



gemeente
Schiermonnikoog

WAD een beweging

Onderzoek naar de morfologische ontwikkelingen in het
Friesche Zeegat en de gevolgen voor de
bevaarbaarheid van de vaarroute naar Schiermonnikoog

Morphological developments in the navigation channel to Schiermonnikoog



Master Thesis

Wouter Knaack
April 2009

Studie naar de morfologische ontwikkelingen in de
vaarroute naar Schiermonnikoog en de gevolgen daarvan
voor de bevaarbaarheid.

Morphological developments in the navigation channel to Schiermonnikoog

Wouter Knaack

Rapport

April 2009

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir. M.J.F. Stive

Dr. A. P. Oost

Ir. H.J. Verheij

Dr. ir. Z. B. Wang

K.B. Braat BSc. MSc.

Technische Universiteit Delft

Universiteit Utrecht / Deltares

Technische Universiteit Delft / Deltares

Technische Universiteit Delft / Deltares

Technische Universiteit Delft

In Jachthafen Op Ús Eilaun

In hafen bij ús om de súd
Der roont it tinkt mij fast op út:
In hafen feur de jachten.
It wiêne de Wiel, de Noorman en de
ree,
Wer de schippers destiids fan út see
Har schip ten anker brachten !

Wy gaije stadich oon feurút,
Ne nach in hafen tat beslút.
We motte fierder beouwe.
Bij starmweer en heichgaid tee
Elk jacht leit feilich hier yn lee
En rastich yn de teouwen !

Wy binne op de gúede wooi,
De jachten bringe gasten mooi
Fan tichtby en fan fieren.
Us Darpsbelang en V.V.V.
Helje gotte schatten út de see,
Ja, metje geouden jieren !!

Een Jachthaven Op Ons Eiland

*Een haven bij ons om de Zuid
Daar loopt het, denk ik, vast op uit.
Een haven voor de jachten
Het waren de Wiël, de Noorman en de ree.
Waar de schippers destijds van uit de zee
Hun schip ten anker brachten!*

*Wij gaan langzaam voort,
Nu nog een haven tot besluit.
We moeten verder bouwen.
Bij stormweer en hoogwater
Elk jacht ligt hier veilig uit de wind.
En rustig aan de touwen!*

*Wij zijn op de goede weg,
De jachten brengen gasten mee
Van dichtbij en van ver.
Ons Dorpsbelang en V.V.V.
Halen grote schatten uit de zee,
Zij, maken gouden jaren!*

L. Wiersma
Uit Yn Myn Thúshafen (1973)

De Wiel en de Noorman (Noorder en Zuider Noorman) waren destijds uitlopers van het Friese Zeegat en dienden als ankerplaatsen voor vissersvaartuigen (snikken) en zeeschepen (koffen en galjoten).
Ze zijn reeds lange jaren verzand.

Voorwoord

Dit onderzoek naar de morfologische ontwikkelingen in de vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog is de afsluiting van een master opleiding Hydraulic Engineering aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. De specialisatie in de master is kustwaterbouwkunde.

Na het bachelor eindwerk over een nieuwe veerdam op Schiermonnikoog is vanuit de gemeente Schiermonnikoog de vraag gekomen of het mogelijk was een stap verder te gaan. Afgelopen maanden is er onderzoek gedaan naar de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat en de geulen die de vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog vormen in het bijzonder. Hopelijk kan dit onderzoek een bijdrage leveren aan de discussie, die gevoerd wordt over de verplaatsing van de veerdam op Schiermonnikoog.

Naast de persoonlijke interesse in de discussie op het eiland is dit onderzoek ook een geweldig leerproces geweest. Uitdagend om vanaf het begin tot het einde het onderzoek op te zetten en uit te voeren.

Ik wil dan ook de gemeente Schiermonnikoog en in het bijzonder Simen Stamhuis, gemeentesecretaris, hartelijk bedanken voor het geven van de mogelijkheid voor dit onderzoek en de vrijheid die ik heb gekregen bij het uitvoeren.

Daarnaast wil ik professor Stive bedanken voor het enthousiasme toen ik met dit onderwerp langs kwam om het te bespreken als mogelijkheid om hierop af te studeren onder zijn supervisie. Verder wil ik graag de heer Wang bedanken voor het regelen van een werkplek op Deltares (voorheen WL | Delft Hydraulics). Deze motiverende en inspirerende omgeving maakte plezierig en gedisciplineerd werken aan dit onderzoek mogelijk. De heren Oost, Verheij en Braat bedank ik voor de uitgebreide en kritische feedback gedurende het onderzoek.

De heren Boerema en Swierstra van Rijkswaterstaat wil ik danken voor hun medewerking met betrekking tot het verstrekken van diverse gegevens en het beantwoorden van vragen. Hetzelfde geldt voor de heer Hoekstra van Wagenborg Passagiersdiensten, die ook altijd bereid was antwoord te geven op vragen en het mogelijk heeft gemaakt om in de praktijk te ervaren hoe het is om met extreem laag water naar Schiermonnikoog te varen met de veerboot. Tot slot wil ik Tom Jaski van stichting `It Eilaun` bedanken voor het volgen van het onderzoek en de geïnvesteerde tijd voor kritische feedback en discussie.

Naast deze heren wil ik graag de medeafstudeerders bij Deltares bedanken voor de discussies, belangstelling en gezelligheid: Lars, Roald, Chris, Thijs, Arend, Marten en Steven. Verder alle vrienden bedankt voor de belangstelling, het klankbord zijn en de steun gedurende het afstuderen.

Tot slot pap en mam bedankt voor de gegeven mogelijkheid van studeren aan de TU en vooral het eindeloze geduld!

Wouter Knaack
April 2009

Samenvatting

Naar aanleiding van het collegeprogramma van de gemeente Schiermonnikoog en een bachelor eindwerk aan de Technische Universiteit Delft is er een onderzoek gestart naar de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat en de gevolgen daarvan voor de bevaarbaarheid van de vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog.

De onderzoeksvragen die gesteld worden zijn:

- Wat zijn de mogelijkheden tot het doen van een voorspelling naar die ontwikkelingen voor de komende decennia.
- Wat zijn de gevolgen voor de bevaarbaarheid.
- In hoeverre is het mogelijk een vaarroute te creëren naar een plek dichterbij het dorp.

Door middel van theorie, eerdere onderzoeken en peildata van Rijkswaterstaat is er een analyse van het bekken gemaakt en zijn er een drietal hypothesen geformuleerd met betrekking tot de onderzoeksvragen. Deze hypothesen zijn met een semi-empirische benadering en het Delft3D model (enkel hydrodynamisch met initiële sedimentatie en erosie) getoetst op de juistheid.

Hypothese I is dat de afsluiting van de Lauwerszee tot gevolg heeft gehad dat het bekken uit evenwicht is, maar op dit moment het evenwicht zich aan het herstellen is. Daarmee komt het wantij weer richting het westen met als gevolg dat de verzanding in de vaarroute toeneemt. Dit kan op basis van de semi-empirische vergelijkingen en het scenario in Delft3D, waarbij de natuur haar gang gaat, niet onomstotelijk bewezen worden. Wat wel duidelijk wordt uit het scenario is dat de verzanding van de Groote Siege doorgaat met beperkte bereikbaarheid van het eiland als mogelijk gevolg.

Hypothese II is dat de effecten van de afsluiting onvoldoende zijn meegenomen bij het bepalen van de huidige aanleglocatie van de veerboot. Er bestaan mogelijkheden om een nieuwe route dichterbij het dorp te ontwikkelen. Deze hypothese wordt gestaafd door de uitkomsten van het scenario waarin de natuur haar gang gaat en het scenario waarbij rigoureus ingegrepen wordt. Een natuurlijke vaarroute naar een locatie dichterbij het eiland is een utopie. Wel is het mogelijk om een geul te baggeren naar de jachthaven en deze open te houden.

Hypothese III is dat stabilisatie van de huidige vaarroute door middel van een aantal maatregelen mogelijk is. Dit wordt aangetoond met het scenario waarin diverse maatregelen getoetst worden. Deze maatregelen variëren van het weghalen van drempels in de Groote Siege tot het verhogen van de wanden van de geulen met natuurlijke oplossingen (oester/mosselbanken). De maatregelen hebben allemaal een positieve invloed op de bevaarbaarheid, echter het teruggaan naar het baggerbeleid van voor 2003 levert het meest optimale resultaat.

De conclusies van dit onderzoek zijn als volgt samen te vatten.

Op langere termijn verzandt de Groote Siege en wordt het eiland beperkt bereikbaar wanneer maatregelen tegen deze verzanding uitblijven. Deze ontwikkelingen vragen om een verder onderzoek naar de gevolgen op langere termijn gecombineerd met de mogelijkheid om een kunstmatige geul aan te leggen naar de jachthaven.

Op korte termijn moeten er maatregelen genomen worden waardoor de verdeling van het water in het bekken een positiever effect heeft op de vaarroute en de Groote Siege in het bijzonder. Het is onmogelijk om een vaarroute te handhaven waarbij baggerwerkzaamheden niet nodig zijn. Het wad is een dynamische omgeving waarbij de natuur leidend is. De uiteindelijke effecten van ingrepen zijn daardoor altijd met een onzekerheid omgeven.

Aanbevolen wordt om een uitgebreider onderzoek voor de lange termijn te starten. Dit onderzoek moet meer factoren meenemen dan met het nu gebruikte model is gedaan. Op korte termijn is het noodzakelijk om met alle betrokken partijen een nieuwe strategie te bepalen en maatregelen te nemen waarbij de bevaarbaarheid van de Grootte Siege gegarandeerd blijft.

Inhoudsopgave

Lijst met figuren

Lijst met tabellen

1. Inleiding van het onderzoek	1
1.1 Aanleiding van het onderzoek	1
1.2 De doelen van dit onderzoek	3
1.2.1 Doelstelling	3
1.2.2 Hoofdvraag	3
1.2.3 Deelvragen	3
1.3 De methode van aanpak	3
1.4 Leeswijzer	4
2. Een getijdebekken in theorie	5
2.1 Hydraulische parameters	5
2.1.1 Getij	5
2.1.2 Wind en lokale windgolven	8
2.1.3 Golven	8
2.2 Processen in een getijdebekken	9
2.3 Processen in de geulen	11
2.3.1 Komberging	12
2.3.2 Bochtwerking	14
2.3.3 Zandtransport	16
2.4 Hydraulische kwalificatie van het Friesche Zeegat	18
3. Het Friesche Zeegat	21
3.1 De ontwikkelingen voor 1969	21
3.1.1 De ebdelta	21
3.1.2 De vloeddelta	24
3.1.3 Het eiland	25
3.2 De ontwikkelingen na 1969 tot 2008	26
3.2.1 De ebdelta	26
3.2.2 De vloeddelta	27
3.2.3 Het eiland	29
3.3 De geschiedenis en ontwikkelingen van de vaarroute naar Schiermonnikoog	30
3.3.1 Geschiedenis van de vaarroute	30
3.3.2 De actuele ontwikkelingen in de vaarroute	32
3.4 Het Friesche zeegat als model	34
3.4.1 Algemeen	34
3.4.2 Proces model	34
3.4.3 Semi-empirische model	37
3.5 Conclusie semi-empirisch model	44
4. Verschillende scenario's	47
4.1 De natuur gaat zijn gang	47
4.1.1 Ebdelta	47
4.1.2 Vloeddelta	48
4.1.3 Effect op de bevaarbaarheid	48
4.2 De natuur wordt geholpen en begeleid	48
4.2.1 Brakzandstergat afsluiten	48
4.2.2 Onnatuurlijke drempels verwijderen om uitstroom van zand te bevorderen	49

4.2.3 De Groote Siege uitbaggeren tot streefdiepte	49
4.2.4 Wanden van de geulen ophogen door middel van mossel- en/of oesterbanken	51
4.2.5 Combinatie van maatregelen	52
4.3 Rigourees ingrijpen	53
4.3.1 De Piebe reanimeren	53
4.3.2 Kanaal vanaf het Gat van Schiermonnikoog naar de jachthaven	53
4.4 Conclusie proces model	55
5. Conclusies en aanbevelingen	59
5.1 Validatie	59
5.2 Discussie	59
5.3 Conclusies	62
5.4 Aanbevelingen	63
6. Referenties	65
6.1 Literatuur en rapporten	65
6.2 Websites en digitale correspondentie	67
A. Figuren bij hoofdstuk 3	69
1. Hypsometrie curven Zoutkamperlaag met alle beschikbare data.	70
2. Zoutkamperlaag vloeddelta en de locaties van de doorsneden	71
3. Doorsneden en bodemprofiel van de belangrijkste geulen	72
4. Cumulatieve debiet door de vijf doorsneden in 1992 en 2006.	74
5. Sedimentatie en erosie in de vaargeul 2004 - 2008	77
B. Figuren bij hoofdstuk 4	85
1. Scenario I	86
2. Scenario II	97
3. Scenario III	131
4. Gebaggerde volumes bij drie verschillende maatregelen	145
C. Figuren bij hoofdstuk 5	147
D. Zeekaarten en Surveykaarten	153

Lijst met figuren

Figuur 1: Het dorp Schiermonnikoog ten opzichte van de jachthaven (blauwe route) en de veerdam (rode route); bron Google Earth (2008)	1
Figuur 2: De vaarroutes naar Schiermonnikoog voor de veerboot (rode lijn) en de pleziervaart (blauwe lijnen) en de belangrijkste geulen; bron Google Earth	2
Figuur 3: Schema opbouw onderzoek	3
Figuur 4: Getij; krachtenspel aarde en zon (d'Angremond, 2001)	5
Figuur 5: Getij; ontstaan doortij en springtij (d'Angremond, 2001)	6
Figuur 6: Getij; amfidromische punten op de Noordzee (d'Angremond, 2001)	6
Figuur 7: Getij; snelheden horizontaal getij	8
Figuur 8: Wind; windopzet in een bekken	8
Figuur 9: Komberging; vloed- en ebscharen (Van Veen, 1950)	9
Figuur 10: Komberging; ontstaan van een wantij (Van Veen, 1950)	10
Figuur 11: Komberging; ontstaan wantij inclusief wind en golven (Van Veen, 1950)	10
Figuur 12a: Voorbeelden golflengtes voor staande golf (I)	10
Figuur 12b: Een dempende golf	10
Figuur 13: Komberging; stromingspatronen in een zeegat (Stive, 2006)	11
Figuur 14: Geul; doorsnede met parameters van een geul (Stive, 2006)	12
Figuur 15: Hypsometrie in twee verschillende bekkens	14
Figuur 16: Erosie in een bocht door de eb- en vloedstroom	15
Figuur 17: Geul; bochtwerking in een geul, doorsnede en bovenaanzicht (Stive, 2006)	15
Figuur 18a: Zandtransport; vorming drempel bij aanval in de flanken door de scharen (I) (Van Veen, 1950)	16
Figuur 18b: Zandtransport; vorming drempel bij splitsing van de scharen (Van Veen, 1950)	16
Figuur 19: Zandtransport; zeefeffect/zandneer in de geul (Van Veen, 1950)	16
Figuur 20: Zandtransport: arme en rijke zandstromen in de geul (Van Veen, 1950)	17
Figuur 21, Residueel transport in de geulen door het getij en de Coriolis versnelling	17
Figuur 22: Het Friesche Zeegat (Oost, 1992)	18
Figuur 23: Wind; windroos KNMI meetlocaties Huibertgat (Noordzee) (I) en Lauwersoog	19
Figuur 24: Hydrodynamische classificatie zeegaten (Stive, 2006)	19
Figuur 25: Geometrie Friesche Zeegat 1832-1834 (Oost, 1995)	21
Figuur 26: Geometrie Friesche Zeegat 1873-1874 (Oost, 1995)	22
Figuur 27: Geometrie Friesche Zeegat 1891 (Oost, 1995)	23
Figuur 28: Geometrie Friesche Zeegat 1934 (Oost, 1995)	24
Figuur 29: Geometrie Friesche Zeegat 1958 (Oost, 1995)	25
Figuur 30: Geometrie Friesche Zeegat 1967 (Oost, 1995)	26
Figuur 31: Geometrie Friesche Zeegat 1982 (Oost, 1995)	27
Figuur 32: Geometrie Friesche Zeegat 1987 (Oost, 1995)	28
Figuur 33: Geometrie Friesche Zeegat 1991 (Oost, 1995)	28

