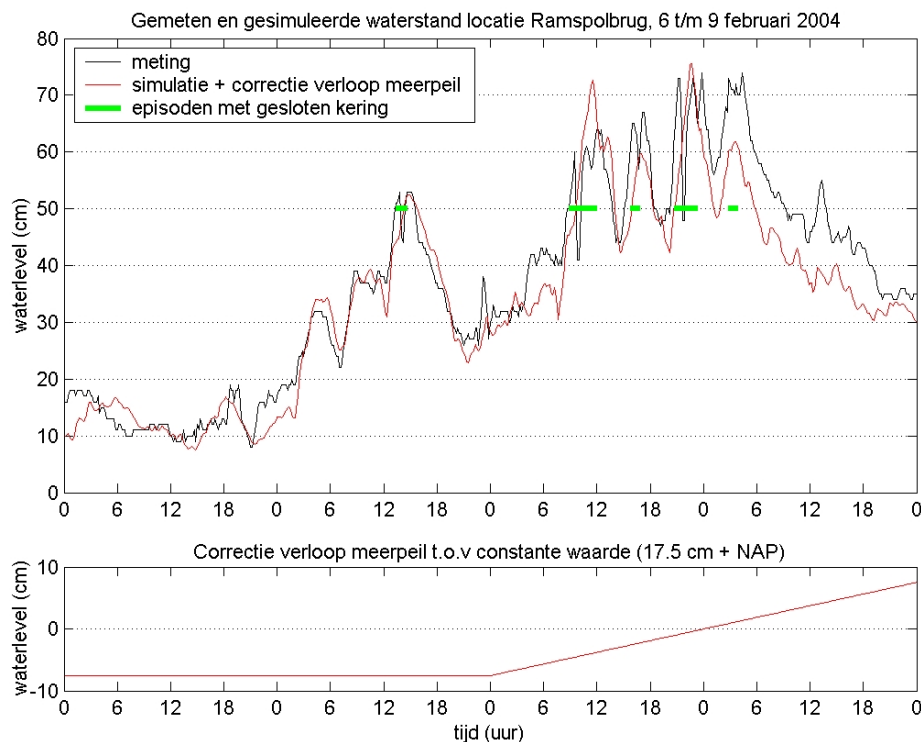
4.2.1 Case A

Inleiding

De analyse van de simulatieresultaten van Case A is gebaseerd op de situatie nabij de Balgstuw Ramspol. De hoofdvraag van deze case is of het model de door de wind opgewekte fluctuaties in de gemeten waterstand bij Ramspol kan reproduceren. Aangezien de waterstandslingeren aan beide zijden van de kering zijn waargenomen is het niet noodzakelijk om de sluitingen van de kering in de simulatie op te nemen. In een simulatie met open kering kan nagegaan worden of de waterstandfluctuaties, die uiteindelijk het sluiten van de kering geïnitieerd hebben, gereproduceerd kunnen worden in de berekening.

Reproductie van waargenomen waterstandfluctuaties

In de simulatie is uitgegaan van een constant meerpeil (NAP + 17.5 cm), dat een gemiddelde waarde is gedurende het tijdinterval waarin de kering meerdere malen is gesloten. Verwacht wordt dat het gebruik van een constant meerpeil geen significante invloed heeft op het opwekken van waterstandfluctuaties door fluctuaties in de wind. Gezien de relatief kleine veranderingen van het meerpeil (O(1 dm)) ten opzichte van de totale diepte van het meer (gemiddeld ca. 5 m) zal het verloop van het peil relatief weinig invloed hebben op de effectiviteit van de wind om een opwaaiing te veroorzaken en op de loopsnelheid van de lange golven (voor deze laatste parameter is de invloed kleiner dan 1%). Om nu wel de directe invloed van het actuele meerpeil in de resultaten op te nemen, is een geschat lineaire verloop in het gemeten meerpeil als correctie opgeteld bij de berekende tijdreeks. Het bovenste paneel van Figuur 11 laat de gemeten en de resulterende, gesimuleerde waterstand voor de locatie van de balgstuw zien. Het onderste paneel toont de correctie van het verloop van het meerpeil ten opzichte van de constante waarde in de simulatie. De groene horizontale lijnen in het bovenste paneel geven de tijdsintervallen weer dat de stuw gesloten was (tijdstip start sluiten tot tijdstip start openen).

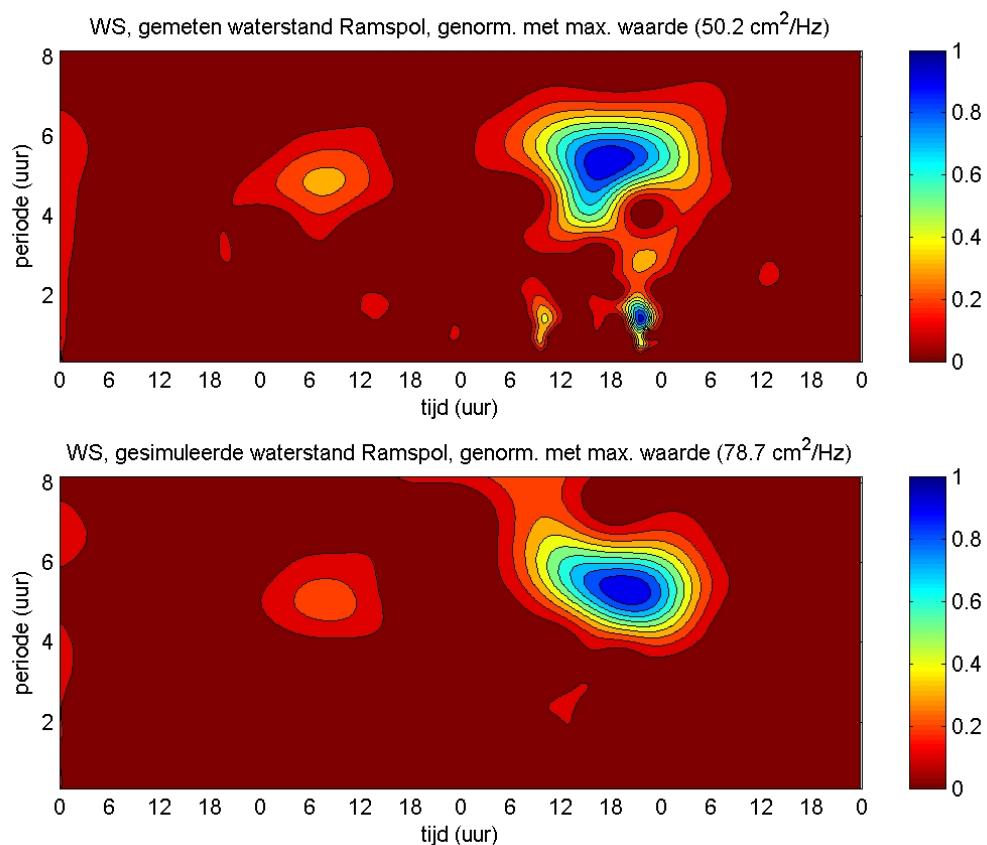


Figuur 11: gemeten en gesimuleerde waterstand voor locatie Ramspolbrug (Case A).

De amplituden van de fluctuaties die in de berekende tijdreeks gevonden worden zijn in een aantal gevallen groter dan de gemeten waarden. Dit is het logische gevolg van het niet opnemen van de gesloten kering in de simulatie en het feit dat het meetpunt ten oosten van ('achter') de kering ligt. Deze discrepanties zijn niet bezwaarlijk voor de huidige studie, aangezien de simulatie duidelijk bevestigt dat fluctuaties in de wind grootschalige waterstandfluctuaties bij Ramspol kunnen veroorzaken, met het meervoudig sluiten van de stuw als gevolg.

Ook de in Paragraaf 1.3 genoemde verwachtingen ten aanzien van de forcering van het model (uniforme wind is voldoende, treksnelheid van ondergeschikt belang) worden bevestigd. De treksnelheid van de meteorologische forcering is niet gevarieerd, maar de goede resultaten van WAQUA verkregen met de huidige methode van forceren zijn een duidelijke bevestiging van deze verwachtingen.

In Figuur 12 staan de wavelet-spectra van de gemeten (gelijk aan Figuur 5d) en de gesimuleerde tijdreeks. De pieken bij relatief korte tijdschalen in het spectrum van de gemeten tijdreeks (bovenste paneel) hangen samen met de inzakkende waterstand bij de Ramspolbrug als gevolg van het sluiten van de balgstuw. Aangezien de simulatie geen rekening houdt met het sluiten van de balgstuw worden deze pieken niet teruggevonden in het spectrum van de gesimuleerde tijdreeks van de waterstand bij Ramspol (onderste paneel).



Figuur 12: wavelet-spectra van gemeten en gesimuleerde waterstanden locatie Ramspol.

De piek in het spectrum van de metingen (bovenste paneel) die de grootschalige fluctuaties aangeeft, wordt voor ongeveer hetzelfde tijdinterval en voor dezelfde tijdschalen (ca. 5.3 uur) gevonden in de gesimuleerde tijdreeks (onderste paneel). (De lineaire trend die voor Figuur 11 werd opgeteld bij de berekende tijdreeks heeft geen invloed op wavelet-spectra.)

Als gevolg van verschillen in de gemeten en berekende amplitude van de fluctuaties zijn de maximale waarden van de spectra niet gelijk. Desalniettemin bevestigen deze spectra het proces van opwekking van waterstandfluctuaties door de fluctuaties in de wind en de correcte simulatie van dit proces in WAQUA (afgezien van absolute waarden van amplituden).

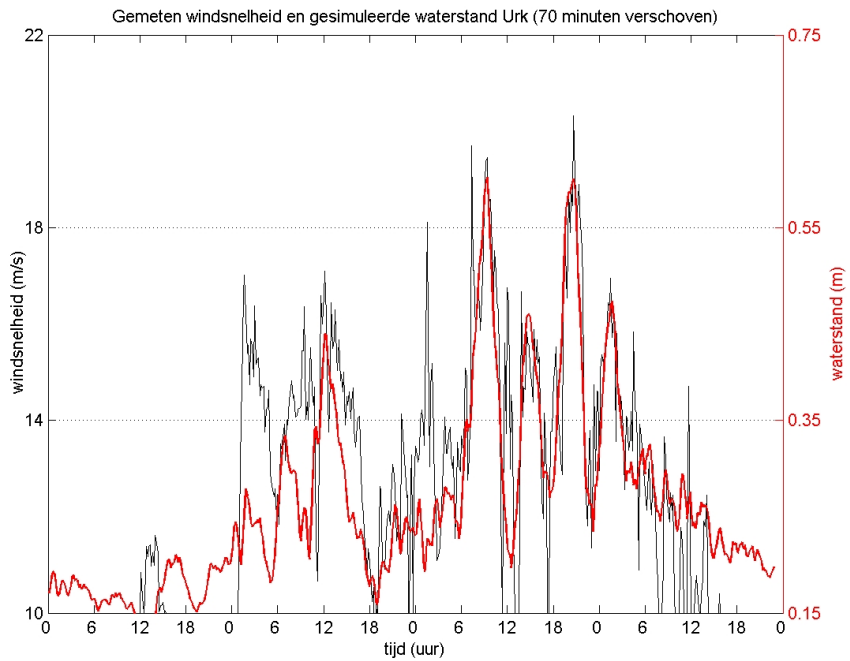
Karakteristieken opwekkingsmechanisme

In Paragraaf 3.1 is al vermeld dat de grootschalige waterstandfluctuaties zoals deze zijn opgetreden tijdens het stormachtige weer op 8 en 9 februari 2004 vermoedelijk niet het gevolg zijn van een seiche in de strikte definitie. Een aanvullende berekening is gemaakt voor een situatie waarin een opwaaiing is gegenereerd (noord-zuid), waarna de wind plotseling sterk is gereduceerd. Het bekken gaat in een dergelijke situatie vervolgens in zijn eigenperiode bewegen. De oscillatie die ontstaat zal uitdempen als gevolg van bodemwrijving. Hieruit bleek dat de eigenperiode van het bekken voor een seiche in noord-zuid richting ongeveer 4.9 uur bedraagt. De belangrijkste tijdschaal in de waterstandmeting bij Rampsol bedraagt 5.3 uur. Deze tijdschalen liggen erg dicht bij elkaar en zouden aan kunnen geven dat een seiche is opgetreden. Daarentegen is de periode van de forcering nagenoeg gelijk aan de periode van de respons, hetgeen wijst op een geforceerde beweging. Om de situatie nader te onderzoeken is een aantal aanvullende analyses van deze situatie uitgevoerd.

