

Opdrachtgever:

Commissie Monitoring Bodemdaling Ameland

Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat

Analyse naar mogelijke invloed van de bodemdaling

Report

januari 2007

Opdrachtgever:

Commissie Monitoring Bodemdaling Ameland

Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat

Analyse naar mogelijke invloed van de bodemdaling

Zheng Bing Wang

Report

januari 2007

Inhoud

1	Inleiding	1
	1.1 Achtergrond.....	1
	1.2 Doelstelling.....	2
	1.3 Aanpak	2
2	Waargenomen ontwikkelingen	3
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Historische ontwikkelingen	3
	2.3 Data analyse.....	5
	2.3.1 Basisgegevens	5
	2.3.2 Analyse van Oost.....	5
	2.3.3 Nieuwe analyse	7
	2.4 Morfologische analyse	9
	2.5 Samenvatting conclusies	10
3	Het zanddelende systeem van het Friesche Zeegat	11
	3.1 Inleiding	11
	3.2 Basisgegevens en de verwerking	11
	3.3 Empirische relaties voor morfologisch evenwicht.....	13
	3.4 Evaluatie sedimenthonger en sedimentoverschot	17
	3.5 Conclusies	19
4	Proces modellering	20
	4.1 Inleiding	20
	4.2 Invloed bodemdaling op stroming	20
	4.2.1 Het model en de berekeningen	20

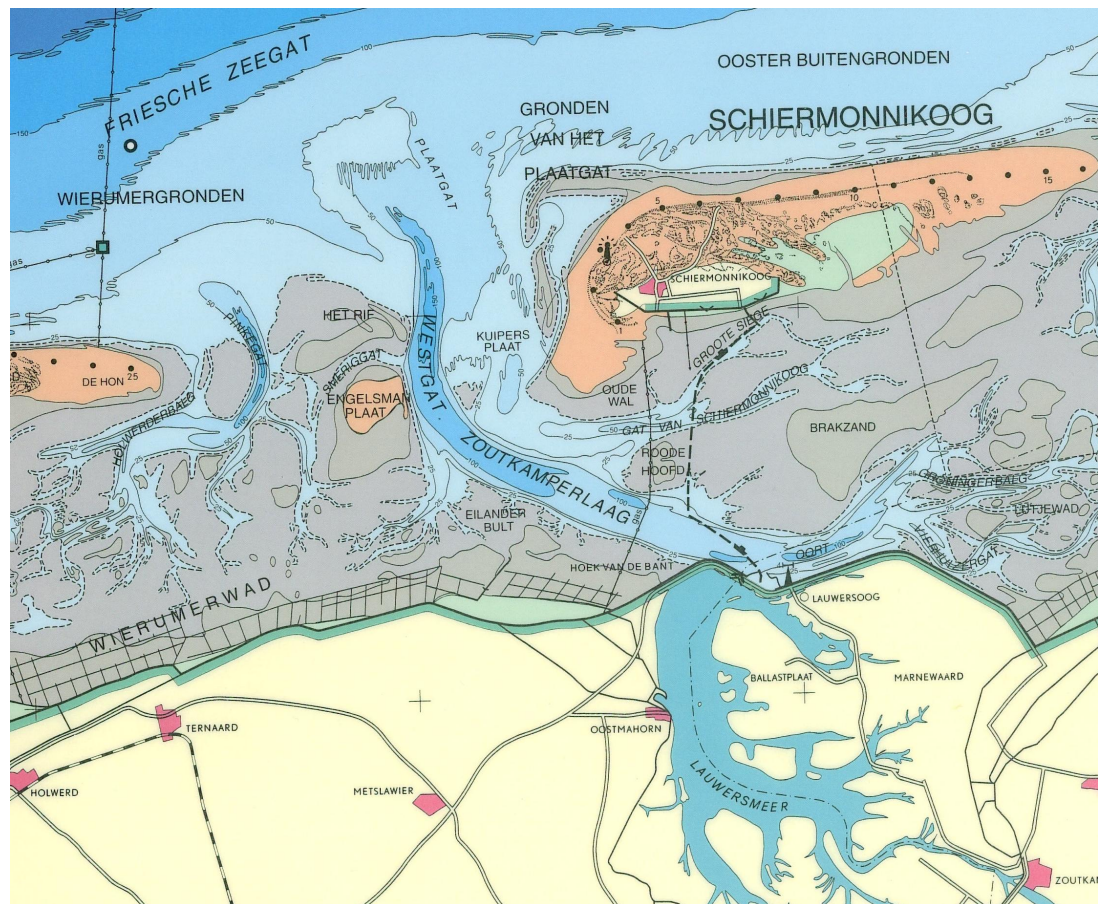
4.2.2	De eerder gerapporteerde resultaten	21
4.2.3	Detail rondom Engelsmanplaat	24
4.2.4	Conclusies	37
4.3	Invloed bodemdaling op golven en stroming	38
4.4	Invloed afsluiting Lauwerszee	44
5	Integrerende beschouwing.....	47
5.1	Inleiding	47
5.2	Beschouwing vanuit waarnemingen	47
5.3	Beschouwing vanuit fysische processen	49
5.4	Conclusies en discussies.....	51
6	Conclusies en aanbevelingen	53
6.1	Eindconclusie.....	53
6.2	Andere constatering.....	53
6.3	Aanbevelingen	54
7	Referenties	55
A	Basis gegevens bodemhoogte	56

I Inleiding

I.1 Achtergrond

De bodemdaling en de mogelijke effecten t.g.v. de gaswinning op Ameland worden vanaf het begin gemonitord. In dit monitoring programma worden zowel de bodemdaling zelf als de effecten daarvan op het fysische systeem en op het ecologische systeem in de Waddenzee en op Ameland gemonitord. De bevindingen tot nu toe zijn gerapporteerd door Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (2005).

Tijdens de openbare audit na de 5 jarige rapportage in 2005 is naar voren gekomen dat er behoefte is meer inzicht te krijgen in de ontwikkelingen van het Rif en de Engelsmanplaat (zie Figuur 1.1). Er deed het verhaal rond dat een vogelhuisje op de Engelsmanplaat nu alleen via een trap te bereiken is, en dit werd als bewijs gezien van het effect van de bodemdaling door de gaswinning. In de afgelopen periode is er blijkbaar erosie opgetreden in deze gebieden en de vraag ontstaat of de bodemdaling in het Pinkegat hierbij een rol heeft gespeeld. Om deze vraag te beantwoorden wordt dit onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat uitgevoerd.



Figuur 1.1 Het Friesche Zeegat

1.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is vast te stellen of er een verband tussen de waargenomen veranderingen van het Rif en de Engelsmanplaat (voornamelijk erosie in de afgelopen periode) en de bodemdaling in het Pinkegat, en zo ja, welke. De vragen zijn dus:

- Heeft de bodemdaling in het Pinkegat de erosie op het Rif en de Engelsmanplaat veroorzaakt of versterkt?
- Als de beschikbaarheid van sediment op het Rif en de Engelsmanplaat afneemt, zal het herstel van de sedimenthonger in het Pinkegat door de bodemdaling worden beïnvloed?

1.3 Aanpak

De Engelsmanplaat vormt de scheiding tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De morfologische veranderingen hiervan kunnen daarom niet los worden gezien van beide zeegaten. Aan de hand van gegevens tot 1991 heeft Albert Oost (1995) in zijn proefschrift de historische ontwikkelingen van de Engelsmanplaat beschreven. Hij heeft een min of meer cyclische ontwikkeling van erosie-sedimentatie-erosie geconstateerd en brengt dit in verband met de eveneens min of meer cyclische ontwikkeling van het Pinkegat. Duidelijk is dus dat het niet eenvoudig is het mogelijke verband tussen de verandering van het Rif en de Engelsmanplaat en de bodemdaling eenduidig vast te leggen.

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een literatuuronderzoek en een data-analyse. In het literatuuronderzoek worden de bekende historische ontwikkelingen op een rij gezet en de bekende theorieën / hypothesen worden geïnventariseerd. In de data-analyse hebben wij zowel de velddata als de modeldata verzameld en geanalyseerd. De analyse van velddata moet in de eerste instantie een beschrijving van de ontwikkelingen van de twee gebieden leveren, met name na 1991 (dus een aanvulling aan de beschrijving van Oost op basis van data tot 1991). In de tweede instantie worden de data gebruikt om de bestaande en eventueel nieuw te formuleren hypothesen te toetsen. Analyse van modeldata is vooral bedoeld om meer inzicht in de relevant fysische processen te krijgen uit de modelstudies in dit gebied (denk aan de Kustgenese studie) te krijgen. Er zijn verder een aantal aanvullende modelberekeningen uitgevoerd, vooral om inzicht te krijgen van de invloed van de bodemdaling op de golf-stroming interactie.

2 Waargenomen ontwikkelingen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de waargenomen ontwikkelingen van het Rif en de Engelsmanplaat beschreven. Dit is bedoeld om vast te stellen wat er precies wordt bedoeld wanneer men over erosie van deze gebieden heeft. Concrete vragen zijn:

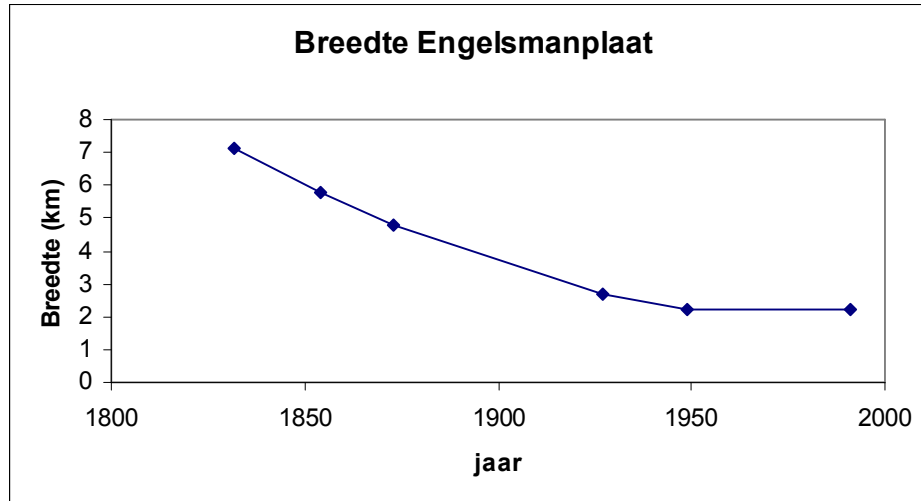
- Wanneer is de erosie van deze gebieden begonnen?
- Hoe ziet de erosie eruit? Is er sprake van verkleining van de gebieden of verlaging?
- Is er sprake van aanhoudende erosie of zijn er afwisselingen tussen sedimentatie en erosie?

De gegevens van waarnemingen worden in de eerste instantie uit de literatuur gehaald. Hierbij is vooral gebruik gemaakt van de beschrijvingen door Oost (1995), die de historische ontwikkelingen van het Friesche Zeegat tot begin jaren negentig vorige eeuw heeft beschreven. Daarna worden de beschikbare velddata van bodempeilingen geanalyseerd. De data-analyse is vooral bedoeld om de ontwikkelingen na 1991 goed in kaart te brengen. Met andere woorden de beschrijvingen van Oost (1995) wordt bijgewerkt met de nieuwste gegevens. Maar voor een consistent beeld wordt de data-analyse uitgevoerd voor alle beschikbare gegevens van bodempeilingen, i.e. vanaf 1927.

2.2 Historische ontwikkelingen

De historische ontwikkelingen van het Friesche Zeegat tot 1991 is uitvoerig beschreven door Oost (1995). Op basis van historisch materiaal en gegevens van bodempeilingen heeft hij een reconstructie van de ontwikkelingen van het Pinkegat, de Zoutkamperlaag en de Engelsmanplaat vanaf 1300 gemaakt. Uit deze reconstructie is gebleken dat de ontwikkeling van de Engelsmanplaat twee consistente gedragingen vertoont, namelijk een trend van erosie vanuit de westkant en een min of meer cyclisch gedrag.

Door de erosie vanuit de westkant is de breedte van de Engelsmanplaat afgenomen van 7.1 km in 1832 tot 2.2 km in 1991 (Oost 1995). Figuur 2.1 toont het historische verloop van de afname van de breedte. De snelheid van de erosie is afgenomen in de loop van tijd, maar de druk van erosie vanuit de westkant is nog steeds aanwezig. Dit heeft te maken met het langzaam migreren van het Waddenzee systeem van west naar oost.



Figuur 2.1 Historische ontwikkelingen van de breedte van de Engelsmanplaat (Oost-West richting). De grafiek is gemaakt aan de hand van getallen die zijn genoemd door Oost (1995) van de breedte zelf en over de veranderingen in de verschillende perioden.

De Engelsmanplaat is al een lange tijd een hoog gelegen gebied geweest (Oost, 1995). Dit is gebaseerd op het feit dat de plaat een Holocene kleikern heeft en op historische waarnemingen. In de afgelopen vijf eeuwen grote supragetijde zandbanken zijn ontwikkeld aan de noordkant van de Engelsmanplaat door golven en vloedstromingen. Dit heeft geleid tot cyclische patroon: De Engelsmanplaat vergroot in oppervlak en in hoogte als de zandbank aan de noordkant aansluit en de kortsluitgeul afsluit. Vervolgens ontstaat er aan de noordkant van de plaat een nieuwe geul en de vergrote plaat begint te eroderen. De periode van de cyclus is ongeveer 100 jaar.

In de huidige situatie wordt de supragetijde zandbank ten noorden van de Engelsmanplaat het Rif genoemd. Deze zandbank is nu gescheiden van de Engelsmanplaat door de kortsluitgeul het Smeriggat. De beschrijving van Oost over de historische ontwikkelingen maakt duidelijk dat deze drie morfologische eenheden niet los van elkaar maar samen als een systeem moeten worden beschouwd. Omdat het Rif nu van de Engelsmanplaat is gescheiden door het Smeriggat zitten wij nu in een fase van erosie op de Engelsmanplaat binnen de cyclische ontwikkeling van dit systeem. Volgens Oost (1995:85) is de Engelsmanplaat aan het verlagen vanaf 1970, en ook het Rif vertoont verlaging in de periode 1982-1991. De verlaging van het Rif is een gevolg van de ontwikkeling van een nieuwe zandbank ten noorden daarvan. Verwacht werd dat het Rif binnen korte termijn aan de Engelsmanplaat zou aansluiten en het Smeriggat zou verdwijnen als geul. De nieuwe zandbank ten noorden van het Rif zou de rol van het Rif overnemen.

Samengevat:

- De Engelsmanplaat vertoont een trend van erosie vanuit de westkant, waardoor de breedte van de plaat afneemt in de tijd.
- De Engelsmanplaat vertoont een cyclische ontwikkeling. Dit hangt samen met de ontwikkelingen van de zandbank ten noorden daarvan die van de plaat gescheiden is door een kortsluitgeul. Deze zandbank ontstaat door golven en vloedstroming en krijgt zand van de buitendelta's (van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag). Na het ontstaan

groeit de zandbank tot een supragetijde zandlichaam, en migreert naar het zuid. Door de afscherming van de zandbank wordt het zandtransport naar de Engelsmanplaat geblokkeerd waardoor de plaat erosie vertoont. Na verloop van tijd verdwijnt de kortsluitgeul en de supragetijde zandbank voegt samen met de Engelsmanplaat. Ieder keer (ongeveer eens in 100 jaar) als dit gebeurt, vergroot de Engelsmanplaat zich plotseling zowel van oppervlak als van hoogte. Daarna gaat de plaat weer eroderen door dat er een geul aan de noordkant ontstaat en de cyclus begint op nieuw. In de meeste tijd binnen de cyclus vertoont de Engelsmanplaat dus erosie.

- Verlaging Engelsmanplaat vanaf 1970
- Verlaging het Rif 1982-1991
- De situatie destijds (1995) was dat de kortsluitgeul het Smeriggat aan het sedimenteren was en het Rif binnenkort zou bij de Engelsmanplaat aansluiten.

2.3 Data analyse

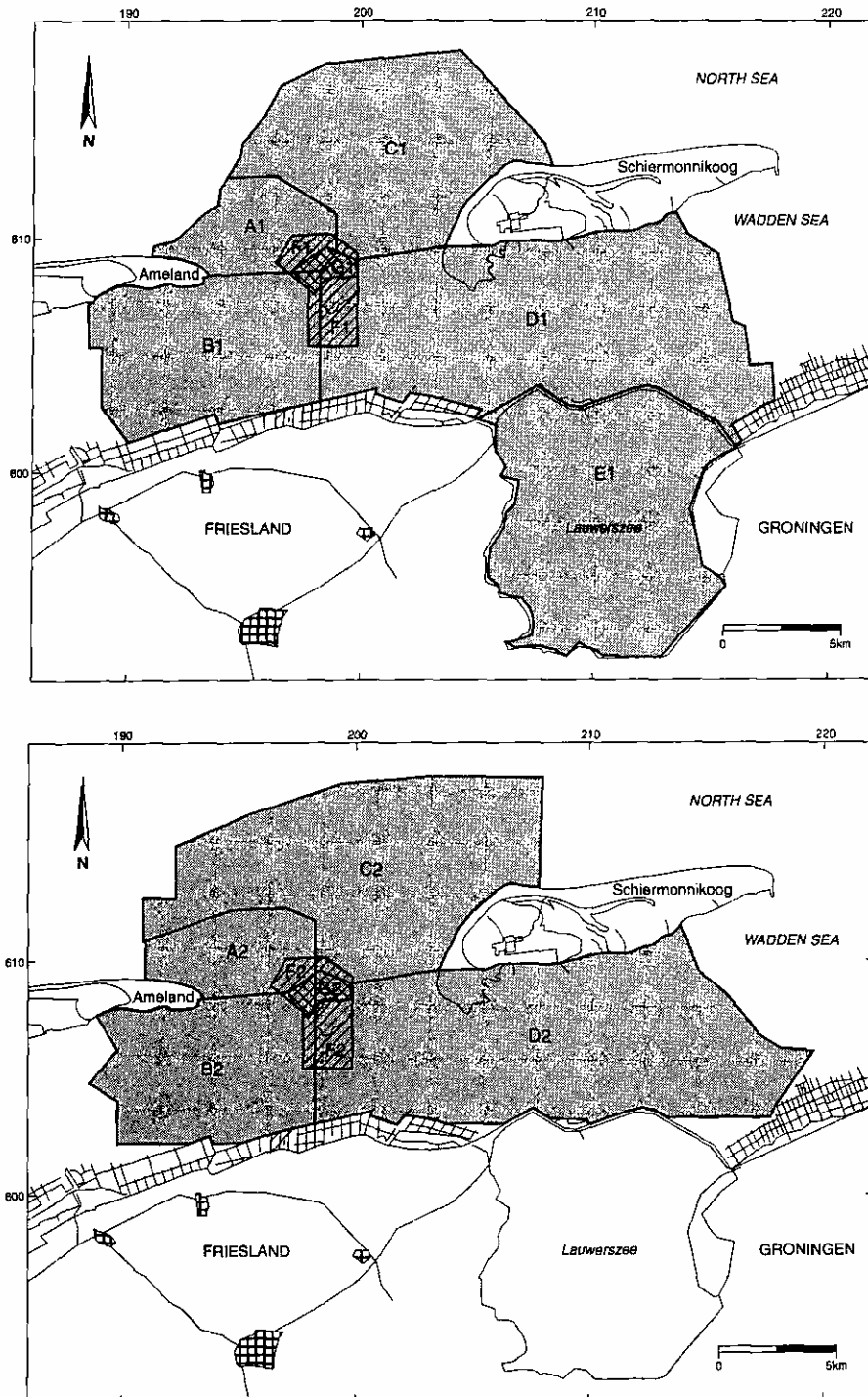
2.3.1 Basisgegevens

Voor de data analyse zijn alle historische gegevens van de bodemligging tot 2006 verzameld. Deze gegevens zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. In appendix A zijn deze gegevens grafisch weergegeven. Bij de eerste inspectie valt het al op dat de gegevens tot 1987 zo goed als gebieddekkend zijn terwijl de gegevens daarna niet meer gebieddekkend zijn behalve 1994. Bij nader informeren is het duidelijk geworden dat de metingen in de Waddenzee zodanig worden uitgevoerd dat de data uit een jaar niet gebieddekkend kan zijn. De data tot 1987 betreffen dus geconstrueerde data op basis van gegevens uit meerdere jaren. Blijkbaar is er na 1987 alleen nog voor 1994 een geconstrueerde bodem gemaakt. Dezelfde data tot 1987 zijn ook de basis geweest van de studie door Oost (1995).

In de huidige studie hebben wij de door Rijkswaterstaat aangeleverde data als basis gebruikt. Er is dus verder geen onderscheid gemaakt tussen de werkelijk gemeten data en de geconstrueerde data. Wel wordt rekening gehouden met de gebieddekkendheid van de data in verschillende jaren.

2.3.2 Analyse van Oost

Een data-analyse van de sedimentatie en erosie van de verschillende onderdelen van het gebied (zie Figuur 2.3) is ook gerapporteerd door Oost (1995). De vier deelgebieden A, B, C, en D duiden respectievelijk op buitendelta van Pinkegat, vloedkom van Pinkegat, buitendelta van Zoutkamperlaag en vloedkom van Zoutkamperlaag. Twee verschillende gebiedsverdelingen zijn gemaakt omdat het systeem door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 veranderd is. Indeling 1 is voor de situatie van vóór 1970 en indeling 2 voor de situatie na 1970.



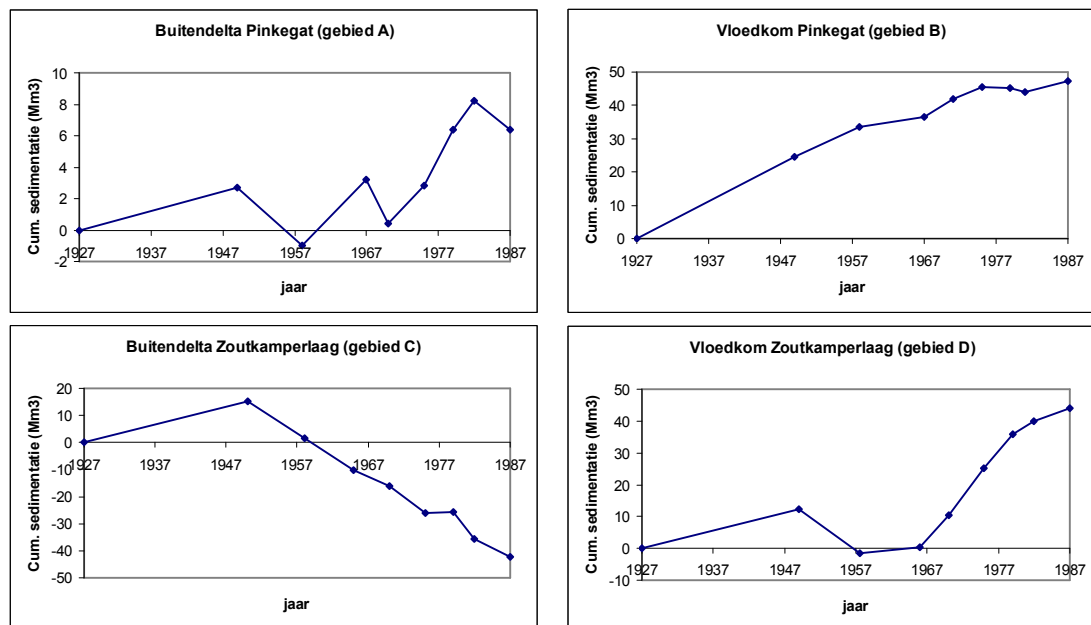
Figuur 2.2 Gebiedindeling voor de berekening van de sedimentatie-erosie hoeveelheden volgens Oost (1995). Indeling 1 (boven) is gebruikt voor de situatie vóór de afsluiting van de Lauwerszee en indeling 2 (onder) voor daarna. In de nieuwe analyse wordt alleen indeling 2 gehanteerd.

Voor de vier grote gebieden heeft Oost (1995) zijn de totale sedimentatie-erosie hoeveelheden in de verschillende perioden tot 1987 berekend (zie Tabel 2.1). Het gebied rondom de Engelsmanplaat is ook expliciet aangeduid in deze indeling, maar Oost (1995) heeft geen

resultaat van sedimentatie-erosie berekeningen voor dit kleine gebied gemaakt. De gegevens in Tabel 2.1 zijn grafisch gepresenteerd in Figuur 2.3.

Tabel 2.1 Historische veranderingen (positief = sedimentatie) in de verschillende gebieden, berekend door Oost (1995).