Figuur 34: Geometrie Friesche Zeegat 2006 (Rijkswaterstaat [9])	29
Figuur 35: Cascademodel (IMSA, 2004)	31
Figuur 36: De Piebe, vaargeul naar de jachthaven	33
Figuur 37: Stappenplan procesmatig model (I) en stappenplan semi-empirisch model	34
Figuur 38: Rekenrooster van het gebruikte Delft3D model	35
Figuur 39: Sedimentatie (negatief) en erosie (positief) in 2006 ten opzichte van 1992	36
Figuur 40: Basisdiepte 2006	36
Figuur 41: Gebieden voor hypsometrie bepaling eerdere onderzoeken. D2 is Zoutkamperlaag (Wang, 2007)	37
Figuur 42: De Zoutkamperlaag D2, vanuit Delft3D	38
Figuur 43: Cumulatieve oppervlakte en volume van de Zoutkamperlaag tot 2006 [appendix A voor groter formaat]	38
Figuur 44: Relatie tussen geulvolume en getijprisma	39
Figuur 45: ontwikkeling van α in tijd	40
Figuur 46: Relatief oppervlakte van inter-getijdengebied afgelopen decennia	40
Figuur 47: Relatieve plaathoogte in de Zoutkamperlaag	41
Figuur 48: Semi-empirische relatie tussen A_{NAP} en P	43
Figuur 49: Mogelijke dwarsdoorsnede van de leidingdrempel in de Grootte Siege	49
Figuur 50: Waterstanden Grootte Siege	50
Figuur 51: Bodemdiepte Grootte Siege n.a.v. maatregel 3 met mor.fac. 12 met laagwater	51
Figuur 52: Dwarsdoorsnede geul waarbij b_k en A worden verkleint.	51
Figuur 53: Diepte met verhoogde geulwanden	52
Figuur 54: Cumulatief debiet in Grootte Siege en Piebe bij scenario III, 2A .	54
Figuur 55: Doorsnede nieuwe Piebe	55
Figuur 56: Cumulatief debiet Zoutkamperlaag - keel in scenario I voor 6 simulaties	56
Figuur 57: Cumulatief debiet Grootte Siege - begin in scenario I voor 6 simulaties	57
Figuur 58: Investerings- en onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor maatregel 3, actie 2a en actie 2b	57
Figuur 59: De Grootte Siege weer als vloed geul na het volledig op diepte baggeren (maatregel 3)	62

Lijst met tabellen

Tabel 1: Meest gangbare getijde componenten voor het bepalen van de waterstand	7
Tabel 2: Kubieke meters weggebaggerd materiaal uit de geulen die de vaarroute naar Schiermonnikoog vormen	32
Tabel 3: Morfologische acceleratie factoren gebruikt in het model	35
Tabel 4: Waarden voor het semi-empirisch mode uit Delft3D (1)I	41
Tabel 5: cumulatieve debiet door doorsneden (prisma)	42
Tabel 6: veranderingen in prisma door doorsnede per getij cyclus.....	42
Tabel 7: Scenario 1: simulatie en morfologische factor	47
Tabel 8: Scenario 2: simulatie, maatregel en morfologische factoren	48
Tabel 9: Scenario 3: simulatie, actie en morfologische factoren	53

1. Inleiding van het onderzoek

In dit hoofdstuk komen achtereenvolgens de aanleiding, doelen en methode van aanpak aan bod. De eerste paragraaf gaat in op de aanleiding voor dit onderzoek. Paragraaf twee van dit hoofdstuk verwoordt het doel van dit onderzoek met daarbij de onderzoeksvragen. In de derde paragraaf wordt de methode van aanpak beschreven hoe in dit onderzoek de antwoorden op de onderzoeksvragen verkregen gaan worden. Tot slot in dit hoofdstuk een korte leeswijzer over hoe dit rapport gelezen moet worden.

1.1 Aanleiding van het onderzoek

Het Waddeneiland Schiermonnikoog is officieel een autoluw eiland. Echter de laatste jaar is zowel het straatbeeld als de mening over dit imago sterk veranderd. Het aantal bezoekers van het eiland stijgt en door de meeveranderende accommodaties op het eiland komen deze toeristen gedurende het hele jaar het eiland bezoeken. Daarnaast worden er steeds grotere en zwaardere transportmiddelen ingezet op het eiland en daarmee neemt de verkeersdruk in de kleine dorpskern toe.

De vraag die zowel door de bevolking als de gemeente Schiermonnikoog gesteld wordt is of Schiermonnikoog nog wel het imago van autoluw eiland kan vasthouden of verbeteren.

De gemeente Schiermonnikoog heeft haar visie vastgelegd in het Structuurplan [Buro Vijn, 2001] en het college van Burgemeester en Wethouders heeft duidelijk in het collegeprogramma van deze raadsperiode geformuleerd hoe zij de problematiek willen aanpakken [Gemeente Schiermonnikoog, 2006]. Daarnaast is vanuit de samenleving door onder meer het onderzoek naar Schiermonnikoog in de toekomst [Van der Bunt, 2001] en de particuliere stichting "It Eilaun" [1] het initiatief gekomen een brede maatschappelijke discussie te starten over de complete infrastructurele indeling van het eiland. Bestuursleden van deze stichting hebben daarvoor diverse Nederlandse en Duitse Waddeneilanden



Figuur 1: Het dorp Schiermonnikoog ten opzichte van de jachthaven (blauwe route) en de veerdam (rode route); bron Google Earth (2008)

bezoekt die konden dienen als referentie. Verslagen van deze excursies zijn gepubliceerd op de website van de stichting en in de Dorpsbode [2]. Een van de belangrijke factoren in deze discussie is de huidige locatie van de veerhaven ten opzichte van het dorp [figuur 1].

Eind 2007 is door een student Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft een bachelor eindwerk gemaakt met als doel de gemeente en de eilander samenleving een beeld te geven hoe een nieuwe veerhaven dichterbij het dorp eruit zou kunnen komen te zien [Knaack, 2007].

Tijdens de discussies en presentaties met de gemeente bleek dat dit onderzoek een goede aanvulling is op de visie van de gemeente in het collegeprogramma. Naar voren kwam dat er pas goede uitspraken gedaan kunnen worden over de haalbaarheid van een nieuwe veerhaven wanneer bekend is, wat de ontwikkelingen in de geulen onder Schiermonnikoog de komende jaren gaat zijn. Dit was ook de uitkomst van een gesprek met professor Stive en de heer Jaski van "It Eilaun" in het begin van 2008.

Daarom heeft de gemeente Schiermonnikoog in de zomer van 2008 besloten dit afstudeeronderzoek te laten doen naar de morfologische ontwikkelingen van de geulen onder Schiermonnikoog. De resultaten van dit onderzoek moeten samen met de input van andere betrokken partijen leiden tot een vervolgbesluit over de mogelijke verplaatsing van de veerhaven. In het kader van die besluitvorming is het idee ontstaan bij de gemeente om een werkconferentie te houden. Tijdens deze conferentie kunnen alle betrokkenen hun mening en input geven over dit onderwerp en de te volgen route naar Schiermonnikoog [figuur 2].



Figuur 2: De vaarroutes naar Schiermonnikoog voor de veerboot (rode lijn) en de pleziervaart (blauwe lijnen) en de belangrijkste geulen; bron Google Earth

Dit moet leiden tot een oplossing waarbij enerzijds het autoluwe karakter van het eiland weer in ere hersteld wordt en anderzijds Schiermonnikoog een tot de verbeelding sprekende aankomst bij het dorp krijgt.

1.2 De doelen van dit onderzoek

1.2.1 Doelstelling

De gemeente Schiermonnikoog moet met de resultaten van dit onderzoek een richting kunnen geven aan de discussie over het verplaatsen van de veerhaven. Het onderzoek moet een beeld geven over de ontwikkelingen die de komende decennia kunnen optreden in het Friesche Zeegat en het deel van de Waddenzee daarachter. Specifiek wordt er gekeken naar de huidige vaarroute tussen Lauwersoog en Schiermonnikoog. De morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat en het getijdebekken daarachter hebben gevolgen voor de bevaarbaarheid van de huidige vaarroute naar het eiland. Wat deze gevolgen zijn en welke consequenties die hebben zijn de antwoorden waarna in dit onderzoek naar gezocht wordt.

1.2.2 Hoofdvraag

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt als volgt: Is het mogelijk om met data uit eerdere onderzoeken en een computermodel een voorspelling te doen naar de ontwikkelingen in de geulen die de vaarroute van Lauwersoog naar Schiermonnikoog vormen voor de komende vijftig jaar?

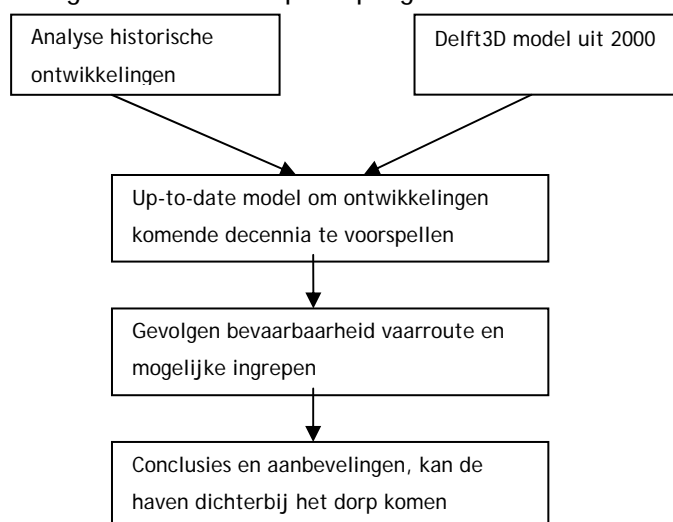
1.2.3 Deelvragen

De eerste deelvraag van dit onderzoek is: Wat zijn de gevolgen van deze ontwikkelingen voor de bevaarbaarheid van de geulen?

Als tweede deelvraag is de volgende vraag geformuleerd: Is het mogelijk de geulen onder Schiermonnikoog in het model zodanig te beïnvloeden met als resultaat een (kunstmatige) vaarroute naar een nieuwe locatie voor de veerhaven dichterbij het dorp.

1.3 De methode van aanpak

In de eerste plaats zal er een analyse gemaakt worden over de ontwikkelingen van de afgelopen decennia in het Friesche Zeegat en het waddengebied daarachter. De kern van dit onderzoek is het simuleren van de morfologische ontwikkelingen van het Friesche Zeegat met het computerprogramma Delft3D. Het model uit het



Figuur 3: Schema opbouw onderzoek

jaar 2000 wordt zoveel mogelijk up-to-date gemaakt aan de hand van door Rijkswaterstaat verstrekte gegevens. Er wordt gestreefd naar ontwikkelingen op de tijdschaal van enige decennia. Als richtlijn wordt hiervoor de levensduur van een waterbouwkundige constructie, zoals een veersteiger, gehanteerd.

De ontwikkelingen die uit het model komen, worden getoetst aan de eisen die er gesteld worden aan een veilige bevaarbare route naar Schiermonnikoog en aan de wens om een locatie voor de veerhaven te vinden die dichterbij het dorp ligt.

Het schema in figuur 3 geeft de onderzoeksaanpak weer.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd. In het eerste hoofdstuk wordt een korte introductie gegeven over het onderwerp, de aanleiding van het onderzoek en wat de doelstelling is van het onderzoek. De onderzoeksvragen zijn in dit hoofdstuk terug te vinden en de methode van aanpak van het onderzoek.

In het tweede hoofdstuk wordt er ingegaan op de theorie van een getijdebekken. Welke hydraulische parameters spelen een rol, welke processen spelen er in een getijdebekken en in de geulen. Zo is het mogelijk om een kwalificatie te geven aan het Friesche Zeegat.

Hoofdstuk drie is de historische analyse van het Friesche Zeegat en de veerverbinding en bijbehorende vaarroute tussen Schiermonnikoog en het vasteland. Vanuit deze historische analyse zijn de te bewijzen hypothesen geformuleerd. In dit hoofdstuk wordt ook de slag gemaakt naar het Friesche Zeegat als computermodel in Delft3D.

Hoofdstuk vier bevat een simulatie in Delft3D van drie verschillende scenario's waarmee in Delft3D een simulatie is gemaakt.

1. Het eerste scenario is het scenario waarbij de natuur niet belemmerd wordt in haar ontwikkelingen. De uitkomsten worden vergeleken met de eisen voor de vaarroute en de gevolgen daarvan voor de bevaarbaarheid.
2. Een scenario waarbij de natuur gestuurd wordt. Het sturen van het getijprisma en kleinschalig baggeren worden als maatregelen gebruikt om de bevaarbaarheid van de huidige vaarroute te toetsen.
3. Een scenario hoe de meest optimale vaarroute naar een ideale locatie voor de veerhaven eruit komt te zien. Waar nodig is, wordt ingegrepen om de vaarroute te stabiel op zijn plek te houden.

In hoofdstuk vijf komen de conclusies van het onderzoek. De uitkomsten van het modelleren worden getoetst aan de in hoofdstuk 3 gestelde hypothesen. Tot slot worden er aanbevelingen gedaan over hoe de conclusies van dit onderzoek verder gebruikt kunnen worden.