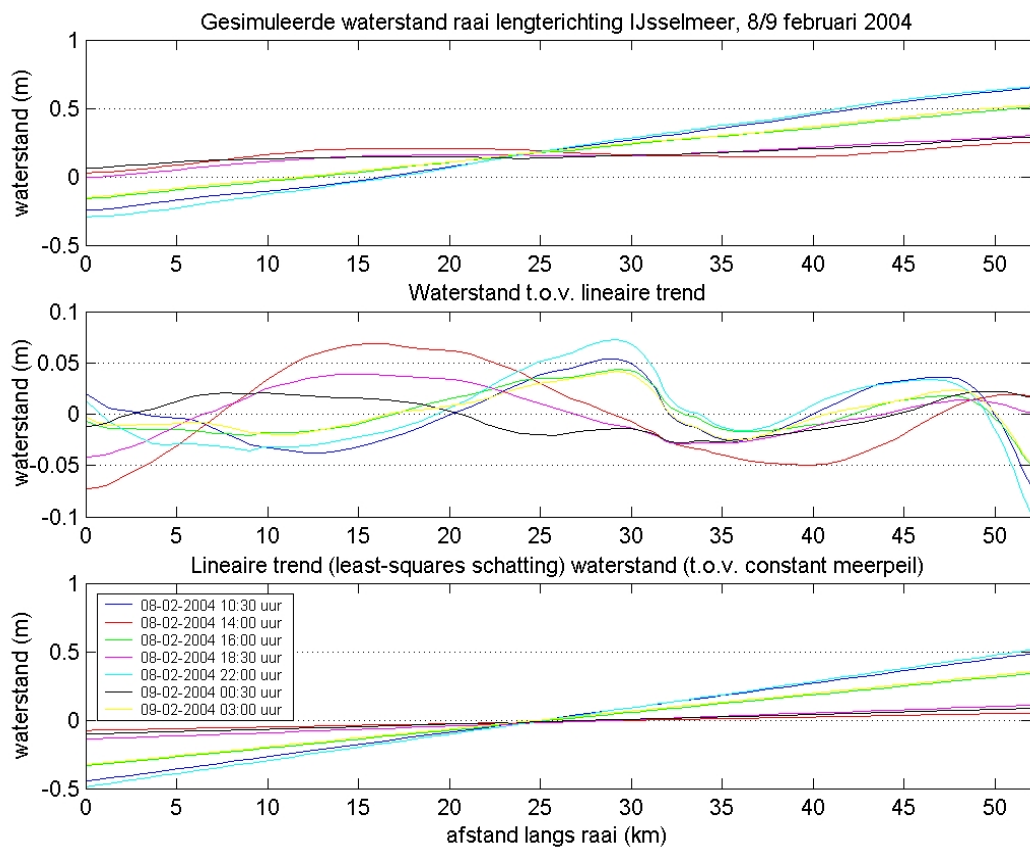
Na het optreden van een sterke toe- en (vervolgens) afname van de windsnelheid kan een seiche ontstaan. Dit zou betekenen dat de grootschalige waterstandfluctuaties verklaard zouden kunnen worden op basis van een seiche dat mogelijk ontstaat na het optreden van elke piek in de windsnelheid. Gezien de demping die optrad in de hierboven omschreven aanvullende simulatie, met plotseling afnemende windsnelheid, wordt dit niet verwacht: ten opzichte van de initiële waarde van de opwaaiing is de eerstvolgende piek in de waterstand (die optreedt nadat de windsnelheid is gereduceerd) slechts ca. 40% van deze waarde. Daarna dempt de amplitude van de oscillatie meer geleidelijk uit.

Het geforceerde karakter van deze beweging kan verder geïllustreerd worden aan de hand van Figuur 13. Hierin staan zowel de gemeten windsnelheid bij Rotterdamse Hoek als de gesimuleerde waterstand bij Urk, waarbij de laatste 70 minuten is vooruitgeschoven in de tijd, op basis van een visuele inschatting. Verwacht wordt dat deze verschuiving vooral het gevolg is van een verschuiving die optreedt in de simulatie (mogelijk door de methode waarmee het model wordt geforceerd). Een voorbeeld is te zien in Figuur 12, waarbij het gesimuleerde signaal O(1 uur) achterloopt op het gemeten signaal. De sterke correlatie (in tijdschaal en in amplitude) die te vinden is tussen de grootschalige fluctuaties in beide signalen op 8 en 9 februari onderbouwt de hypothese van een geforceerde beweging. De resultaten van de simulatie van Case A laten zien dat de opwekking van de waterstandfluctuaties hoofdzakelijk plaats vindt op het IJsselmeer, waarna de verstoring het Ketelmeer op loopt (dit laatste is o.a. af te leiden uit faseverschillen tussen maximale waterstanden langs het Ketelmeer).

Om de opwekking van de grootschalige waterstandfluctuaties op het IJsselmeer verder te analyseren zijn de tijdstippen van een maximum of minimum waarde in de gesimuleerde tijdreeks van de waterstand bij Urk geïdentificeerd. Voor elk van deze tijdstippen is de gesimuleerde waterstand langs een raai in de lengterichting (noordwest-zuidoost), in het midden van het IJsselmeer, weergegeven in het bovenste paneel van Figuur 14. De start van de raai (0 km) ligt bij de Afsluitdijk en het einde van de raai (ca. 52 km) ligt nabij de noordwest hoek van Flevoland. De plot is gebaseerd op de afstand langs de raai, hetgeen een zeer beperkte afwijking oplevert ten opzichte van een rechte lijn tussen beide locaties (de raai is als gevolg van de kromlijnige opbouw van het rooster enigszins gekromd).



Figuur 13: dubbel-as plot met windsnelheid (links) en waterstand Urk (rechts).



Figuur 14: waterstand langs raai in lengterichting van het IJsselmeer (Case A).

Het bovenste paneel laat de gesimuleerde waterstand langs de raai zien. Het middelste paneel laat het verschil zien tussen het gesimuleerde verloop en een kleinste-kwadraten schatting van een lineaire trend en het onderste paneel geeft deze lineaire trend weer.

Het is mogelijk dat de waterstandfluctuaties worden veroorzaakt door een seiche dat optreedt rond een min of meer gemiddelde (opgewaaide) waterstand. Dit wordt echter niet verwacht: het onderste paneel laat zien dat tijdens een top (bij Urk, $x \approx 45$ km) een relatief hoge opwaaiing wordt gevonden, en dat tijdens een tijdelijk lagere windsnelheid de sterkte van de opwaaiing is afgezwakt zodat een veel lagere opzet wordt gevonden. Deze lagere opwaaiing heeft elke keer ongeveer dezelfde waarde, min of meer onafhankelijk van de amplitude van de voorafgaande piek in de waterstand bij Ramspol. Na de laatste piek in de waterstand (en in de windsnelheid, zie Figuur 13) stopt de grootschalige beweging, die optreedt bij de tijdschaal van 5.3 uur, ook nagenoeg direct. Ook dit geeft aan dat er een directe interactie optreedt tussen de soms toenemende windsnelheid en de opwaaiing en dat er geen significante seiche-oscillatie optreedt.

De hierboven omschreven mogelijkheid dat er geen seiche is opgetreden kan nog verder onderbouwd worden indien de verhouding van de windschuifspanning (inclusief C_d -waarde) wordt bepaald voor de bijbehorende piekwindsnelheden. Op 8 en 9 februari zijn twee relatief sterke (20 m/s) en twee relatief zwakke pieken (15 m/s) waargenomen, terwijl er een ‘achtergrond’ windsnelheid van ca. 10 m/s opgetreden is. De windschuifspanning (inclusief C_d -waarden) die afgeleid kan worden voor de hogere pieken in de windsnelheid is ongeveer het dubbele van die voor de relatief lagere pieken. Dit correspondeert met de uitwijking in de waterstand aan de zuidkant van de raai ($x = 52$ km), waarbij de momentane waarde van de opwaaiing ten opzichte van het meerpeil behorende bij de hogere windsnelheid (blauw en cyaan, 10:30 uur en 22:00 uur op 8 februari) ongeveer het dubbele zijn van de waarden van de opwaaiing die corresponderen met de lagere pieken in de windsnelheid (geel en groen, 16:00 uur op 8 februari en 03:00 uur op 9 februari). Ook dit duidt erop dat de grootschalige waterstandfluctuaties het gevolg zijn van een directe interactie tussen windschuifspanning en verhang/opwaaiing en niet het gevolg van een seiche.

Ondanks de bovenstaande beargumentering is niet met volledige zekerheid aan te geven of de waterstandfluctuaties in de huidige case inderdaad niet het gevolg waren van seiche. Samenvattend kan gezegd worden dat er dus sterke aanwijzingen aan te geven zijn dat er geen seiche is opgetreden en dat er geen aanwijzingen gevonden zijn dat dit wel het geval is, behalve de globale overeenkomst tussen de periode van de waterstandfluctuaties en een eigenperiode van het IJsselmeer.

Mogelijk dat, algemeen gezien, zowel direct geforceerde variaties in de opwaaiing (zoals verwacht wordt dat het geval is geweest in Case A) en/of seiches ervoor kunnen zorgen dat de kering meerdere keren tijdens een episode met stormachtig weer sluit. Wellicht dat in een aanvullende studie dit verder kan worden onderzocht.

4.2.2 Case B

Inleiding

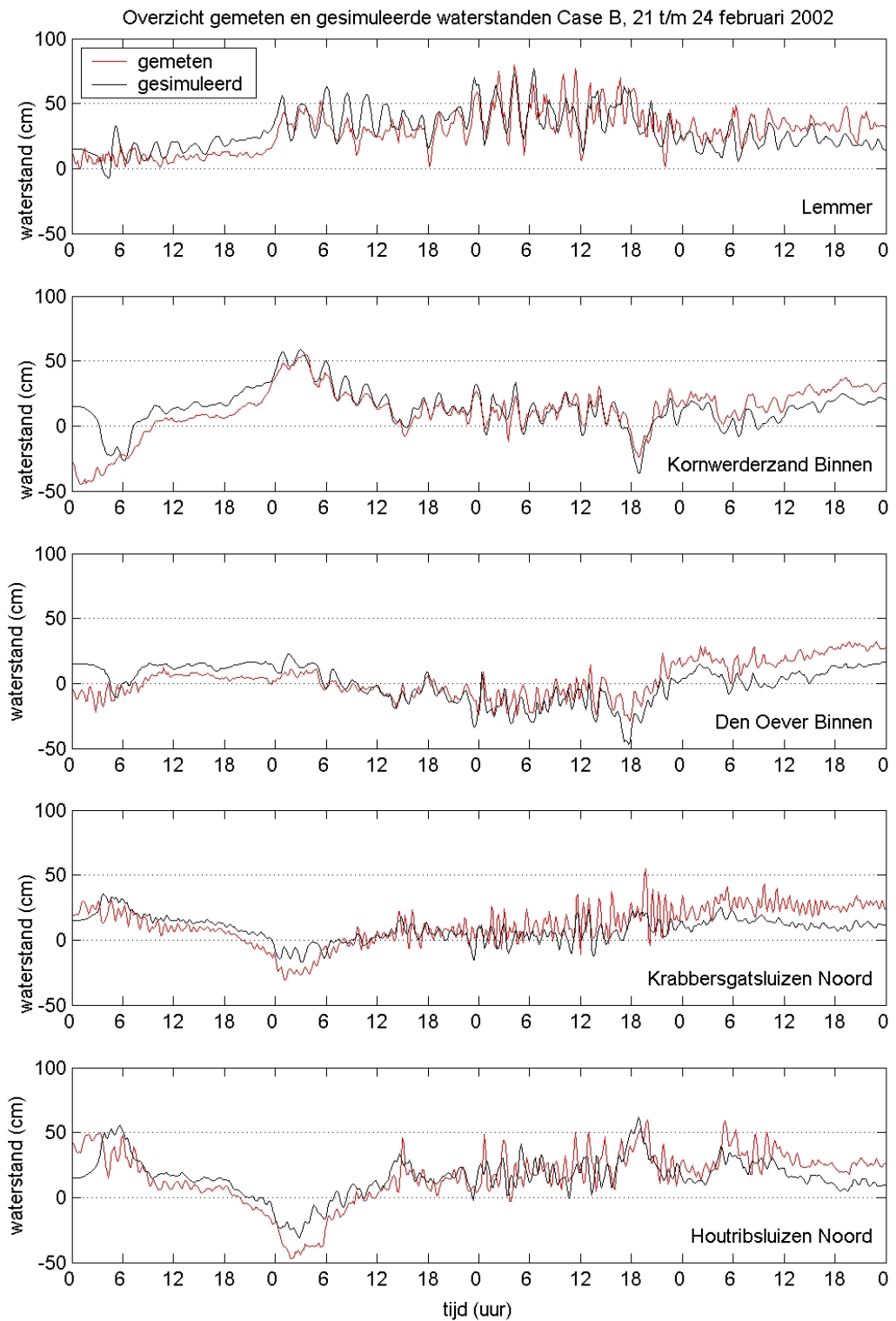
De analyse van Case B is gebaseerd op de vijf locaties die genoemd zijn in Paragraaf 3.2. Belangrijkste vraag voor de simulatie van deze case is of WAQUA de waterstandslingeren die optreden tijdens dit soort stormen kan reproduceren en of de dominante eigenperioden op deze locaties (die voor enkele locaties verschillend zijn) worden teruggevonden in de simulatie.