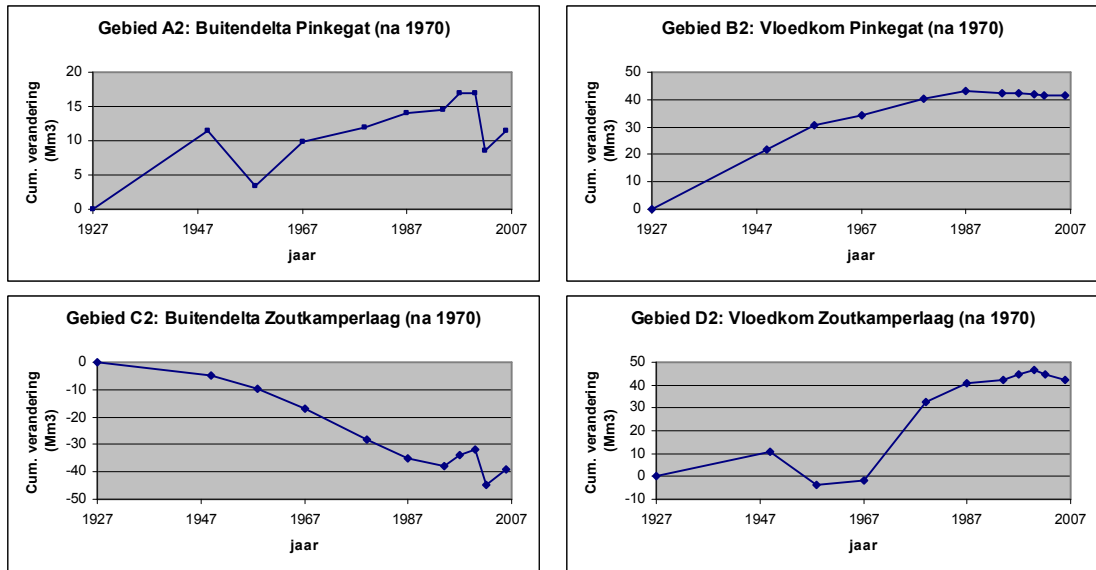
A: Buitendelta Pinkegat		B: Vloedkom Pinkegat		C: Buitendelta Zoutkamperlaag		C: Vloedkom Zoutkamperlaag	
period	Million m ³	period	Million m ³	Periode	Million m ³	Periode	Million m ³
1927-1949	2.7	1927-1949	24.5	1927-1950	15.1	1927-1949	12.3
1949-1958	-3.7	1949-1958	9.1	1950-1958	-13.7	1949-1957.5	-13.7
1958-1967	4.2	1958-1967	2.8	1958-1965	-11.6	1957.5-1966	1.7
1967-1970	-2.8	1967-1971	5.4	1965-1970	-5.9	1966-1970	10
1970-1975	2.4	1971-1975	3.7	1970-1975	-9.8	1970-1975	14.8
1975-1979	3.6	1975-1979	-0.3	1975-1979	0.4	1975-1979	10.7
1979-1982	1.8	1979-1981	-1.2	1979-1982	-10	1979-1982	4.3
1982-1987	-1.8	1981-1987	3.3	1982-1987	-6.6	1982-1987	3.8



Figuur 2.3 Cumulatief veranderingen (toename = sedimentatie) in de verschillende gebieden op basis van gegevens zoals berekend door Oost (1995).

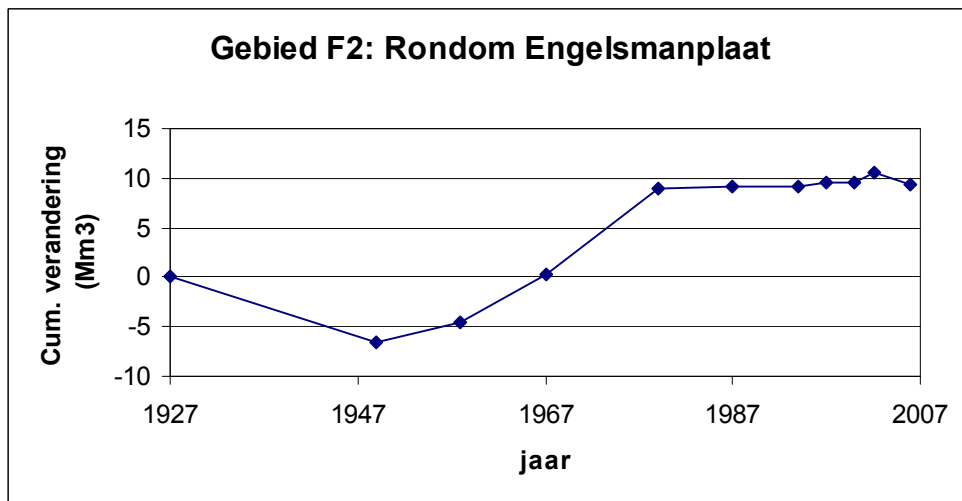
2.3.3 Nieuwe analyse

Een nieuwe data-analyse wordt uitgevoerd om twee redenen. Ten eerste, er zijn nu nieuwe data van na 1991 beschikbaar. Ten tweede, in de analyse van Oost (1995) is er niet in detail naar het gebied rondom de Engelsmanplaat gekeken. Om een consistent beeld te verkrijgen zijn alle beschikbare data geanalyseerd met de gebiedsindeling 2 zoals weergegeven in Figuur 2.2. Dus ook voor de data van voor de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 worden de volumeveranderingen bepaald voor de buitendelta's en de vloedkommen van de twee zeegaten die gelden voor de nieuwe situatie na de afsluiting. Verder is de volumeverandering van het gebied rondom de Engelsman plaat F2 (zie Figuur 2.2) bepaald. Opgemerkt wordt dat dit deelgebied ook onderdeel uitmaakt van de andere vier delen (A2, B2, C2, en D2).



Figuur 2.4 Cumulatief veranderingen (toename = sedimentatie) in de verschillende gebieden op basis van gebiedindeling 2 in Figuur 2.2.

De veranderingen van de buitedelta's en de vloedkommen van de twee zeegaten, zoals uit de nieuwe analyse zijn bepaald, zijn weergegeven in Figuur 2.4. Rekening houdend met het feit dat de gehanteerde gebiedindeling vóór 1970 anders is, geven de nieuwe resultaten hetzelfde beeld van veranderingen als de resultaten van Oost (1995), zie Figuur 2.3. De trend van veranderingen is na 1987 voortgezet, maar de sedimentatie in de twee vloedkommen en in de buitedelta van het Pinkegat lijkt afgevlakt te zijn in de laatste jaren.



Figuur 2.5 Totale sedimentatie-erosie in het gebied rondom de Engelsmanplaat

In Figuur 2.5 zijn de veranderingen in het gebied F, i.e. gebied rondom de Engelsmanplaat en het Rif, weergegeven. Van 1927 tot 1947 treedt er in dit gebied erosie op. Daarna treedt er in dit gebied sedimentatie op tot 1980. In de periode na 1980 is er netto weinige veranderingen. Hoewel de gebieddekkendheid van de data in de recente jaren niet optimaal is, lijken de resultaten van de analyse aan te geven dat de erosie niet overal optreedt in het

gebied. Het sediment dat vrijgekomen is door de verlaging van bijvoorbeeld de Engelsmanplaat is blijkbaar terecht gekomen in de directe omgeving.

2.4 Morfologische analyse

Behalve de volumebepalingen van de sedimentatie-erosie in de verschillende deelgebieden, zoals in de vorige paragraaf zijn beschreven, kunnen de velddata ook gebruikt worden om ontwikkelingen van de verschillende morfologische elementen in het gebied te analyseren. In Appendix A zijn de gemeten / geconstrueerde bathymetrische contouren van de verschillende jaren vanaf 1927 gegeven. Daarna zijn ook de bodemniveauperanderingen in de verschillende perioden afgebeeld. Hieruit zijn een aantal relevante constatering gedaan:

- Ook in de huidige situatie (2006) scheidt de kortsluitgeul Smeriggat nog steeds de Engelsmanplaat en het Rif van elkaar. De voorspelling van Oost (1995) dat het Rif en de Engelsmanplaat binnen korte termijn aan elkaar zouden sluiten is voorlopig nog niet uitgekomen. Er treedt wel sedimentatie op in deze geul maar de afname van de diepte van de geul lijkt heel langzaam te gaan. De bodem van de geul ligt momenteel op NAP-1.5 a NAP -2 m. Omdat de ontwikkeling van het systeem niet echt strikt cyclisch is, is er nooit een exacte verwachte tijd genoemd over de aansluiting tussen het Rif en de Engelsmanplaat. Maar het lijkt er op dat deze aansluiting is vertraagd t.o.v. de verwachting.
- Op de Engelsmanplaat treedt er nog steeds erosie op en de plaat verlaagt zich (zie de sedimentatie-erosie patroon in de periode 1994-2006). Dit gedrag komt overeen met de verklaring van Oost(1995), omdat het Rif en de Engelsmanplaat nog steeds van elkaar gescheiden zijn. Op het Rif is de sedimentatie en erosie afwisselend, er is dus zwel verhoging als verlaging. De zandbank ten noorden van het Rif is bijna aan het Rif aangesloten. Als deze aansluiting straks eerder optreedt dan de aansluiting tussen het Rif en de Engelsmanplaat dan is er sprake van een afwijking in het gedrag van het systeem.
- Het valt op dat het wantij achter de Engelsmanplaat aan het verplaatsen is sinds 1970. Dit wantij kan worden beschouwd als de grens tussen de vloedkom van het Pinkegat en de vloedkom van de Zoutkamperlaag. Op de topografische kaarten in Appendix A kan men zien dat het wantij in de jaren vóór 1970 rondom het midden van de Engelsmanplaat ligt en ongeveer een Noord-Zuid oriëntatie heeft. In de jaren na 1970 is het wantij naar west geschoven en meer een Noordoost-Zuidwest oriëntatie heeft gekregen. Het effect hiervan is dat de vloedkom van de Zoutkamperlaag is vergroot ten kost van die van het Pinkegat.
- Een andere waarneming betreft de ontwikkeling van de Hon in samenhang met het Pinkegat, zoals eerder is al gerapporteerd door Eysink (zie Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005). De ontwikkeling van de Hon hangt sterk samen met de cyclische ontwikkeling van de geulen van het Pinkegat. Wanneer de geulen naar oost migreren groeit de Hon aan en de Hon wordt aangevallen wanneer er een nieuwe geul ontstaat. De periode van de cyclus is geschat op 70 à 75 jaar op basis van historische waarnemingen. Op basis hiervan zou men kunnen verwachten dat de groei van de Hon die in 1979 was begonnen tot ongeveer 2010 zou voortzetten. Maar in werkelijkheid is er sinds 2000 al een nieuwe erosie fase van de Hon begonnen. Hoewel men het onwaarschijnlijk vond had men niet kunnen uitsluiten dat de bodemdaling een rol heeft gespeeld voor dit afwijkende gedrag van het systeem.

- Elders in de vloedkom van het Pinkegat treedt er vooral sedimentatie op in het intergetijdegebied. Op het gebied ten zuid van Ameland, waar de bodemdaling het sterkst is, verhoogt de plaat zich doordat er meer sedimentatie dan bodemdaling optreedt.

2.5 Samenvatting conclusies

Uit het literatuuronderzoek en de data analyse kunnen wij de volgende antwoorden geven op de vragen die in 2.1 zijn gesteld:

- De verlaging van de Engelsmanplaat is begonnen in 1970. De verlaging van het Rif is begonnen in 1982.
- De totale hoeveelheid van sediment in het gebied F2 (zie Figuur 2.2) rondom de Engelsmanplaat en het Rif neemt niet af in de afgelopen periode. De erosie betreft dus een verlaging van de hogere delen en geen verkleining van het gebied.
- Op de Engelsmanplaat lijkt de erosie aanhoudend te zijn. In alle beschouwde perioden sinds 1970 is er voornamelijk sprake van verlaging. Op het Rif is er voornamelijk erosie in de periode 1982-1991 (Oost, 1995), maar de recente gegevens geven aan dat er afwisselende sedimentatie-erosie optreedt in dit gebied.

Verder zijn de volgende constatering gedaan:

- De ontwikkeling van de Engelsmanplaat vertoont een cyclisch gedrag met een periode in de orde van 100 jaar. De plaat vergroot zich in oppervlak en in hoogte als de zandbank aan de noordkant aansluit en de kortsluitgeul zich afsluit. Vervolgens ontstaat er aan de noordkant van de plaat een nieuwe geul en de vergrote plaat begint te eroderen.
- Momenteel scheidt de kortsluitgeul Smeriggat het Rif van de Engelsmanplaat. De erosie op de Engelsmanplaat is op zich conform het normale gedrag van de plaat in de huidige status binnen de cyclus.
- Mogelijke afwijkend gedrag van de veranderingen t.o.v. de verwachte normale ontwikkelingen betreft:
 - Vertraging van de aansluiting het Rif aan de Engelsmanplaat en de afsluiting van het Smeriggat.
 - Mede door de vertraagde aansluiting versterkte erosie op de Engelsmanplaat.
 - Eerder begonnen erosiefase van de Hon in samenhang met de ontwikkelingen van de geulen van het Pinkegat.

Een conclusie die nu al kan worden getrokken is dat de erosie op de Engelsmanplaat en op het Rif niet door de bodemdaling t.g.v. gaswinning is geïnitieerd. De erosie is namelijk eerder dan het begin van de gaswinning op Ameland (in 1986) begonnen.

3 Het zanddelende systeem van het Friesche Zeegat

3.1 Inleiding

De twee vloedkommen (Pinkegat en Zoutkamperlaag) en hun buitendelta's in het Friesche Zeegat vormt een zanddelend systeem. Tussen een vloedkom en de bijbehorende buitendelta en tussen de twee buitendelta's onderling wordt sediment uitgewisseld. Zo is de netto sedimentatie in een vloedkom precies gelijk aan de sedimentimport vanuit de bijbehorende buitendelta. De waargenomen ontwikkelingen van deze vier elementen (vloedkom Pinkegat, buitendelta Pinkegat, vloedkom Zoutkamperlaag, buitendelta Zoutkamperlaag) zijn in vorig hoofdstuk beschreven. Om deze ontwikkelingen beter te begrijpen worden de verzamelde data in dit hoofdstuk nader geanalyseerd. Doel van de analyse is om twee vragen te beantwoorden:

1. Hoe belangrijk is de bodemdaling door gaswinning voor de morfologische ontwikkeling t.o.v. andere menselijke ingrepen en natuurlijke ontwikkelingen?
2. Hoe belangrijk is het gebied rondom de Engelsmanplaat als sedimentbron (voor compensatie van sedimenthonger elders in het systeem)?

Beantwoorden van vraag 1 geeft bijdrage aan het beantwoorden van de onderzoeksvraag wat het effect van de bodemdaling op de opgetreden erosie op de Engelsmanplaat is. Vraag 2 is direct gerelateerd aan de onderzoeksvraag of de eventueel vertraagde erosie op de Engelsmanplaat invloed op het herstel van de bodemdaling kan hebben.

De analyse in dit hoofdstuk wordt op het schaalniveau van een hele vloedkom uitgevoerd. Hierbij maken wij gebruik van de empirische relaties voor het morfologische evenwicht. De parameters / variabelen in deze empirische relaties worden bepaald uit de hypsommetrische curven van de vloedkommen, zoals beschreven in de VOP studie (Elias e.a., 2006). De analyse in de VOP studie is gebaseerd op de hypsommetrische gegevens van alle getijdenbekkens in de NL Waddenzee. Daarbij is het Friesche Zeegat echter als een bekken beschouwd. In de huidige analyse worden Pinkegat en Zoutkanperlaag als twee aparte bekkens beschouwd.

Voor de andere menselijke ingrepen in het gebied wordt beschouwd de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Een natuurlijke ontwikkeling die belangrijke invloed heeft op de morfologische ontwikkeling op het beschouwde schaalniveau is de zeespiegelrijzing. Deze twee invloeden worden naast de bodemdaling in dit hoofdstuk beschouwd.

3.2 Basisgegevens en de verwerking

In de VOP studie gebruikte hypsommetrie gegevens van de bekkens Marsdiep, Eierlandsegat, Vlie, Amelanderzeegat en Friesche Zeegat vanaf 1926 zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. In deze dataset is het Friesche Zeegat als een bekken beschouwd. Voor de

huidige studie is het belangrijk de ontwikkelingen in het Pinkegat en in de Zoutkamperlaag apart te beschouwen. Daarom worden de hypsommetrische curven van deze twee vloedkommen afgeleid uit de verzamelde bodemgegevens. Voor elk jaar waarin voor een bepaalde vloedkom bodemdieptegegevens bestaan wordt een hypsommetrisch curve bepaald voor de analyse. Hierbij worden vaste grenzen voor beide vloedkommen gehanteerd. Voor alle jaren, ook vóór 1970, wordt de tweede indeling in Figuur 2.2 gehanteerd, polygoon B2 voor Pinkegat en D2 voor Zoutkamperlaag. Hier is gekozen voor de vaste grenzen om de analyse consistent te houden. Maar bij het gebruik van de afgeleide gegevens dient men rekening te houden dat in werkelijkheid de grenzen van de vloedkommen niet vast zijn omdat bijvoorbeeld de wantijen zich verplaatsen.

Oppervlak en volume op hoogst niveau

De afgeleide hypsometrie gegevens per vloedkom bevatten $A(z)$ en $V(z)$, met z =vertikaal niveau, A =horizontaal (nat) oppervlak op niveau z , en V =(nat) volume onder niveau z . Voorbeelden van de afgeleide gegevens zijn gepresenteerd in Figuur 3.1.

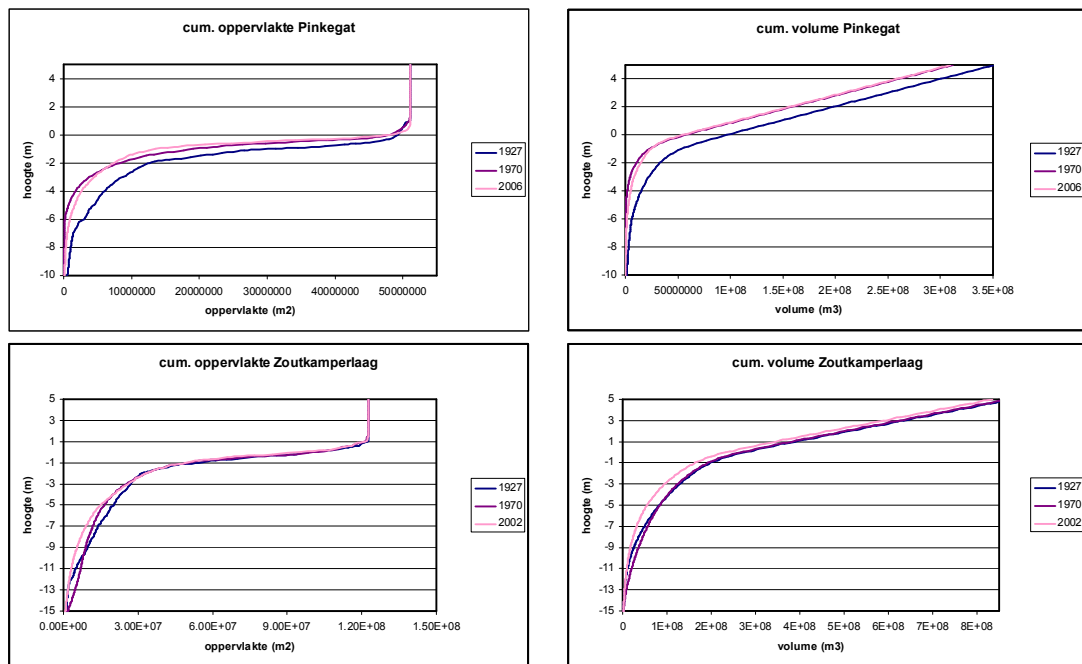


Figure 3.1 hypsommetrische curves van de twee vloedkommen. Links oppervlakte $A(z)$, Recht volume $V(z)$, Boven Pinkegat, Onder Zoutkamperlaag

Beide parameters zijn gegeven voor een groot genoeg bereik van z , i.e. vanaf een laag niveau z_0 waarop zowel A als V gelijk is aan nul tot een hoogst niveau z_L ver boven het HW. Merk op dat er een relatie tussen de twee parameters is, per definitie:

$$V(z) = \int_{z_0}^z A(z) dz \quad (3.1)$$

De oppervlakte op het hoogste niveau z_L is verder gebruikt als oppervlak van het bekken. De verandering van het volume op dit hoogste niveau vertegenwoordigt de totale sedimentatie-erosie in het bekken, zoals is gepresenteerd in vorig hoofdstuk.

$$\begin{aligned}A_b &= A(z_L) \\ V_{tot} &= V(z_L)\end{aligned}\tag{3.2}$$

Oppervlak en volume op HW

$$\begin{aligned}A_{HW} &= A(a) \\ V_{HW} &= V(a)\end{aligned}\tag{3.3}$$

Hierin a = amplitude van getij, gelijk gesteld aan 1.1 m.

Oppervlak en volume op MW

$$\begin{aligned}A_{MW} &= A(0) \\ V_{MW} &= V(0)\end{aligned}\tag{3.4}$$

Oppervlak en volume op LW

$$\begin{aligned}A_{LW} &= A(-a) \\ V_{LW} &= V(-a)\end{aligned}\tag{3.5}$$

3.3 Empirische relaties voor morfologisch evenwicht

Gekeken wordt hoe aan de empirische relaties voor het morfologische evenwicht worden voldaan door de twee bekkens in de verschillende perioden. Er zijn twee empirische relaties van belang op schaalniveau van een hele vloedkom, namelijk de relatie tussen het geulvolume en het getijprisma en de relatie tussen het plaatareaal en het oppervlak van het bekken.

Volgens de eerste empirische relatie is het geulvolume, gedefinieerd als het natte volume onder het gemiddelde waterniveau (MW, =NAP), evenredig met het getijprisma tot macht 3/2 (Eysink, 1990):

$$V_{MW} = \alpha P^{\frac{3}{2}}\tag{3.6}$$

Bij evenwicht is de constant α is gelijk aan $65 \cdot 10^{-6}$ als V_{MW} en P zijn in m^3 .

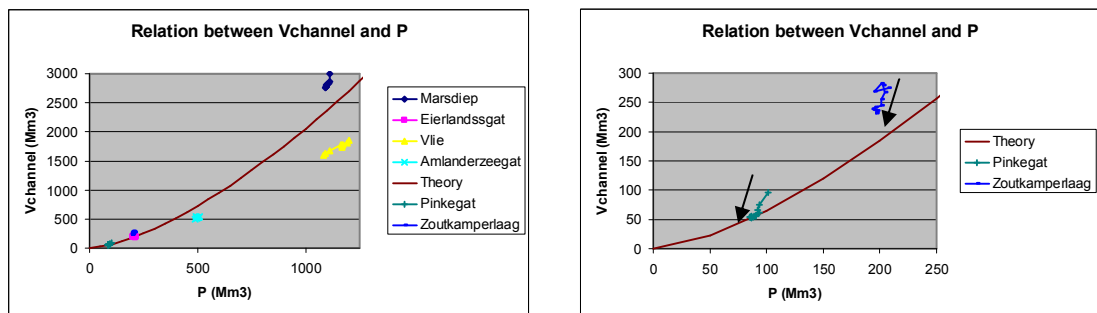
Het getijprisma wordt als volgt afgeleid:

$$P = V_{HW} - V_{LW}\tag{3.7}$$

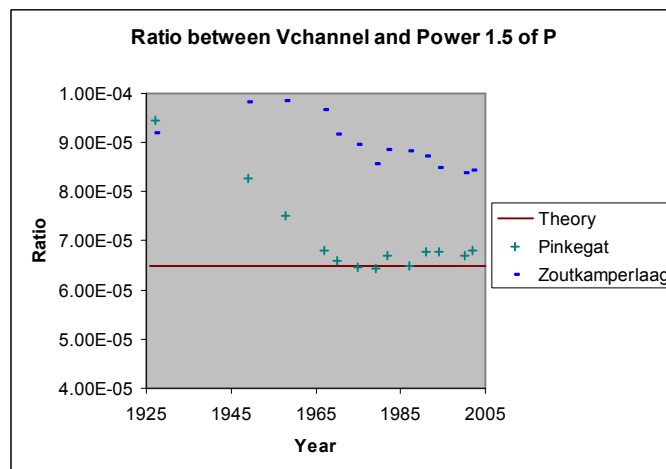
De gegevens van beide bekkens zijn in Figuur 3.2 gepresenteerd, samen met die van de andere bekkens in de Nederlandse Waddenzee. In de figuur is ook de empirische relatie (3.6)

met $\alpha=65 \cdot 10^{-6}$ weergegeven. Als een algemeen beeld (zie linker plaatje in de figuur) lijken de veldgegevens goed aan de evenwichtsrelatie (3.6) te voldoen. In feite is relatie (3.6) met de waarde van de constante α waarschijnlijk uit een vergelijkbare dataset afgeleid. Dit betekent dat gegevens van zowel bekkens in evenwicht als bekkens uit evenwicht zijn gebruikt bij de afleiding van de relatie. Daarom moet de waarde van α zoals in de literatuur is gepresenteerd zeker niet als heilig worden beschouwd. In andere woorden, er moet rekening met een zekere onzekerheid in de waarde van α worden gehouden wanneer de relatie wordt gebruikt. Indien wij, als voorbeeld, de gegevens van Marsdiep zouden uitsluiten omdat wij weten dat dit bekken uit evenwicht is na de bouw van de Afsluitdijk, zou de waarde van α afgeleid uit de overgebleven dataset veel kleiner zijn. Verder moeten we ook weten dat zelfs als een bekken in evenwicht is, het betrekking heeft op een dynamisch evenwicht horende bij een zeespiegelrijzing van orde 18 cm per eeuw.