2. Een getijdebekken in theorie

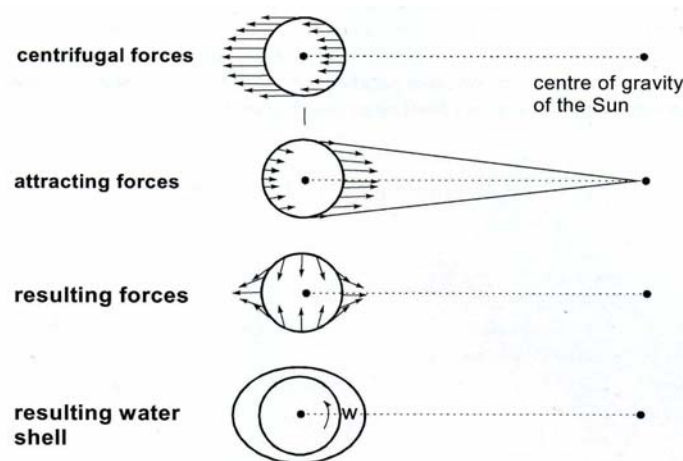
In dit hoofdstuk komt de theorie aan bod die van belang is om de werking van een getijdebekken, zoals het Friesche Zeegat te begrijpen. De eerste paragraaf behandelt de hydraulische parameters, de tweede paragraaf gaat in op de processen in een bekken. In de derde paragraaf wordt ingezoomd op de processen in de geulen van een bekken. En tot slot wordt in de laatste paragraaf wordt aan de hand van de eerste drie paragrafen een hydraulische kwalificatie gegeven voor het Friesche Zeegat.

2.1 Hydraulische parameters

Een stroming langs de Nederlandse kust in de richting west - oost langs de Waddeneilanden is de grote motor achter alle morfologische veranderingen van de stranden, duinen en geulenstelsels. Deze stroming wordt veroorzaakt door het getij, maar wat is nou precies het getij en wat zijn de invloeden van het getij in een getijdebekken zoals het Friesche Zeegat? Wat zijn daarnaast de invloeden van wind en golven op het getijdebekken?

2.1.1 Getij

Het getij is het gevolg van de krachtenwerking tussen zon, aarde en de maan. Dit kan in twee systemen opgesplitst worden, namelijk een zon - aarde systeem en een aarde - maan systeem. In beide systemen is de grootste massa dominant en bepalend voor het zwaartekrachtspunt van het systeem. Vandaar dat de aarde om de zon draait en de maan om de aarde. Bij dit draaien ontstaan er twee verschillende krachten, de middelpuntzoekende kracht en de middelpuntvliedende kracht. Dit resulteert in de krachtenverdeling zoals in figuur 4 te zien is. Deze



Figuur 4: Getij; krachten spel aarde en zon (d'Angremond, 2001)

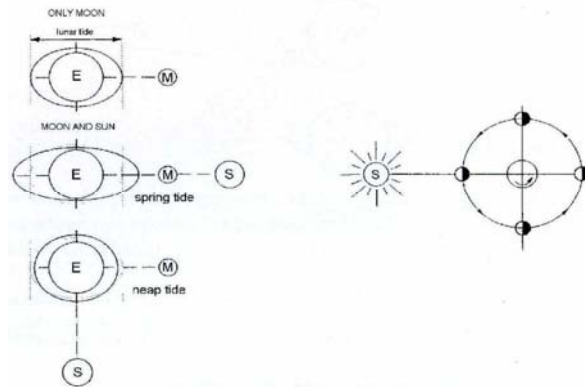
krachtenverdeling heeft daarmee ook invloed op de "dikte" van de schil water om de aarde, mocht het aardoppervlak volledig uit water bestaan. De invloed van de maan is hierboven nog buitenbeschouwing gelaten, maar door het draaien van de maan rondom de aarde wordt de ellips uit figuur 4 verschoven en ontstaat het systeem van springtij en doodtij [figuur 5]. Echter de aarde is niet volledig bedekt met water, de getijgolf heeft enkel de originele ellipsvorm op 65°S. Vanaf deze

$$c = \sqrt{gd}$$

Vergelijking 1,
voortplantingssnelheid
in de Noordzee

lengtegraad plant de getijgolf zich in noordelijke richting voort door de verschillende oceanen.

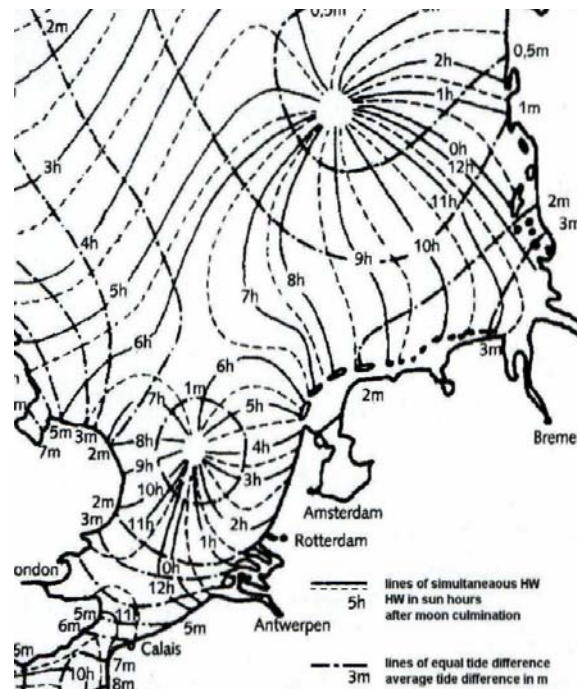
De getijgolf, waar Nederland mee te maken heeft, plant zich voort door de Atlantische oceaan met een voortplantingssnelheid c , die afhankelijk is van de diepte (wrijving wordt hierbij voorlopig verwaarloosd), waarin g de zwaartekrachtsversnelling is van $9,81 \text{ m/s}^2$ en d de waterdiepte [vergelijking 1]. In de oceaan en kustwateren veroorzaken niet-uniforme dieptes, samen met de beweging van het water door toedoen van de Coriolisversnelling¹, dat de getijgolf



Figuur 5: Getij; ontstaan doottij en springtij (d'Angremond, 2001)

wordt verstoord.

Deze verstoring in tijd en in amplitude kan worden gevisualiseerd door middel van een kaart met daarin de contourlijnen van gelijktijdig hoogwater en van gelijke



Figuur 6: Getij; amfidromische punten op de Noordzee (d'Angremond, 2001)

¹ De Coriolis versnelling is de afwijking van een stroming van een rechte lijn. Op het noordelijk halfrond is deze afwijking naar rechts gericht, op het zuidelijk halfrond naar links. [d'Angremond, 2001]

uitwijking tussen hoog- en laagwater. Deze kaart voor de Noordzee is afgebeeld in figuur 6. Punten waar de uitwijking tussen hoog- en laagwater nul is worden amfidromische punten genoemd. In de Noordzee zijn twee van dit soort punten te vinden.

Hiermee is het verschil in tijd en hoogte van het getij langs de Nederlandse kust verklaard, maar het geeft geen verklaring voor de ongelijkheden in de dagelijkse

$$h(t) = h_0 + \sum_{i=1}^N h_i \cos(\omega_i t - \alpha_i)$$

Vergelijking 2: voorspelling waterstand

hoog- en laagwaters op één locatie. Dit heeft te maken met de stand van de aardas ten opzichte van de denkbeeldige aarde-maanlijn. Deze twee lijnen staan niet haaks op elkaar en veroorzaken ongelijkheden door de rotatie van de aarde om haar eigen as. De vergelijking 2, waarin:

Getijdecomponent	Periode (zonne-uren)	Beschrijving	Karakter
M2	12,42	principal lunar	tweedaags
S2	12,00	principal solar	tweedaags
N2	12,66	larger lunar elliptic	tweedaags
K2	11,97	luni-solar	tweedaags
K1	23,93	luni-solar diurnal	dagelijks
O1	25,82	principal lunar diurnal	dagelijks
P1	24,07	principal solar diurnal	dagelijks
Q1	26,87	larger lunar elliptic	dagelijks
MF	327,90	lunar fortnightly	lange termijn
MM	661,30	lunar monthly	lange termijn
SSA	4383,00	solar semi annual	lange termijn
M4	6,21		gemengd
MS4	6,10		gemengd

Tabel 1: Meest gangbare getijde componenten voor het bepalen van de waterstand

$h(t)$ = de voorspelde waterstand ten opzichte van een referentie niveau (N.A.P. in Nederland)

h_0 = basis waterstand

h_i = amplitude van de component i

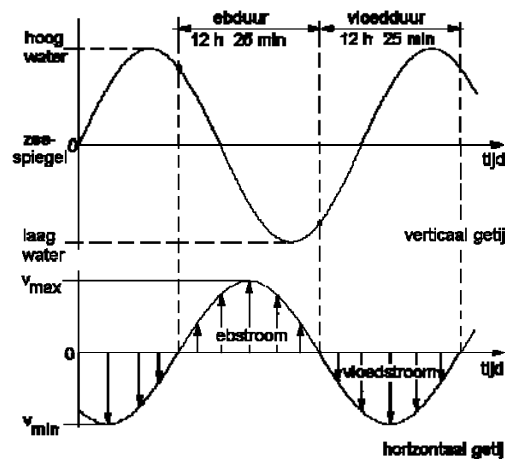
α_i = fase hoek van de component i

ω_i = snelheid van de component i

t = tijd

wordt gebruikt om een voorspelling te doen van het verticale getij op een locatie [d'Angremond, 2001]. Het getij wordt door meerdere componenten opgebouwd. Deze componenten hebben allemaal een relatie tot de zon en de maan en om een juiste voorspelling van het getij te kunnen doen moeten al deze factoren meegenomen worden. Tabel 1 geeft een overzicht van de primaire getijde componenten en de tijdsduur van de getij cyclus in zonuren.

Welke invloed van verstoring deze verschillende componenten, beter bekend als getij asymmetrie, hebben voor het getijdebekken wordt verderop in dit hoofdstuk duidelijk gemaakt. De genoemde asymmetrie is vooral goed zichtbaar in de tijdsperiodes van opkomend en afgaand water [Stive, 2006]. In de periodes van opkomend en afgaand water variëren de horizontale stroomsnelheden. Dit wordt het horizontale getij

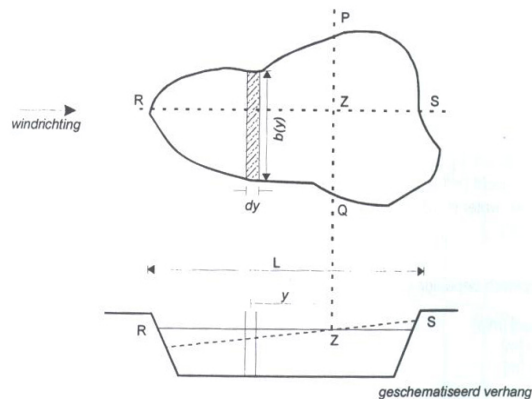


Figuur 7: Getij; snelheden horizontaal getij

genoemd. Zoals in figuur 7 is te zien, zijn de horizontale snelheden het hoogst vlak voor de kentering.

2.1.2 Wind en lokale windgolven

Wind, die langere tijd uit één richting waait, veroorzaakt een wrijvingskracht op het water. Dit resulteert in een stijging van de waterstand aan de lijzijde. Belangrijke parameter hierbij is de afstand waarover de wind vrij baan heeft, de



Figuur 8: Wind; windopzet in een bekken

zogenaamde strijklengte. Hoe groter deze afstand is, hoe groter de windopzet is. Figuur 8 geeft schematisch weer hoe de windopzet opgebouwd is. De ontstane wrijvingskracht kan windgolven en door de wind gedreven stromingen veroorzaken wanneer deze langere tijd voorkomt in een gebied. De invloed van deze lokaal ontstane windgolven is klein op de morfologische stromingen in het gebied en daarom wordt hier in deze studie ook niet verder op ingegaan.

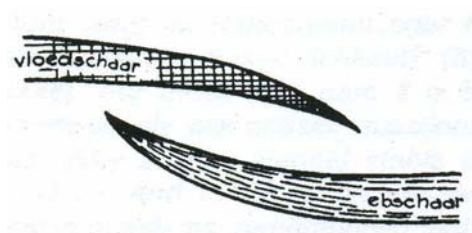
2.1.3 Golven

De windgolven die offshore ontstaan, spelen een rol bij de morfologische problemen in een getijdebekken. Zij veroorzaken stromingen vanaf zee het bekken in, stromingen die sediment meenemen. De golven verliezen op twee manieren hun energie en daarmee hun sediment. De eerste manier is dat door toedoen van de weerstand op de bodem de golf dempt de tweede manier is doordat de verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte de verhouding 0,6 ~ 0,7 bereikt. Op dat moment zal een golf breken en daarmee een hoop energie verliezen.

De invloed van deze offshore windgolven op het Friesche Zeegat wordt in paragraaf 2.4 besproken.

2.2 Processen in een getijdebekken

De getijgolf verplaatst zich dus van zuid naar noord langs de Nederlandse kust en van west naar oost langs de Waddeneilanden. Via de zeegaten tussen de eilanden vult de getijgolf de Waddenzee. Het Friesche Zeegat is één van deze zeegaten. Elk zeegat heeft haar eigen gebied dat gevuld wordt, de zogenaamde komberging, begrensd door het vaste land en aan beide zijden een wantij. De komberging wordt bepaald door het hoogteverschil van de vlakken waar de kentering optreedt. Deze kenteringhoogtes zijn niet hetzelfde niveau als het niveau van hoogwater (HW) en laagwater (LW). De vulling en lediging van deze kom vindt plaats door een geulenstelsel bestaand uit doorgaande geulen, vloed- en ebscharen [figuur 9].



Figuur 9: Komberging; vloed- en ebscharen (Van Veen, 1950)

Samen met de zandbanken vormen zij het getijdebekken. De definitie van een vloedschaar is *een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de vloed en die aan het bovineinde een drempel heeft*. Een ebschaar heeft een tegenovergestelde

$$P = \int_{LWS}^{HWS} Q dt$$

$$V = \int_0^L (A_{HW}(x) - A_{LW}(x)) dx$$

$$P = \int_0^L (A_{HWS}(x) - A_{LWS}(x)) dx$$

Vergelijking 3: Bepalen getij

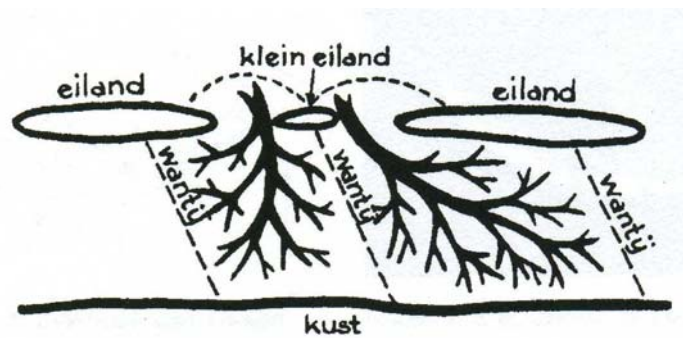
prisma

werking en de definitie daarvan is *een getijgeul die voornamelijk open ligt voor de ebstroom en die aan het zee-einde een drempel heeft*. [Van Veen, 1950]. Gezamenlijk vormen zij aan de binnenkant van het zeegat een vloeddelta en aan de buitenkant van het bekken een ebdelta. De hoeveelheid water die per getij cyclus in en uit het bekken stroomt wordt het getijprisma genoemd. Met vergelijking 3 is het mogelijk om de hoeveelheid water te bepalen in de mond van het zeegat en de komberging daarachter [Wang, 2001].