Dominante eigenperioden

In Figuur 15 staat een overzicht van de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterstanden op de vijf beschouwde locaties. De simulatie is wederom uitgevoerd op basis van een constant meerpeil (0.15 m + NAP). Aangezien het meerpeil gedurende het beschouwde tijdsinterval van deze case slechts beperkt veranderde is dit effect niet in de plots opgenomen.

De algemene trend van de signalen komt redelijk overeen. Een voorbeeld van een goede overeenkomst wordt gevonden voor de relatief grote amplituden die optreden bij Lemmer na de frontpassage van 22 op 23 februari. Een duidelijke overschatting is te vinden voor dezelfde locatie, alleen nu na de frontpassage van 21 op 22 februari. De oscillatie die vervolgens in de simulatie voorkomt (van zuidwest-noordoost, één knoop) is in werkelijkheid met veel lagere amplitude opgetreden. De overschatting in het model zou het gevolg kunnen zijn van bijvoorbeeld een overschatting van het effect van deze frontpassage door het toepassen van uniforme windvelden.

Om een beter inzicht te krijgen in de waterstandfluctuaties/seiches in het model is voor de geselecteerde locaties een wavelet-spectrum gemaakt van de gesimuleerde tijdreeksen. Deze staan in Appendix B, samen met spectra van de gemeten tijdreeksen ter vergelijking. Op basis van de spectra van de gesimuleerde tijdreeksen zijn de perioden van de waterstandfluctuaties in het model voor de verschillende locaties bepaald. Deze staan in Tabel 3. In deze tabel zijn ook de waarden opgenomen zoals afgeleid uit de metingen (zie Tabel 2). Opvallend is dat de kortste eigenperiode (0.7-0.75 uur) niet in de simulatie gevonden wordt. Wel worden de twee andere veelvoorkomende eigenperioden (1.3-1.4 en 2.2-2.3 uur) gevonden.



Figuur 15: overzicht van de gemeten en gesimuleerde waterstanden (Case B).

locatie \ parameter	perioden waterstandfluctuaties en/of seiches uit simulaties (uur)	perioden waterstandfluctuaties en/of seiches uit metingen (uur)
Lemmer	2.3	1.5 en 2.3
Kornwerderzand (binnen)	1.4, 2.3	1.4 , 2.4
Den Oever (binnen)	1.3, 2.2	0.75, 1.8-2.0
Krabbersgatsluizen (noord)	1.4	0.75 , 1.4
Houtribsluizen (noord)	1.3 , 2.3	0.75, 1.3 , 1.8, 2.2

Tabel 3: overzicht overheersende eigenperiode in gesimuleerde en gemeten waterstanden.

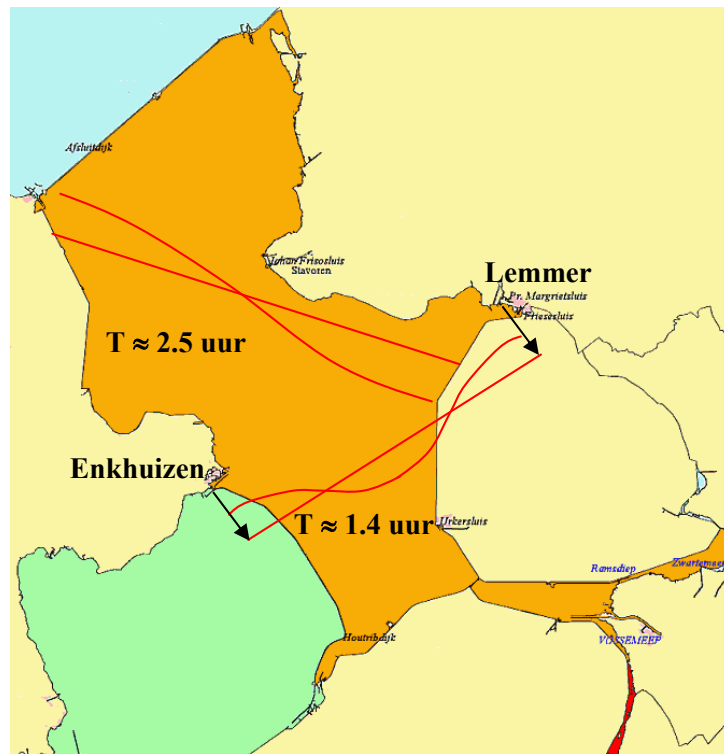
Optredende seiche-vormen en bijbehorende eigenperioden in de WAQUA-simulatie

Op basis van de analyse van de metingen en de numerieke resultaten is afgeleid dat de gemeten en gesimuleerde eigenperioden overeenkomen met een specifieke ‘seiche-vorm’ op het IJsselmeer. In Figuur 16 staan deze vormen schematisch weergegeven.

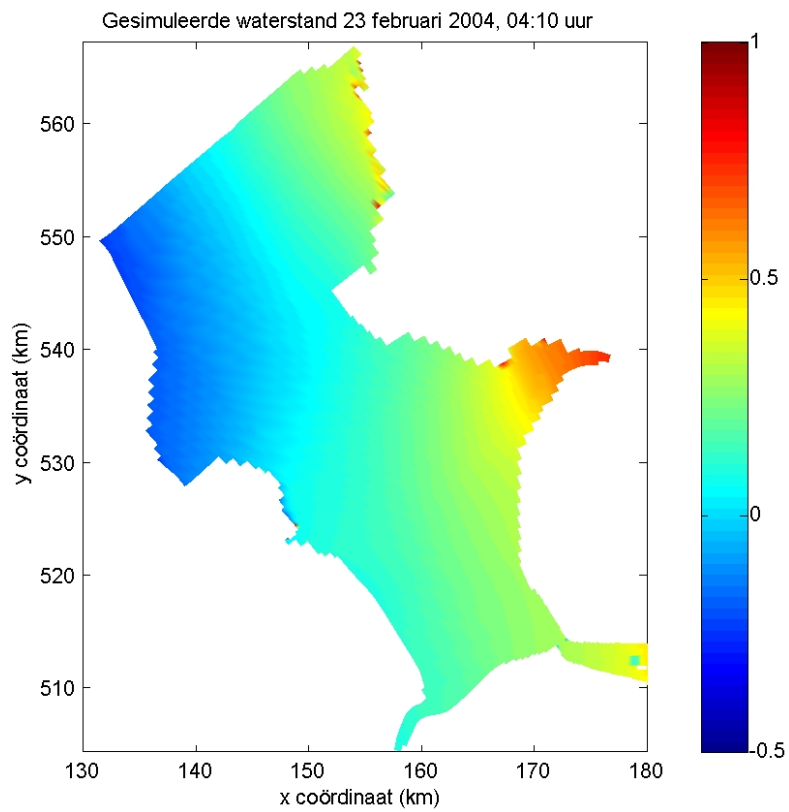
De seiche met een periode van 2.5 uur treedt ongeveer op in de richting van westnoordwest naar oostzuidoost en heeft één knooppunt, ongeveer op het midden van het IJsselmeer. Een voorbeeld van de gesimuleerde waterstand, inclusief deze vorm van de seiche is opgenomen in Figuur 17. Merk op dat de weergegeven waterstand het gecombineerde resultaat is van de windopzet en een daarop gesuperponeerde seiche-beweging. De knoop(lijn) van deze vorm loopt niet parallel aan de lengterichting van het IJsselmeer, maar ongeveer vanaf midden Afsluitdijk naar het zuiden, in de buurt van Stavoren en vooral Enkhuizen. Dit verklaart waarom juist op deze laatste locatie deze periode niet of nauwelijks wordt waargenomen in de metingen.

De tweede eigenperiode (ca. 1.4 uur) komt overeen met een seiche over de breedte van het IJsselmeer (zie Figuur 16), min of meer van zuidwest naar noordoost. Deze seiche heeft twee knopen, en een buik op het midden van het IJsselmeer.

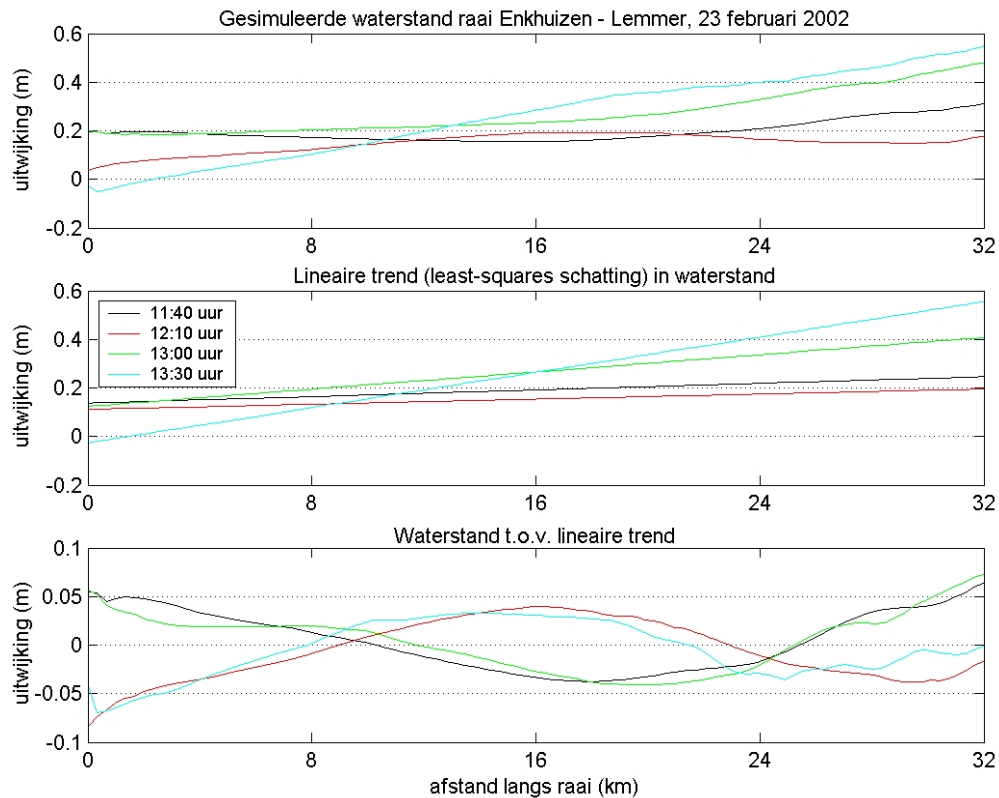
De vorm en oriëntatie van de seiche met een periode van ca. 1.4 uur is verder geïllustreerd in Figuur 18, waarin numerieke resultaten zijn opgenomen voor een raai van Enkhuizen naar Lemmer (soortgelijk als in Figuur 14). Het bovenste paneel van de figuur laat de gesimuleerde waterstand zien voor 4 tijdstippen, overeenkomend met een top of een dal van de gesimuleerde waterstandfluctuatie bij Lemmer. In het middelste paneel staat voor elk van deze tijdstippen de lineaire trend die bepaald is met behulp van een kleinste-kwadraten schatting op basis van het waterstandverloop in het bovenste paneel. Deze trend wordt gezien als een schatting van de momentane waterstand als gevolg van windopzet.



Figuur 16: in WAQUA gereproduceerde seiche-vormen op het IJsselmeer.



Figuur 17: waterstand IJsselmeer tijdens top seiche bij Lemmer.



Figuur 18: waterstanden langs een raai van Enkhuizen (0 km) naar Lemmer (ca. 32 km).