In Figuur 3.2 zijn de data van de twee bekkens in het Friesche Zeegat ook in meer detail getoond (zie rechter plaatje). Daarbij is ook met gebruik van pijlen aangegeven hoe de ontwikkeling in een bekken in tijd is gegaan. Deze ontwikkeling in de tijd is ook weergegeven in Figuur 3.3 door het verloop van de verhouding tussen het geulvolume en de 1.5^{de} macht van het getijprisma te laten zien.



Figuur 3.2 Geulvolume gerelateerd aan getijprisma. Links: alle bekkens in de NL Waddenzee samen. Rechts: details van de twee bekkens in het Friesche Zeegat.



Figuur 3.3 Ontwikkeling van waarde van α in tijd afgeleid van de data van de twee bekkens.

Opgemerkt moet worden dat de analyse is gebaseerd op vaste grenzen voor beide bekken, namelijk de tweede indeling zoals in Figuur 2.2 is weergegeven, ook voor de jaren vóór de afsluiting van de Lauwerszee. Dit houdt in dat voor Zoutkamperlaag de data vóór 1970 niet voor de hele vloedkom zijn. Dit betekent dat voor dit bekken men eigenlijk alleen naar de data vanaf 1970 moet kijken. Sinds 1970 is de waarde van α sterk afgenomen, maar zelfs de huidige waarde is nog ver verwijderd van de evenwichtswaarde. Blijkbaar is de zandhonger die door de afsluiting van de Lauwerszee is ontstaan nog steeds niet weggewerkt door sedimentatie. Voor het Pinkegat geldt dat de waarde van α vanaf de jaren 1960 vrij constant is en in de buurt van de evenwichtswaarde zit. Onduidelijk is waarom de paar datapunten voor 1960 ver uit het evenwicht is. Wel is bekend dat de kwaliteit van de data in de vroege jaren minder zijn dan de recenter data.

De tweede empirische relatie betrekking op het relatieve areaal van de intergetijdgebieden in een bekken (Ranger and Partensky, 1974):

$$\frac{A_f}{A_b} = 1 - 0.025\sqrt{A_b} \quad (3.8)$$

Hierin is A_f het oppervlak van intergetijdgebieden en A_b is het totale oppervlak van het bekken, beide met de eenheid km² (of miljoen m²). Voor de analyse is het oppervlak op het hoogste niveau gebruikt voor A_b en A_f als volgt wordt berekend:

$$A_f = A_{HW} - A_{LW} \quad (3.9)$$

De data van alle bekken in de NL Waddenzee zijn in Figuur 3.4 weergegeven samen met de empirische evenwichtsrelatie (3.8). Ook deze figuur laat zien dat een empirische relatie zoals (3.8) waarschijnlijk is afgeleid uit velddata zonder onderscheid tussen bekken in evenwicht en bekken uitevenwicht te maken.

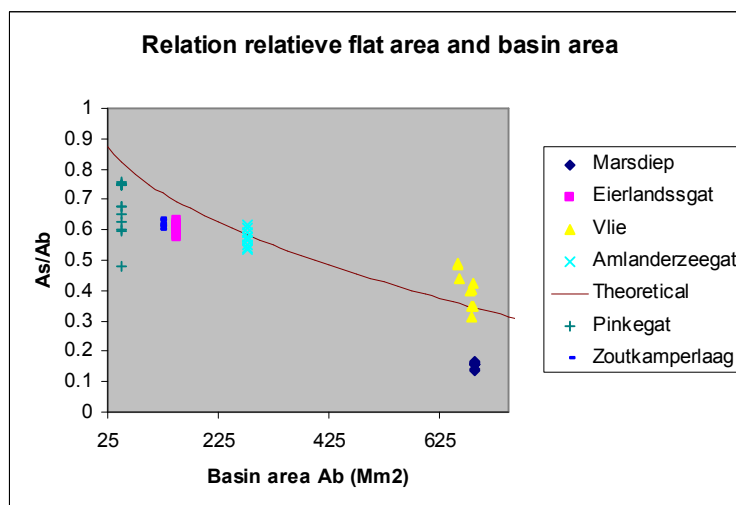


Figure 3.4 Relation between relative area of inter-tidal flat and the basin area.

De ontwikkeling in tijd van het relatieve plaatareaal in de twee bekkens is weergegeven in Figuur 3.5 samen met de evenwichtswaarde volgens de empirische relatie (3.8). Te zien is dat in beide bekkens de hoeveelheid plaat minder is dan volgens de empirische relatie. De afwijking t.o.v. het evenwicht volgens relatie (3.8) in Zoutkamperlaag groter dan in Pinkegat. Ook is te zien dat de het relatieve plaatareaal in beide bekkens min of meer constant blijft in de afgelopen paar decennia. Wel moet worden opgemerkt dat bij de analyse geen rekening is gehouden met de verandering van de grootte van de bekkens door de verplaatsing van de wantijen. Vooral voor de Zoutkamperlaag kan dit belangrijk geweest zijn.

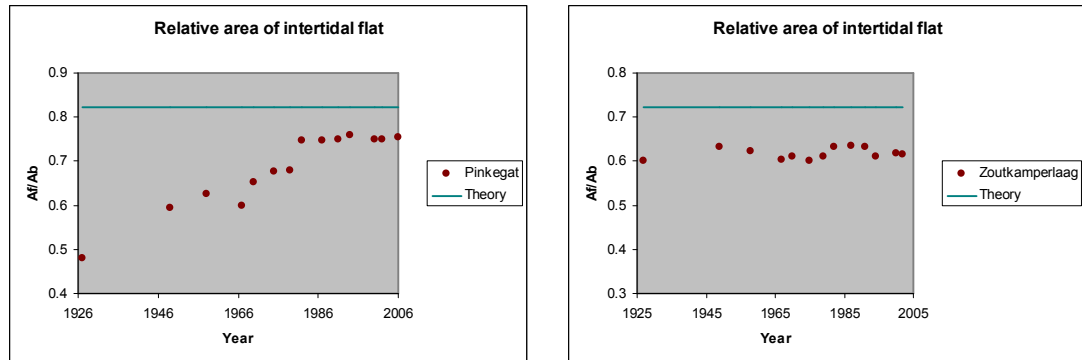


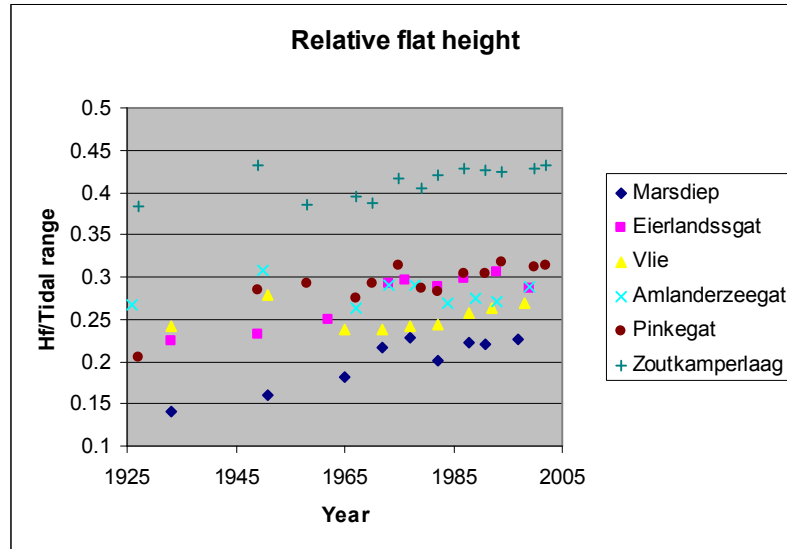
Figure 3.5 Ontwikkeling van het relatieve plaatareaal in de twee bekkens

Een andere parameter die de ontwikkeling van de platen kan weergeven is de relatieve hoogte van de plaat h_f/H , met $H=2a$ =getijverschil en h_f =hoogte van plaat gedefinieerd als:

$$h_f = \frac{V_f}{A_f} = \frac{A_{HW}H - P}{A_f} \quad (3.10)$$

Hierin V_f is het plaatvolume, gedefinieerd als het volume van sediment in het bekken tussen HW en LW.

De data van de relatieve plaathoogte in de verschillende bekkens zijn weergegeven in Figuur 3.6. Het lijkt erop dat in alle bekkens deze parameter naar een waarde ergens tussen 0.25 and 0.3 nadert. De enige uitzondering is de Zoutkamperlaag waarin de plaat hoger is dan in de andere bekkens.

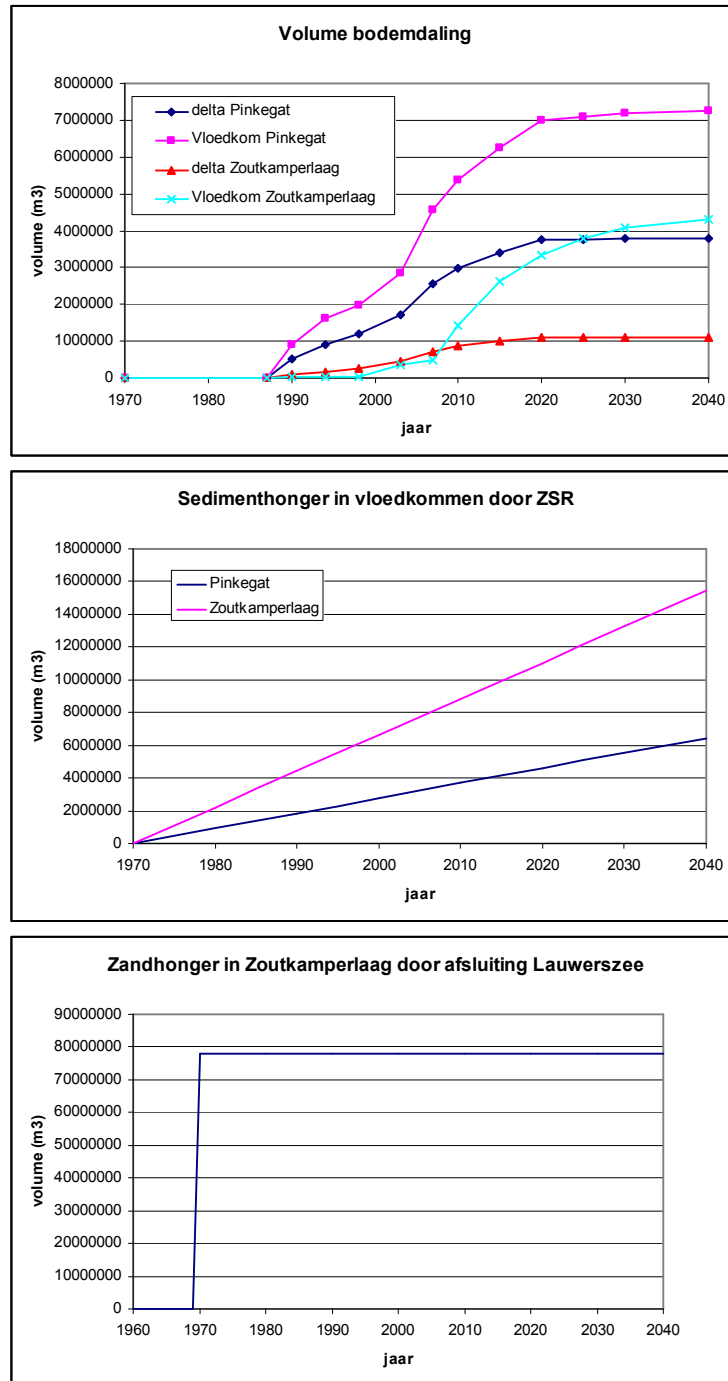


Figuur 3.6 Ontwikkeling van de relatieve plaathoogte in verschillende bekken.

3.4 Evaluatie sedimenthonger en sedimentoverschot

Om de relatieve belangrijkheid van de verschillende ingrepen en natuurlijke ontwikkelingen met elkaar te vergelijken worden de sedimenthonger door de verschillende oorzaken met elkaar vergeleken. Drie oorzaken worden beschouwd, bodemdaling door gaswinning, zeespiegelrijzing en de afsluiting van de Lauwerszee.

In Figuur 3.7 zijn de verlopen van de zandhonger door de drie oorzaken weergegeven. De zandhonger t.g.v. de bodemdaling door gaswinning is simpelweg bepaald als het volume van de bodemdalingsskuil (zie Wang en Eysink, 2005). De getoonde gegevens (bovenste plaatje in Figuur 3.7) heeft betrekking op alle gaswinningen inclusief de geplande in de toekomst in de nieuwe velden. Bij zeespiegelrijzing is uitgegaan van een snelheid van 18 cm/eeuw. Het getoonde verloop is vanaf 1970 en verkregen door de oppervlakken van de vloedkommen te vermenigvuldigen met deze snelheid. De afsluiting van de Lauwerszee veroorzaakt eenmalig een zandhonger in het resterende deel van de Zoutkamperlaag. De getoonde grootte hiervan is berekend als het verschil van het geulvolume in 1970 en de evenwichtswaarde hiervan volgens de relatie (3.6). Zoals in vorige paragraaf is opgemerkt is de waarde van de coëfficiënt in deze relatie niet heilig. Maar zelfs rekening houdend met onzekerheid in de berekening van deze zandhonger moet men concluderen dat de afsluiting van de Lauwerszee relatief een veel grotere ingreep is t.o.v. de bodemdaling door gaswinning. Tabel 3.1 geeft een samenvatting van de aard en grootten van de sedimenthonger door verschillende oorzaken.



Figuur 3.7 Ontwikkeling van de relatieve plaathoogte in verschillende bekkens.

Wel wordt opgemerkt dat de afsluiting van de Lauwerszee naast de sedimenthonger in de vloedkom ook een zandoverschot in de buitendelta van de Zoutkamperlaag veroorzaakte. Dit komt doordat ook de (evenwicht) grootte van de buitendelta aan de grootte van het getijprisma is gerelateerd is. De grootte van dit overschot is in dezelfde orde als de honger in de vloedkom. Hierdoor heeft de buitendelta van de Zoutkamperlaag als een belangrijke bron van sediment gefungeerd in de afgelopen periode, ter compensatie van de sedimenthonger in de twee vloedkommen. Deze bron is veel belangrijker dan de erosie van de Engelsmanplaat. Hiermee zijn de waargenomen ontwikkelingen, zoals in vorig hoofdstuk zijn beschreven (zie Figuren 2.3 – 2.5), beter te begrijpen.

Tabel 3.1 Samenvatting sedimenthonger in de vloedkommen door verschillende oorzaken

Oorzaak	aard	grootte	
		Pinkegat	Zoutkamperlaag
Bodemdaling	Tijdelijk (1987-2040)	7.2 Mm ³	4.3 Mm ³
Zeespiegelrijzing	Continu doorgaand	0.9 Mm ³ /jaar	2.2 Mm ³ /jaar
Afsluiting Lauwerszee	Eenmalig	-	~ 70 Mm ³

3.5 Conclusies

Samengevat zijn de volgende conclusies uit de beschouwing van het zanddelende systeem getrokken:

- De empirische relaties voor evenwicht van de getijdenbekkens, zoals in literatuur te vinden zijn, zijn waarschijnlijk gebaseerd op velddata van zowel bekkens in (dynamisch) evenwicht als bekkens uit evenwicht.
- De Zoutkamperlaag is nog steeds niet in evenwicht en reageert nog steeds aan de afsluiting van de Lauwerszee. De zandhonger in de geul is nog steeds niet weggewerkt en het relatieve plaatareaal is nog steeds te klein.
- De aanpassing van de plaat lijkt veel grotere tijdschaal te hebben dan de aanpassing van de geul na de afsluiting van de Lauwerszee.
- Afsluiting van de Lauwerszee heeft een veel grotere verstoring op het morfologische systeem in het Friesche Zeegat dan de bodemdaling door gaswinning.
- Het overschot aan zand door de afsluiting van de Lauwerszee in de buitendelta van de Zoutkamperlaag heeft als bron gefungeerd voor de compensatie van zandhonger in de vloedkommen. Deze bron is relatief veel belangrijker dan de erosie van de Engelsmanplaat.

4 Proces modellering

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van procesmodelleringen gebruikt om meer inzicht te krijgen in de effecten van de menselijke ingrepen. Behalve de bodemdaling wordt ook de andere belangrijke ingreep in dit gebied, de afsluiting van de Lauwerszee in 1969, beschouwd. Allereerst worden de bestaande modelresultaten beschouwd, waar nodig en kan, worden ook aanvullende berekeningen uitgevoerd.

Voor de effecten van de bodemdaling zijn er berekeningen met een Delft3D model voor dit gebied uitgevoerd voor het opstellen van de MER voor de gaswinning uit de Waddenzeevelden. De modelresultaten waren al geanalyseerd om de abiotische effecten van de bodemdaling te bepalen (Wang, 2005). De resultaten van deze berekeningen worden hier opnieuw geanalyseerd, waarbij extra aandacht aan de invloed op de ontwikkeling van het gebied rondom de Engelsmanplaat wordt besteed. Deze bestaande berekeningen zijn alleen voor de stroming. Omdat golven ook een belangrijke rol speelt bij de ontwikkeling van de intergetijdegebieden zijn ook aanvullende berekeningen voor golven en stroming uitgevoerd.

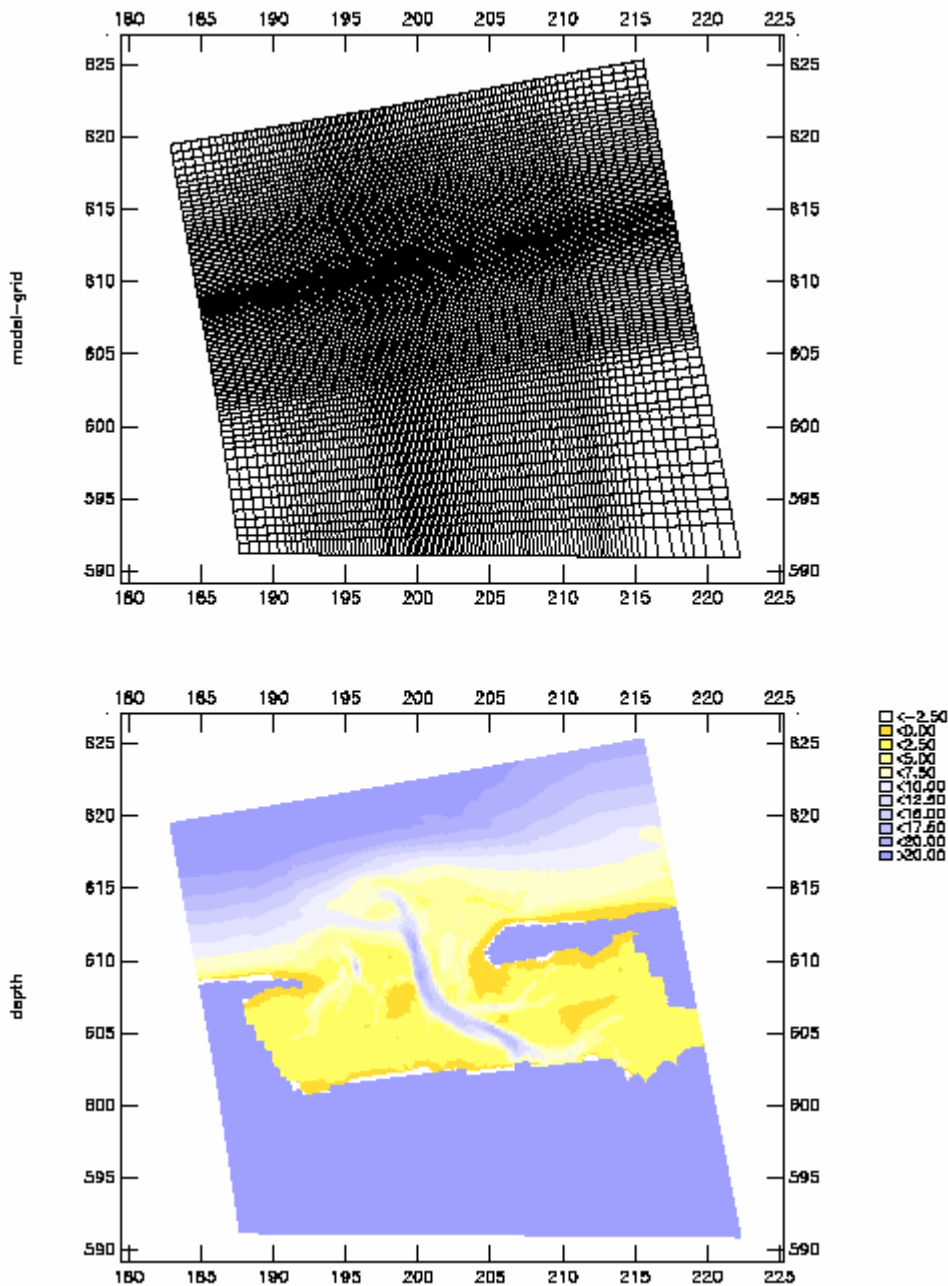
Voor de effecten van de afsluiting van de Lauwerszee worden alleen de bestaande modelresultaten gebruikt. Het gaat om de resultaten van modelberekeningen uitgevoerd in het Kustgenese project. De resultaten van deze berekeningen zijn niet meer digitaal beschikbaar en kunnen daarom niet opnieuw worden geanalyseerd. Alleen de eerder gerapporteerde resultaten worden gebruikt. Nieuwe modelberekeningen kan niet binnen dit project worden uitgevoerd omdat een model met de Lauwerszee voor de situatie vóór de afsluiting niet voor handen is.

4.2 Invloed bodemdaling op stroming

4.2.1 Het model en de berekeningen

In deze paragraaf worden de Delft3D berekeningen voor de MER van de gaswinning uit een zestal gasvelden onder de Waddenzee opnieuw geanalyseerd (Wang, 2005). Het doel van het onderzoek met het DELFT3D-model destijds is om aan te tonen wat het maximale effect van de bodemdaling op de waterbeweging kan zijn. Daarom is een numeriek getijmodel van het gebied gebouwd in het DELFT3D-programma (zie Fig.4.1). Gebruik is gemaakt van een bestaand model. Alleen de bodemligging in het model is vervangen door de 2000 bodem en de 2000 bodem plus de totale bodemdaling van alle velden in 2040. Met het model zijn getij-berekeningen uitgevoerd met dieptegemiddelde stroomsnelheden (2DH-mode) voor de situatie zonder bodemdaling en met de voorspelde totale einddaling door gaswinning zonder compensatie door sedimentatie (extreme toestand). Om een zo compleet mogelijk beeld te

krijgen is in beide gevallen eenzelfde periode van 16 dagen doorgerekend waarbinnen een volledige doortij-springtijcyclus valt.