In vergelijking 3 staan A_{HWS} , A_{LWS} , A_{HW} en A_{LW} respectievelijk de oppervlaktes op het tijdstip van hoogwater kentering, laagwater kentering, hoogwater en laagwater zijn.

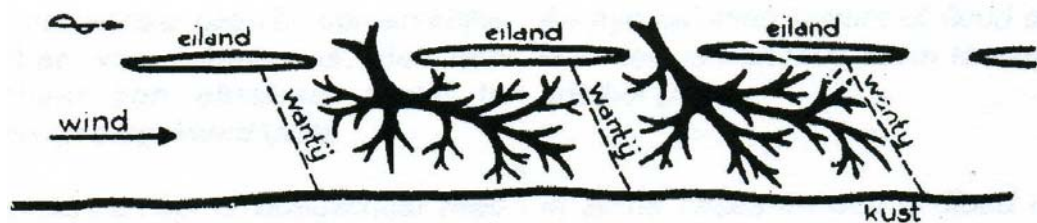
Zoals al aangegeven wordt de komberging van een zeegat tussen de Waddeneilanden ingesloten tussen twee wantijen en het vaste land van Groningen of Friesland. Het wantij ontstaat op de plek onder een eiland waar de getijgolf, die het eiland aan de westkant passeert, de andere getijgolf, die het eiland aan de oostkant passeert, tegenkomt [figuur 10].

Theoretisch gezien zouden deze golven in het midden van het eiland elkaar treffen.



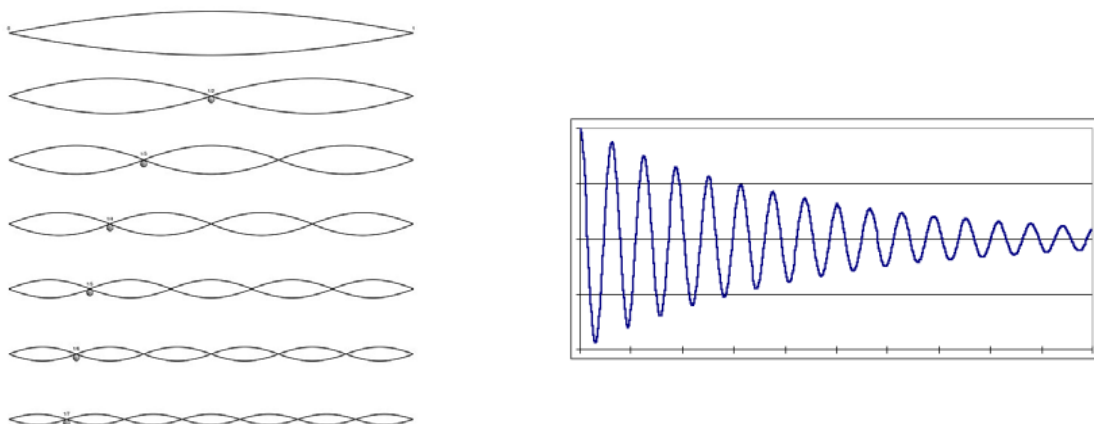
Figuur 10: Komberging; ontstaan van een wantij (Van Veen, 1950)

Doordat langs de Nederlandse waddenkust de getijgolf zich van west naar oost verplaatst, loopt de getijgolf eerder vanuit het westen dan de getijgolf uit het oosten de kombergingsgebieden binnen. Dit geeft de westelijke tak van de getijgolf de mogelijkheid om verder onder het eiland door te lopen en het gevolg daarvan is dat hij de oostelijke tak van de getijgolf dan ook meer richting het oosten tegenkomt in plaats van in het midden van het eiland. Daarbij spelen de overheersende wind- en golfrichting ook een rol bij de locatie van het wantij. Door de offshore windgolven uit noordwestelijke richting en de overheersende westelijke windrichting wordt in het Waddengebied het wantij meer in oostelijke richting geduwd [figuur 11][Van Veen, 1950].



Figuur 11: Komberging; ontstaan wantij inclusief wind en golven (Van Veen, 1950)

Wanneer een getijgolf een getijdebekken binnenstroomt, kan hij volledig reflecteren als een staande golf (kort bekken, het bekken heeft de lengte van een halve golflengte of een veelvoud ervan) of resoneren wanneer de lengte van het bekken niet hetzelfde is als een halve golflengte of een veelvoud daarvan [figuur

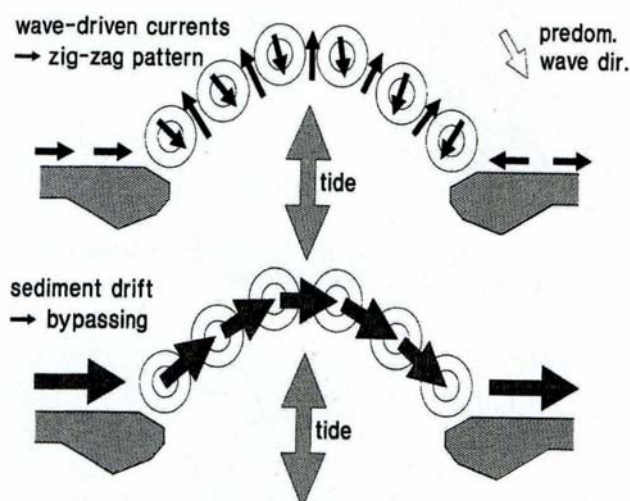


Figuur 12a: Voorbeelden golflengtes voor staande golf (I)

Figuur 12b: Een dempende golf

12a]. Bij zeer lange bekkens zal de getijgolf door bodemwrijving en de zwakke reflecterende golf uitdempen [figuur 12b]. Het volume water is veruit het grootst op het punt waar het water de komberging binnenstroomt, het zeegat. Hoe verder in het bekken, hoe kleiner de afvoer wordt. Dit heeft als gevolg dat de dwarsdoorsneden van de geulen naar binnen toe ook steeds kleiner worden in vergelijking met de doorsnede van het zeegat zelf. De vorm van de geulen wordt daarnaast nog eens mede bepaald door de asymmetrie van het getij.

De watermassa, waarmee de komberging gevuld wordt, neemt enorme volumes zand met zich mee. Dit zand wordt door het littoraal sediment transport langs de Nederlandse kust meegenomen. Op de plaatsen waar de continue kustlijn onderbroken wordt, wordt een deel van dit zand door getij en golven naar binnen



Figuur 13: Komberging; stromingspatronen in een zeegat (Stive, 2006)

meegevoerd de komberging in. Hierdoor ontwikkelen de geulen van de vloeddelta aan de binnenzijde van het zeegat zich verder. Een ander deel van het zand wordt of rechtstreeks of via ontelbare zigzaggende bewegingen, door het getij veroorzaakt, door de geulen van de ebdelta naar de overkant van het zeegat getransporteerd [figuur 13]. Bij het leegstromen van de komberging stroomt een groot deel van het zand weer mee naar buiten om daar weer opgenomen te worden in het littoraal sediment transport of de zigzaggende stromingen door de geulen van de ebdelta. Een andere mogelijkheid voor het zand is in de ebdelta bezinken. Bij het in- en uitstromen van de komberging heeft het zand verschillende snelheden. Bij lage stroomsnelheden bezinkt een deel van de zandmassa in de geulen van de vloeddelta en stroomt het niet meer mee naar buiten. Wanneer er hoge stroomsnelheden in de geulen zijn, zal er zand eroderen uit de geulen en mee naar buiten stromen [Stive, 2006]. Hierdoor veranderen de doorsneden van de geul continu. Bij deze cyclus zou in theorie een natuurlijk evenwicht tussen de komberging, het volume water dat er gedurende één getijde cyclus in en uit het bekken stroomt en het zandtransport moeten ontstaan.

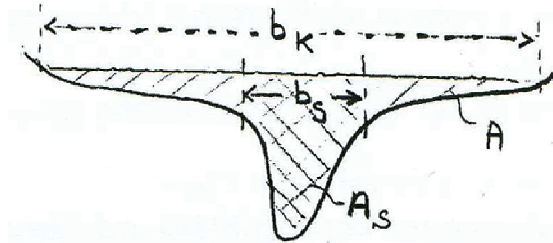
2.3 Processen in de geulen

Zoals eerder genoemd bestaat een geulsysteem van een getijdebekken uit vloed- en ebscharen. Deze geulen vermijden elkaar of raken elkaar in de flank [figuur 9]. Redenen hiervoor zijn, door het getij veroorzaakt, de bochtwerking, het zandtransport en de komberging. Hierdoor ontstaat er in een geul erosie en sedimentatie.

2.3.1 Komberging

Bij komberging zijn de afmetingen van geulen en zandbanken van belang bij het bepalen van de berging, de stroming en daarmee de sedimentatie en erosie.

Figuur 14 laat zien welke parameters in een doorsnede van een willekeurige geul in een getijdebekken van belang zijn. De as van de geul in de lengte wordt als x-



Figuur 14: Geul; doorsnede met parameters van een geul (Stive, 2006)

richting gekozen. Deze parameters $A(x,t)$, $b_k(x,t)$, $b_s(x,t)$ en $A_s(x,t)$ vormen weer de

$$A_s = b_s H = b_s (h + \eta)$$

$$(A_s u_s)_x + b_k \eta_t = 0$$

$$Q = \bar{A} u = A_s u_s \rightarrow u_s = \frac{Q}{A_s}$$

$$\frac{1}{b_k} (b_s H u_s)_x + \eta_t = 0$$

Vergelijking 4: Bepaling
stroomvoerende oppervlakte

Vergelijking 5: Massabalans

input voor een drietal balansen die van belang zijn: de massabalans, de momentumbalans en de energiebalans. A_s is de stroomvoerende oppervlakte en kan volgens vergelijking 4 berekend worden. B_s is daarin de stroomvoerende breedte en H is de diepte, opgebouwd uit de gemiddelde waterdiepte plus de waterstandverhoging door het getij. Wanneer de afvoer door een geul bekend is, kan ook de stroomsnelheid bepaald worden in de geul. De snelheid speelt weer een rol in het sedimentatieproces. In hoofdstuk 4.2 en 4.3 wordt deze vergelijking gebruikt samen met de hypsometrie en semi-empirische relaties uit hoofdstuk 3.4 om maatregelen in de huidige vaarroute te nemen of de dimensies van de nieuwe geulen te bepalen, op basis van de lodingen van 2006 [9].

Verder is het zo dat de continuïteitsvergelijking geldt. De volumeverandering door in- en uitgaand transport moet gelijk zijn aan de volumeverandering door

$$(A_s u_s)_t + (A_s u_s^2)_x + (b_k - b_s) \eta_t u_s + g A_s \eta_x + \frac{b_s}{\rho} \tau_b = 0$$

$$u_t + u u_x + g \eta_x + c_D \frac{|u|u}{H} = 0$$

Vergelijking 6: Momentumbalans

waterstandveranderingen in het gehele bekken. Daarvoor is de massabalans [vergelijking 5]. De momentumbalans [vergelijking 6] geeft de momentumverandering, de verandering voor in- en uitgaand momentumtransport in de dwars- en langsdoorsnede, het drukverschil en de bodemwrijving weer. Deze kan herschreven worden tot een ondiep water getijvergelijking (tweede regel vergelijking 6)

Tot slot is het van belang om de energie in een getijdebekken te kunnen bepalen. Het verspillen van energie in een bekken komt de vaardiepte niet ten goede. Met

de eerste regel van vergelijking 7 is het mogelijk om de hoeveelheid energie te bepalen in een getijdebekken per eenheid van lengte. De hoeveelheid energie over een complete periode van het getij is 0. De energiebalans die daaruit volgt staat in de tweede regel van vergelijking 7. Aan de rechterkant staan de inkomende en uitgaande energietransporten in langs- en dwarsrichting. Aan de linkerkant staat het energieverlies door de bodemwrijving.

$$E = \left\langle b_k \frac{1}{2} g \rho \eta^2 + A_s \frac{1}{2} \rho u^2 \right\rangle; E_t = 0$$

$$\frac{\delta}{\delta x} \left\langle A_s u \left(\frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g \eta \right) \right\rangle + \left\langle (b_k - b_s) \eta_t \frac{1}{2} \rho u^2 \right\rangle = - \left\langle b_s \tau_b u \right\rangle$$

Vergelijking 7: Energiebalans

Zoals eerder beschreven in paragraaf 2.1.1 verloopt de cyclus van het getij nooit gelijk. De periode van opkomend water is niet gelijk aan de periode van afgaand

$$(\mu l)^2 \ll 1$$

$$(kl)^2 \ll 1$$

Vergelijking 8: relatie tussen golfgetal en lengte bekken

water. Dit wordt de getij asymmetrie genoemd.

Het Friesche Zeegat kan door middel van de relaties uit onder andere vergelijking 8 gezien worden als een kort getijdebekken waardoor vergelijking 9 geldt.

$$\tan(\omega t + \varphi) = \frac{\tanh(\mu(x-l))}{\tan(k(x-l))} \approx \frac{\mu}{k}$$

Vergelijking 9: relatie tussen golfgetal, periode en fase

$$t_{HWK}(x) - t_{HWK}(l) \approx t_{HWK}(x) - t_{HW}(l) \approx 0$$

$$t_{LWK}(x) - t_{LWK}(l) \approx t_{LWK}(x) - t_{LW}(l) \approx 0$$

Vergelijking 10: Bepaling tijdstip kentering

Hierdoor kan gesteld worden dat de kenteringen door het hele bekken gelijktijdig plaatsvinden. Dat kan als volgt uitgeschreven worden in vergelijking 10.

$$t_{HW}(0) - t_{LW}(0) = \frac{1}{2} T$$

Vergelijking 11: Symmetrie in het zeegat

Wanneer aangenomen wordt dat bij de entree van het zeegat het getij symmetrisch is kan het verschil tussen de tijdsperiode van eb en vloed op de volgende manier benaderd worden zoals beschreven in vergelijking 11.

Het superscript + staat voor de periode tussen hoogwater en hoogwater kentering (HW → HWK), het superscript - is de periode tussen laagwater en de laagwater kentering (LW → LWK) [vergelijking 12].