Het onderste paneel van Figuur 18 geeft voor elk beschouwd tijdstip het verschil tussen het berekende waterstandverloop (bovenste paneel) en de (geschatte) momentane waterstand die alleen het gevolg is van de opwaaing (middelste paneel). In de resulterende waterstanden is duidelijk een seiche-vorm met twee knopen zichtbaar. Aangezien de tijdstippen zijn geselecteerd op basis van het optreden van een top of dal van de waargenomen waterstandfluctuatie bij Lemmer, komen deze ‘momentopnamen’ overeen met een minimum of maximum in de waterstand als gevolg van de seiche. De enigszins afwijkende vorm die gevonden wordt aan de zijde van Lemmer wordt toegeschreven aan de variaties in diepte en breedte die het IJsselmeer daar lokaal heeft.

Merk op dat dit een heel ander resultaat is dan voor Case A gevonden werd in Figuur 14, op basis van een soortgelijke aanpak. Ter illustratie: de top van een seiche hoeft niet noodzakelijkerwijs samen te vallen met een hoge waarde voor de opwaaing, zie bijvoorbeeld het resultaat voor 13:30 uur (cyaan) waarbij de hoogste waarde van de opwaaing samenvalt met een *dal* van de seiche bij Lemmer.

De periode van deze tweede gesimuleerde seiche-vorm wordt in de metingen waargenomen op meerdere locaties. De vorm en oriëntatie van de seiche verklaart waarom deze zowel in Lemmer als in Enkhuizen is gemeten (dit in tegenstelling tot de seiche met een periode van 2.5 uur). Bovendien is het optreden van deze vorm een verklaring voor het feit dat “midden op het IJsselmeer” (zoals is aangegeven in de beschrijving van Case B in de offerteaanvraag van de opdrachtgever, ref. WSH/3223) ook waterstandfluctuaties met significante amplituden worden waargenomen: de buik van de seiche-vorm met twee knopen zorgt voor significante amplituden op locaties op het IJsselmeer waar de seiche-beweging van 2.5 uur een knoop heeft.

Naast de hierboven omschreven seiche-vormen wordt nog een belangrijke periode op verschillende locaties in de meetreeksen teruggevonden, namelijk 0.7-0.75 uur. Het ontbreken van deze periode in de WAQUA-uitkomsten is vooral duidelijk voor locatie Enkhuizen/Krabbersgatsluizen (Figuur B-4). Zoals eerder aangegeven wordt deze op meerdere locaties in de metingen waargenomen, maar lokaal kan een andere periode overheersen. Het ontbreken van deze component wordt toegeschreven aan de methode waarop in de huidige studie de windforcering is opgelegd in het model (dit is binnen de huidige studie niet verder onderzocht). Voor langere tijdschalen gaan de onderliggende aannames beter op en levert de gebruikte methode goede resultaten op (zoals ook in Case A het geval was). Voor kortere tijdschalen zouden aanvullende berekeningen gemaakt moeten worden met een overtrekkend windveld, eventueel in combinatie met velden van atmosferische druk (niet opgenomen in de huidige studie).

Dit wordt verder onderbouwd door de aanvullende simulatie die gemaakt is voor Case A (eerder genoemd in Paragraaf 4.2.1). Tijdens het uitslingeren van de hoofdbeweging treedt bij Enkhuizen duidelijk een fluctuatie op met een periode rond de 0.7 uur. Dit geeft aan dat het model op zich een oscillatie bij deze tijdschaal kan opleveren. Belangrijk hierbij op te merken is dat het kunstmatig initiëren van deze beweging, zoals uitgevoerd in de aanvullende simulatie, nog geen garantie is dat deze ook in praktische situaties, tijdens het simuleren van echte stormen, teruggevonden zal worden.

4.2.3 Case C

Inleiding

Case C is gericht op een globale analyse van de effecten van een relatief kleinschalige, maar zeer zware storm (windkracht 12 Beaufort). De analyse van deze case zal dus minder diepgaand zijn dan voor de eerste twee cases. In het bijzonder wordt gekeken naar de maximale waterstanden die optreden op verschillende locaties langs de oever van het meer. Daarnaast zal ook de ‘overshoot’ voor de beschouwde locaties worden bepaald. Met ‘overshoot’ wordt de kortdurende piek in de waterstand bedoeld die optreedt voordat een (lager) evenwicht zich instelt als na een interval met toenemende (of afnemende) windsnelheid een constante (maximale/minimale) windsnelheid wordt bereikt.

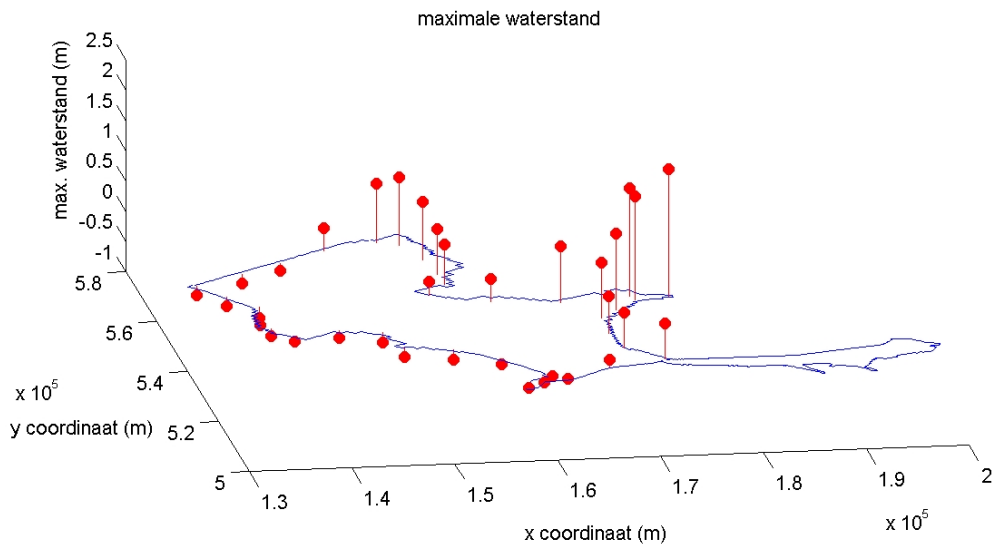
De case wordt uitgevoerd voor het IJsselmeer, waarna een interpretatie van de resultaten gegeven wordt voor de implicaties voor het Markermeer.

Maatgevende waterstanden en overshoot

De stormsituatie in deze case wordt gesimuleerd op basis van een schetsmatig verloop van de windsnelheid volgens 8, 16, 34, 34, 16 en 8 m/s (in stappen van een uur). Voor en na deze storm is de windsnelheid constant (8 m/s). Voor het gehele tijdsinterval wordt een constante windrichting aangehouden (westzuidwest). Deze windrichting betekent dat logischerwijs verwacht kan worden dat de hoogste waterstanden, en grootste waarden van de overshoot, overwegend aan de oostzijde van het IJsselmeer gevonden zullen worden.

Overshoot kan plaatsvinden direct volgend op de sterke toename in de windsnelheid aan het begin van de bestudeerde storm en direct volgend op de sterke afname van de windsnelheid na afloop van deze storm. De waarde van de overshoot is bepaald ten opzichte van de evenwichtswaarde van de waterstand op de beschouwde locaties. Voor de overshoot bij afnemende wind is de evenwichtswaarde aangehouden die aan het eind van de simulatie wordt gevonden voor 8 m/s windsnelheid. Daarentegen kan de huidige simulatie niet gebruikt worden voor het bepalen van de evenwichtswaterstand bij 34 m/s, aangezien het tijdsinterval waarin deze maximale windsnelheid optreedt te kort is om een evenwichtssituatie te bereiken. Daarom is voor een deel van de locaties (waar overshoot optreedt bij toenemende windsnelheid) gebruik gemaakt van een aanvullende simulatie, waarin het hierboven omschreven verloop van de storm met stappen van 6 uur is uitgevoerd in plaats van met stappen van een uur. Dit resulteert in een voldoende lang tijdsinterval voor het ontstaan van een evenwichtswaarde voor deze hoge windsnelheid.

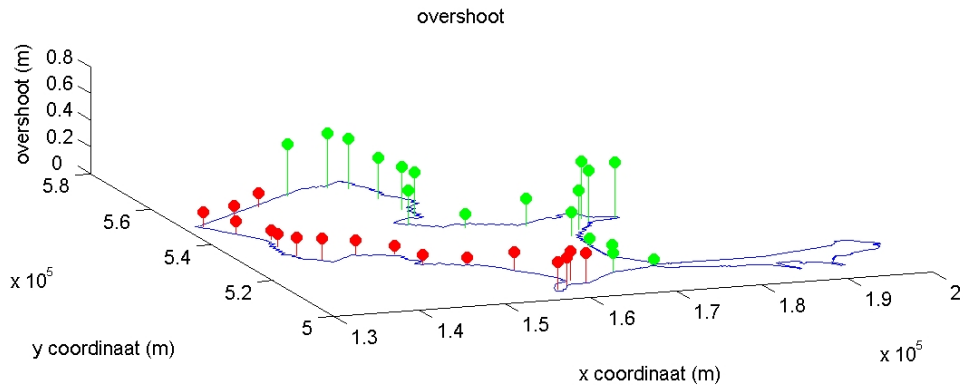
Langs het IJsselmeer zijn uitvoerpunten gedefinieerd op relevante locaties. Voor elk van deze locaties is de maximale waterstand en de overshoot bepaald. Een overzicht van de resultaten van de hierboven omschreven analyse staat in Figuur 19 en Figuur 20. Deze resultaten, samen met aanvullende informatie over de beschouwde locaties en de bijbehorende coördinaten staan in Appendix C.



Figuur 19: overzicht maximale waterstanden in Case C.

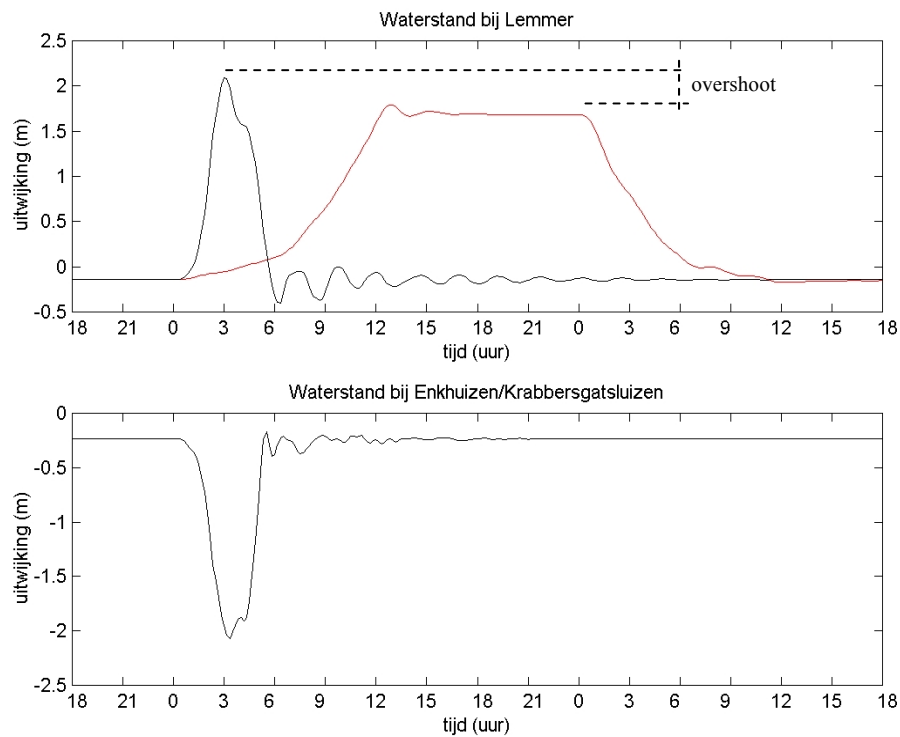
Figuur 19 laat zien dat de maximale waterstand (getoonde waarden zijn inclusief overshoot) het hoogst is bij Lemmer (2.1 m). Dit wordt primair toegeschreven aan de grotere breedte die het IJsselmeer daar heeft voor deze oriëntatie van de wind: bij een gegeven verhang zullen daar de hoogste waterstanden optreden. Dit wordt onderbouwd door de waterstanden die langs verschillende raaien van zuid-west naar noord-oost op het IJsselmeer optreden in de simulatie ten tijde van de hoogste waterstand bij Lemmer: het verhang is ongeveer gelijk voor alle raaien (en constant langs de lengte van elke raai), alleen door de grotere breedte van het meer (en dus de langere raai) ter hoogte van Lemmer loopt de waterstand daar hoger op. Andere mogelijke invloeden, zoals het bij Lemmer taps toelopen van het IJsselmeer en de lokaal geringere diepte, worden daarom in dit geval als van ondergeschikt belang gezien.