Figuur 4.1 Rooster (boven) en bodemligging van Het Friesche Zeegat Delft3D model

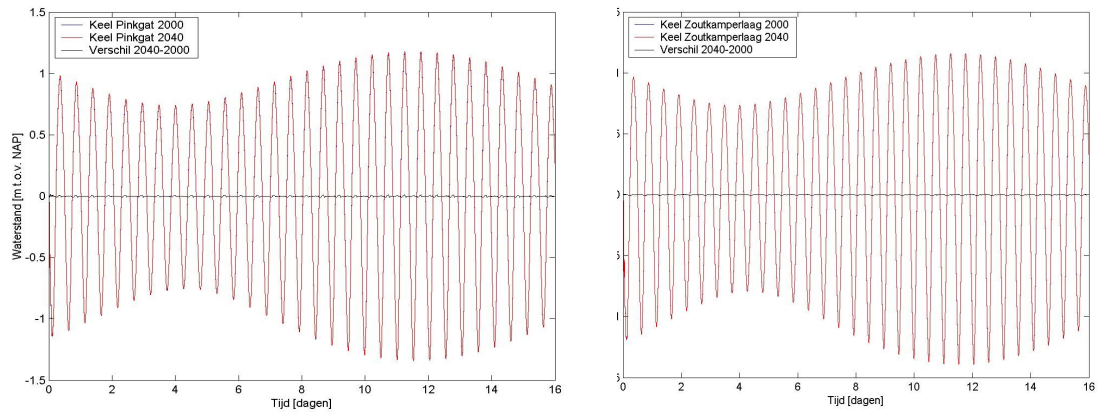
4.2.2 De eerder gerapporteerde resultaten

Waterstanden en debieten

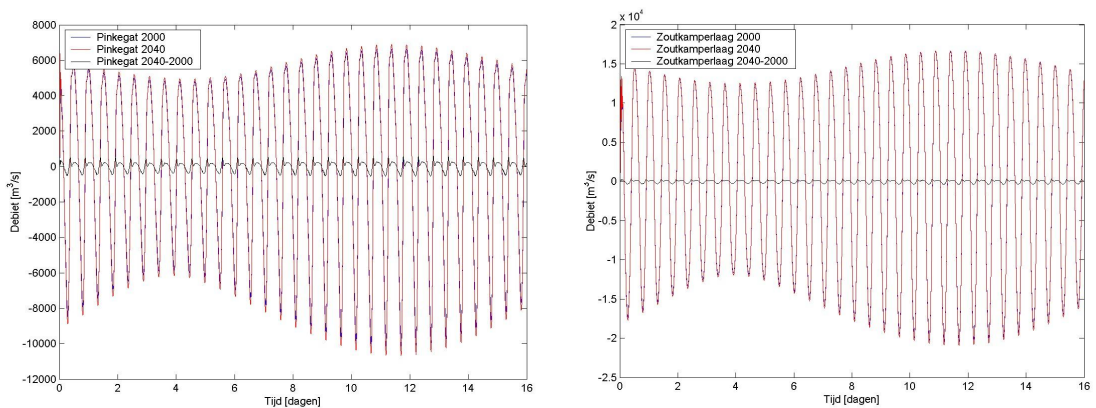
De betrekkelijk geringe veranderingen leiden, geheel naar verwachting, niet tot significante verschillen in de waterstanden. Als voorbeeld worden de waterstandsverlopen en de –

verschillen in de zeegaten van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag gegeven (Fig. 4.2). De bodemdaling heeft slechts marginale effecten op de waterstand.

Door de bodemverlaging is het getijprisma marginaal toegenomen. Dat effect is slechts goed zichtbaar als het verschil in debiet apart wordt getoond (zie Fig. 4.3). Het verschil in de situatie met ongecompenseerd maximum bodemdaling ligt in de orde van 3.37 % in het Pinkegat en circa 1.5 % in de Zoutkamperlaag.



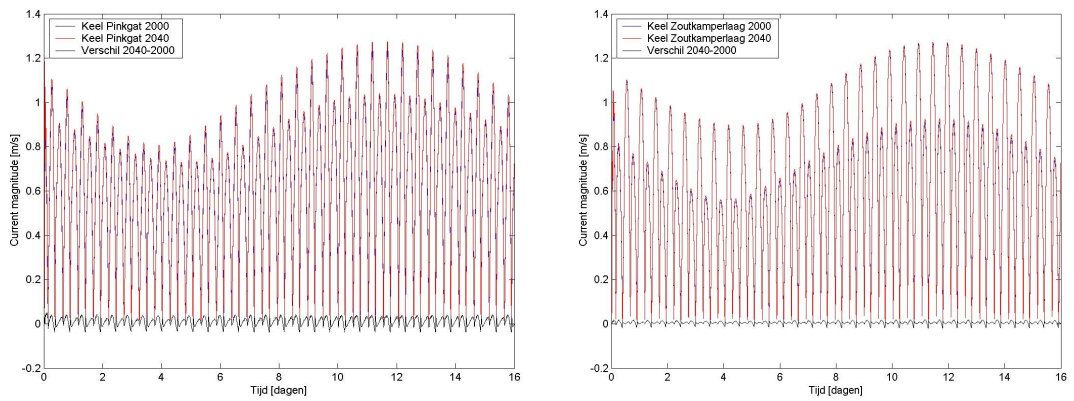
Figuur 4.2 Berekende waterstanden en waterstandsverschillen in het Friesche Zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling



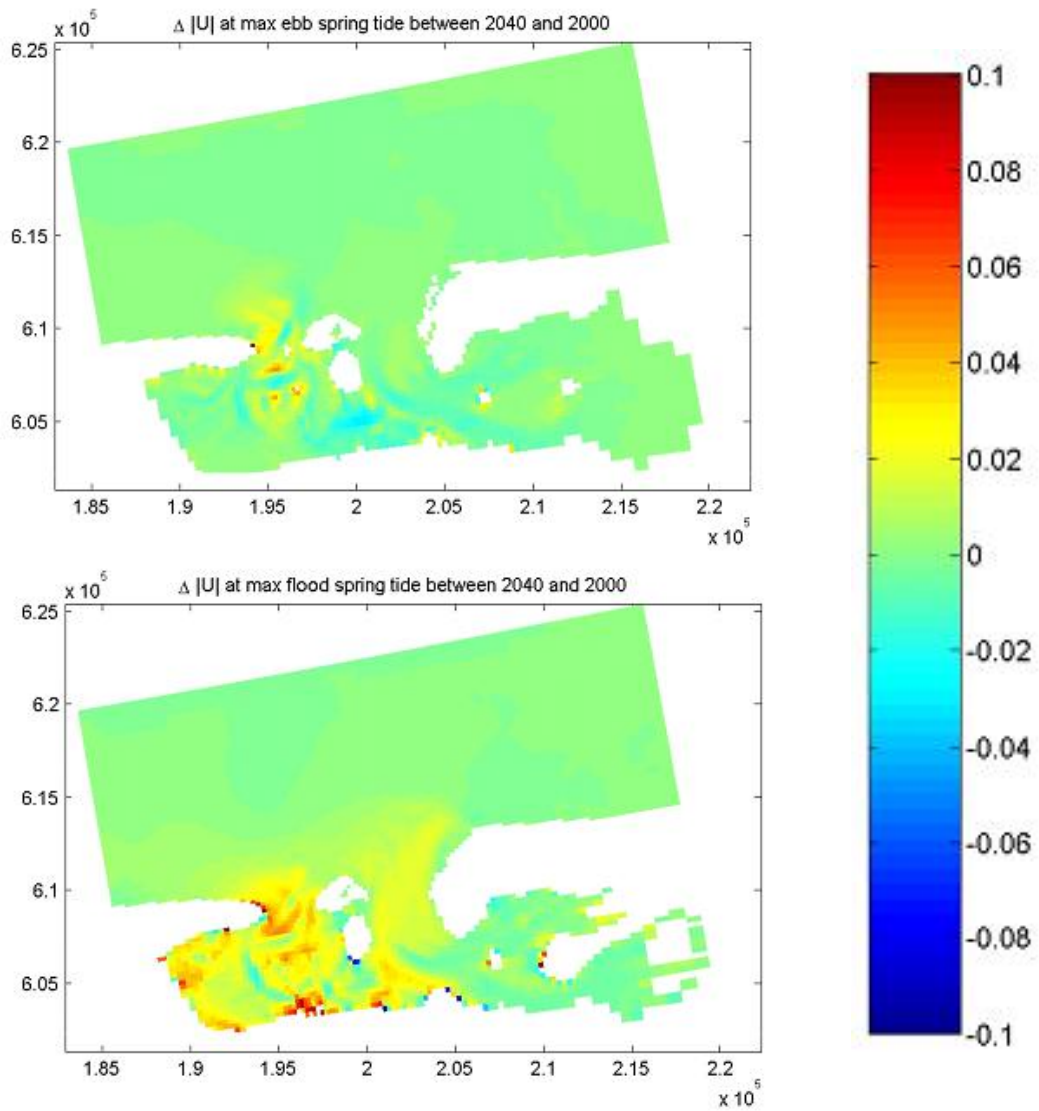
Figuur 4.3 Berekende debieten en debietverschillen in het Friesche Zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling

Stroomsnelheden

Het effect op de stroomsnelheden is minder dan dat op de debieten, omdat een deel van het extra debiet wordt gecompenseerd door verruiming van de geulen als gevolg van bodemdaling. De invloed in de zeegaten is gegeven in Figuur 4.4. Voor het hele gebied is de invloed op de maximale stroomsnelheden bij springtij in Figuur 4.5. Daaruit blijkt dat de maximale stroomsnelheden in het algemeen niet of met minder dan 0.04 m/s veranderen en slechts lokaal met 0.04 à 0.06 m/s toenemen. De verschillen tijdens doortij zijn nog kleiner (zie Wang, 2005).



Figuur 4.4 Berekende stroomsnelheden en snelheidsverschillen in het Friesche Zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling



Figuur 4.5 Berekende stroomsnelheidsverschillen in het gebied rond het Friesche Zeegat tijdens springtij als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling

Getij-asymmetrie

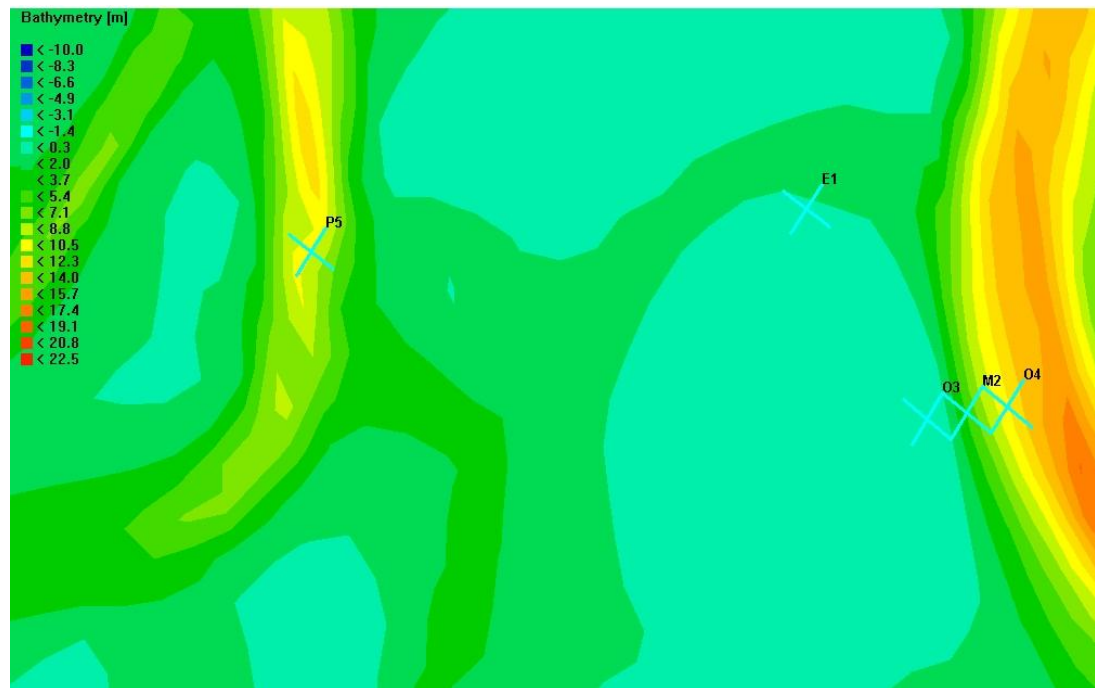
Interessant is dat de bodemdaling de getij-asymmetrie beïnvloedt. Met getij-asymmetrie wordt bedoeld het verschijnsel dat de vloedperiode korter is dan de ebperiode, waardoor de stroomsnelheid tijdens vloed groter is dan die tijdens eb (omdat er dezelfde hoeveelheid water wordt getransporteerd tijdens vloed en tijdens eb). Door de niet-lineaire relatie tussen het sedimenttransport en de stroomsnelheid ontstaat er dan een import van sediment hoewel er netto geen water in een bekken achterblijft. Dit wordt vloeddominantie genoemd.

Hoewel de verandering van de stroomsnelheid door de bodemdaling klein is, kan duidelijk worden waargenomen in Fig. 4.4 dat de toename van snelheid tijdens vloed groter is dan tijdens eb. Dit is ook goed te zien in Fig. 4.5. Tijdens zowel springtij als doortij is de toename van de maximale vloedsnelheid groter dan die van de maximale ebsnelheid, rondom de keel van beide zeegaten. Dit betekent dat de bodemdaling de vloeddominantie bevordert, en dus extra sedimentimport als gevolg heeft. Hiermee is een procesonderbouwing gegeven dat sedimenthonger door bodemdaling extra sedimentimport veroorzaakt om de sedimenthonger weg te werken.

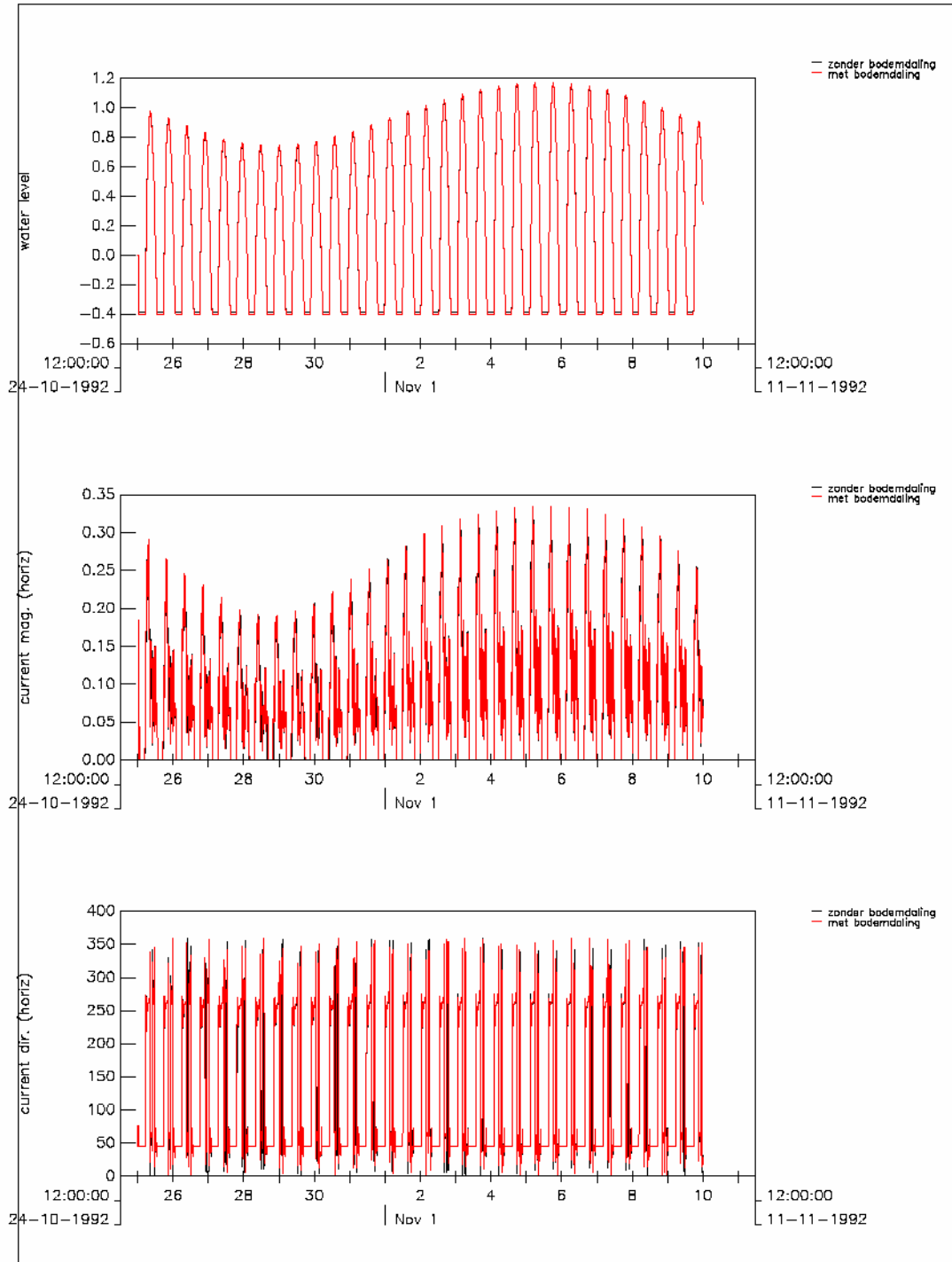
4.2.3 Detail rondom Engelsmanplaat

Waterstand en stroomsnelheden

Bij de nieuwe analyse worden eerst gekeken naar de waterstanden en de stroomsnelheden op stations rondom de Engelsmanplaat (zie Figuur 4.6). Deze stations, op en in de buurt van de Engelsmanplaat zijn bij de simulaties al gedefinieerd.

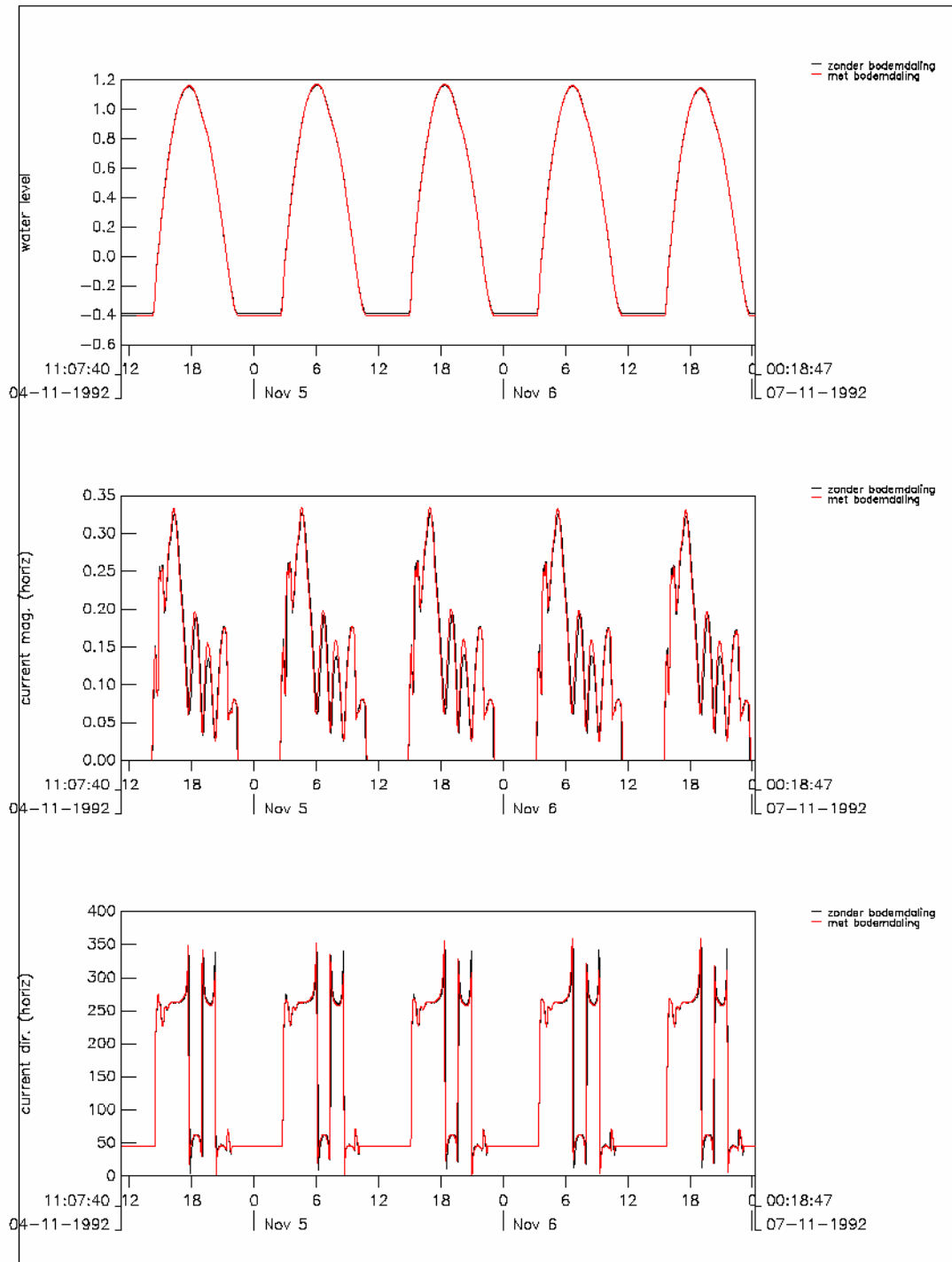


Figuur 4.6 Posities van de stations rondom de Engelsmanplaat

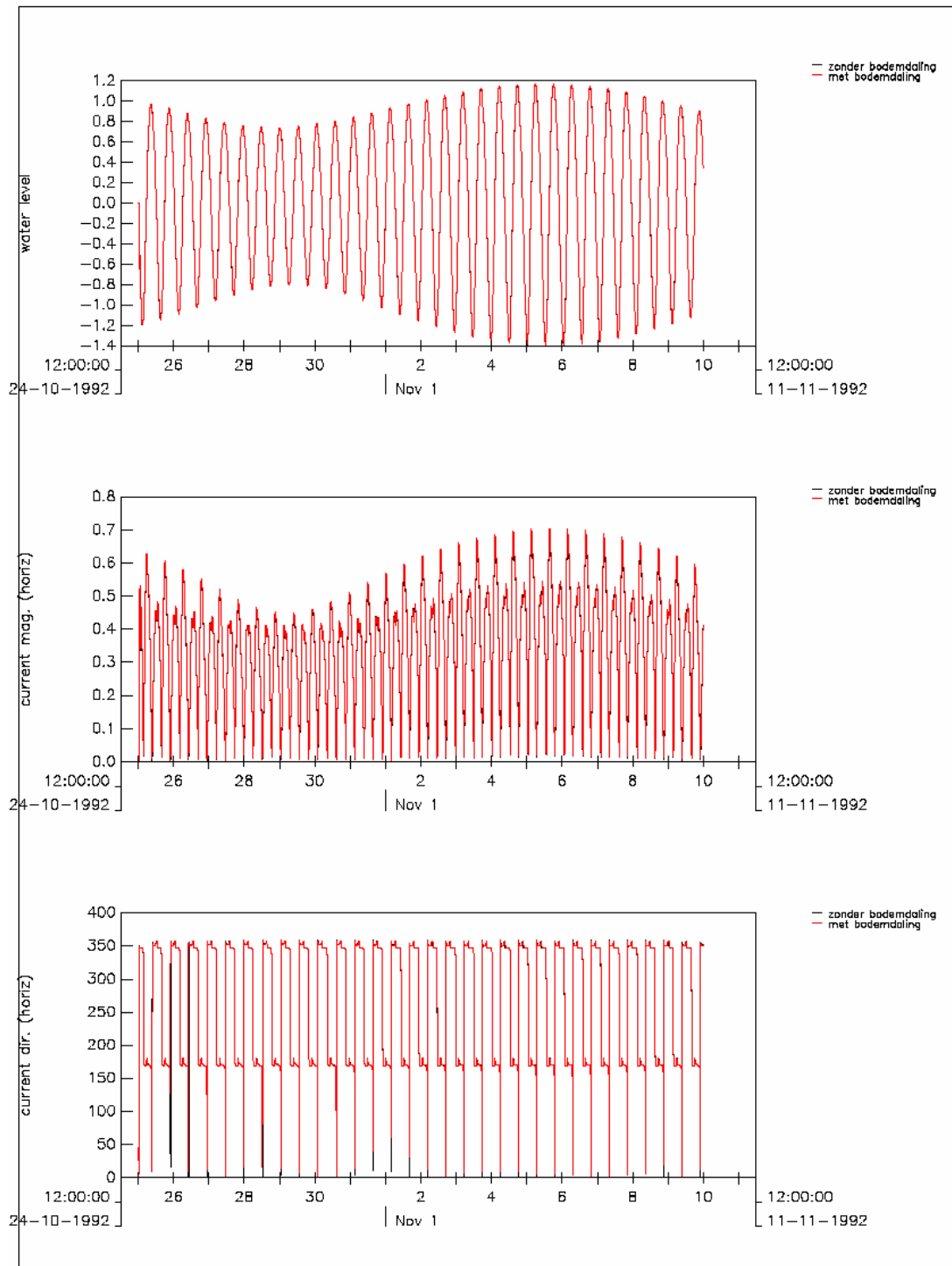


Figuur 4.7 Berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station E1 (Engelsmanplaat)

Figuren 4.7 en 4.8 laten de resultaten van de waterstand, de grootte en de richting van de stroomsnelheid op station E1 (Engelsmanplaat) zien. Het is een station aan de noordkant op de Engelsmanplaat (Figuur 4.6). Figuur 4.7 laat de hele periode zien en Figuur 4.8 laat in meer detail een aantal van de getijperioden zien. Duidelijk is dat de bodemdaling praktisch geen invloed heeft op de waterstand en stroomsnelheid op dit station.