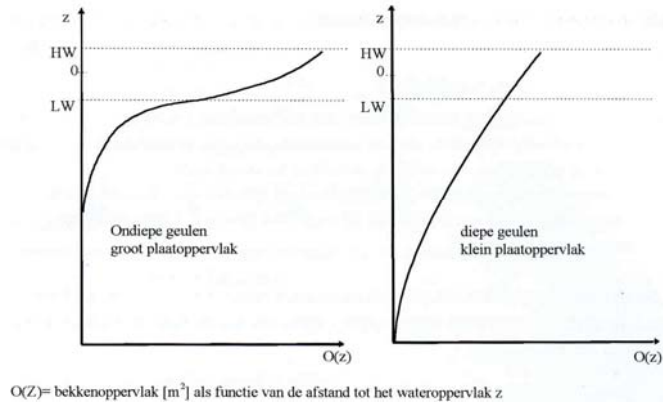
$$\Delta t_{flood} - \Delta t_{eb} \approx \pi \frac{r l^2}{g} \left[\frac{1}{H^+ H_K^+} - \frac{1}{H^- H_K^-} \right] \propto -H^+ H_K^+ + H^- H_K^-$$

Vergelijking 12: Periodes in relatie tot de waterstanden

Het verschil tussen deze tijdsperiodes geeft weer dat in theorie door de ongelijkheid in vloed- en ebperiode de gemiddelde stroomsnelheid tijdens vloed verschilt met de snelheid bij eb en daarmee ook het gemiddelde sediment

transport verschilt in beide periodes [Stive, 2006]. Echter onderzoek en metingen [Oost, 1995] hebben aangetoond dat de gemiddelde stroomsnelheden tijdens eb en vloed vergelijkbaar zijn. Bij het opkomende tij neemt door het buitentreden van de geulen de snelheid af en bij afgaand tij neemt de snelheid weer toe zodra het water zich enkel nog in de geul concentreert.

Van een getijddebekken moet bepaald worden wat de eigenschappen zijn. Een bekken met veel berging gedurende hoogwater door een groot oppervlakte aan zandplaten heeft de eigenschap zoals in vergelijking 13 beschreven wordt.



Figuur 15: Hypsometrie in twee verschillende bekken.

Een andere eigenschap is de diepte van de geulen. Wanneer de amplitude van de getijgolf gedeeld door de diepte veel kleiner is dan 1 geldt vergelijking 14. Dit betekent een langere vloedperiode en daardoor is de snelheid van de ebstroom

$$\left(\frac{b_K}{b_s}\right)^+ \square \left(\frac{b_K}{b_s}\right)^-$$

Vergelijking 13: Bepaling eigenschappen bekken, oppervlakte

$$\left(\frac{a}{h}\right) \square 1 \rightarrow H^+ \approx H^- \rightarrow (HH_K)^+ \square (HH_K)^-$$

Vergelijking 14: Bepaling eigenschappen bekken, diepte

groter dan de vloedstroom. Voor bassins met een kleine berging en ondiepe geulen geldt natuurlijk precies het omgekeerde [vergelijking 15]. Figuur 15 geeft weer wat eigenschappen als geuldiepte en plaatoppervlakte voor invloed hebben op de stijging van het water in een bekken.

$$\left(\frac{b_K}{b_s}\right)^+ \approx \left(\frac{b_K}{b_s}\right)^- \rightarrow H^+ > H^- \rightarrow (HH_K)^+ > (HH_K)^- \quad (HH_K)^+ \approx (HH_K)^-$$

Vergelijking 15: Bepaling eigenschappen bekken

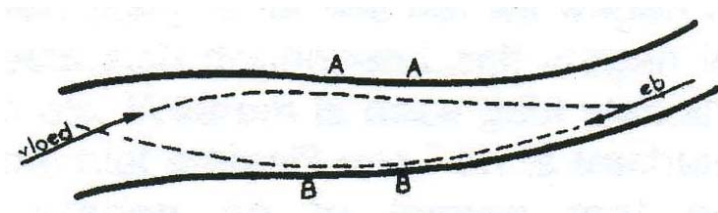
Vergelijking 16: Bepaling eigenschappen bekken

Ondanks de ongelijkheden in de verschillende periodes van het getij en de daarbij optredende sedimenttransporten wordt er gestreefd naar een evenwicht in het bekken. Het is daarbij nodig om te weten of een getijddebekken sediment importeert of exporteert. Dit kan gebaseerd worden op het morfologisch evenwicht. Dit morfologisch evenwicht ontstaat wanneer vergelijking 16 geldt.

2.3.2 Bochtwerking

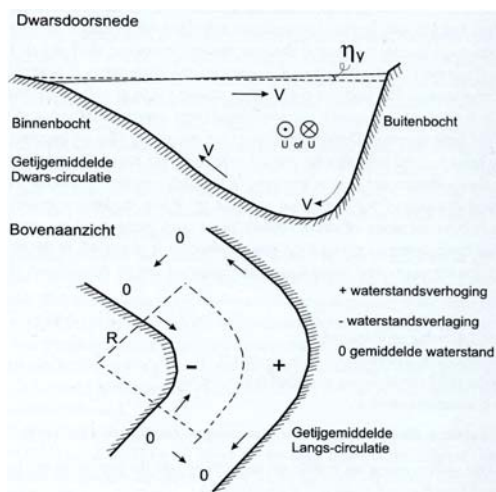
Een andere reden is de bochtwerking in een getijddebekken. De eb- en vloedstroom in een simpele S-bocht, zoals in figuur 16 laat zien hoe een vloed- en een ebschaar

gevormd worden. Op beide oevers zijn punten die eroderen door één van de stromen.



Figuur 16: Erosie in een bocht door de eb- en vloedstroom

Bij ongeleide bochten is het door de centrifugale kracht niet mogelijk dat de eb- en vloedstroom op hetzelfde pad liggen. Een geul wordt normaliter pas gestopt wanneer het een steenachtige constructie tegenkomt. Maar op het wad kan het ook voorkomen dat een bocht in een geul te wijd wordt en dat de te ruime bocht afgesneden wordt. De verwachting is dat afsnijding plaatsvindt op een plek waar de vloodschaar ligt, maar dit blijkt niet zo te zijn. Een doorbraak van een drempel van een vloodschaar gebeurt zelden op het wad en als het gebeurt, is het van korte duur en vaak niet volledig. Een oorzaak hiervan is dat er over een drempel veel zandtransport plaatsvindt. Dit transport veroorzaakt sterke stromingen en een groot verhang. De bochten en indirect ook de zandplaten komen voort uit de horizontale en transversale circulerende stromingen in een geul, veroorzaakt door een bocht in het traject. In vergelijking 17 wordt een balans beschreven voor de transversale krachten, waarbij uitgegaan wordt van een transversale stroming in een bocht onder invloed van bodemwrijving en een luchtdrukverschil. Het eerste deel van de vergelijking beschrijft de centrifugale kracht, het tweede deel het Corioliseffect, het derde deel van de vergelijking is het verschil in luchtdruk en deel vier van de vergelijking beschrijft de turbulente viscositeit van de stroming.



Figuur 17: Geul; bochtwerking in een geul, doorsnede en bovenaanzicht (Stive, 2006)

In figuur 17 is te zien hoe de stroming zich gedraagt door een dwarsdoorsnede en een bovenaanzicht van de geul. Daaruit wordt duidelijk dat de transversale stroming naar binnen gerichtet is. Dit veroorzaakt ein sedimenttransport van de buitenbocht (erosie) naar die binnenbocht (sedimentatie). Daarnaast veroorzaakt die centrifugale kracht ein Wasserstandsverhoging in die buitenbocht ein -verlaging in die binnenbocht. Hierdoor neemt die snelheit in die binnenbocht af, waardoor zanddeeltjes sneller die kans kriegen om te bezinken.

$$-\frac{u^2}{R} + fu + \frac{1}{\rho} p_y - (Nv_z)_z = 0$$

Vergelijking 17: Krachtenbalans in transversale richting

$$\eta_y = \frac{9}{20} \frac{u(0)^2}{gR} - \frac{5}{8} \frac{fu(0)}{g}$$

Vergelijking 18: Verhang in transversale richting

Het verhang van deze transversale waterstand kan dan berekend worden met vergelijking 18.

2.3.3 Zandtransport

Door de getijstroom en de ongelijkheid van het getij vindt er zandtransport plaats door de geulen van een bekken. Zoals in figuren 18a en 18b al duidelijk zichtbaar is, ontstaat de drempel tussen een vloed- en een ebschaar daar waar de twee zandstromen botsen. De drempel ontstaat logischerwijs in de geul waarin de minste stroming staat en het minst krachtig is. De zanddeeltjes die meegevoerd worden in de getijstroom zijn onderhevig aan een zeefeffect veroorzaakt door het getij. Door de stroomsnelheid van het water, de bodemwrijving en de bochtwerking

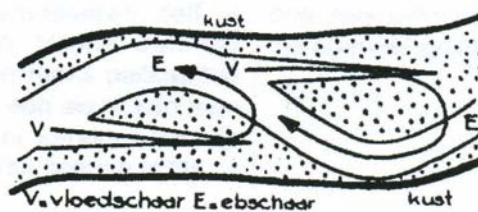


Figuur 18a: Zandtransport; vorming drempel bij aanval in de flanken door de scharen (I) (Van Veen, 1950)



Figuur 18b: Zandtransport; vorming drempel bij splitsing van de scharen (Van Veen, 1950)

zullen de zanddeeltjes nooit allemaal bij het wantij aankomen om te bezinken. Om dezelfde redenen is het ook mogelijk dat zanddeeltjes de ebdelta niet halen. Hierdoor ontstaat een heen en weer beweging voor individuele zanddeeltjes: het zeefeffect [figuur 19]. Dit is dan ook de oorzaak dat op sommige plaatsen in een



Figuur 19: Zandtransport; zeefeffect/zandneer in de geul (Van Veen, 1950)

getijdebekken meer sedimentatie optreedt dan op andere plekken. Daarnaast verschilt in een ebstroom de hoeveelheid zand over de diepte. In bochten bij een ebstroom zijn er bovenin de stroom veel minder zanddeeltjes aanwezig dan onderin de stroom. Dit komt vooral doordat de snelheid van de ebstroom bovenin hoger is dan onderin en dat dus het zandarme oppervlakte water uit de bocht schiet. Het zandrijke water onderin de stroom kan wel de bocht afsnijden vanwege een lagere snelheid [figuur 20]. In een brede geul tussen twee zandplaten door krijgt het zandtransport door toedoen van het eerder besproken getij asymmetrie

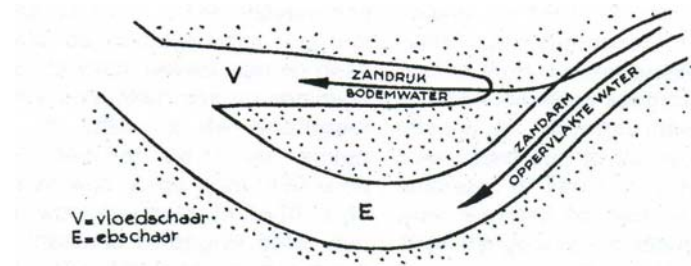
$$S = \rho_{sed} \beta \left| u \right|^{-b-1} \left| u \right|^{-}$$

Vergelijking 19: Empirische bepaling hoeveelheid sediment.

$$\langle S \rangle = f(b_s, h_s, b_p, h_p)$$

Vergelijking 20: Hoeveelheid sediment als functie van geometrische eigenschappen.

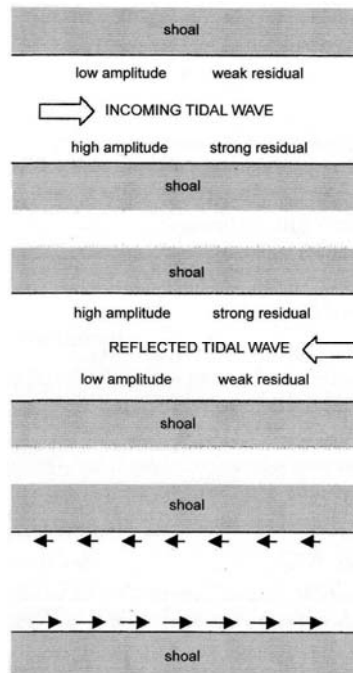
en ook nog door de Coriolis versnelling een patroon zoals in figuur 21 wordt weergegeven. Er ontstaat een verhang in dwarsrichting van de stroming in het kanaal. Daar waar het verhang het grootst is ontstaat een sterkere stroming en dus meer transport.



Figuur 20: Zandtransport: arme en rijke zandstromen in de geul (Van Veen, 1950)

Met een empirische relatie kan de grootte van het transport als volgt beschreven worden [vergelijking 19] waarin voor b een waarde van 3 wordt genomen en voor β een waarde tussen de 10^{-7} - 10^{-4} .

Maar de gemiddelde grootte van het sedimenttransport kan ook aangegeven worden als functie van de dieptes en breedtes van het getijdebekken [vergelijking 20] en omschreven worden naar een vergelijking [vergelijking 21] die weer



Figuur 21, Residueel transport in de geulen door het getij en de Coriolis versnelling

$$\langle S \rangle \propto (HH_K)^+ - (HH_K)^-$$

Vergelijking 21: Hoeveelheid sediment in relatie tot waterstanden

toepasbaar is om het morfologisch evenwicht te bepalen.

Wanneer er in een doorsnede bepaald moet worden wat de grootte van het sedimenttransport is gedurende één getijde periode, kan dat door middel van een simpele meting van gemiddelde snelheid, gemiddelde sediment concentratie en de diepte. Door vervolgens de integraal [vergelijking 22] te berekenen is de grootte van het sedimenttransport bepaald.

$$M(x_0) = \int_0^T h(x_0, t) u(x_0, t) c(x_0, t) dt$$

Vergelijking 22: Sedimenttransport door een bekende doorsnede

$$\frac{H^+}{H^-} = \alpha \sqrt{\frac{b_K^+}{b_K^-}}$$

Vergelijking 23: Importeert of exporteert het bekken?