In Figuur 20 staan de waarden voor de overshoot (oplopend tot ca. 45 cm) die op basis van de simulatieresultaten zijn bepaald voor de locaties langs de oevers van het IJsselmeer. Op de groene locaties treedt de overshoot op bij toenemende wind, terwijl de rode locaties aangeven dat de overshoot optreedt bij afnemende windsnelheid. Over het algemeen zijn de waarden in deze laatste categorie duidelijk lager dan in de eerste.



Figuur 20: overzicht overshoot voor de beschouwde locaties in Case C.

Het optreden van overshoot is verder geïllustreerd in Figuur 21. In het bovenste paneel van de figuur staat de gesimuleerde waterstand bij Lemmer (zwarte lijn), als een voorbeeld van een locatie waar overshoot optreedt bij toenemende windsnelheid. In hetzelfde paneel staat de gesimuleerde waterstand volgens de aanvullende berekening (rode lijn), die uitgevoerd is voor het bepalen van de evengewichtswaarde van de waterstand tijdens de hoge windsnelheid die optreedt gedurende de piek van de storm. Aangegeven is hoe in deze gevallen informatie uit beide simulaties is gebruikt voor het bepalen van de overshoot.



Figuur 21: voorbeelden van gesimuleerde tijdreeksen (Lemmer en Enkhuizen).

In het onderste paneel staat de gesimuleerde waterstand bij Enkhuizen (Krabbersgatsluizen), als voorbeeld van een locatie waar overshoot optreedt bij een afnemende windsnelheid. Nadat de wind sterk is afgenomen treedt er op deze locatie overshoot op met een relatief kleine uitwijking (0.07 m).

De hierboven omschreven resultaten geven aan dat (op basis van de toegepaste windrichting) overshoot vooral voor het oostelijke deel van het IJsselmeer van belang is ($O(35 \text{ cm})$), en in mindere mate voor het westelijke deel van het IJsselmeer ($O(10 \text{ cm})$). Opgemerkt moet worden dat deze resultaten zijn verkregen op basis van één geselecteerde windrichting. Nagegaan moet worden wat de invloed is van andere windrichtingen (niet opgenomen in de huidige studie).

Vertaling resultaten naar het Markermeer

De resultaten verkregen voor het IJsselmeer kunnen gebruikt worden voor een inschatting van de invloed van een dergelijke storm op de opwaaiing en overshoot op het Markermeer. De resultaten van de simulatie geven aan dat, zoals logischerwijs verwacht kan worden, overshoot van groter belang zal zijn voor de benedenwindse rand (Houtribdijk) en in mindere mate voor de overige dijken langs het meer (zoals de Oostvaardersdijk). De breedte van het meer bij de toegepaste windrichting is vergelijkbaar met de breedte van het IJsselmeer. Bovendien is de gemiddelde diepte van beide meren vergelijkbaar. Dit geeft aan dat soortgelijke waarden voor opwaaiing en overshoot verwacht kunnen worden. Locale maxima, zoals die voor het IJsselmeer worden gevonden rondom de locatie Lemmer, worden in dit geval niet verwacht vanwege de meer regelmatige vorm van het meer, in het bijzonder aan de oost en de zuidoost kant van het meer.

Op het Ketelmeer worden geen significante waarden van overshoot gevonden bij toenemende windsnelheid (dit effect treedt alleen op aan de oostkant van het IJsselmeer op). Door de kortdurende piek in de waterstand op het IJsselmeer als gevolg van de opwaaiing worden bovendien op het Ketelmeer relatief lage waarden van maximale waterstanden gevonden: de respons van de waterstand op het Ketelmeer is te traag om op deze fluctuaties te reageren (als gevolg van de relatief nauwe opening naar het IJsselmeer). Daarom worden voor de randmeren (ook met relatief nauwe doorgangen naar het grotere meer) ook geen problemen verwacht met hoge opwaaiing en significante overshoot-hoogten, vergeleken met waarden die op zullen treden op het Markermeer tijdens dit soort zware, maar kortdurende stormen.

Gezien de oriëntatie van het Markermeer zal de hier gebruikte windrichting één van de meest ongunstige situaties beschrijven. Het is desalniettemin van belang om na te gaan wat het gedrag van het bekken zal zijn bij verschillende windrichtingen. Logischerwijs kan verwacht worden dat dan ook andere delen van de dijken rondom het Markermeer belast zullen worden met aanvullende opwaaiing en overshoot (bijvoorbeeld de Oostvaardersdijk).

5 Conclusies

5.1 Algemeen

In deze studie is het model WAQUA ingezet voor een eerste verkenning naar het opwekken van waterstandslingeren in het IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer en Gooi- en Eemmeer). Deze verkenning is uitgevoerd aan de hand van drie cases, waarbij per case specifieke onderzoeksvragen geanalyseerd zijn. Case A beschrijft een stormsituatie waarin de Balgstuw Rampsol in drie dagen vijf keer gesloten is (terwijl verwacht werd dat een sluiting gemiddeld slechts eenmaal per jaar zou plaatsvinden). Case B is een voorbeeld van een stormsituatie waarin op verschillende locaties langs het IJsselmeer verschillende eigenperioden worden waargenomen. De laatste situatie, Case C, is een kunstmatige storm, waarbij onder andere de maximale waterstanden langs het IJsselmeer beschouwd zijn.

5.2 Conclusies per case

Case A

In Case A blijken de waterstandfluctuaties waardoor de Balgstuw te Rampsol meerdere malen tijdens één stormachtige situatie is gesloten, opgewekt te worden door fluctuaties in de windsnelheid. Met behulp van wavelet-analyse is de correlatie tussen de fluctuaties in de windsnelheid en die in de waterstand aangetoond. De resultaten van WAQUA geven aan dat deze fluctuaties op een correcte manier gereproduceerd kunnen worden in dit model.

Op basis van de metingen en de resultaten van de numerieke resultaten is afgeleid dat er in dit geval waarschijnlijk geen seiche (volgens de definitie van een beweging bij een eigenperiode) is opgetreden. Het is eerder een opeenvolgende reeks van pieken in de windsnelheid die resulteren in pieken in de opwaaiing nabij Rampsol. Dit betekent dat deze situatie zich relatief vaak voor kan doen aangezien het niet noodzakelijk is dat energie in de wind optreedt bij specifieke tijdschalen die samenvallen met een eigenperiode van het IJsselmeer. Opgemerkt moet worden dat het optreden van waterstandfluctuaties alleen zal leiden tot het veelvuldig sluiten van de kering indien het gemiddeld peil van het IJsselmeer voldoende hoog is (rond NAP).

Case B

In Case B zijn de verschillende eigenperioden van de meetlocaties bestudeerd. Ook in dit geval is op basis van wavelet-spectra een correlatie gevonden tussen de windsnelheid en de respons van het IJsselmeer. Ondanks dat de resultaten minder uitgesproken zijn dan in Case A kan gesteld worden dat ook in dit geval de fluctuaties in de windsnelheid de fluctuaties in de waterstand veroorzaken (mogelijk in combinatie met veranderingen in atmosferische druk).

In de metingen worden dominante perioden gevonden bij ongeveer 2.5 uur, 1.5 uur en 0.7 uur. Deze komen overeen met eerder waargenomen perioden, zoals beschreven door Bottema (2004). Dit onderbouwt dat er in dit geval sprake is van seiches: ondanks dat nu een andersoortige meteorologische situatie wordt beschouwd, worden toch weer dezelfde perioden gevonden: de eigenperioden van het IJsselmeer.

De WAQUA-resultaten voor Case B geven aan dat de seiches met eigenperioden van 2.5 uur en 1.5 uur worden gereproduceerd. De seiche met een periode van 2.5 uur oscilleert in deze situatie tussen Lemmer en Den Oever, globaal gesproken in westnoordwest-oostzuidoost richting. De knoop van deze beweging bevindt zich in de nabijheid van Enkhuizen (Krabbersgatsluizen), hetgeen verklaart waarom deze beweging/periode op die locatie nauwelijks wordt teruggevonden in de waterstanden.

De seiche met een periode van 1.5 uur treedt op in de breedte van het IJsselmeer (zuidwest-noordoost). Op basis van resultaten voor een raai tussen Lemmer en Enkhuizen blijkt dat er tussen deze locaties een seiche met twee knopen optreedt. Dit verklaart waarom deze periode wel wordt waargenomen op beide locaties. Het patroon van de staande golf op basis van twee knopen, met een buik midden op het IJsselmeer, verklaart ook waarom er waterstandfluctuaties met significante amplituden worden gemeten op het meer in een gebied waar de seiche met een periode van 2.5 uur juist een knoop vertoont.

In de modelresultaten ontbreekt de seiche met een periode van 0.7 uur. Dit wordt voornamelijk toegeschreven aan het feit dat het model wordt geforceerd op basis van uniforme windvelden. Juist voor relatieve kleine schalen gaan de hiervoor gemaakte aannames minder goed op: de ruimteschalen van deze bewegingen worden uitgerekt tot over het gehele beschouwde gebied (dit is niet verder onderzocht in de huidige studie). In een test met een kunstmatige opwekking van een seiche, door een langzaam toenemende windsnelheid die in een kort tijdsbestek sterk wordt gereduceerd, is wel een beweging bij een periode van ca. 0.7 uur gevonden. Dit geeft aan dat het model deze periode op zich kan berekenen. Daarentegen moet benadrukt worden dat het gedrag van het model bij het simuleren van echte stormcondities nog onbekend is.

Case C

Voor Case C is het effect van een kunstmatige storm berekend in WAQUA (windkracht 12 Beaufort). Uit de resultaten van deze berekening blijkt dat tijdens een dergelijke storm maximale waterstanden langs het IJsselmeer op kunnen treden van ongeveer 2.1 m + NAP. Ook de 'overshoot' is bepaald. Deze 'overshoot' is de kortdurende piek die optreedt voordat een (lager) evenwicht zich instelt als na een interval met toenemende (of afnemende) windsnelheid een constante (maximale/minimale) windsnelheid optreedt. Voor de gebruikte windrichting (westzuidwest) is de overshoot het grootst langs de oostelijke, benedenwindse rand van het meer. Hier treedt overshoot op na de plotselinge toename van de wind. Aan de westzijde van het meer treden lagere waarden van de overshoot op. Op deze locaties treedt de overshoot op na de sterke afname van de windsnelheid. Overlast als gevolg van de combinatie van hoge waterstanden en overshoot zal dus vooral optreden aan de benedenwindse kant van het meer, en in mindere mate langs de overige dijken langs het meer.

De resultaten van deze berekening zijn vertaald naar het Markermeer. De breedte van dit meer bij de toegepaste windrichting en de gemiddelde diepte zijn vergelijkbaar met die van het IJsselmeer. Dit geeft aan dat soortgelijke waarden voor opwaaiing en overshoot hier verwacht kunnen worden. Ook op het Markermeer zal vooral aan de benedenwindse kant de opwaaiing en overshoot van belang zijn (Houtribdijk). Langs andere dijken zullen lagere waarden voor de opwaaiing en overshoot optreden.

Van belang is dat de gevonden waarden van overshoot (tot ruim 0.4 m) duidelijk hoger zijn dan tot nu toe in de Hydraulische Randvoorwaarden gebruikte toeslagen voor buistoten en andere waterstandfluctuaties (zie ook Paragraaf 5.3).

Verwacht wordt dat de gebruikte windrichting (westzuidwest) het meest kritisch zal zijn. In het geval van andere windrichtingen kunnen ook andere dijken, zoals de Oostvaardersdijk, zwaarder belast worden.

5.3 Adviezen t.a.v. onderzoeksvragen

Op basis van de resultaten van de huidige studie kunnen de volgende adviezen gegeven worden.

De geschiktheid van WAQUA voor het correct simuleren van waterstandslingeren

De algemene conclusie is dat WAQUA geschikt is voor het simuleren van waterstandslingeren (inclusief seiches) zoals die optreden op het IJsselmeer. In de resultaten van een simulatie van een gemeten storm worden twee (ca. 1.5 uur en 2.5 uur) van de drie overheersende eigenperioden gereproduceerd. De gesimuleerde amplituden komen niet voor elke eigenperiode goed overeen met de gemeten uitwijkingen. Dit wordt toegeschreven aan het feit dat het model niet gekalibreerd is. Desalniettemin, geven de resultaten aan dat de perioden (en bijbehorende vorm) van deze seiches goed worden gereproduceerd.