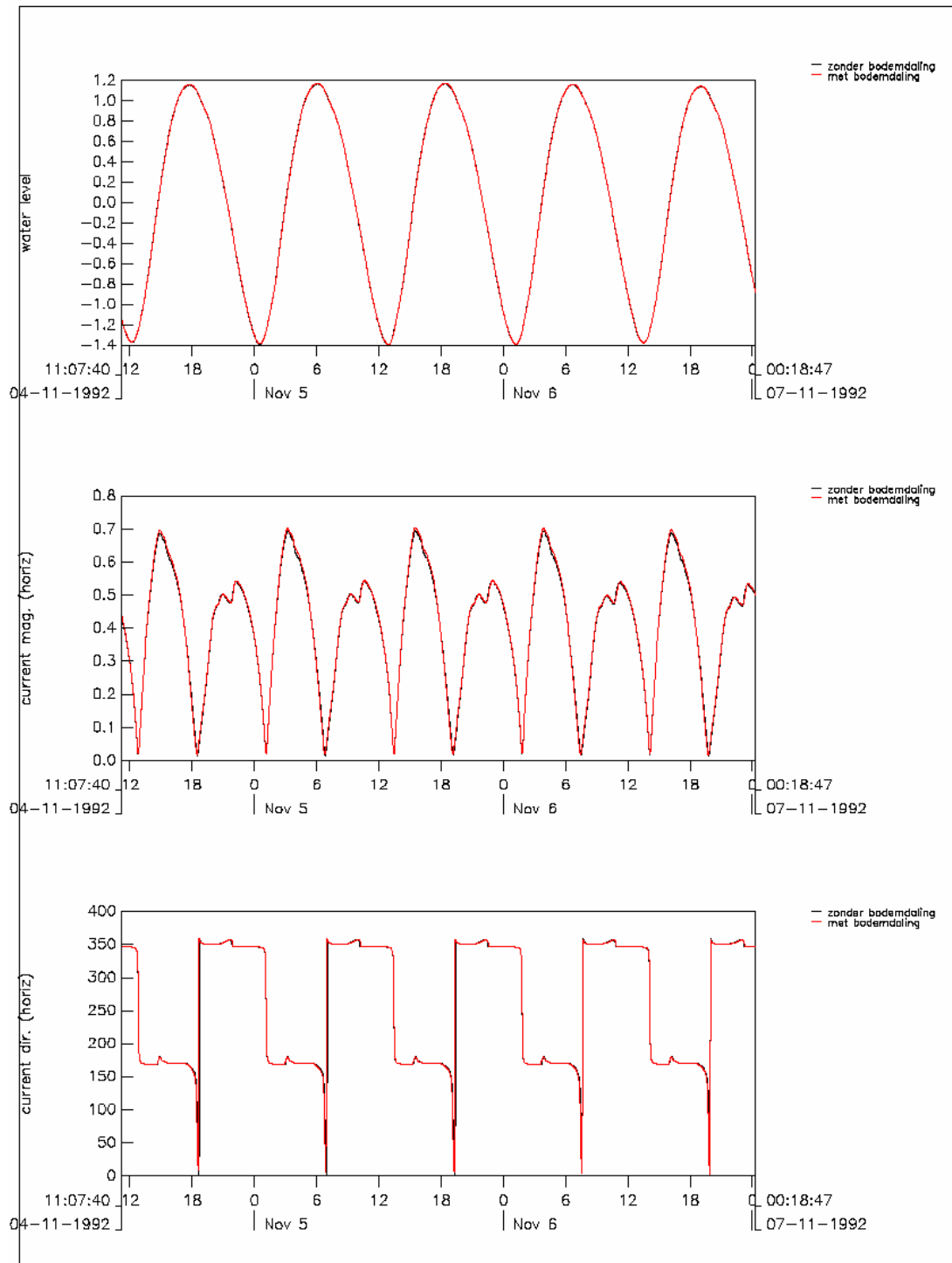


Figuur 4.8 Detail berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station E1 (Engelsmanplaat)

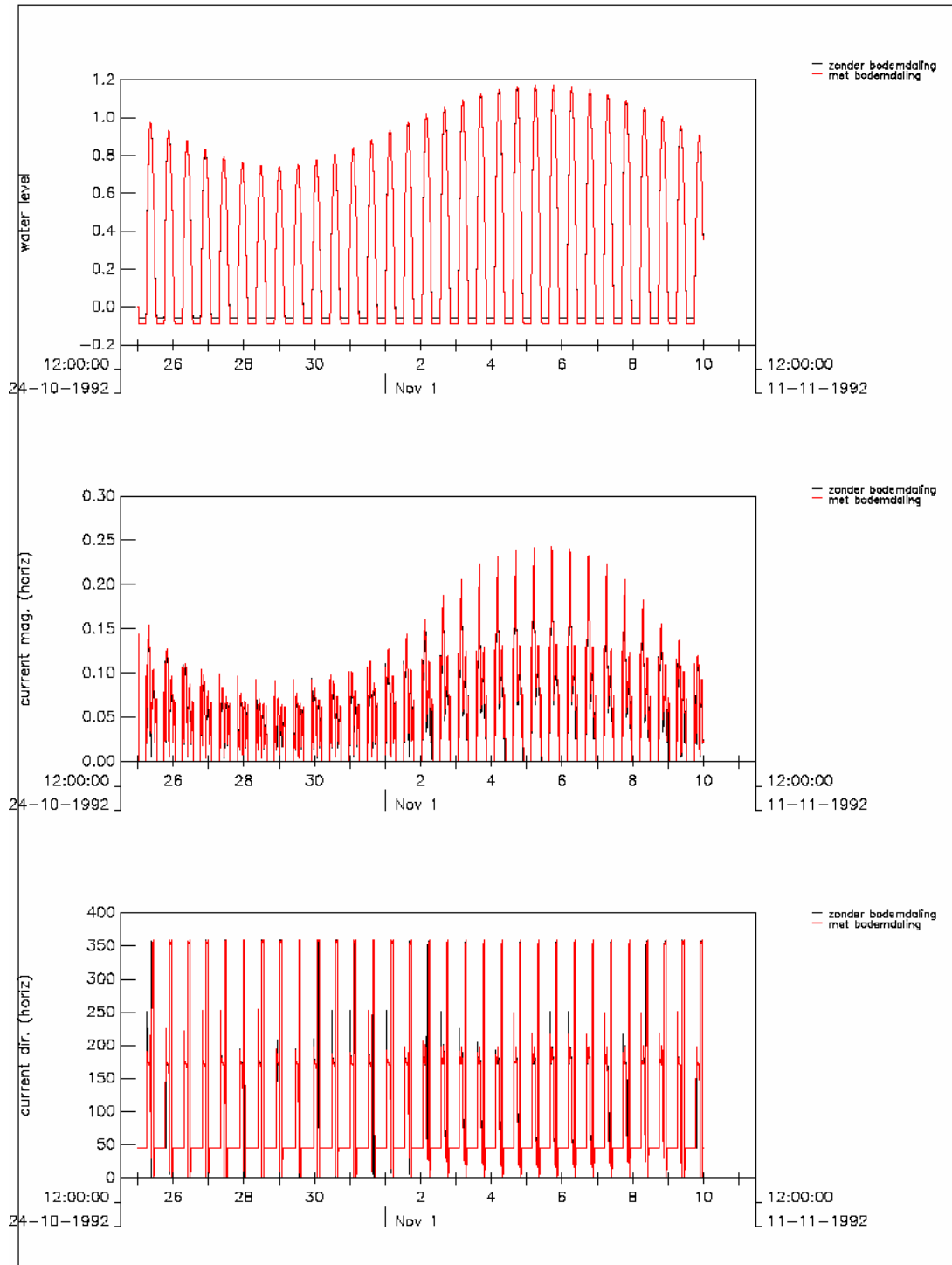


Figuur 4.9 Berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station M2 (Meetpaal)

Figuren 4.9 en 4.10 laten de resultaten zien op station M2 (Meetpaal), een station aan de rand van de Engelsmanplaat in de hoofdgeul van Zoutkamperlaag. Ook hier is er nauwelijks effect te zien van de bodemdaling. De stroomsnelheid is heel klein beetje hoger voor de situatie met bodemdaling.

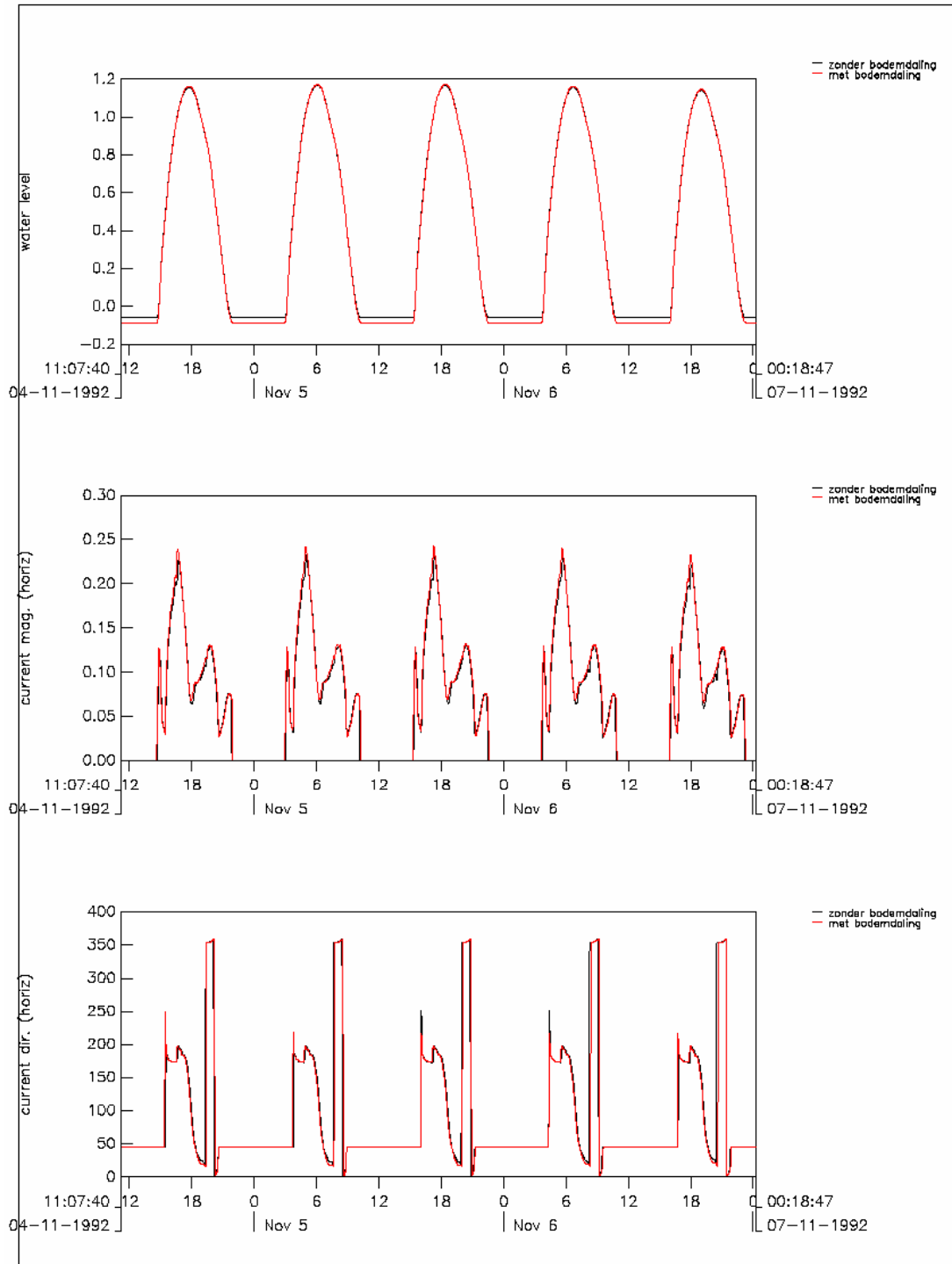


Figuur 4.10 Detail berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station M2 (Meetpaal)

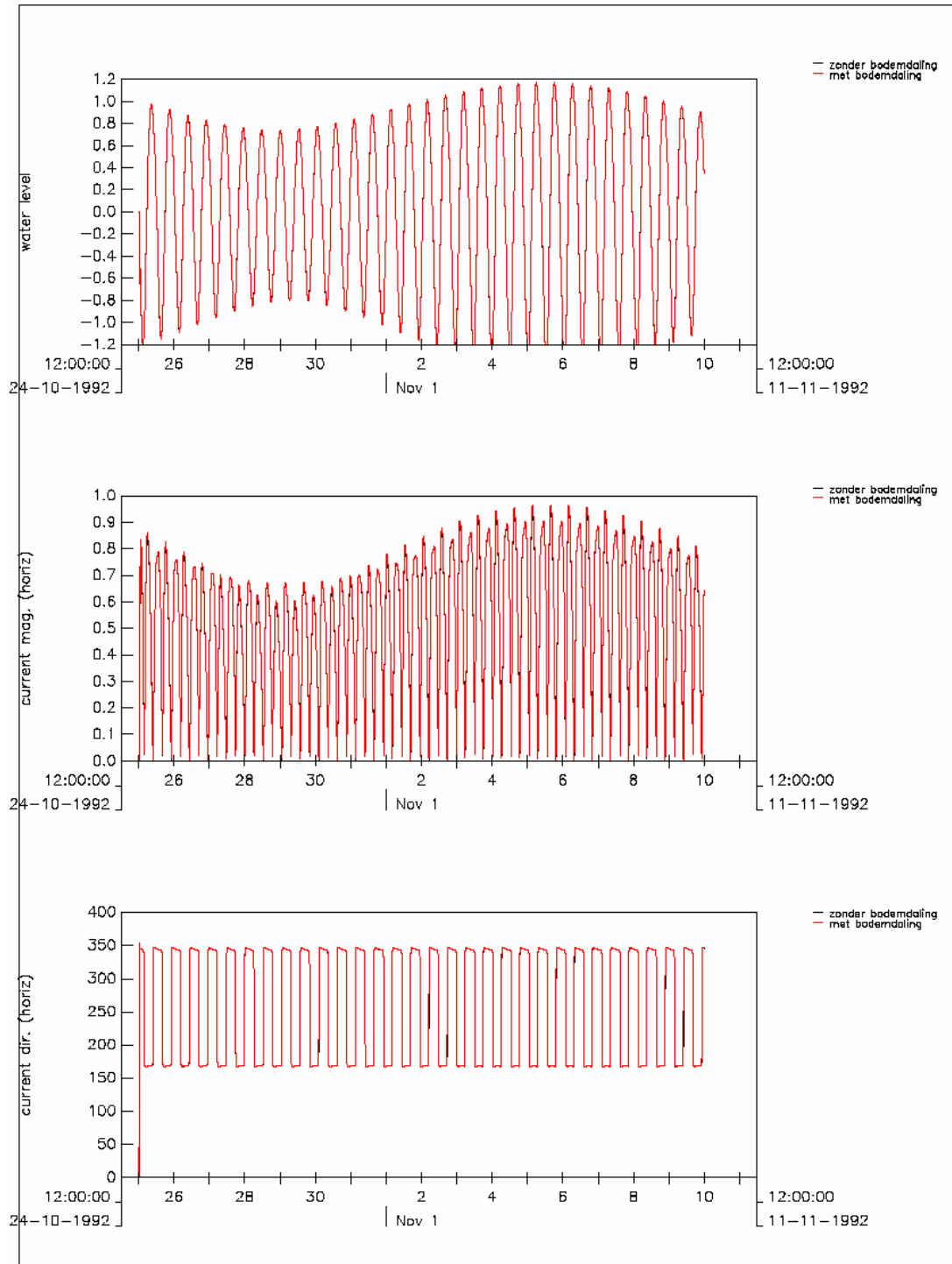


Figuur 4.11 Berekende waterstand, snelheidsgruotte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station O3 (Obs 1)

Figures 4.11 en 4.12 laten de resultaten zien op station O3 (Obs1), een station aan de oostkant op de Engelsmanplaat. Hier kan men zien dat op deze locatie er een bodemdaling optreedt, zodat de periode van droogval iets korter wordt (zie waterstandverloop op de bovenste panel). Verder is praktisch geen verschil te zien tussen de resultaten van de twee berekeningen.

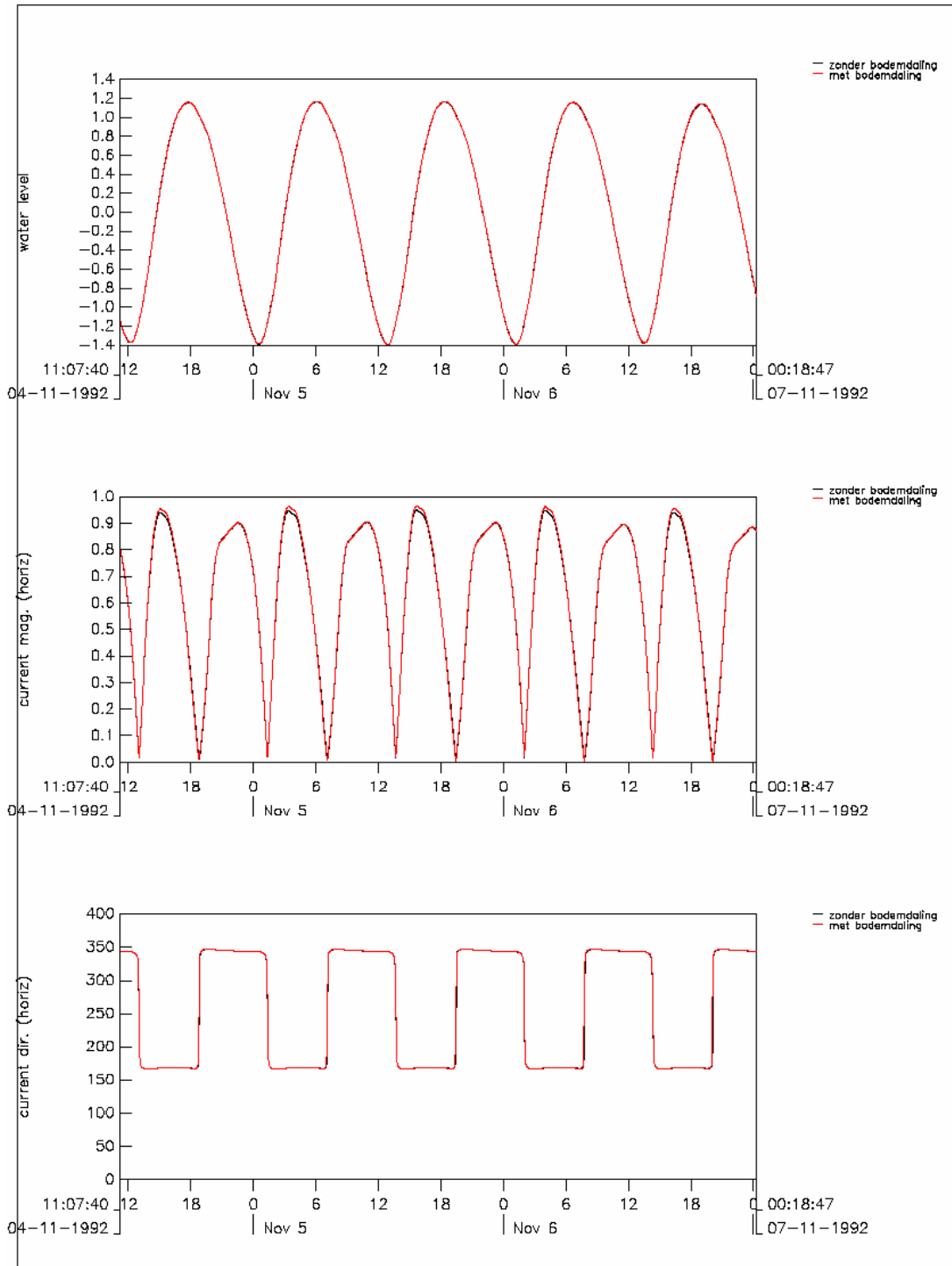


Figuur 4.12 Detail berekende waterstand, snelheidsgrootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station O3 (Obs 1)

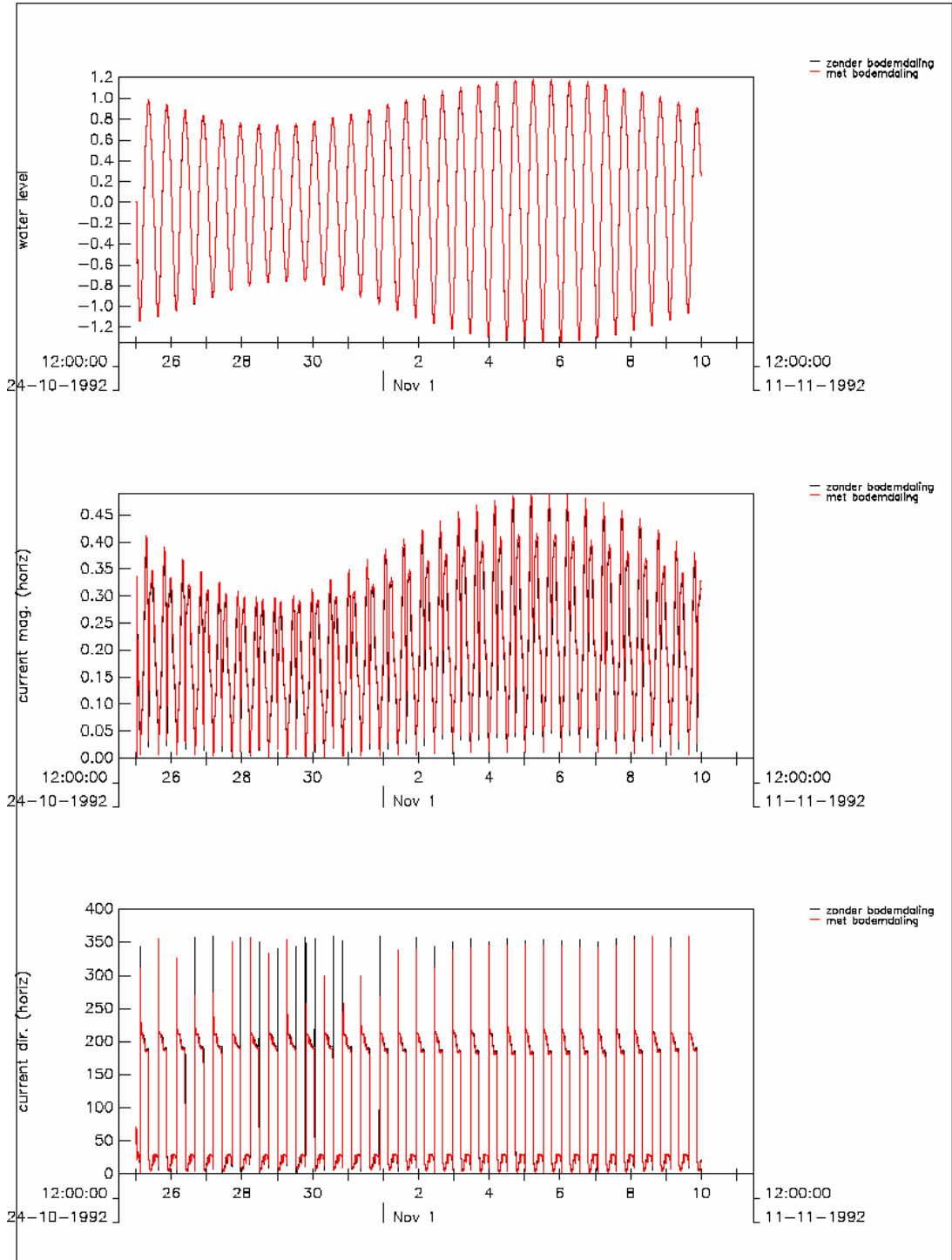


Figuur 4.13 Berekende waterstand, snelheidsgrootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station O4 (Obs2)

Figuren 4.13 en 4.14 laten de resultaten zien voor het station O4 (Obs 2), een station in de hoofdgeul van Zoutkamperlaag ten oost van de Engelsmanplaat. Het enige verschil tussen de twee berekeningen is een kleine verhoging van de stroomsnelheid, vooral tijdens vloed.