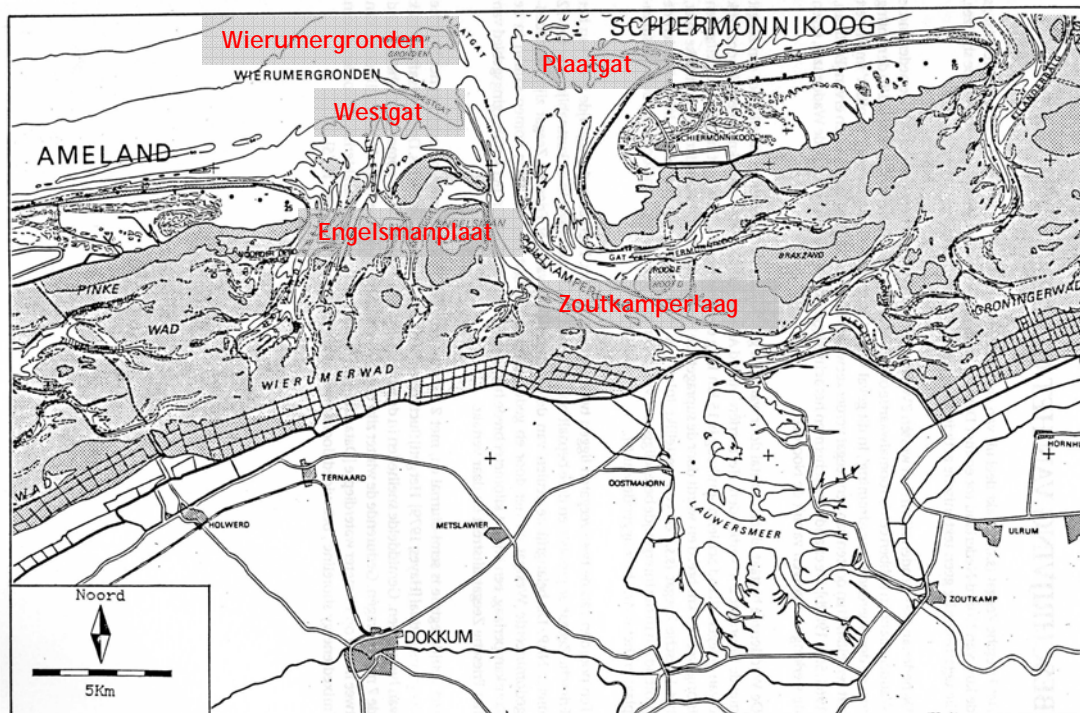
Zoals in de paragraaf over de komberging aangegeven is, wordt er naar een evenwicht gestreefd. Om te weten of een getijdebekken zand importeert of exporteert moet de vergelijking 23 opgelost worden.

Voor een alfa groter dan 1 geldt sediment import, het bekken is te ondiep. Een alfa kleiner dan 1 betekent een sediment export.

Aan de hand van dat gegeven kan ook het evenwicht in het sedimenttransport bepaald worden en gekeken worden welke gevolgen dat heeft voor het getijdebekken [Stive, 2006 en Van Veen, 1950].

2.4 Hydraulische kwalificatie van het Friesche Zeegat

Het zeegat tussen Ameland en Schiermonnikoog bestaat eigenlijk uit twee zeegaten, die door de zandplaat Engelsmanplaat gescheiden worden. Het zeegat naast Ameland is het Pinkegat en blijft buiten beschouwing van dit onderzoek zolang aantoonbaar is dat Engelsmanplaat niet verdwijnt door erosie of bodemdaling

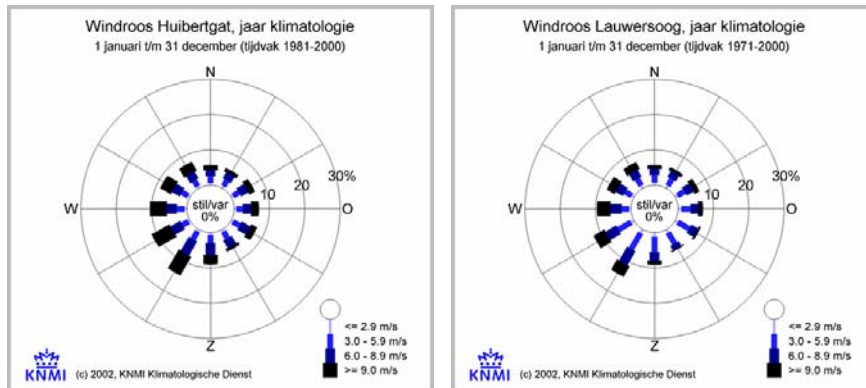


Figuur 22: Het Friesche Zeegat (Oost, 1992)

[Wang, 2007]. Het Friesche Zeegat is het ongeveer 3 kilometer brede zeegat tussen Engelsmanplaat en Schiermonnikoog. Als eerste is het noodzakelijk om het Friesche Zeegat te kwalificeren en goed te beschrijven. Dat wordt gedaan aan de hand van het bovenstaande figuur 22. In deze figuur zijn de volgende kenmerken te onderscheiden: de vloedgeul Westgat, de ebgeul Plaatgat en de ebdelta Wierumergronden, die gekenmerkt wordt door de grote zandbank aan de noordkant van Schiermonnikoog. De geul waar de vloedgeul en de ebgeul samen komen is de Zoutkamperlaag [Oost, 1992].

In het te onderzoeken getijdebekken van het Friesche Zeegat, is op het meetstation bij de veerdam van Schiermonnikoog het gemiddelde verschil tussen hoog- en laagwater 2,29 meter. Het horizontale getij heeft bij doortij een maximale snelheid van 1,3 knopen (=0,67 m/s) en bij springtij een maximale snelheid van 1.7 knopen (=0,87 m/s) (bron Stroomatlas voor de Waddenzee, locatie Schiermonnikoog [9]).

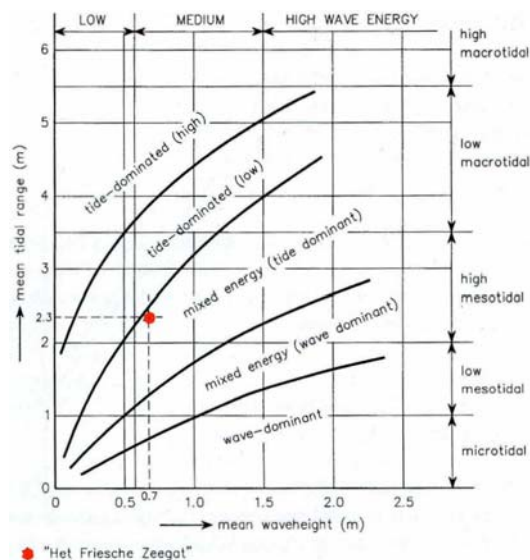
Over de overheersende windrichting kan het volgende gezegd worden. Aan de hand van de gegevens van de meetlocaties Schiermonnikoog-Noord en Lauwersoog blijkt dat een windrichting tussen Zuid en West overheersend is [figuur 23]. De bijbehorende strijklengtes over de Waddenzee variëren tussen de 2,20 kilometer en 8,35 kilometer.



Figuur 23: Wind; windroos KNMI meetlocaties Huibertgat (Noordzee) (I) en Lauwersoog

Dit veroorzaakt een windopzet tussen de 0,10-0,20 m. Zoals al eerder gezegd heeft deze windopzet weinig invloed op de morfologische ontwikkelingen en wordt dan ook buiten beschouwing gehouden.

De golven vanaf de Noordzee die sediment met zich meebrengen en het getijdebekken penetreren komen grotendeels uit de richting 260-360 graden (Noordwestelijke richting) wanneer de meetgegevens van de meetlocatie Schiermonnikoog-Noord gebruikt worden. De significante golfhoogtes kunnen oplopen tot 2,33 meter in het zeegat gedurende de winterperiode. De golven vanaf de Waddenzee zijn windgolven die een hoogte van 1,20 meter bereiken [9].



Figuur 24: Hydrodynamische classificatie zeegaten (Stive, 2006)

De invloed van de zeespiegelstijging is in zoverre relevant, dat in het getijdebekken meer water geborgen moet worden. Echter door de goed beschermde randen van het bekken zal het bekken in oppervlakte niet vergroten. De waterstand in het bekken wordt hoger en daarmee verdwijnen zandplaten en wordt het evenwicht verstoord. Duidelijke uitspraken zijn echter nog moeilijk te doen over de effecten op de Wadden en het Friesche Zeegat in het bijzonder [van Goor, 2003].

Het Friesche Zeegat kan aan de hand van deze gegevens en de theorie uit de eerdere paragrafen van dit hoofdstuk getypeerd worden als een mesotidal systeem met veel golf energie. Toch domineren de golven niet, de grote zeegaten, de vorm van de westkant van Schiermonnikoog en de grote ebdelta geven aan dat er hier sprake is van een zeegat dat door het getij gedomineerd wordt, een zogenaamde mixed energy coast [figuur 24] [Hayes, 1980 en Stive, 2006].

3. Het Friesche Zeegat

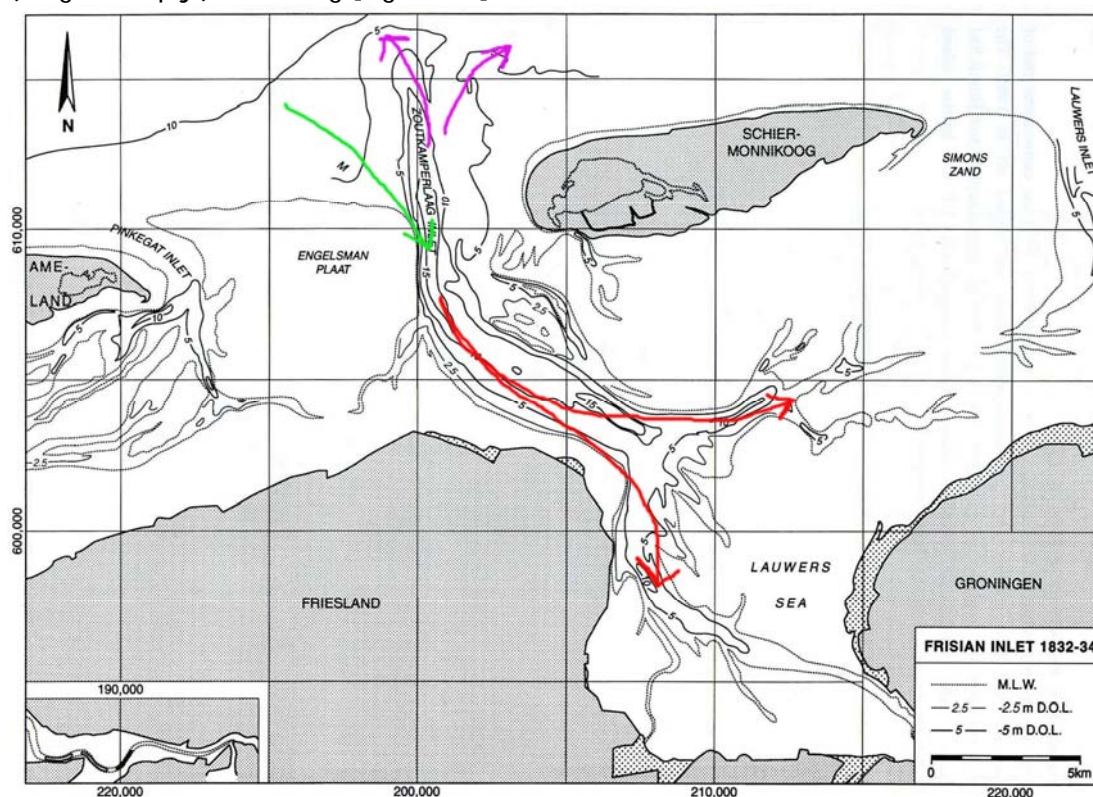
De geschiedenis van het Friesche Zeegat is op te delen in twee periodes. De periode voor en de periode na de afsluiting van de Lauwerszee. Deze periodes zijn ook onafhankelijk van elkaar onderzocht [Oost & de Haas, 1992, 1993]. De eerste paragraaf van dit hoofdstuk behandelt de periode voor de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 en de tweede paragraaf de periode na de afsluiting tot 2008. De geschiedenis en de ontwikkelingen van de vaarroute naar Schiermonnikoog staan in de derde paragraaf. De laatste paragraaf gaat dieper in op het Friesche Zeegat als model. Om de hypothesen te kunnen bewijzen wordt er gebruik gemaakt van zowel semi-empirische als procesmatige modellering. In dit hoofdstuk worden de hypothesen geformuleerd die getoetst moeten worden met de modellen.

3.1 De ontwikkelingen voor 1969

Als de ontwikkeling in het Friesche Zeegat bekeken wordt, dan kan het volgende opgemerkt worden over de ontwikkelingen van de geometrie van het Friesche Zeegat en dan specifiek die van de Zoutkamperlaag sinds 1832. De ontwikkelingen worden opgedeeld in de ebdelta, de vloeddelta [figuur 22] en het eiland zelf.

3.1.1 De ebdelta

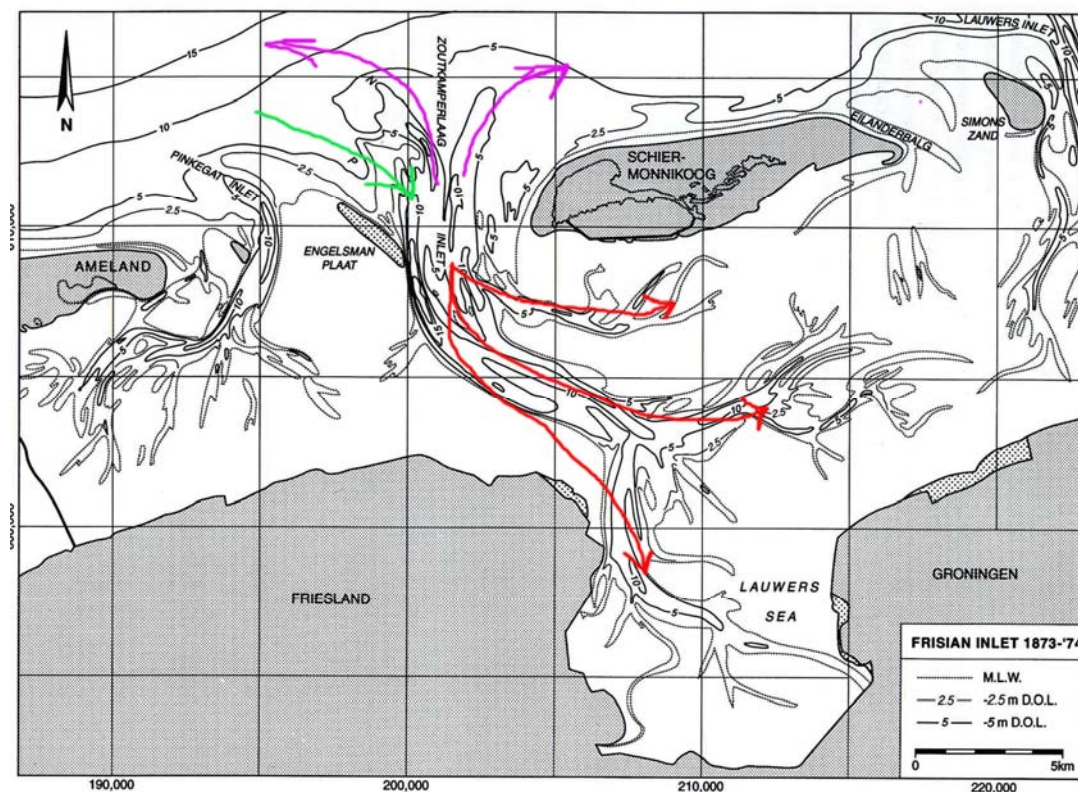
Bij het begin, rond 1830, van de historische analyse van het Friesche Zeegat bestaat de Zoutkamperlaag uit een noord-zuid geul die richting de Noordzee splitst in twee ebscharen (paarse pijlen) waarvan de noordwest georiënteerde schaar het belangrijkste was. Aan de zuidwestkant van de ebdelta is de vloodschaar Middengat (M, groene pijl) aanwezig [figuur 25].