Belangrijkste beperking van het simuleren van de seiches zal de forcering van het model zijn. Op basis van uniforme windvelden wordt de kortste eigenperiode, zoals die in de metingen waargenomen wordt (0.7 uur), niet gereproduceerd. Daarom wordt aanbevolen om aanvullende berekeningen uit te voeren met overtrekkende velden van wind om na te gaan of WAQUA op basis van een dergelijke forcering de opwekking van deze componenten op een fysisch realistische manier kan reproduceren.

Het gegeven dat soms ook duidelijke waterstandslingeren optreden vòòr het optreden van significante windsnelheidfluctuaties suggereert dat ook fluctuaties in atmosferische druk in sommige gevallen een rol kunnen spelen bij het opwekken van waterstandslingeren. Daarom wordt aanbevolen om ook de invloed van fluctuaties in atmosferische druk nader te onderzoeken (valt buiten huidige studie). Er dient dat ook nagegaan te worden of significante fluctuaties in atmosferische druk ook zonder gelijktijdige fluctuaties in windsnelheid op kunnen treden.

Mogelijke opwekkingsmechanismen van de waterstandslingeren (meteorologisch: windcondities)

De meteorologische situaties in Case A en B geven aan dat verschillende atmosferische fenomenen een rol spelen in de opwekking van waterstandfluctuaties op het IJsselmeer. In Case A worden de waterstandfluctuaties opgewekt door relatief grootschalige fluctuaties in de windsnelheid (tijdschalen >5 uur). Gezien de karakteristieken van de beweging is geconcludeerd dat de waterstandfluctuaties niet het gevolg zijn van een seiche. Dit betekent dat windsnelheidfluctuaties niet noodzakelijkerwijs rond een eigenperiode van het IJsselmeer hoeven op te treden. Hieruit valt op te maken dat deze situatie dus geen ‘toevalstreffer’ was en dat het waarschijnlijk is dat deze ook tijdens andere stormen kan optreden (voor Case B was dit bijvoorbeeld al het geval). Daarom wordt aanbevolen om aanvullende cases te bestuderen. Dit zou bijvoorbeeld op basis van archiefsituaties uitgevoerd kunnen worden. Ook voor die gevallen zou nagegaan kunnen worden of:

- de kering (meerdere keren) dicht zou zijn gegaan indien deze al operationeel was op dat moment;
- welke waterstandfluctuaties er opgetreden zijn (seiches, overige waterstandfluctuaties);
- en, op basis van simulaties, door wat voor soort windsnelheidfluctuaties zij opgewekt zijn.

Dit zou een goed onderbouwd beeld geven van de daadwerkelijk te verwachten sluitingsfrequentie van de Balgstuw bij Ramspol.

Ook voor Case B is afgeleid dat de waterstandfluctuaties opgewekt zijn door fluctuaties in de windsnelheid. Een plotselinge toename van de windsnelheid rondom een koufrontpassage zorgt dat een seiche ontstaat bij een eigenperiode van het IJsselmeer (2.5 uur). Enkele uren na de frontpassage, tijdens erg variabele wind en buig weer, treden windsnelheidfluctuaties op met een tijdschaal van 1.5 uur. Deze wekken een seiche in de dwarsrichting van het IJsselmeer op (2 knopen) met een periode van ca. 1.5 uur.

Met behulp van wavelet-analyse worden in de wind ook fluctuaties gevonden rond een periode van 0.7 uur. In de waterstandmetingen bij Lemmer wordt deze component ook gevonden en in Enkhuizen leidt deze component tot een seiche bij die periode.

De hierboven omschreven bevindingen geven aan dat veranderingen in windsnelheid (mogelijk in combinatie met windrichting) een belangrijke (misschien de belangrijkste) factor zijn in de opwekking van de waterstandfluctuaties in het IJsselmeer. In een vervolgstudie zou de opwekking van de waterstandfluctuaties in meer detail bestudeerd moeten worden. Op basis van de analyse van meerdere tijdsintervallen met stormachtig weer kan bijvoorbeeld nagegaan worden of dezelfde seiche-vormen optreden tijdens elk interval met stormachtig weer.

Het belang van de waterstandslingeren in het IJsselmeergebied voor de praktijk

Hydraulische Randvoorwaarden

In de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 staat dat ‘seiches en slingeren’ voor het IJsselmeer en het Markermeer ‘minder van belang zijn’. In de Leidraad Zee- en Meerdijken (TAW, 1999 Basisrapport en Leidraad) staat dat voor de meren een toeslag van 10 cm wordt

toegepast (zie pagina 12 van de Leidraad). Gezien de berekende (en gemeten) significante amplituden van de waterstandfluctuaties (en seiches) en die van de overshoot zou hiervoor een aangepaste/aangescherpte toeslag voor opgenomen moeten worden. Benadrukt wordt dat de huidige studie een verkennend karakter heeft en dat de resultaten die verkregen zijn slechts een globaal beeld geven van de beschouwde verschijnselen. Voor het uitwerken van definitieve toeslagen voor dijkhoogten zouden deze seiches en waterstandslingeren in meer detail bestudeerd moeten worden.

Op dit moment is overshoot impliciet in de toetsingsapplicaties voor de Hydraulische Randvoorwaarden en de Waarschuwingsdienst Dijken IJsselmeergebied (WDIJ, zie onder) opgenomen. Het betreft echter een waarde voor overshoot behorende bij één type (standaard)storm. Het is dan ook aan te bevelen te onderzoeken in hoeverre het meenemen van meerdere typen standaardstormen (kort, lang, snel opkomend/langzaam opkomend) aanleiding geeft tot noodzakelijke aanpassingen in de Hydraulische Randvoorwaarden (niet opgenomen in huidige studie).

Balgstuw Ramspol

Voor de Balgstuw Ramspol zijn de waterstandfluctuaties van belang aangezien zij ervoor kunnen zorgen dat de waterstand en stroming nabij de kering relatief snel achter elkaar aan het criterium voor sluiten (en later weer openen) voldoet. Voor het inschatten van de reikwijdte van het probleem zou een aanvullende studie uitgevoerd moeten worden om meerdere stormcondities te beschouwen waarin een soortgelijke situatie op zou kunnen treden. Daarnaast zou in die studie ook een aangepast sluitcriterium uitgewerkt kunnen worden, waardoor het ‘klepperen’ van de kering zoveel mogelijk voorkomen kan worden.

WDIJ

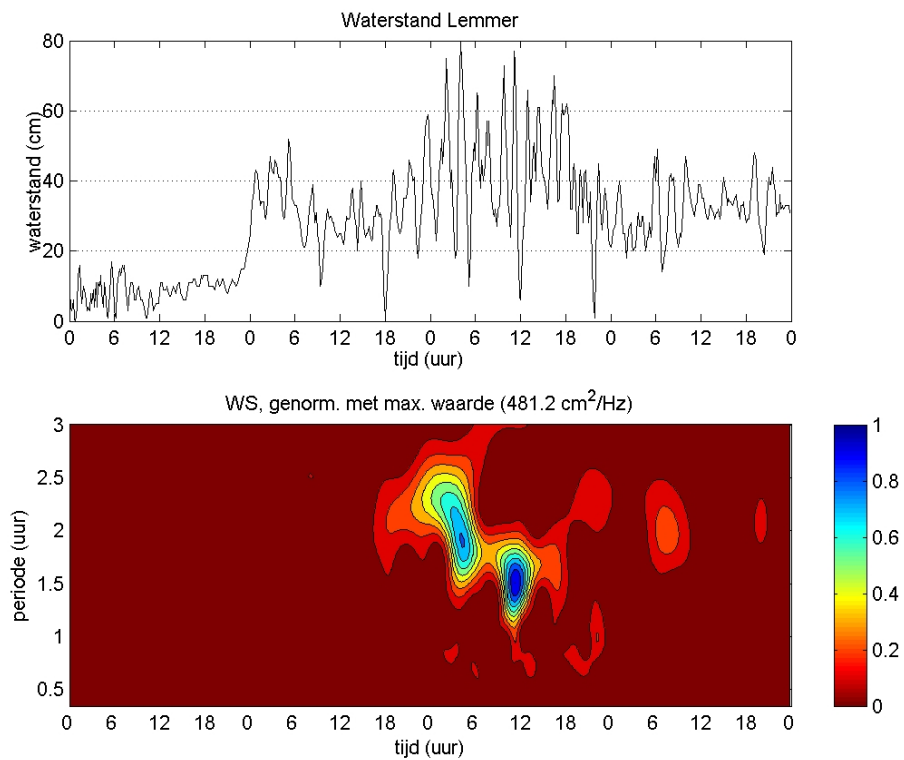
De Waarschuwingsdienst Dijken IJsselmeergebied (WDIJ) zorgt ervoor dat de dijkbeheerders in het IJsselmeergebied worden gewaarschuwd in geval van een zware storm en geeft informatie over actuele waterstanden en golfoploophoogten. Deze waarschuwing is gebaseerd op een database die is opgebouwd aan de hand van geschematiseerde stormen. In deze database staan de maatgevende belastingen op dijken voor stormsituaties met verschillende windrichtingen, maximale windsnelheden en meerpeilen. Zolang er geen plotselinge veranderingen in de windsnelheid of –richting optreden werkt deze methode goed (zie Claessens *et al.* 2002). Maar indien deze plotselinge veranderingen in meteorologische parameters wel optreden dan kan er een onderschatting van de maatgevende belastingen op de dijken gemaakt worden, aangezien de fenomenen die in de huidige studie geanalyseerd zijn niet in de gegevens van de database zijn opgenomen. Aanbevolen wordt om, na het maken van meer gedetailleerde analyses, deze effecten op te nemen in de waarschuwing van de WDIJ aangezien zij optreden met significante amplituden.

Mogelijk dat nagegaan kan worden of het KNMI (op termijn) de fluctuaties in de windsnelheid zou kunnen gaan voorspellen. Zo zouden de waterstandslingeren uiteindelijk kunnen worden voorspeld, onder andere ten bate van de waarschuwing van de WDIJ.

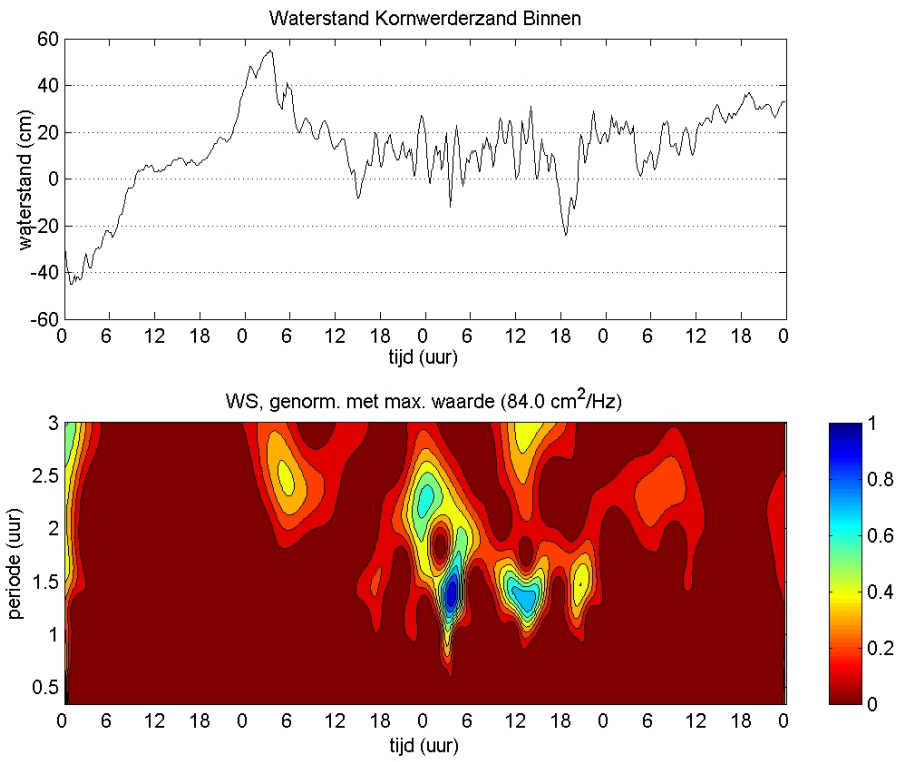
Referenties

- Bottema, M. (2004), Verrassend snelle golfgroei op het IJsselmeer, *Meteorologica*, maart 2004, p. 15-19.
- Claessens, E. J., J. P. de Waal, H.C. van Twuiver en M. Bottema (2002), The application of a coupled wind, water level and wave model in a warning system against flooding, *International workshop on wave analysis, modelling and prediction*, Banff, Alberta, Canada, October 21 - 25, 2002.
- Defant, A. (1961), *Physical oceanography*, Oxford: Pergamon.
- De Jong, M. P. C. (2004), *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9017925-9.
- Donn, W. L. (1959), The Great Lakes Storm Surge of May 5, 1952, *Journal of Geophysical Research*, 64(2), p. 191-198.
- Hibiya, T. en Kajiura, K. (1982), Origin of the 'Abiki' phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 38, p. 172-182.
- Korgen, B. J. (1995), Seiches, *American Scientist*, 83, p. 330-341.
- Luetlich Jr., R. A., S. D. Carr, J. V. Reynolds-Fleming, C. W. Fulcher en J. E. McNinch (2002), Semi-diurnal seiching in a shallow, micro-tidal lagoonal estuary, *Continental Shelf Research*, 22, p. 1669-1681.
- Raichic, F., M. Orlić, I. Vilibić en V. Malačić (1999), A case study of the Adriatic seiches (December 1997), *Il Nuovo Cimento Della Societa Italiana di Fisica*, 22C (5), p. 715-726.
- Rijkswaterstaat (2001), *Hydraulische Randvoorwaarden voor het toetsen van primaire waterkeringen*, Tech. Rap. HR2001.
- Suursaar, U., T. Kullas en M. Otsmann (2002), A model study of the sea level variations in the Gulf of Riga and the Vainameri Sea, *Continental Shelf Research*, 22(14), p. 2001-2019.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) (1999), *Leidraad Zee- en Meerdijken*, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 118 p.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) (1999), *Basisrapport Zee- en Meerdijken*, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 154 p.
- Wilson, B. W. (1972), Seiches, *Adv. Hydroscience*, 8, p. 1-94.