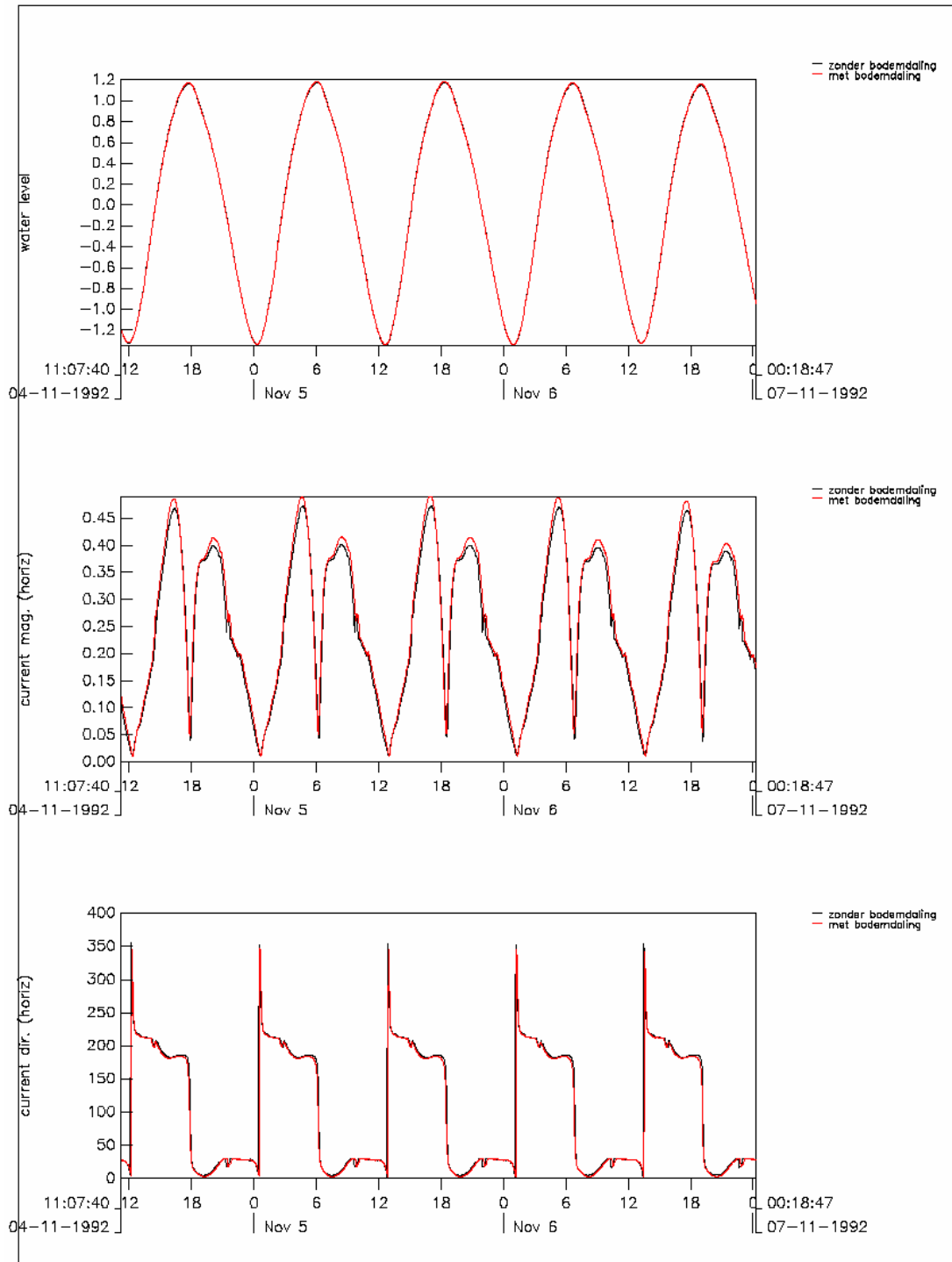


Figuur 4.14 Detail berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station O4 (Obs2)

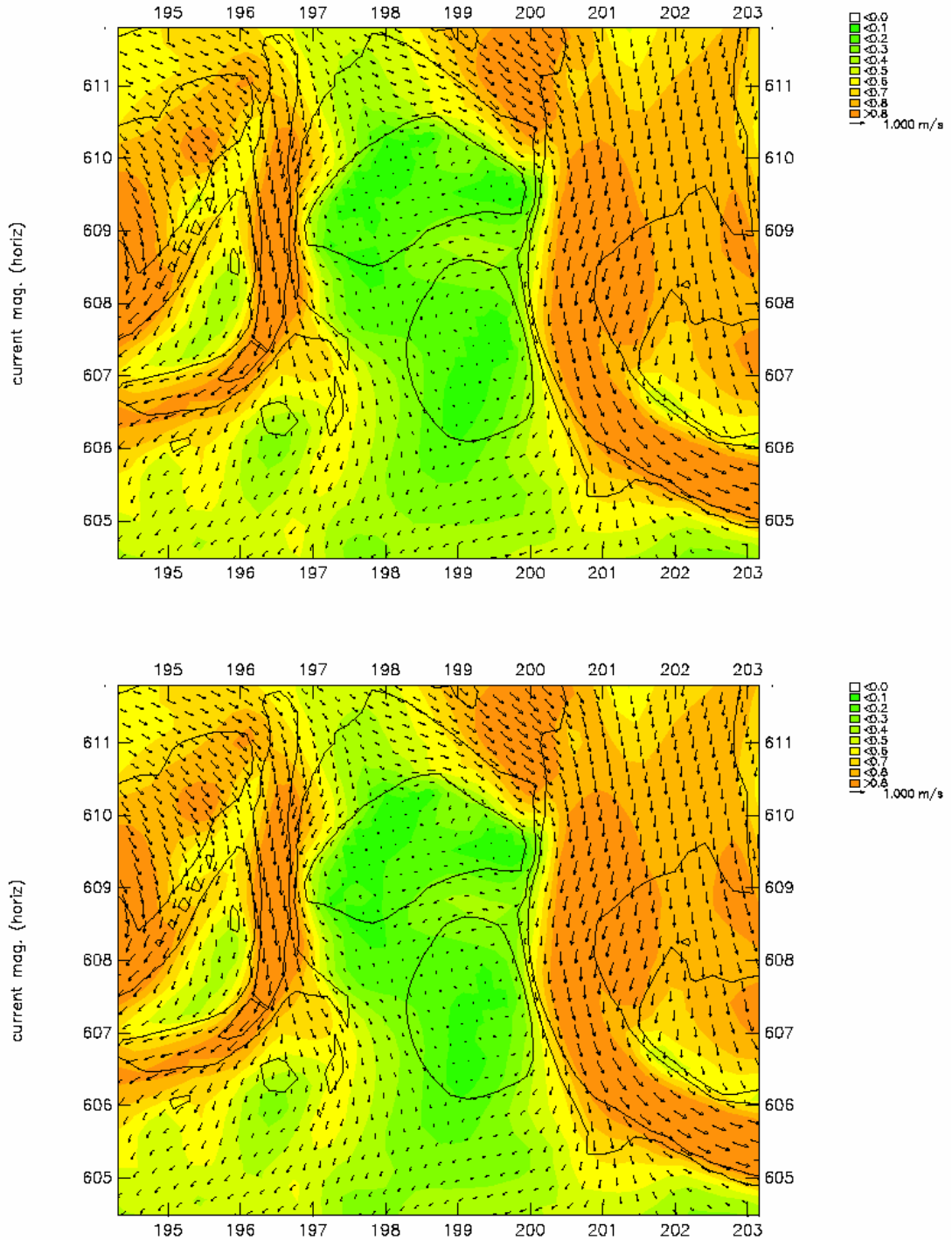


Figuur 4.15 Berekende waterstand, snelheidsgruotte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station P5 (Pinkegat)

Figuren 4.15 en 4.16 laten de resultaten zien voor het station P5 (Pinkegat), een station in een geul in het Pinkegat ten west van de Engelsmanplaat. Het enige verschil tussen de twee berekeningen is een verhoging van de stroomsnelheid, zowel tijdens vloed als tijdens eb. De verhoging is groter dan in de Zoutkamperlaag.



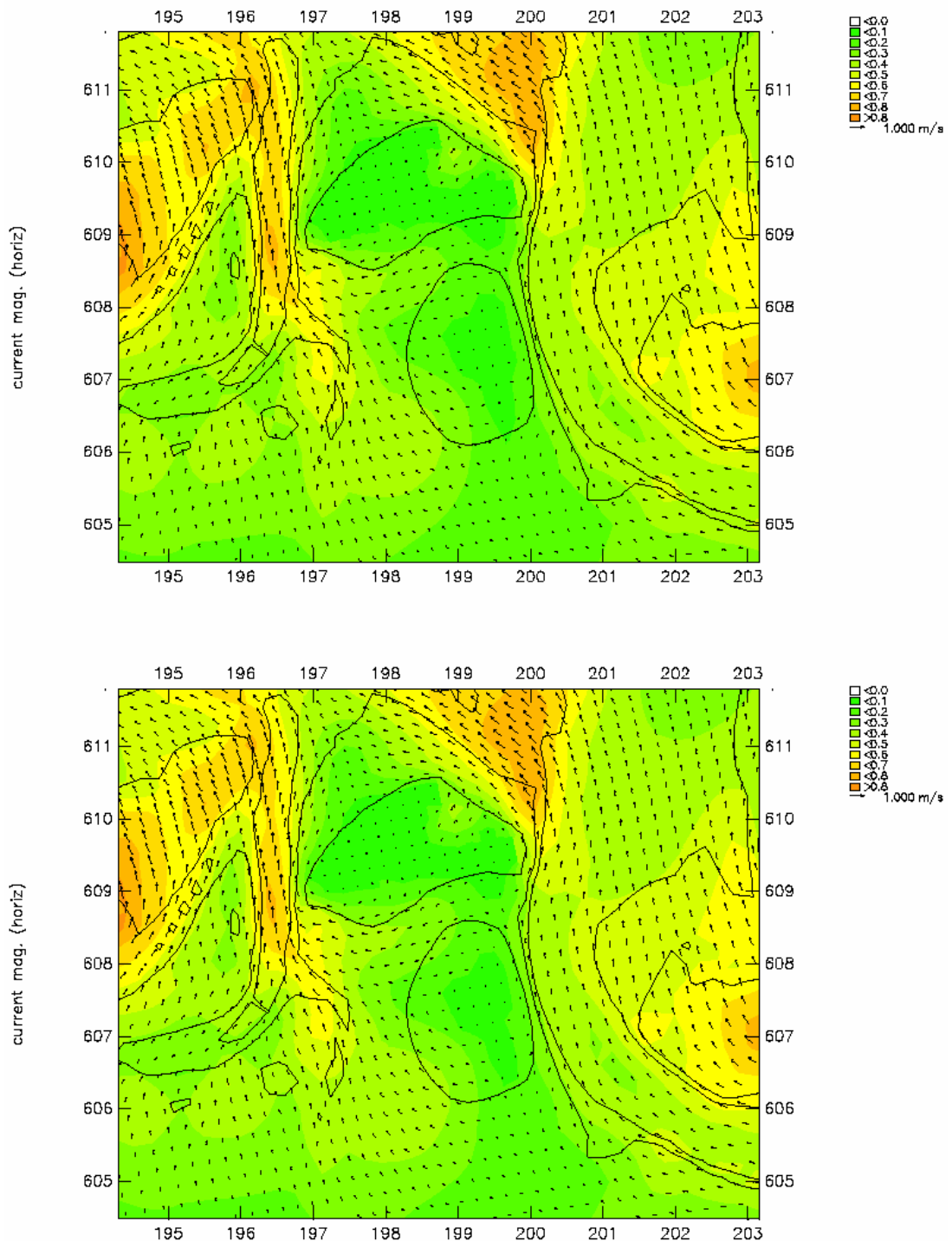
Figuur 4.16 Detail berekende waterstand, snelheids grootte en -richting, zonder en met bodemdaling, Station P5 (Pinkegat)



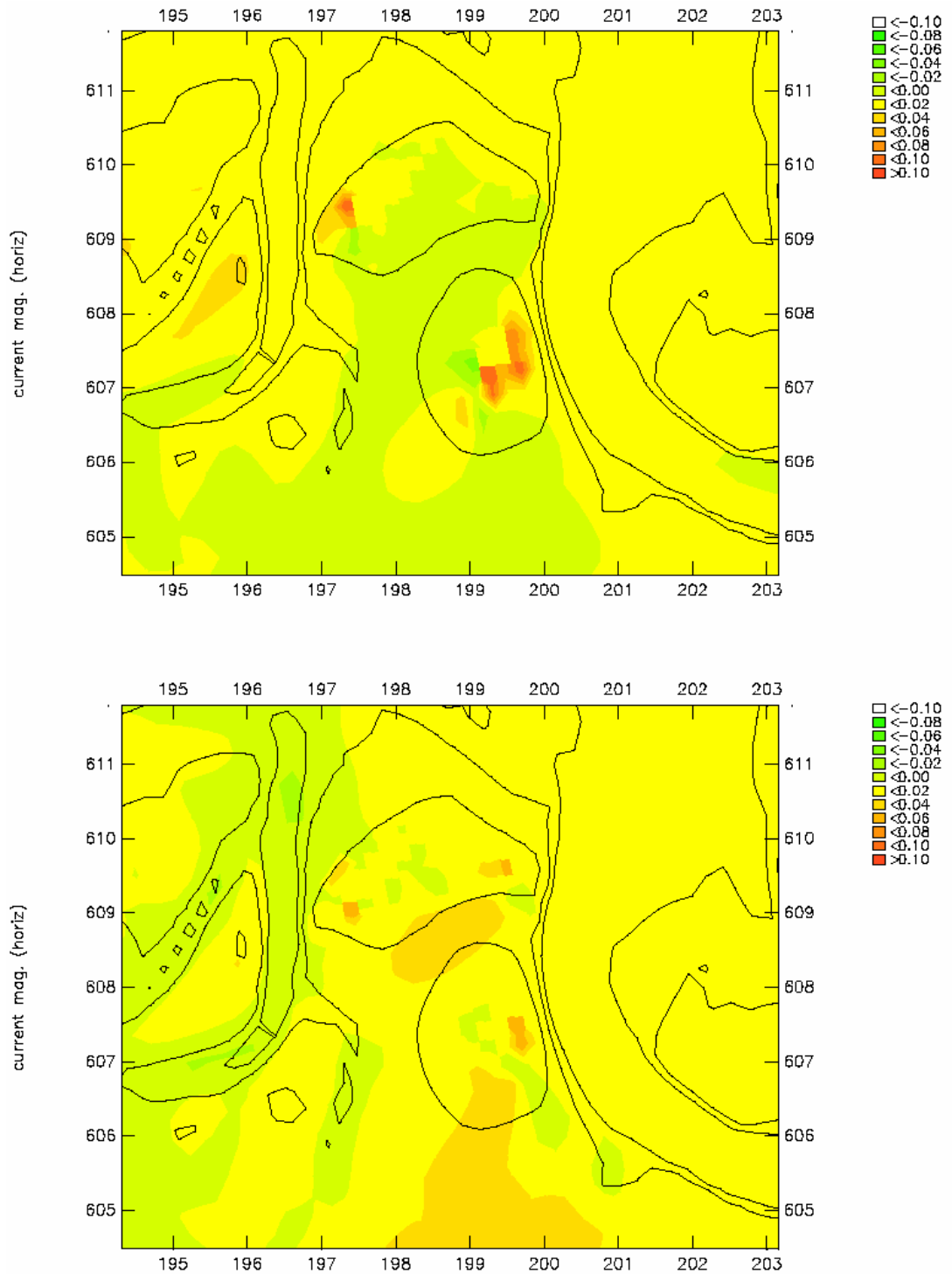
Figuur 4.17 Grootte en patroon van stroomsnelheid in het gebied rondom de Engelsmanplaat, tijdens vloed bij springtij. Boven zonder bodemdaling, onder met bodemdaling.

In Figuur 4.5, die de invloed van de bodemdaling op de grootte van de stroomsnelheid weergeeft, kan men niets zien op het Rif en de Engelsmanplaat. Dit komt doordat maximale eb- en vloedstroming rondom gemiddelde waterstand optreden. Daarom worden de stroomsnelheid rondom de Engelsmanplaat opnieuw bekeken, en dan wel op een moment dat de stroomsnelheid hier ongeveer het hoogst is. Figuur 4.17 geeft de vloedstroming weer en Figuur 4.18 de ebstroming. Het verschil van de grootte van de stroomsnelheid,

veroorzaakt door bodemdaling, is weergegeven in Figuur 4.19. Conform de conclusie eerder getrokken voor de andere gebieden, is het effect van de bodemdaling klein op zowel de patroon als de grootte van de stroomsnelheid. Dit geldt voor zowel eb als voor vloed.



Figuur 4.18 Grootte en patroon van stroomsnelheid in het gebied rondom de Engelsmanplaat, tijdens eb bij springtij. Boven zonder bodemdaling, onder met bodemdaling.



Figuur 4.19 Verskil van stroomsnelheid veroorzaakt door bodemdaling, boven vloed, onder eb.

4.2.4 Conclusies

Uit het onderzoek van de getijdenstroming met het Delft3D model zijn de volgende waarnemingen gedaan:

- De invloed van de bodemdaling op de waterstand is nihil.

- De bodemdaling veroorzaakt een vergroting van het debiet bij de keel van Pinkegat met ongeveer 3.4% en bij de keel van Zoutkamperlaag met 1.5%.
- De maximale stroomsnelheid wordt nauwelijks beïnvloed door de bodemdaling. De veranderingen is in het algemeen minder dan 0.04 m/s tegenover de ongestoorde waarde van orde 1 m/s.
- Het effect van de bodemdaling op het stromingsbeeld en op de grootte van de stroomsnelheid in het gebied rondom de Engelsmanplaat is minimaal.
- De bodemdaling versterkt de vloeddominantie.

Geïnterpreteerd naar de gevolgen van sedimenttransport en morfologie leiden deze constatering tot de volgende conclusies:

- Gezien de kleine veranderingen in de waterbeweging door de bodemdaling zal er geen verandering in de sedimenttransportprocessen zijn, die de het dynamische morfologische evenwicht van de zeegatsystemen kan bedreigen.
- De relatief kleine verandering van de stroomsnelheid kan niet leiden tot een merkbare verandering van de sedimentsamenstelling in het gebied.
- De versterkte vloeddominantie kan extra sedimentimport veroorzaken om de bodemdalingskuil op te vullen.
- Het lijkt onwaarschijnlijk dat de bodemdaling enig invloed heeft op de morfologische ontwikkelingen van de Engelsmanplaat en het Rif.

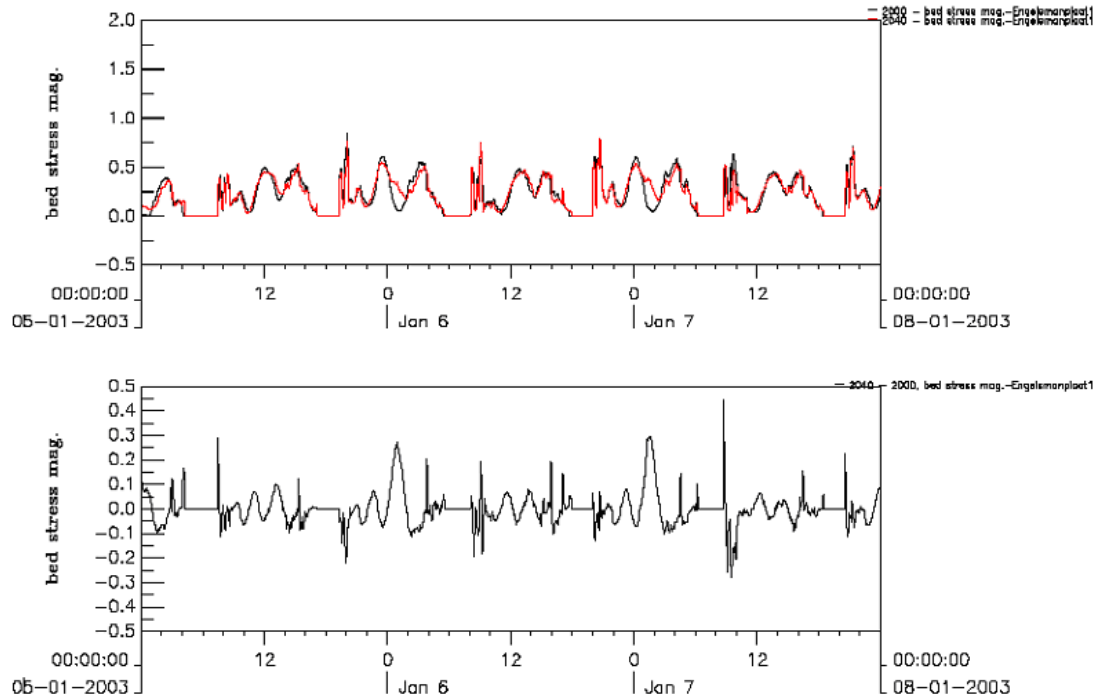
4.3 Invloed bodemdaling op golven en stroming

Niet alleen stroming, maar ook korte kolven hebben invloed op het sedimenttransport en de morfologische veranderingen. Dit geldt zeker voor de ondiepe gebieden zoals de Engelsmanplaat en het Rif. De modelberekeningen zoals geanalyseerd in de vorige paragraaf hebben alleen betrekking op getijdenstroming. Daarom worden er een paar aanvullende berekeningen uitgevoerd met zowel getij als golven. De berekeningen zijn uitgevoerd met dezelfde modelopzet als de berekeningen voor de getijdenstroming alleen. Alleen wordt nu de korte golven meegenomen. Als randvoorwaarden voor de korte golven worden aan de zeerand de volgende golfconditie opgelegd:

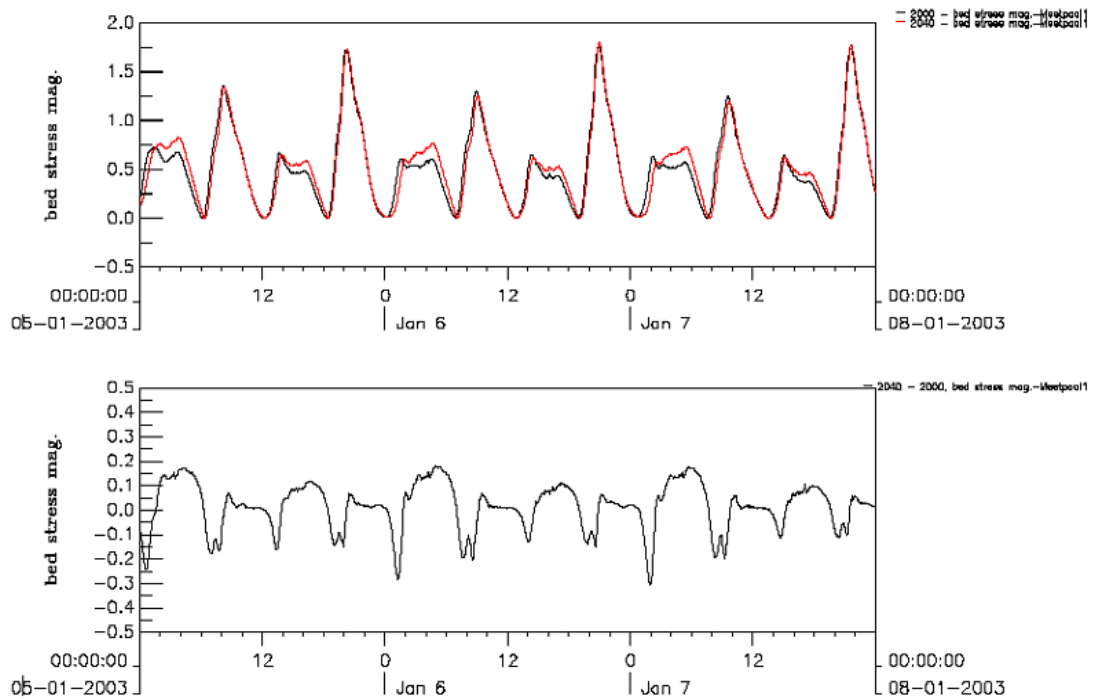
Significante golfhoogte	2.9 m
Golfperiode	6.4 sec.
Golfrichting:	315 N (noordwest)

Verder gedetailleerde beschrijving van de opzet van het model is gegeven door Kluyver (2006), zie ook Van Koningsveld e.a. (2007).