Figuur 25: Geometrie Friesche Zeegat 1832-1834 (Oost, 1995)

In de jaren die volgen verplaatst het Middengat zich naar het noorden waar het als ebschaar een open verbinding vormt met de zee rond 1850. In de zuidwesthoek van

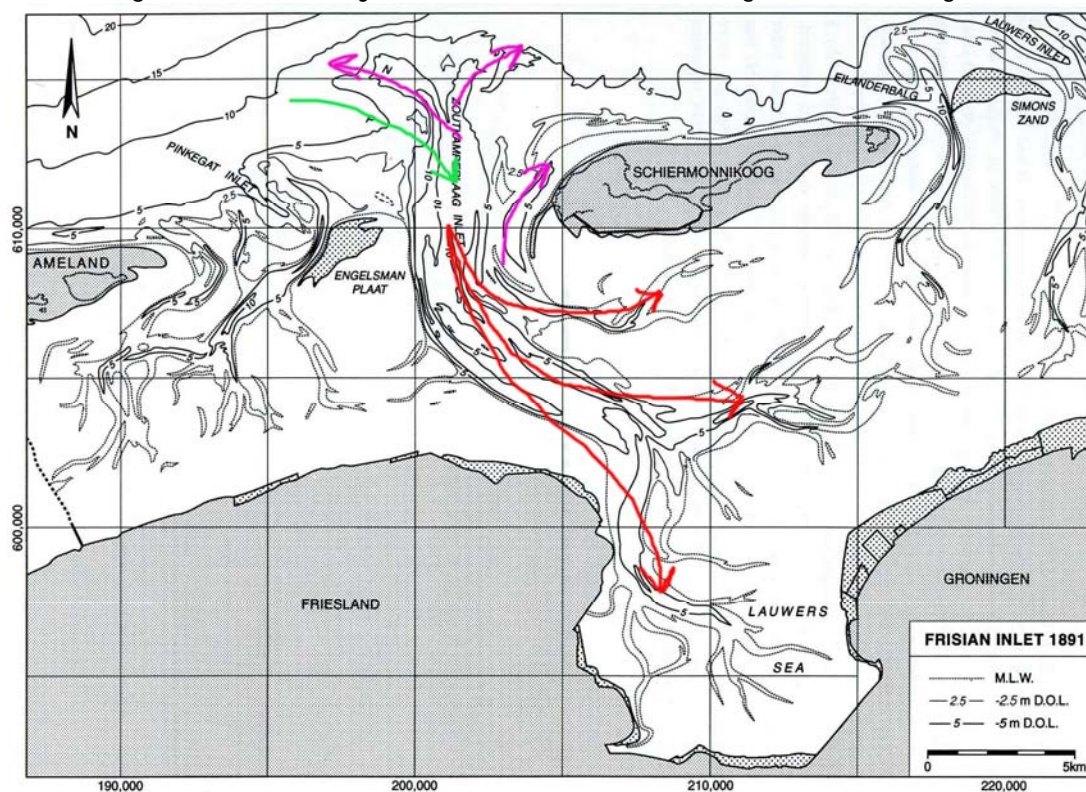
de ebdelta ontstaat een nieuwe vloedschaar, het Oude Middengat. Van de ebdelta ontwikkelt de westkant zich als het deel met de open verbinding naar zee. Deze verbinding is Noordwest georiënteerd en wordt dan ook het Noordwestgat genoemd. Door de vorming van zandplaten aan de oostkant van de ebdelta is er in het oosten geen open verbinding met de zee. Van de twee ebscharen, het Noordoostgat en het Oostgat, heeft alleen het Noordoost gat een open verbinding. Door een zandbank worden de twee belangrijkste ebscharen gesplitst. Aan de westkant zijn drie scharen: twee vloedscharen waaronder het Oude Middengat en een ebschaar, het Rifgat. Het Noordoostgat is nog steeds aanwezig in het oosten van de ebdelta, waar het Oostgat volledig is afgestoten als ebschaar. De situatie in 1874 [figuur 26] geeft weer dat de oostelijke en westelijke ebschaar door een zandplaat zich meer van



Figuur 26: Geometrie Friesche Zeegat 1873-1874 (Oost, 1995)

elkaar verwijderen. Het Plaatgat (P, groen) als vloedschaar en het Noordgat (N, paars) als ebschaar vormen de belangrijkste geulen voor het westelijk deel van de ebdelta. Te zien is dat het Oostgat is verdwenen en dat de ebschaar het Noordoostgat (paars) zich naar oostelijke richting heeft verplaatst in het oostelijk deel. In 1891 is er aan de westkant van de ebdelta weinig veranderd. Aan de oostkant is de ebschaar volledig verdwenen en ontstaat er aan de noordkant van dit oostelijk deel van de ebdelta een nieuw ebschaar. Naar het oosten toe is er dus geen open verbinding meer met de zee. Het oude Noordoostgat heeft zich meer richting het eiland verplaatst en voedt daar als ondiepe geul, de geul die zuidwestelijk onder het eiland doorloopt en de vloeddelta vult [figuur 27]. In de volgende jaren verplaatsen de belangrijke scharen uit het westelijke deel van de ebdelta zich met de klok mee naar het oosten. Aan de zuidwestkant ontstaat wederom een nieuwe vloedschaar. De oude vloedschaar Plaatgat verplaatst zich in meer noordelijke richting. Aan de oostkant komt de verbinding tussen de scharen en de hoofdgeul weer tot stand. Het Plaatgat ontwikkelt zich verder als verbinding tussen zee en bekken. Aan de noordkant van het Plaatgat ontstaat nog een

vloedschaar. Het oostelijke deel van de hoofdgeul verliest in deze jaren de verbinding met het westelijke deel. In 1927 is het Plaatgat noord-zuid georiënteerd



Figuur 27: Geometrie Friesche Zeegat 1891 (Oost, 1995)

en vervult het de functie van ebschaar. Aan de oostelijke kant van de ebdelta is de verbinding met de hoofdgeul deels weer verdwenen. Enkel resten van de oude scharen die door verplaatsing met de klok mee richting het eiland zijn gegaan, vormen een ondiepe ebschaar.

In 1934 [figuur 28] het de ebdelta vijf verschillende eb- en vloedscharen die zich met de klok mee verplaatsen door de delta van west naar oost. Het Plaatgat draait verder naar het oosten en wordt het Oude Plaatgat (OP) en de vloedschaar in het zuidwesten draait meer richting het noorden en wordt het Nieuwe Plaatgat (NP).

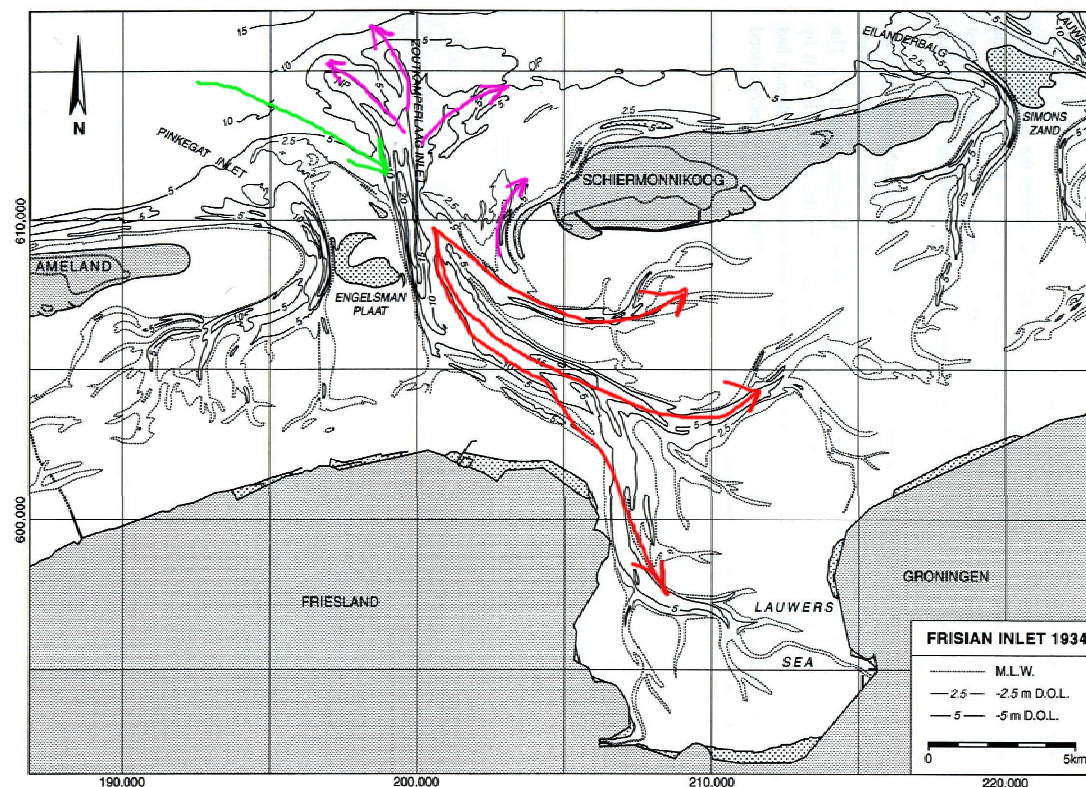
Eind jaren twintig blijft de configuratie van de ebdelta van de Zoutkamperlaag nagenoeg hetzelfde. De belangrijkste vloedschaar loopt in west-oost richting en de belangrijkste ebschaar loopt noord-zuid. De oostelijke kant van de delta is niet actief. Na de oorlog in het begin van de jaren vijftig is het Nieuw Plaatgat noord-zuid komen te liggen en is het Oude Plaatgat volledig afgesloten van de hoofdgeul. In de zuidwest hoek van de ebdelta is een nieuwe schaar ontstaan. Aan de oostkant ontstaat weer een vloedschaar. Dit is het gevolg van het doordraaien van de noord-zuid scharen met de klok mee.

In 1958 [figuur 29] kan de situatie als volgt beschreven worden. De schaar die in het zuidwesten van de ebdelta is ontstaan, ontwikkelt zich tot vloedschaar. Het Plaatgat heeft nu twee duidelijke ebscharen, het Noordwestgat en het nieuwe Plaatgat, dat noord-noord-oost georiënteerd is. De oostelijke vloedschaar ontwikkelt zich verder in de breedte. [Oost, 1995].

Tot slot 1967 [figuur 30], twee jaar voor de afsluiting van de Lauwerszee, het Noordwestgat wordt dieper en het nieuwe Plaatgat wordt ondieper. De ebdelta blijft groot en in het oosten van de delta voor de kust van Schiermonnikoog wordt de ebschaar steeds meer afgestopt door een zandbank die daar ontstaat.

3.1.2 De vloeddelta

De hoofdgeul van de ebdelta loopt in 1834 door in de vloeddelta (rode pijl) en splitst zich in twee geulen. De noordelijke tak richting het wantij in het oosten en de zuidelijke tak die de Lauwerszee vult [figuur 25]. Rond 1850-1859 ontstaat een derde tak in deze hoofdgeul die nog noordelijker loopt en daarmee een geul onder het eiland Schiermonnikoog vormt.



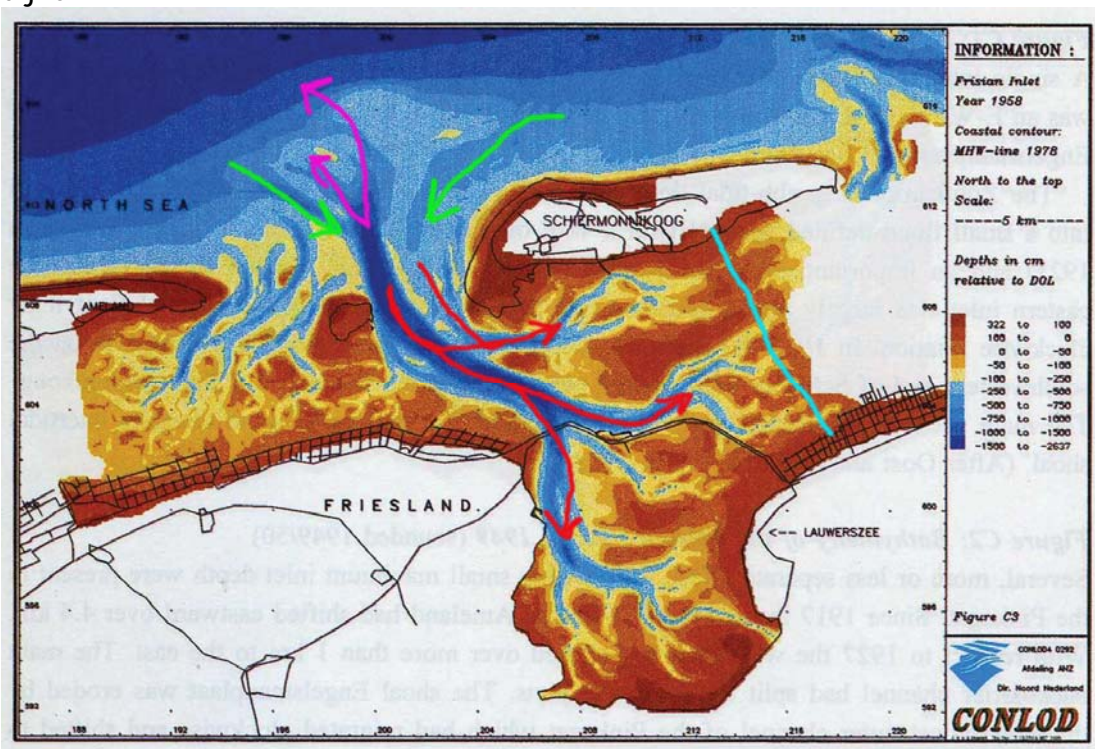
Figuur 28: Geometrie Friesche Zeegat 1934 (Oost, 1995)

Het wantij van Schiermonnikoog is ver naar het oosten gelegen. Rond 1874 ontwikkelen alle drie de vertakkingen zich. De meest noordelijke tak wordt direct vanuit de hoofdgeul van de Zoutkamperlaag gevuld [figuur 26]. De rest van de vloeddelta blijft nagenoeg gelijk, op een aantal plekken zijn er lichte veranderingen zichtbaar in de dieptes van de geulen. Het wantij van Schiermonnikoog wordt, door invloed van de sterker wordende vloeddelta van de Lauwers, smaller en teruggedrongen in westelijke richting. De drie hoofdgeulen van de vloeddelta in het getijdebekken blijven bestaan doordat de zandplaten die de vertakkingen scheiden hoger worden. De zuidelijkste tak voedt de Lauwerszee, de middelste tak voedt het zuidelijk deel van de Waddenzee onder Schiermonnikoog en loopt in oostelijke richting door tot op tweederde van de lengte Schiermonnikoog. Verder is er aan de westkant van Schiermonnikoog een geul ontstaan, die gevuld wordt door de geulen uit het oostelijk deel van de ebdelta [figuur 27]. In de daarop volgende jaren blijven de drie hoofdgeulen in de vloeddelta stabiel qua ligging. Enkel wat veranderingen in de diepte komen voor. In 1934 breekt het wantij bijna door op een plek waar de vloedgeulen van de Zoutkamperlaag en de Lauwers elkaar tegenkomen [figuur 28]. In het tijdspad richting de afsluiting van de Lauwerszee verandert de vloeddelta niet drastisch meer. Het geheel lijkt in evenwicht. De meest noordelijke geul onder Schiermonnikoog is inmiddels verder vertakt, de noordelijke tak is de huidige Groote Siege, de zuidelijke tak is het Brakzandstergat [figuur 29 en figuur 30]. De

impact van de afsluiting van de Lauwerszee op de vloeddelta wordt in paragraaf 3.2.2 verder besproken [Oost, 1995].