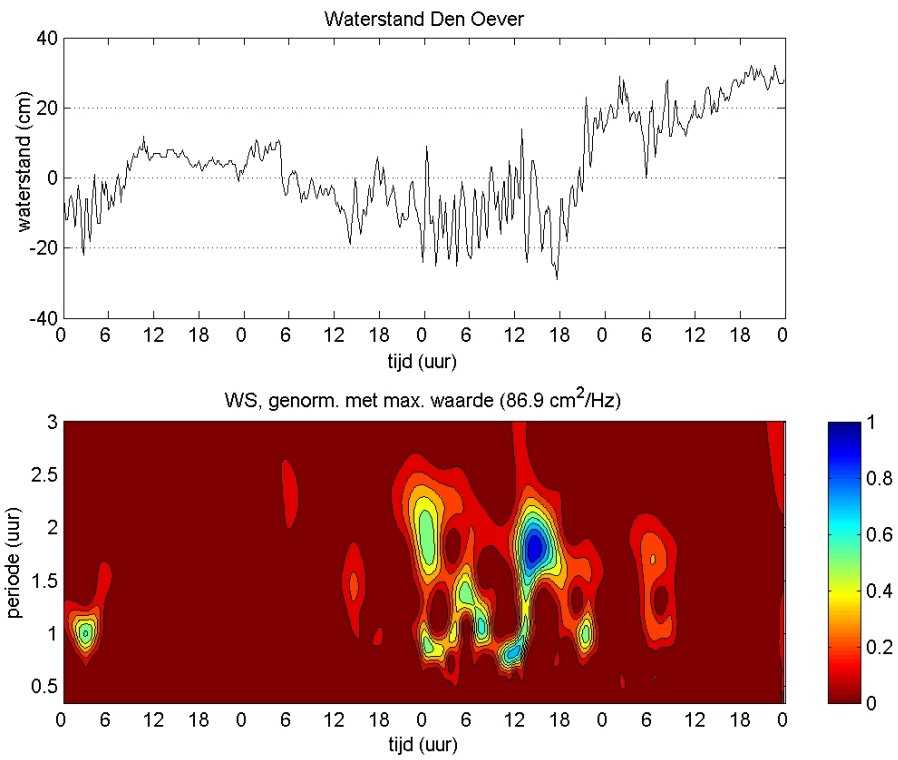
A Wavelet-analyse waterstandmetingen Case B



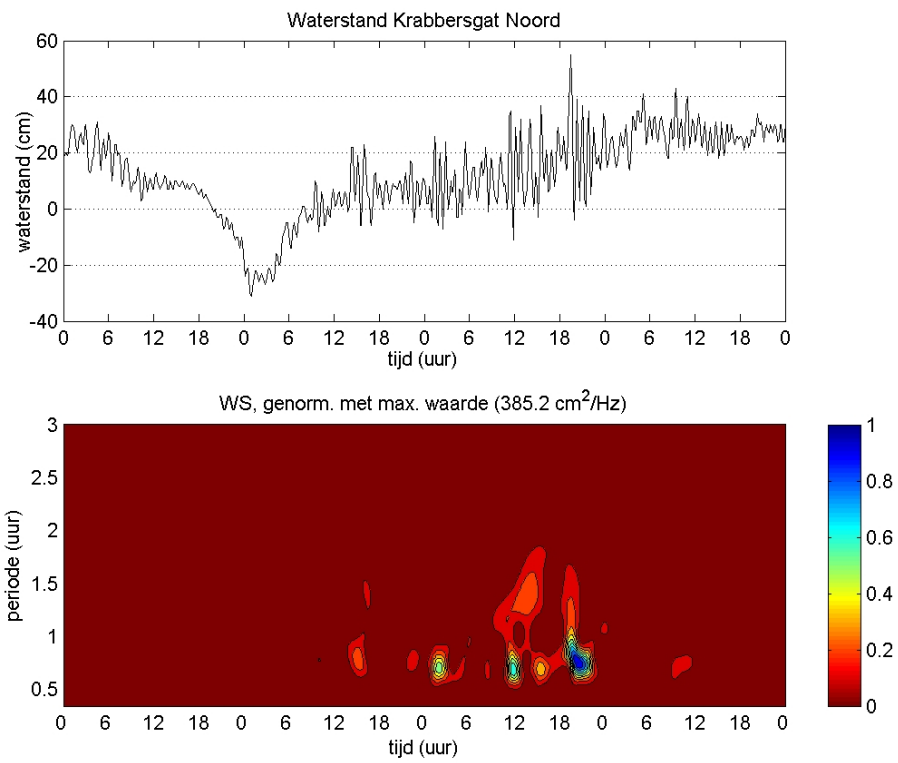
Figuur A-1: resultaten wavelet-analyse waterstandmeting Lemmer, 21 t/m 24 februari 2002.



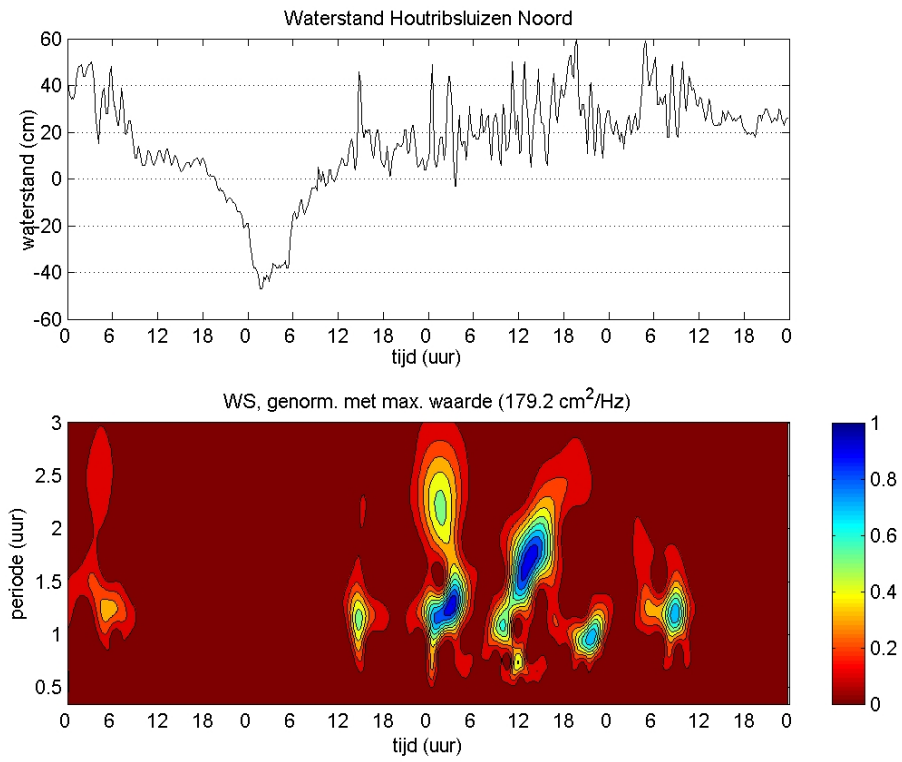
Figuur A-2: resultaten wavelet-analyse waterstandmeting Kornwerderzand Binnen, 21 t/m 24 februari 2002.



Figuur A-3: resultaten wavelet-analyse waterstandmeting Den Oever Binnen, 21 t/m 24 februari 2002.

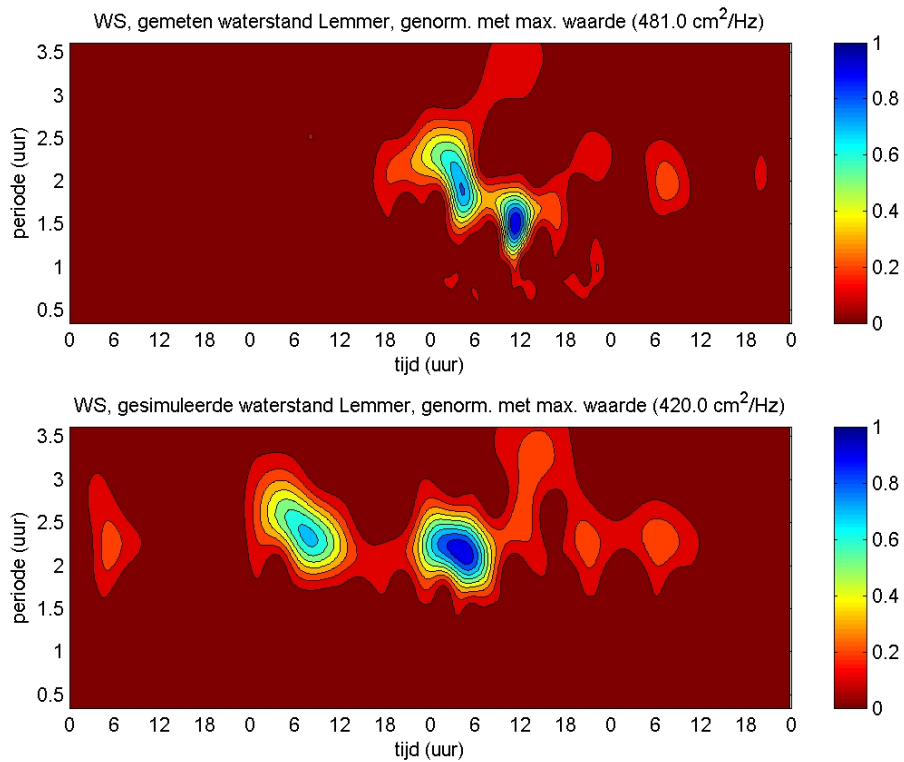


Figuur A-4: resultaten wavelet-analyse waterstandmeting Krabbersgat noord, 21 t/m 24 februari 2002.

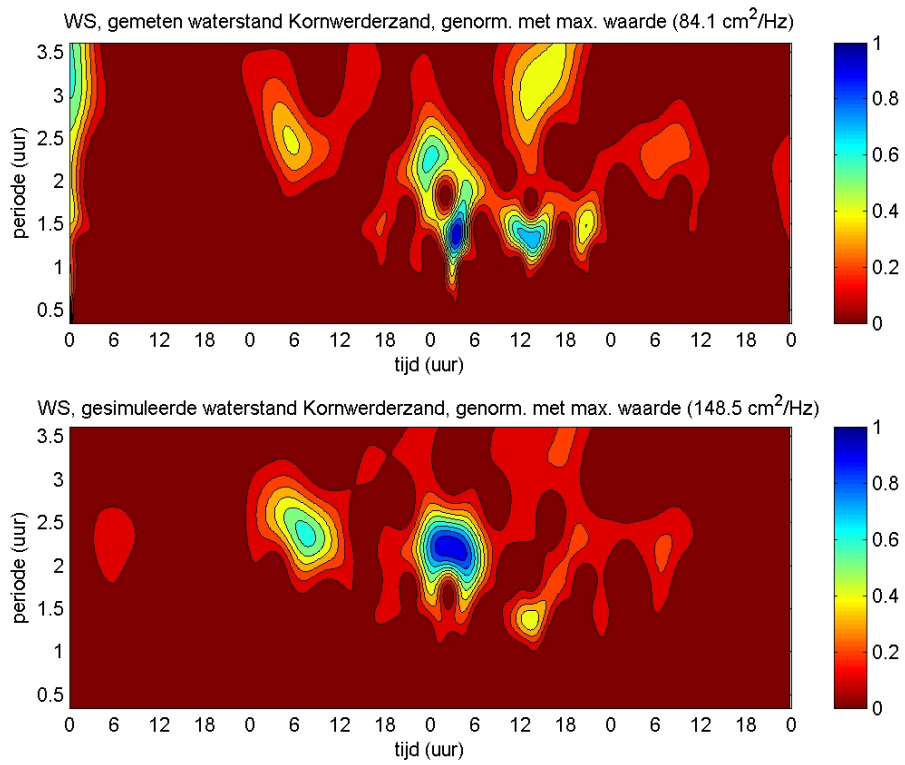


Figuur A-5: resultaten wavelet-analyse waterstandmeting Houtribsluizen, 21 t/m 24 februari 2002.