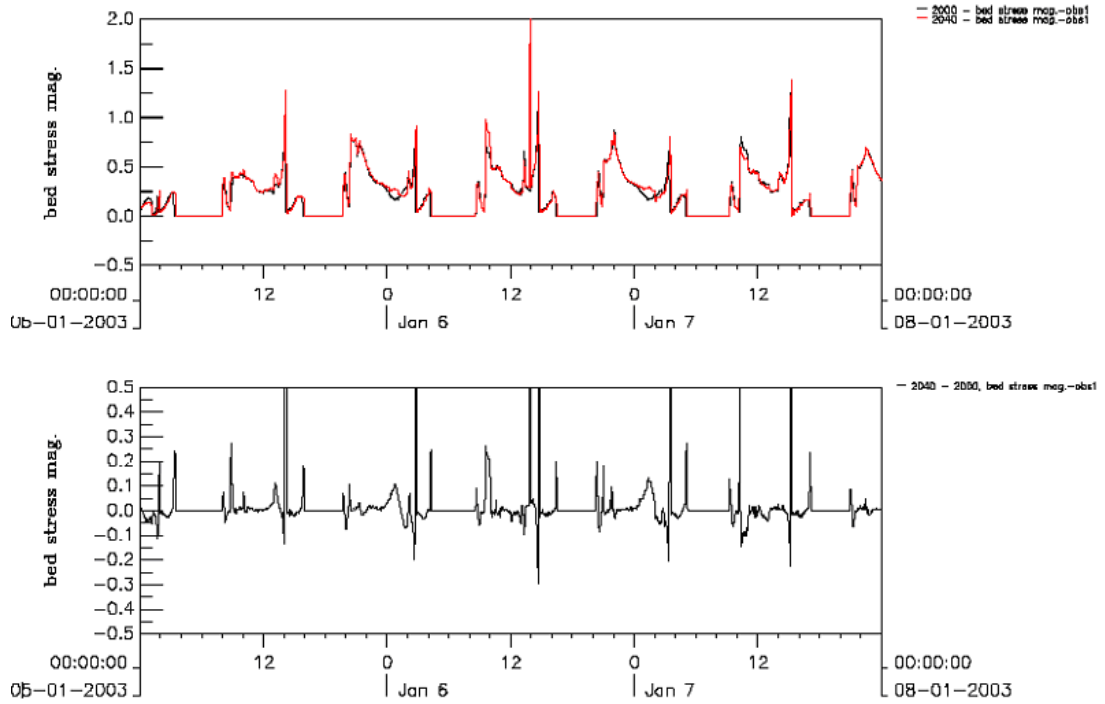
Net als bij de stromingsberekeningen worden nu ook een berekening voor de bodem van 2000 en een berekening voor de 2000 bodem plus de bodemdaling in 2040 uitgevoerd. Verschil tussen de resultaten uit de twee berekeningen is een (overdreven) indicatie van het effect van de bodemdaling.



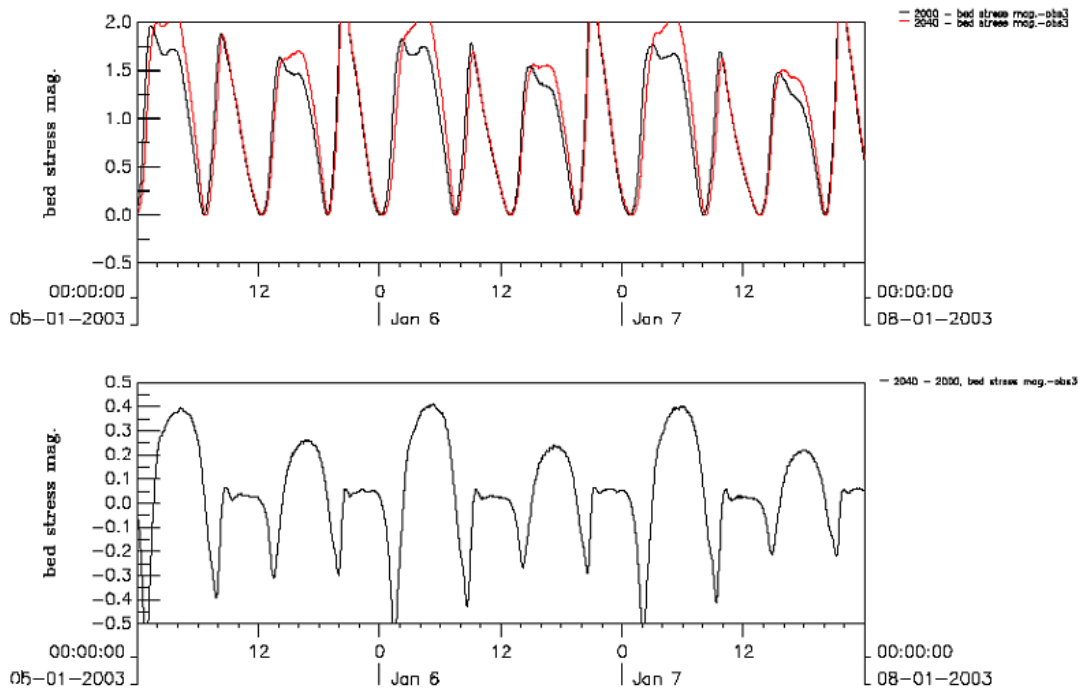
Figuur 4.20 Berekende bodemschuifspanning (boven) en het effect van de bodemdaling erop (onder), station E1



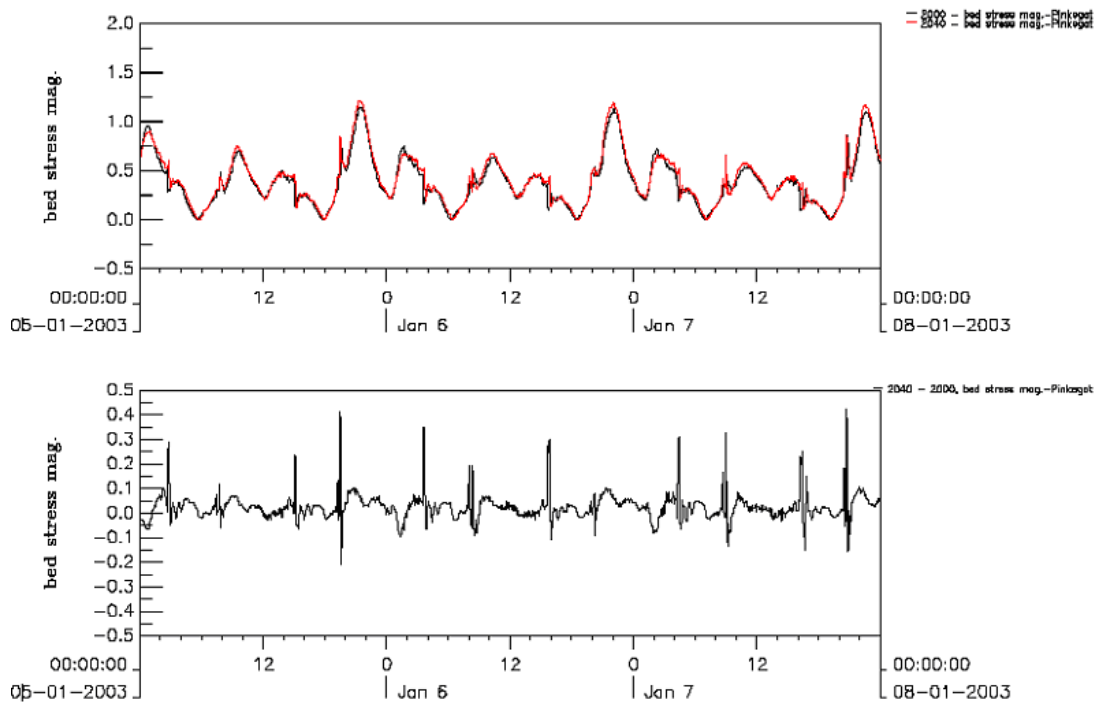
Figuur 4.21 Berekende bodemschuifspanning (boven) en het effect van de bodemdaling erop (onder), station M2



Figuur 4.22 Berekende bodemschuifspanning (boven) en het effect van de bodemdaling erop (onder), station O3



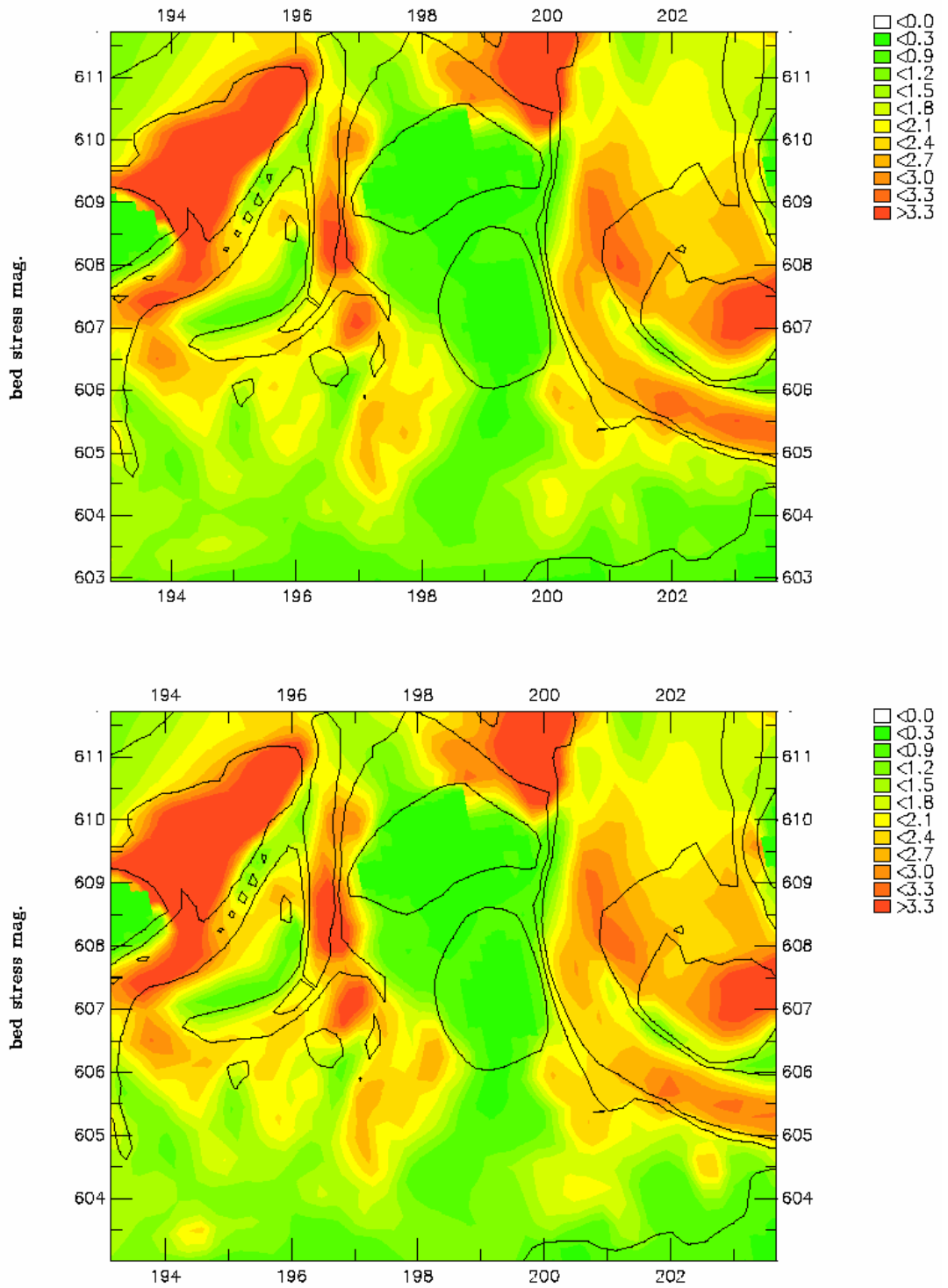
Figuur 4.23 Berekende bodemschuifspanning (boven) en het effect van de bodemdaling erop (onder), station O4



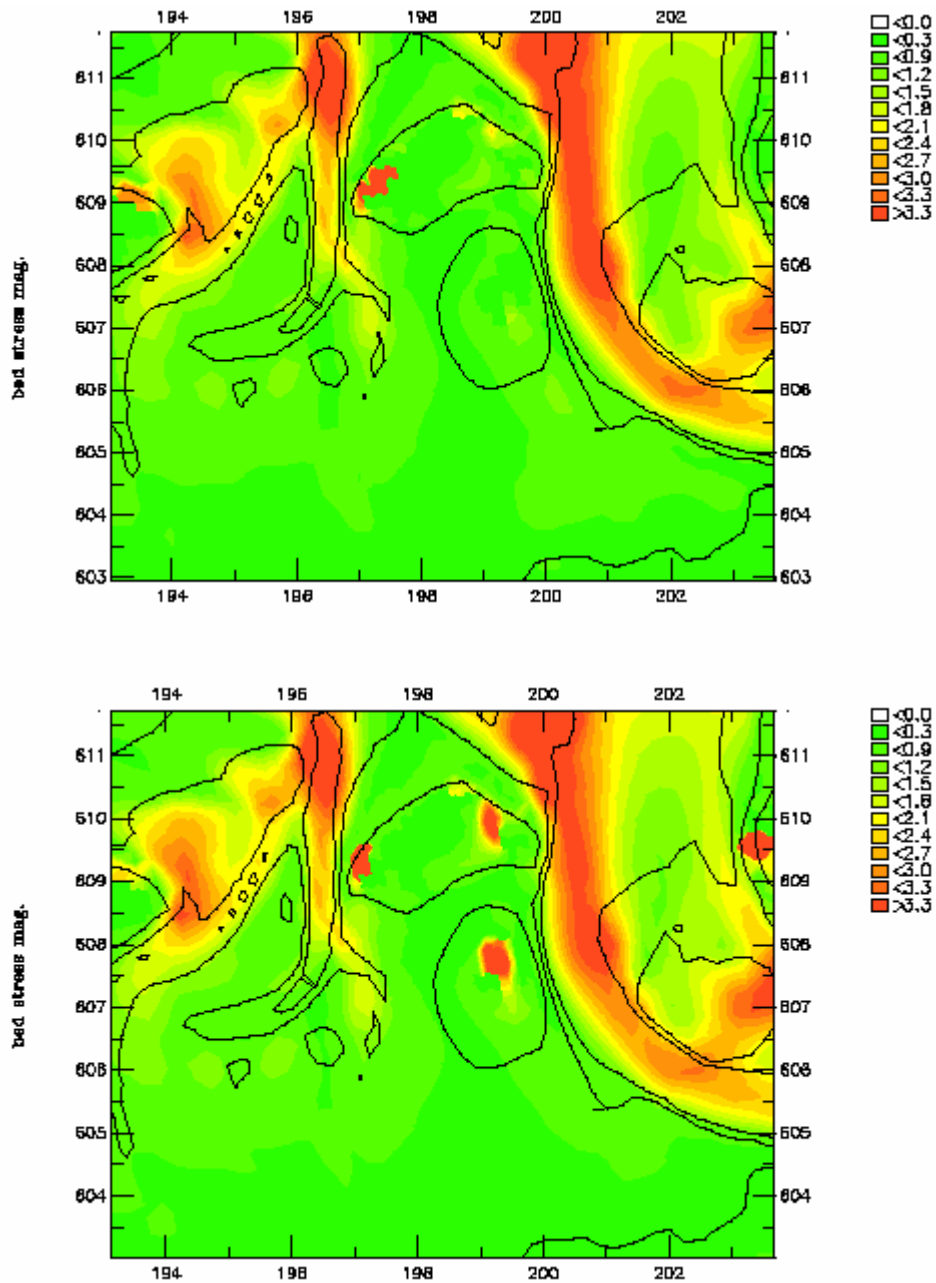
Figuur 4.24 Berekende bodemschuifspanning (boven) en het effect van de bodemdaling erop (onder), station P5

In Figuren 4.20 t/m 4.24 zijn de berekende bodemschuifspanningen, t.g.v. stroming gecombineerd met korte golven, op de 5 stations (Figuur 4.6), uit beiden berekeningen weergegeven. In elke figuur is ook het verschil tussen de resultaten van de twee berekeningen, met en zonder bodemdaling, weergegeven. In alle stations zijn de verschillen tussen de twee berekeningen klein. In de stations met hogere bodemligging (E1 en O3) is het verschil relatief groter dan in de dieper gelegen stations (M2, O4, P5). Merk wel op dat de grote verschillen treedt vooral op bij de overgangen van droog en nat worden van het station. Dit is in feite het gevolg dat in de berekening met bodemdaling een punt net iets later droog wordt of net iets eerder nat wordt. De overall conclusie blijft dat de bodemdaling alleen kleine invloed hebben op hydrodynamische processen op en rondom de Engelsmanplaat.

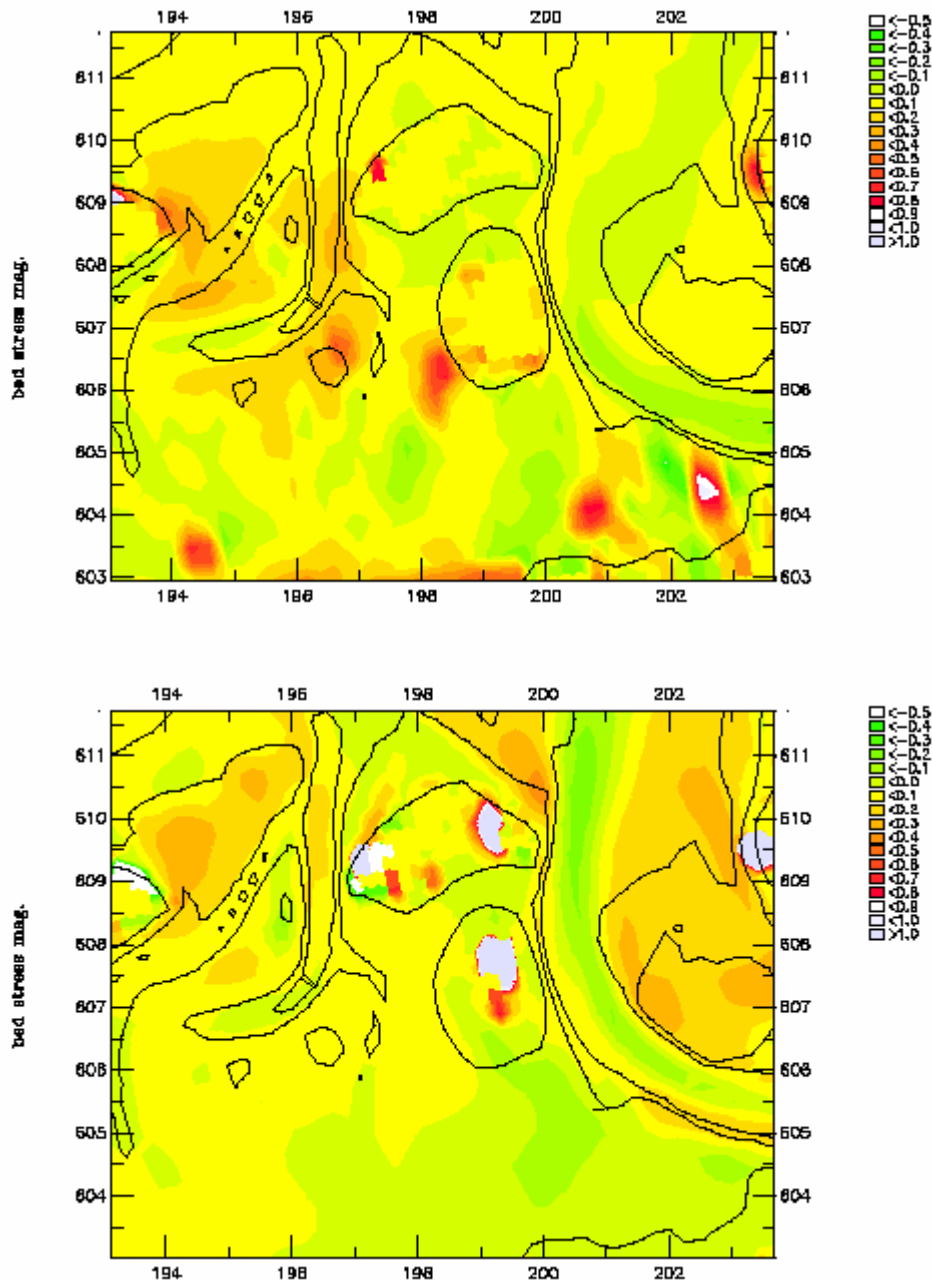
In Figuren 4.25 en 4.26 is de berekende bodemschuifspanning rondom de Engelsmanplaat weergegeven. Figuur 4.25 geeft een moment opname tijdens vloed (rondom maximale waarde op de plaat) en Figuur 4.26 voor een moment tijdens eb. In de figuren zijn de resultaten van de beide berekeningen gepresenteerd. In Figuur 4.27 is het effect van de bodemdaling gepresenteerd door de verschillen tussen de resultaten van de twee berekeningen weer te geven. De verschillen tussen de twee berekeningen zijn klein, behalve op een aantal punten op de Engelsmanplaat en op het Rif. Het is goed te zien dat dit te maken heeft met gebieden die in de ene berekening (zonder bodemdaling) nog droog staat en in de andere berekening (met bodemdaling) nat zijn. Dit is te zien door het feit dat deze punten zitten op een kring ongeveer parallel aan de contour van de plaat. Ook de conclusies uit deze figuren blijven dat de effecten van de bodemdaling niet significant zijn. Opgemerkt wordt verder de effecten van de bodemdaling is overdreven in de huidige beschouwing, omdat in werkelijkheid er wel herstel door sedimentatie optreedt.



Figuur 4.25 Berekende bodemschuifspanning bij vloed, boven zonder en onder met bodemdaling



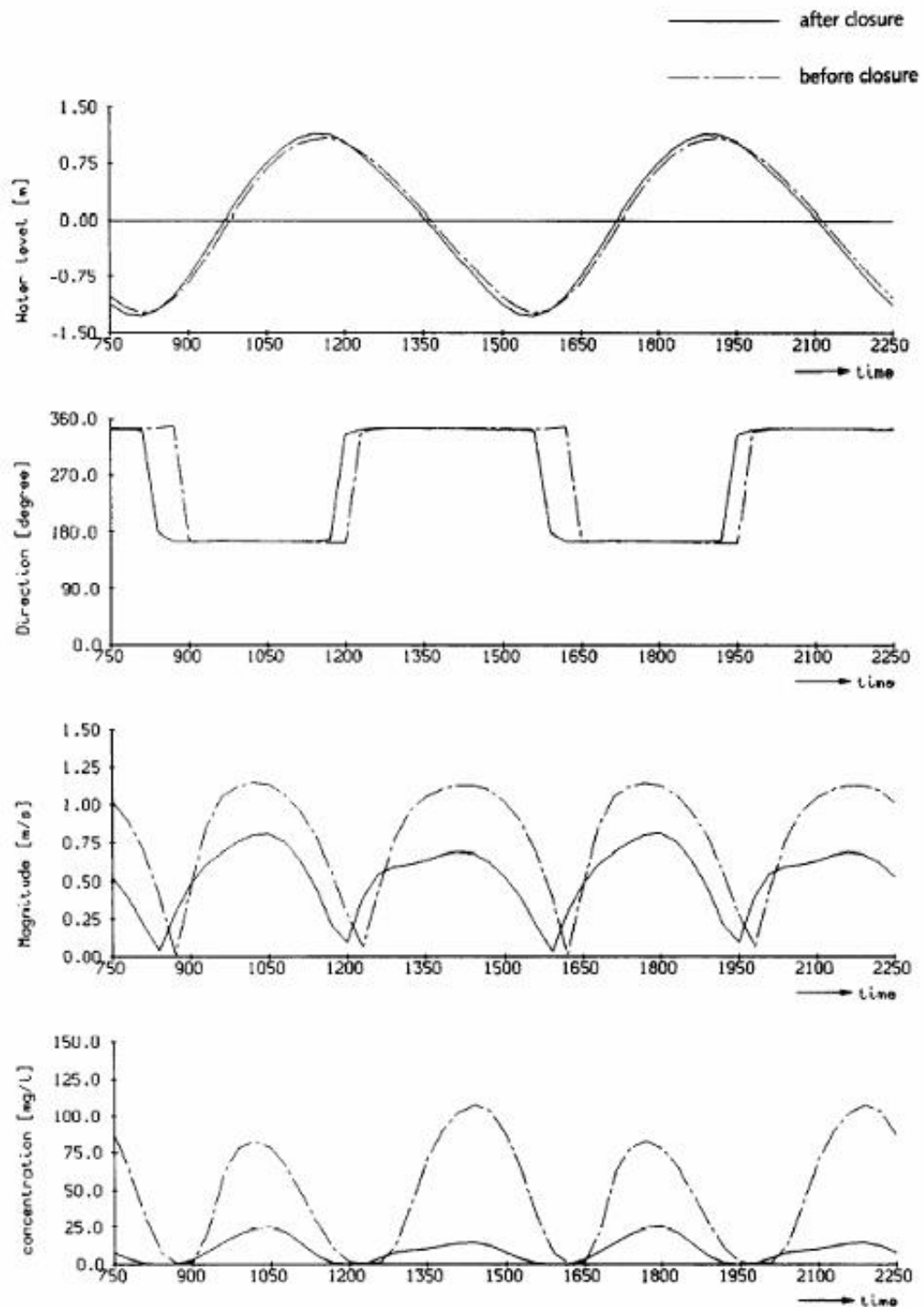
Figuur 4.26 Berekende bodemschuifspanning bij eb, boven zonder en onder met bodemdaling



Figuur 4.27 Verschillen van bodemschuifspanningen uit de twee berekeningen, boven vloed, onder eb

4.4 Invloed afsluiting Lauwerszee

Naast de bodemdaling door gaswinning is een andere belangrijke menselijke ingreep in het recente verleden in het Friesche Zeegat is de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Door deze afsluiting is de vloedkom van de Zoutkamperlaag aanzienlijk verkleind, met als gevolg dat de komberging van Zoutkamperlaag met orde een derde is afgenomen. Het is belangrijk om de effecten ook van deze ingreep te analyseren naast die van de bodemdaling. De effecten van de afsluiting is eerder al uitgebreid bestudeerd in bijvoorbeeld de Kustgenese studie, hoewel men toen niet specifiek naar de invloed op de ontwikkeling van de Engelsmanplaat heeft bekeken.