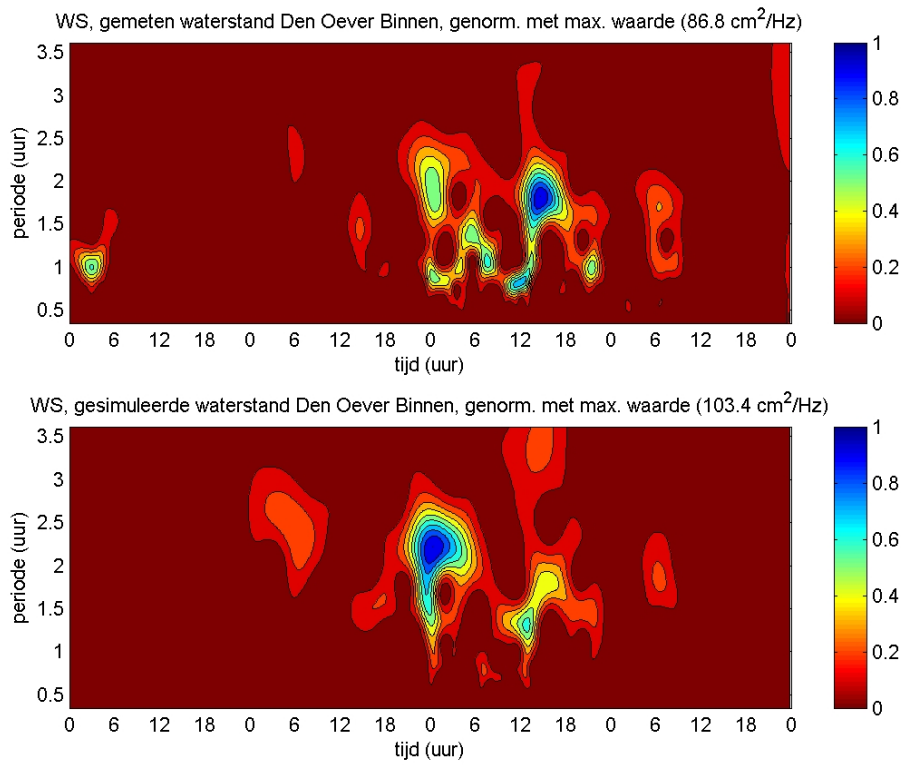
B Wavelet-analyse gesimuleerde waterstanden Case B



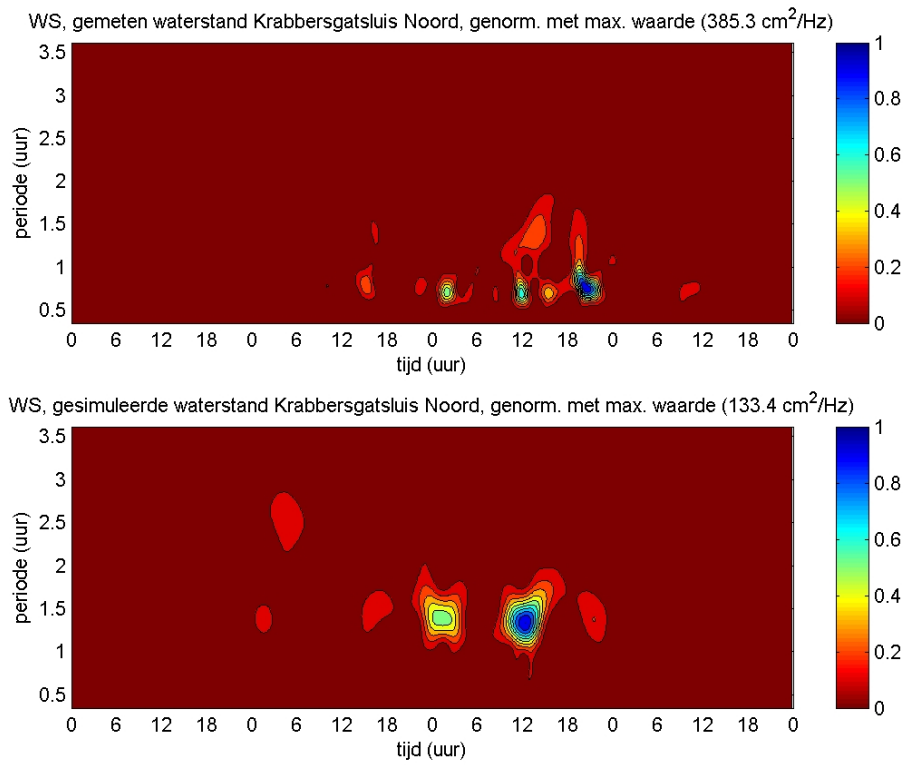
Figuur B-1: boven: wavelet-spectrum (WS) waterstandmeting Lemmer, 21 t/m 24 februari 2002; onder: wavelet-spectrum van gesimuleerde tijdreeks.



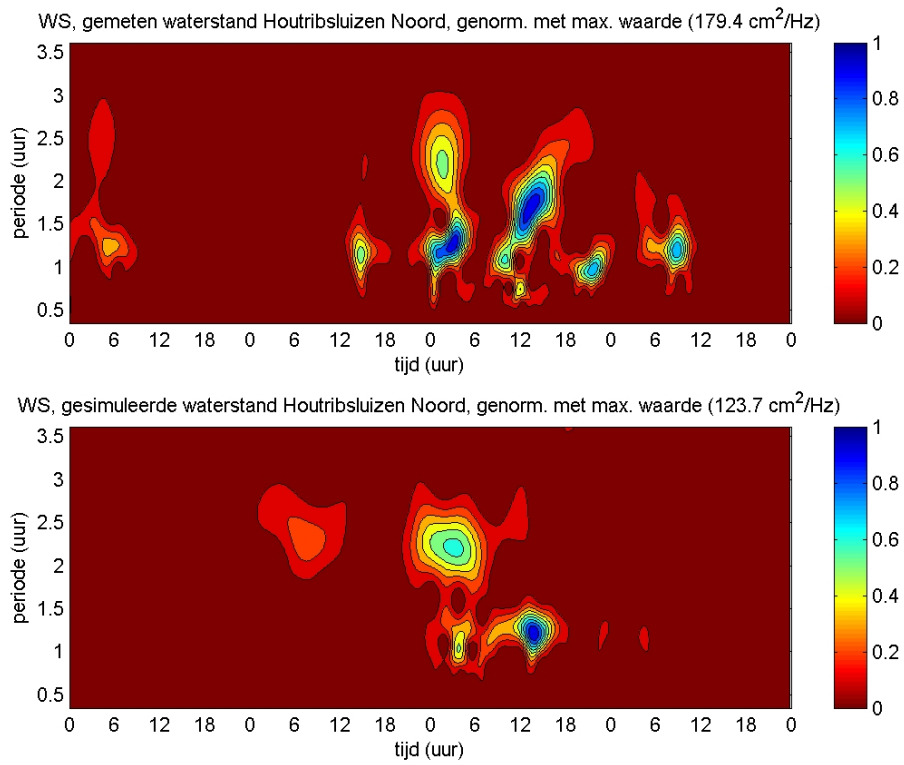
Figuur B-2: boven: wavelet-spectrum (WS) waterstandmeting Kornwerderzand Binnen, 21 t/m 24 februari 2002; onder: wavelet-spectrum van gesimuleerde tijdreeks.



Figuur B-3: boven: wavelet-spectrum (WS) waterstandmeting Den Oever Binnen, 21 t/m 24 februari 2002; onder: wavelet-spectrum van gesimuleerde tijdreeks.



Figuur B-4: boven: wavelet-spectrum (WS) waterstandmeting Krabbersgatsluizen, 21 t/m 24 februari 2002; onder: wavelet-spectrum van gesimuleerde tijdreeks.



Figuur B-5: boven: wavelet-spectrum (WS) waterstandmeting Houtribsluizen Noord, 21 t/m 24 februari 2002; onder: wavelet-spectrum van gesimuleerde tijdreeks.

C Informatie uitvoerlocaties Case C

locatie	maximale waterstand (m)	evenwichts- waarde waterstand (m)	overshoot (m)	bij toe- of afnemende windsnelheid	bij toe- of afnemende windsnelheid		x *10 ⁵ (m)	y *10 ⁵ (m)
					M	N		
Den Oever	-0.14	-0.25	0.11	-	2	19	1.3231	5.4946
Afsluitdijk (km 78)	-0.15	-0.23	0.08	-	2	30	1.3735	5.5357
Afsluitdijk (km 84)	-0.12	-0.22	0.10	-	2	51	1.4158	5.5739
Afsluitdijk (km 90)	0.37	-0.02	0.39	+	2	71	1.4649	5.6174
Kornwerderzand	0.96	0.55	0.41	+	5	93	1.5205	5.6436
Makkum	1.12	0.74	0.38	+	9	95	1.5400	5.6290
Tabbe	0.95	0.64	0.31	+	17	89	1.5537	5.5688
Hindeloopen	0.75	0.43	0.32	+	22	74	1.5594	5.5087
Koudum	0.65	0.32	0.33	+	25	65	1.5607	5.4699
Stavoren	0.22	-0.04	0.26	+	27	50	1.5390	5.4291
Mirnserklif	0.37	0.27	0.10	+	33	61	1.5939	5.3951
Oude Mirdumklif	0.93	0.73	0.20	+	38	81	1.6601	5.3809
Lemsterhoek	1.78	1.35	0.43	+	42	101	1.7293	5.3962
Lemmer	2.09	1.68	0.41	+	45	112	1.7666	5.3902
Friesehoek	1.71	1.33	0.38	+	47	100	1.7327	5.3808
Noordermeer	1.26	0.97	0.29	+	51	91	1.7082	5.3451
Rotterdamse hoek	0.92	0.74	0.18	+	54	80	1.6892	5.3138
Tielerwaard	0.62	0.56	0.06	+	59	70	1.6878	5.2525
Urk	0.59	0.50	0.09	+	65	57	1.6938	5.1932
Ketelbrug_zwolsehoek	0.58	0.55	0.03	+	84	63	1.7256	5.1443
Horne Zathe	0.13	-0.01	0.14	+	78	30	1.6686	5.1194
Lelystad	0.01	-0.21	0.22	-	78	19	1.6222	5.0784
Jachthaven houtrib	-0.01	-0.21	0.20	-	77	12	1.5983	5.0727
Houtrib	-0.01	-0.22	0.21	-	73	6	1.5795	5.0503
Houtribdijk (km 7)	0.00	-0.22	0.22	-	72	17	1.6086	5.0914
Houtribdijk (km 16)	-0.09	-0.22	0.13	-	60	19	1.5708	5.1685
Houtribdijk (km 22)	-0.17	-0.22	0.05	-	54	17	1.5307	5.2104
Enkhuizen	-0.17	-0.24	0.07	-	46	10	1.4851	5.2289
Oostdijk/Gelderse hoek	-0.17	-0.23	0.06	-	35	18	1.4730	5.2881
Andijk	-0.13	-0.23	0.10	-	31	13	1.4328	5.3030
Onderdijk	-0.09	-0.25	0.16	-	29	2	1.3878	5.2872
Medemblik	-0.12	-0.25	0.13	-	25	4	1.3692	5.3176
Wieringermeerdijk	-0.15	-0.24	0.09	-	20	12	1.3658	5.3695
Zeughoek	-0.17	-0.24	0.07	-	17	18	1.3702	5.4040
Dijkgatbosch	-0.15	-0.24	0.09	-	10	18	1.3453	5.4482