Figuur 4.28 Berekende waterstand, stroomsnelheid en sediment concentratie in de keel van de Zoutkamperlaag voor de situatie vóór en na de afsluiting van de Lauwerszee (na Wang e.a., 1995)

Figuur 4.28 heeft betrekking op eerder gepresenteerde resultaten van berekende waterstand, stroomsnelheid en zandconcentratie op een station in de keel van de Zoutkamperlaag (Wang e.a., 1995). De berekeningen waren uitgevoerd met de bodem voor de situatie net vóór en net na de afsluiting. Men kan zien dat de afsluiting van de Lauwerszee een merkbaar effect op de waterstand en een groot effect op de stroomsnelheid en de sedimentconcentratie in de

Zoutkamperlaag heeft. De effecten zijn veel groter dan die van de bodemdaling zoals in de vorige paragrafen zijn beschouwd. Conform de afname van de komberging is de stroomsnelheid in de geul met orde een derde afgenomen. Verder is het interessant om te zien uit de figuur voor de stroomrichting dat door de afsluiting de vloedperiode korter en de ebperiode langer is geworden. Dit heeft als gevolg dat de getijsymmetrie in dit punt omgedraaid is van ebdominant naar vloeddominant, wat duidelijkst te zien is in de figuur voor de sedimentconcentratie.

De resultaten van deze berekeningen zijn niet meer digitaal beschikbaar, zodat een verdere analyse nu niet mee kan worden uitgevoerd. Maar de resultaten getoond in Figuur 4.28 geven al duidelijk aan dat de effecten veel groter zijn dan die van de bodemdaling zoals in de vorige paragrafen zijn beschouwd. Het belangrijkste is een verzwakking van de getijdenstroming in de geulen wat consistent is met de geconstateerde zandhonger in de vloedkom van de Zoutkamperlaag (zie Hoofdstuk 3).

5 Integrerende beschouwing

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de voorgaande drie hoofdstukken integrerende beschouwd om tot antwoorden te komen van de gestelde onderzoeksvragen. Eerst wordt op basis van de waarnemingen geprobeerd de gestelde vragen te beantwoorden. Daaruit zal blijken dat het onwaarschijnlijk is dat de bodemdaling de waargenomen erosie op de Engelsmanplaat heeft veroorzaakt. Vervolgens wordt een beschouwing gedaan aan de hand van fysische processen. Daaruit kan ook worden geconcludeerd wat waarschijnlijk wel de oorzaken zijn van de waargenomen ontwikkelingen in het gebied rondom de Engelsmanplaat.

5.2 Beschouwing vanuit waarnemingen

Allereerst kan men de vragen stellen of de verlaging van de Engelsmanplaat een direct gevolg is van de bodemdaling. Deze vraag kan met zekerheid en met nee worden beantwoord. De verlaging van de Engelsmanplaat is niet een *direct* gevolg van de bodemdaling omdat op de locatie van de plaat zelf nog nauwelijks bodemdaling is opgetreden t.g.v. de gaswinning op Ameland. Zelfs volgens de eindprognose in 2040, wanneer de bodemdaling t.g.v. de gaswinning uit alle velden in de buurt is opgetreden, zal de bodemdaling op de Engelsmanplaat tussen 2 en 6 cm zijn (zie Figuur 5.1). Verder uitgaand dat het vogelhuisje op de Engelsmanplaat niet dieper gefundeerd is dan de bron van de bodemdaling dan bevestigt het verhaal over de trap van dat vogelhuisje juist dat de waargenomen verlaging geen bodemdaling is, maar erosie.



Figuur 5.1 Totale bodemdaling in 2040

Vervolgens ontstaat dan de vraag of de erosie op de Engelsmanplaat door de bodemdaling is veroorzaakt en/of versterkt. De waarnemingen (zie hoofdstuk 2) geven aan dat de verlaging van de Engelsmanplaat is begonnen in 1970. De gaswinning op Ameland begon in 1986 en de bodemdaling als gevolg daarvan kan dus niet eerder zijn begonnen. De chronologische volgorde van feitelijke gebeurtenissen geeft dus aan dat de bodemdaling de erosie, die tot de verlaging van de plaat heeft geleid, niet heeft geïnitieerd. Er kan dus met zekerheid worden geconcludeerd dat de bodemdaling de verlaging van de Engelsmanplaat niet heeft veroorzaakt.

Of de bodemdaling de erosie die tot de verlaging van de Engelsmanplaat heeft versterkt is minder gemakkelijk met zekerheid te beantwoorden. Het staat vast dat bodemdaling zandhonger in het Pinkegat, dus de omgeving van de Engelsmanplaat, heeft veroorzaakt (zie hoofdstuk 3). De bodemdaling wordt hersteld door sedimentatie, waarvoor sediment dus nodig is. Data analyse geeft echter aan dat de totale hoeveelheid sediment in het gebied rondom de Engelsmanplaat (Polygoon F in Figuur 2.2) in de afgelopen periode niet is afgenomen. Het is vrijwel constant gebleven sinds de jaren 70 vorige eeuw. Dit suggereert dat het geërodeerde sediment op de Engelsmanplaat in de directe omgeving is afgezet, dus niet naar gebied met bodemdaling is gegaan. Data analyse geeft aan dat de buitendelta's, vooral die van de Zoutkamperlaag de belangrijkste bron van sediment is voor de compensatie van sedimenthonger in de vloedkommen. Binnen het kader van de monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost is de ontwikkeling van de platen in het Pinkegat gevolgd door op verschillende locaties de verandering van de plaathoogten te meten. Tot zover is de conclusie dat de bodemdaling geen verlagende effecten op de platen elders (dan de Engelsmanplaat) in de vloedkom heeft laten zien, zelfs niet op locaties waar duidelijk bodemdaling optreedt (Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005, zie ook Wang e.a., 2006). Verder is er ook geen versnelde erosie van de Engelsmanplaat sinds de bodemdaling geconstateerd. Het is dus niet waarschijnlijk dat dit de erosie op de Engelsmanplaat heeft versterkt.

Om meer zekerheid te verkrijgen over het verband tussen de bodemdaling en de ontwikkeling van de Engelsmanplaat te verkrijgen, stellen wij ons de volgende vragen:

1. Wat is de bijzonderheid van de Engelsmanplaat t.o.v. de andere intergetijdegebieden in Pinkegat?
2. Is de waargenomen ontwikkeling van de Engelsmanplaat in de afgelopen periode afwijkend van het normale gedrag van deze plaat? Zo ja, in welke opzicht?

Antwoorden op deze vragen geven belangrijke aanwijzingen in welke richting de verklaring van de waargenomen ontwikkelingen op de Engelsmanplaat moet worden gezocht. Dit is vooral van belang voor de procesbeschouwing in de volgende paragraaf.

Vraag 1 is simpel te beantwoorden. De Engelsmanplaat ligt tussen de twee vloedkommen Pinkegat en Zoutkamperlaag in. Dat is dan ook meteen de bijzonderheid t.o.v. de andere platen in het Pinkegat. De bijzondere ligging van de Engelsmanplaat houdt in dat in tegenstelling tot de andere platen in het Pinkegat, de ontwikkeling van deze plaat niet alleen door het Pinkegat maar ook door de Zoutkamperlaag wordt beïnvloed. Een deel van deze plaat wordt overstroomd en geledigd vanuit het Pinkegat en het andere deel vanuit de Zoutkamperlaag. Op basis van de bodemliggingskaarten in de verschillende jaren is geconstateerd dat het wantij achter de Engelsmanplaat, die de grens tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag vormt, sinds 1970 naar het west is geschoven (zie hoofdstuk 2). Dit

geeft aan dat de invloed van de Zoutkamperlaag op de Engelsmanplaat sindsdien in de tijd relatief is toegenomen. Bij het zoeken naar de oorzaak van de opgetreden ontwikkelingen van de Engelsmanplaat moet men dus niet alleen kijken naar de gebeurtenissen in het Pinkegat maar ook vooral kijken naar veranderingen in de Zoutkamperlaag.

Voor het antwoord op vraag 2 moet vooral gezocht worden in de beschrijvingen van de historische ontwikkelingen van het gebied in de literatuur. Uit het literatuuronderzoek (hoofdstuk 2) is duidelijk gebleken dat de Engelsmanplaat samen met de zandbank ten noorden ervan (nu het Rif) en de kortsluitgeul er tussen (nu Smeriggat) een min of meer cyclisch gedrag vertoont (Oost,1995). De Engelsmanplaat vergroot en verhoogt elk keer als de kortsluitgeul verdwijnt en de zandbank met de plaat aansluit. Daarna ontstaat er een nieuwe zandplaat en een nieuwe kortsluitgeul. Dan volgt er een periode waarin er erosie op de Engelsmanplaat optreedt tot de volgende aansluiting van de zandbank. Op basis hiervan concludeerde Oost (1995) dat de waargenomen erosie op zich normaal is gezien de huidige status binnen de cyclus: de Engelsmanplaat gescheiden van het Rif door het Smeriggat. Oost (1995) voorspelde ook dat het Rif binnen korte termijn aan de Engelsmanplaat zou aansluiten, wat tot heden toe nog niet is uitgekomen. Hieruit kunnen wij concluderen dat een mogelijk afwijkingen t.o.v. het normale cyclus gedrag is dat de afsluiting van het Smeriggat, ofwel de aansluiting het Rif aan de Engelsmanplaat is vertraagd. Een andere mogelijke afwijking kan zijn dat de erosie / verlaging op de Engelsmanplaat sterker is dan normaal, hoewel er geen vergelijkingsmateriaal voor hand is.

Verder wordt opgemerkt dat ook de hoofdgeulen van het Pinkegat een min of meer cyclische ontwikkeling vertoont. Een geconstateerde afwijking t.o.v. deze cyclische ontwikkeling volgens Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (2005) is dat de aanval op de Hon door het Pinkegat eerder lijkt te zijn begonnen. Men kon niet uitsluiten dat de bodemdaling hierop invloed heeft gehad.

5.3 Beschouwing vanuit fysische processen

De resultaten van zowel de eerder uitgevoerde modelberekeningen als de aanvullende modelberekeningen geven aan dat de bodemdaling geen significante invloed heeft op de hydrodynamische processen (zie hoofdstuk 4). De afsluiting van de Lauwerszee heeft relatief veel meer invloed gehad op de fysische processen. Dit geeft al de aanwijzing dat de oorzaak van de ontwikkelingen op de Engelsmanplaat eerder door de Afsluiting van de Lauwerszee dan door de bodemdaling is veroorzaakt.

In vorige paragraaf is geconcludeerd dat als er sprake is van afwijking van normaal cyclisch gedrag van het gebied rondom de Engelsmanplaat dan is het de vertraagde afsluiting van het Smeriggat en versterkte erosie op de Engelsmanplaat. Daarom is het van belang te kijken welke fysische processen de ontwikkelingen van zowel de platen als de geulen beïnvloeden en de gevolgen van de twee menselijke ingrepen in het gebied, gaswinning en afsluiting Lauwerszee, met elkaar te vergelijken en na te gaan in hoeverre de relevante processen hierdoor worden beïnvloed.

Morfologische ontwikkeling van een plaat binnen een getijdenbekken wordt bepaald door de geul-plaat interactie. Algemeen inzicht in deze interactie is dat getijdenstroming in de geulen de plaat opbouwt en golven op de plaat de plaat afbreekt. Platen verhogen zich

tijdens rustig weer omstandigheden doordat de getijdenstroming vanuit de geulen sediment naar de platen transporteert. Bij stormen verlagen platen zich door de erosie van de gecombineerde werking van stroming en golven. De evenwichtshoogte van de plaat wordt bereikt als deze twee forceringen met elkaar in balans zijn. Wanneer dit evenwicht wordt verstoord treden er verandering van de plaathoogte op. Een bekend voorbeeld van zo een verstoring is opgetreden in de Oosterschelde na de bouw van de stormvloedkering. De bouw van de kering en van de compartimenteringsdammen (voor het behoud van getijverschil) heeft tot gevolg dat het getijvolume aanzienlijk is afgenomen en de stroomsnelheid in de geulen significant is afgenomen. Met andere woorden, er is zandhonger in de geulen ontstaan. Het gevolg voor de platen in de Oosterschelde is erosie die tot aanzienlijke verlaging heeft geleid (De Bok, 2001, Van der Hoeven, 2006, Mulder en Louters, 1994). Als wij in dit verband de twee menselijke ingrepen met elkaar vergelijken dan krijgen wij een beeld zoals is geschetst in de volgende tabel. Het is dus duidelijk de afsluiting van de Lauwerszee wel waarschijnlijk en de bodemdaling niet de erosie op de Engelsmanplaat heeft versterkt.

Tabel 5.1 Effecten van de ingrepen op getijdenstroming

Effect afsluiting Lauwerszee	Effect bodemdaling
<ul style="list-style-type: none"> • Verschuiving wantij → groter deel van de Engelsmanplaat wordt door de Zoutkamperlaag gevoed • Verlaging stroomsnelheid in de Zoutkamperlaag → water dat de Engelsmanplaat opstroomt minder sediment bevat • M.a.w., een verstoring in de balans getijstroming (opbouw) en golven (afbraak) → erosie /verlaging. Vergelijkbare ontwikkelingen ook opgetreden in de Oosterschelde met precies dezelfde mechanisme 	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief veel kleiner • Volgens de gangbare theorie zal het juist sedimentatie op de plaat bevorderen omdat het een verhoging van de stroomsnelheden in de geulen veroorzaakt.

De ontwikkeling van een kortsluitgeul hangt sterk samen met het zogenaamde motorische vermogen, i.e. verhang (waterstandverschil) tussen de twee einden van de geul (van Veen, 1950). Als het motorische vermogen klein is wordt de stroming door de geul zwakker, en de geul heeft de neiging zich af te sluiten. Groter motorische vermogen betekent een sterke stroming door de geul, en de geul heeft de neiging zich open te blijven of zelfs zich te verruimen. Groot waterstandverschil over een ondiep gebied kan zelfs de aanleiding zijn tot het ontstaan van een nieuwe geul door het gebied. In dit verband zijn de twee ingrepen met elkaar vergeleken in Tabel 5.2. Daaruit wordt geconcludeerd dat als er een menselijke invloed op de ontwikkeling van het Smeriggat is geweest, dan is dit de afsluiting van de Lauwerszee geweest en niet de bodemdaling door gaswinning. Dit betekent dat de vertraging van de afsluiting van deze kortsluitgeul mogelijk een gevolg is van de afsluiting van de Lauwerszee, en onwaarschijnlijk een gevolg van de bodemdaling.

Tabel 5.2 Effecten van de ingrepen op de waterstand

Effect afsluiting Lauwerszee	Effect bodemdaling
<ul style="list-style-type: none"> • Merkbare toename getijslag in Zoutkamperlaag → een verandering van het motorische vermogen van het Smeriggat • Mogelijk oorzaak van de vertraagde afsluiting van deze geul. 	<ul style="list-style-type: none"> • geen merkbare verandering van de waterstand • dus geen invloed op het motorische vermogen van het Smeriggat.

Door de verandering van de waterstand bij de keel van het zeegat moet de afsluiting van de Lauwerszee ook invloed gehad hebben op de ontwikkeling en migratie van de geulen in de buitendelta's volgens de gangbare theorie (Allersma, 1993). Daarom kan als hypothese worden gesteld dit ook de mogelijke oorzaak van de verstoorde ontwikkelingen van Pinkegat en de Hon is geweest in plaats van de bodemdaling.

5.4 Conclusies en discussies

Samengevat zijn de volgende conclusies m.b.t. de effecten van de bodemdaling getrokken:

- De waargenomen verlaging van Engelsmanplaat is niet een direct gevolg van bodemdaling, maar veroorzaakt door erosie.
- De erosie die de verlaging van Engelsmanplaat heeft veroorzaakt was niet geïnitieerd door de bodemdaling.
- Het is erg onwaarschijnlijk dat de erosie van Engelsmanplaat en het Rif door de bodemdaling is versterkt.
- De erosie in het gebied rondom Engelsmanplaat is geen belangrijke bron voor sediment dat nodig is voor de compensatie van de sedimenthonger o.a. veroorzaakt door de bodemdaling.

Met betrekking tot de afsluiting van de Lauwerszee zijn de volgende conclusies getrokken:

- De afsluiting van de Lauwerszee heeft waarschijnlijk wel de erosie van Engelsmanplaat versterkt.
- De afsluiting van de Lauwerszee heeft waarschijnlijk ook invloed gehad op de ontwikkeling van het Smeriggat. Als hypothese kan worden geformuleerd dat dit de aansluiting van het Rif aan de Engelsmanplaat heeft vertraagd.
- De afsluiting van de Lauwerszee heeft ook de ontwikkeling van de hoofdgeulen in het Pinkegat verstoord. Het is mogelijk de oorzaak geweest voor de vervroegde aanval op de Hon die men recentelijk heeft geconstateerd.

Opgemerkt wordt dat niet alle conclusies hierboven met dezelfde zekerheid zijn geformuleerd. De eerste twee conclusies m.b.t. de bodemdaling zijn 100% zeker, en de andere twee conclusies m.b.t. de bodemdaling hebben grote zekerheid. De conclusies m.b.t. de afsluiting van de Lauwerszee zijn relatief minder zeker, hoewel ze zeer aannemelijk zijn. De mindere zekerheid heeft te maken dat met name bij de procesmodellering minder aandacht aan deze ingreep is besteed in de huidige studie. Verder heeft het te maken dat de ontwikkeling van het morfologische systeem altijd dynamisch is geweest. Wanneer men over cyclische ontwikkeling heeft bedoelt men eigenlijk min of meer cyclisch. Bovendien

moet men rekening houden met het feit dat hoe verder terug in de tijd hoe minder de kwaliteit van de documentatie van de ontwikkelingen zijn. Neem het voorbeeld van het cyclische gedrag van de Engelsmanplaat. De herhalingsperiode hiervan is orde 100 jaar, maar wij hebben minder dan 100 jaar bodemdiepte gegevens. Zo kunnen wij niet goed weten in de vorige erosie periode hoe snel de erosie op de plaat was. Daarom kunnen wij niet zeker weten of de erosie van de Engelsmanplaat sinds 1970 sneller dan “normaal” is. De conclusie dat de afsluiting van de Lauwerszee de erosie waarschijnlijk heeft veroorzaakt is vooral gebaseerd op beschouwingen van fysische processen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Eindconclusie

Als eindconclusie worden de antwoorden op de twee onderzoeksvragen, zoals in hoofdstuk 1 zijn geformuleerd, hieronder gegeven:

- Heeft de bodemdaling in het Pinkegat de erosie op het Rif en de Engelsmanplaat veroorzaakt of versterkt?

Nee, de erosie is zeker niet veroorzaakt door de bodemdaling. Het is ook zeer onwaarschijnlijk dat de bodemdaling de erosie heeft versterkt.

- Als de beschikbaarheid van sediment op het Rif en de Engelsmanplaat afneemt, zal het herstel van de sedimenthonger in het Pinkegat door de bodemdaling worden beïnvloed?

Nee. Het sediment geërodeerd op het Rif en op de Engelsmanplaat is vooral in de directe omgeving afgezet. Dit is dus niet de belangrijke bron geweest voor sediment ter compensatie van de zandhonger. Een verandering hiervan zal daarom het herstel van de bodemdaling niet beïnvloeden.

6.2 Andere constatering

Naast het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn een aantal andere interessante conclusies getrokken, met name over de invloed van de afsluiting van de Lauwerszee:

- Als er sprake is van afwijkend gedrag van de Engelsmanplaat en het Rif dan zijn ze waarschijnlijk veroorzaakt door de Afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Mogelijke afwijkingen van het normale min of meer cyclische gedrag zijn:
 - Vertraagde verdwijning van de kortsluitgeul van het Smeriggat, ofwel aansluiting het Rif en de Engelsmanplaat.
 - Versterking van de erosie op de Engelsmanplaat.
- Het eerder geconstateerde afwijkende gedrag van de hoofdgeulen in het Pinkegat, waardoor de aanval op de Hon eerder is begonnen, is mogelijk ook een gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee.
- Het overschot van sediment in de buitendelta van de Zoutkamperlaag, ontstaan na de afsluiting van de Lauwerszee, is een belangrijke bron geweest voor sediment ter compensatie van sedimenthonger in de vloedkommen.

6.3 Aanbevelingen

De conclusies, vooral die m.b.t. de invloeden van de Lauwerszee, kunnen beter worden onderbouwd door verder onderzoek aan de hand van procesmodellering. In de huidige studie is de beschouwing op de invloed van de afsluiting op de fysische processen gebaseerd op beperkte resultaten van de eerdere studies. Hoewel de effecten van de Afsluiting van de Lauwerszee op de morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat uitgebreid is onderzocht in verschillende studies, heeft men nooit naar de aspecten die nu naar voren zijn gekomen gekeken. Er zijn verschillende modelleringen uitgevoerd, maar men heeft nooit gekeken naar de invloed van de afsluiting op het motorische vermogen over het Smeriggat. In de modellering studies is vooral gekeken naar de ontwikkelingen van de grote geulen, maar veel minder goed naar de ontwikkelingen van platen, en zeker niet in detail naar de Engelsmanplaat of het Rif. Men heeft ook niet gekeken naar het verband tussen het gedrag van de hoofdgeulen in het Pinkegat en de afsluiting. De constatering / hypothesen uit de huidige studie kunnen leidraad geven voor een nieuwe modelstudie naar de invloed van de afsluiting van de Lauwerszee. Zo een studie is wetenschappelijk zeker interessant en kan de conclusies van de huidige studie beter onderbouwen.

7 Referenties

- Allersma, E., 1993, Geulmigratie in buitendelta's, Verslag van een bureaustudie, Rapport H850.55, WL | Delft Hydraulics.
- Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005, Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 18 jaar gaswinning.
- De Bok, C., 2001, Long-term morphology of the Eastern Scheldt, Werkdocument RIKZ/2002.108x.
- Elias, E., Van Koningsveld M., Tonnon P.K. en Z.B. Wang, 2006, Sediment budget analysis and testing hypotheses for the Dutch coastal system, VOP II-1.2 Long-term coastal management and DC05.20 North sea and Coast, Report Z4100, WL | Delft Hydraulics.
- Kluyver, M., 2006, Smart Nourishment of the Frisian Inlet, Morphodynamic analysis of an innovative way of nourishing, Report Z3873/Z3912, WL | Delft Hydraulics.
- Mulder, J.P.M. and T. Louters, 1994, Changes in basin geomorphology after implementation of the Oosterschelde estuary project, *Hydrobiologia*, 282/283: 29-39.
- Oost, A.P., 1995, Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet, A study of the barrier islands, ebb-tidal deltas inlets and drainage basins, Doctoral thesis, Utrecht University.
- Renger, E. and Partensky, H.W., 1974, Stability criteria for tidal basins, in Proc. 14th Coastal Eng. Conf., Copenhagen, ASCE, New York, 425 pp.
- Stein, R.C., 1991, Some considerations on tidal inlets, A literature survey on hydrodynamic and morphodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to "Het Friesche Zeegat", Report H840.45, WL | Delft Hydraulics.
- Van der Hoeven, M.L.E.B., 2006, De zandhonger van de Oosterschelde, Casestudie; de morfologische ontwikkeling van de Galgeplaat, Afstudeerrapport, Faculteit CITG, TU Delft.
- Van Koningsveld, M., Wang, Z.B., Kluyver, M. and M.J.F. Stive, 2007, Nourishment of tidal basins, Proceedings of ICCE 2006.
- Wang, Z.B., Louters, T. and H.J. de Vriend, 1995, Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea, *Marine Geology*, 126 (1995), 289-300.
- Wang, Z.B., Oost A.P. and J.G. De Ronde, 2006, Morphological response of the Frisian Inlet to sea-level rise and land subsidence, Proceedings of 2nd International Conference on Coast and Estuaries, Guangzhou, China.
- Wang, Z.B. en W.D. Eysink, 2005, Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning, Rapport Z3995, WL | Delft Hydraulics.

A Basis gegevens bodemhoogte