3.1.3 Het eiland

Een eiland zal zich in de loop der jaren altijd verplaatsen in de richting van het getij. Voor Schiermonnikoog betekent dit, dat aan de westkant erosie plaatsvindt en aan de oostkant van het eiland sedimentatie ontstaat. Het gevolg van de erosie in de periode 1717 - 1760 op Schiermonnikoog is dat een tweetal dorpen, Westerburen en Dampen, aan de zuidwestkant van het eiland werden verzwolgen door de zee [4]. Vanaf 1891 ontstaat er aan de zuidwestkant van Schiermonnikoog een zandbank, die eraan bijdraagt dat het zand daar afgezet wordt. Deze zandbank wordt in de loop der tijd nog menigmaal beproefd door de zee, maar toch ontwikkelt zich hier een stuk nieuw eiland, het Rif. Bij het Duitse Waddeneiland Spiekeroog gebeurt eigenlijk hetzelfde als wat er bij Schiermonnikoog vanaf 1891 gebeurde. Een grote inter-getijden zandbank vormt zich aan de zuidwestkant van het eiland [vanaf figuur 27]. Een ontwikkeling die tot op heden bij het Duitse Norderney en Ameland niet gebeurd is [FitzGerald, 1987 en Knaack, 1993]. Beide eilanden hebben nog steeds te maken met een diepe geul meteen onder het eiland die een sterk eroderende werking uitoefent op de westkust van het eiland. Dit vraagt dan ook om de nodige maatregelen om deze (zuid)westelijke kustlijn te handhaven en te verdedigen. In dezelfde tijd wordt ook de zuidkant van Schiermonnikoog gefixeerd door het aanleggen van de eerste dijken.

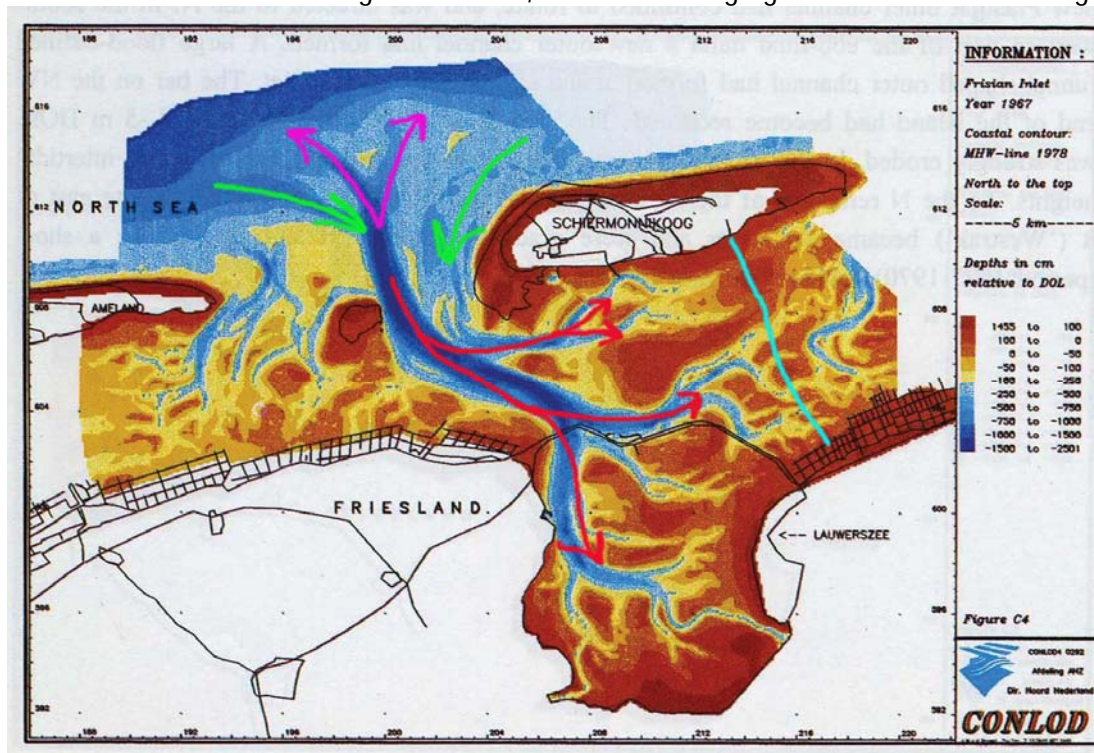


Figuur 29: Geometrie Friesche Zeegat 1958 (Oost, 1995)

In de periode tot de afsluiting van de Lauwerszee verandert het eiland niet of nauwelijks. Het Rif stabiliseert zich en zorgt ervoor dat de noordelijke tak van de hoofdgeul van de Zoutkamperlaag het eiland niet aantast door erosie. Aan de noordwest kant van Schiermonnikoog wordt het strand steeds breder en hoger, zodat ook aan die kant een veilige stabiel situatie ontstaat. Het eiland Schiermonnikoog kalft niet af aan deze kant en zal dus in lengte alleen nog maar gaan groeien.

3.2 De ontwikkelingen na 1969 tot 2008

In de periode 1961 - 1969 wordt de Lauwerszee afgesloten en wordt vanaf dat moment het Lauwersmeer [5][6]. De gevolgen hiervan voor dezelfde onderdelen als in de vorige paragraaf van het Friesche Zeegat worden hieronder besproken. In 1969 wanneer de afsluiting een feit is, is de komberging van het Friesche Zeegat



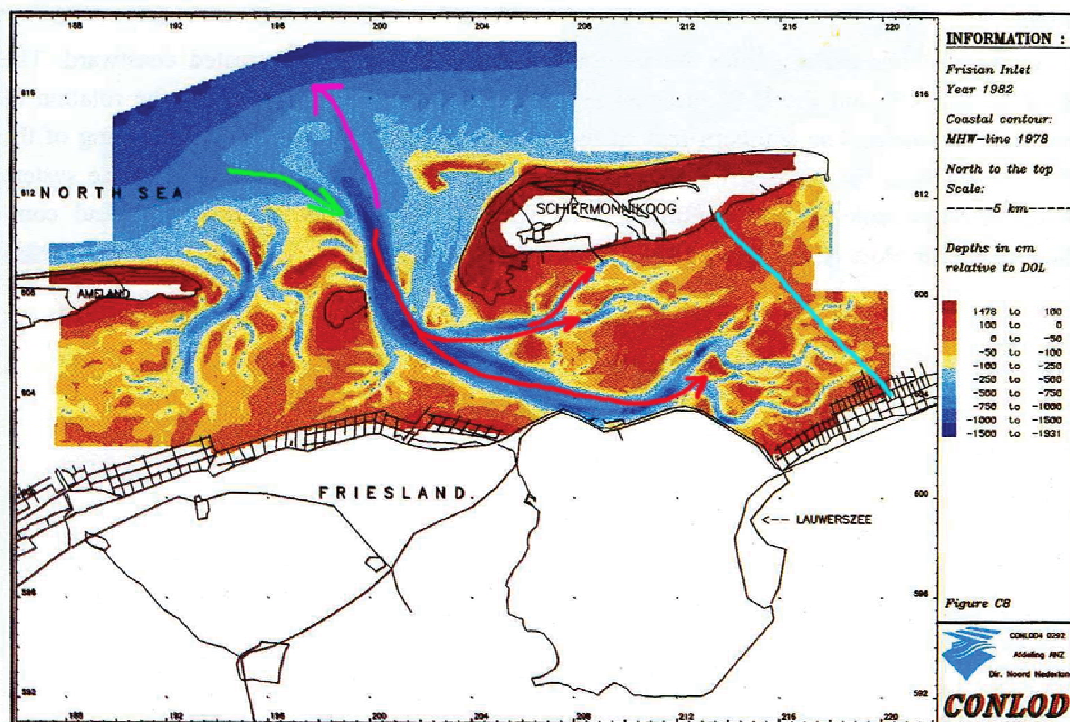
Figuur 30: Geometrie Friesche Zeegat 1967 (Oost, 1995)

getijdebekken afgenomen van 305 miljoen kubieke meter naar 200 miljoen kubieke meter. De gevolgen hiervan zijn direct merkbaar voor het Friesche Zeegat.

3.2.1 De ebdelta

In de eerste plaats ontstond er erosie in de ebdelta, omdat deze te groot werd voor het Friesche Zeegat. Van het zand van de geërodeerde ebdelta werd een deel naar de zandbank, die zich in west-oost richting aan de noordwest kant van Schiermonnikoog vlak voor de kust ontwikkelt, getransporteerd. Een ander deel, het grootste deel, werd via het zeegat naar de vloeddelta gevoerd waardoor het zeegat en de hoofdgeul verzanden. Er ontstaat een vloodschaar, het Westgat, in de richting west-oost en in de noordwestelijke richting ontwikkelt zich een ebschaar. Beide scharen zullen zich in de loop der jaren met de klok mee verplaatsen naar het oosten, echter aan de oostelijk kant van de ebdelta worden de geulen geblokt door de zandbank, die daar groeit en een permanente positie krijgt. Ook de diepte van de geulen in de ebdelta neemt af. De zandbank voor de noordwestkust van Schiermonnikoog begint zich nu ook in noord-zuid richting te ontwikkelen. Verder zet de erosie van de ebdelta zich voort net zoals het ondieper worden van de hoofdgeul. De vloed- en ebschaar in het westelijk deel van de ebdelta blijven met de klok meer roteren naar het oosten. Dit proces zet zich zeker tot 1982 voort. [figuur 31]. In 1991 heeft de zandbank een stuk zee afgesloten en vormt daarmee een lagune voor Schiermonnikoog. De zandbank heeft dan inmiddels een dusdanige hoogte dat hij enkel bij zware storm onder water komt te staan. De hoofdgeul wordt steeds ondieper. Verder blijven de vloodschaar het Westgat en de ebschaar het Plaatgat zichzelf nog steeds verplaatsen met de klok mee naar het oosten

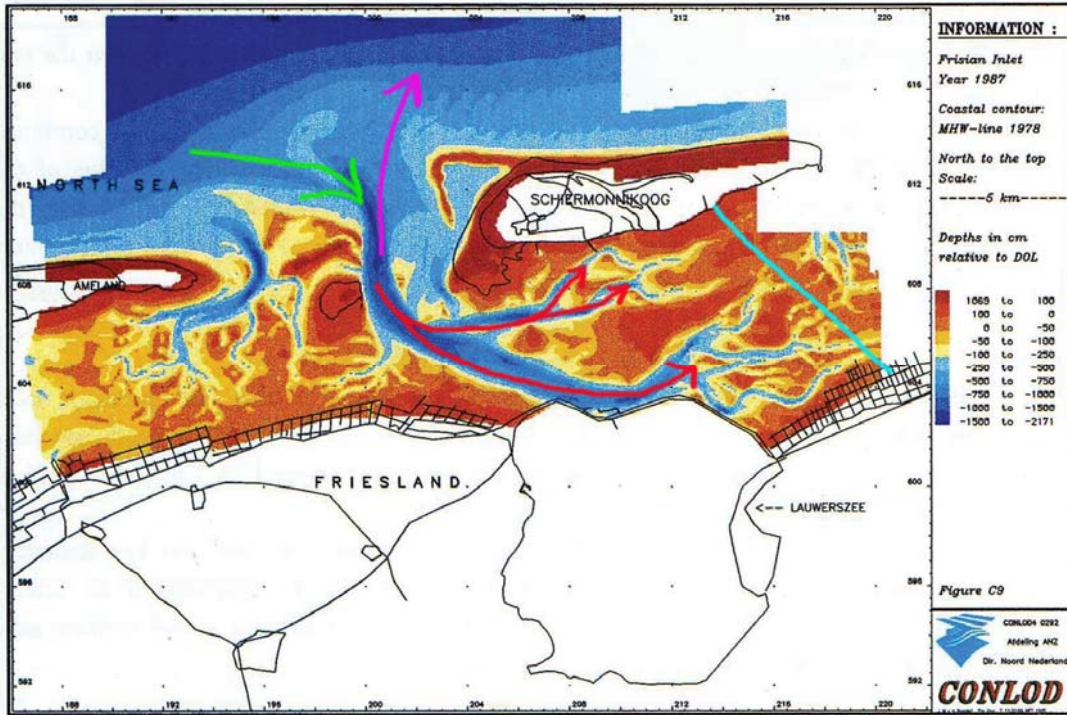
[figuur 32 en 33][Oost, 1995]. Tot slot de situatie in de ebdelta in 2006, vijftien jaar later, is de ebschaar Plaatgat verder naar het oosten verplaatst en heeft daarmee de zandbank voor de kust deels laten verdwijnen. Het Westgat bestaat nu uit een tweetal vloedscharen waarvan de meest zuidelijke een directe verbinding met de hoofdgeul heeft. De vloed- en ebschaar worden door een grote zandplaat van elkaar gescheiden. De verwachting is dat de komende jaren het proces van het met de klok mee roteren naar het oosten niet zal stoppen en daarmee zullen aan de westelijke zijde van de ebdelta steeds weer nieuwe vloedscharen ontstaan [figuur 33][9].



Figuur 31: Geometrie Friesche Zeegat 1982 (Oost, 1995)

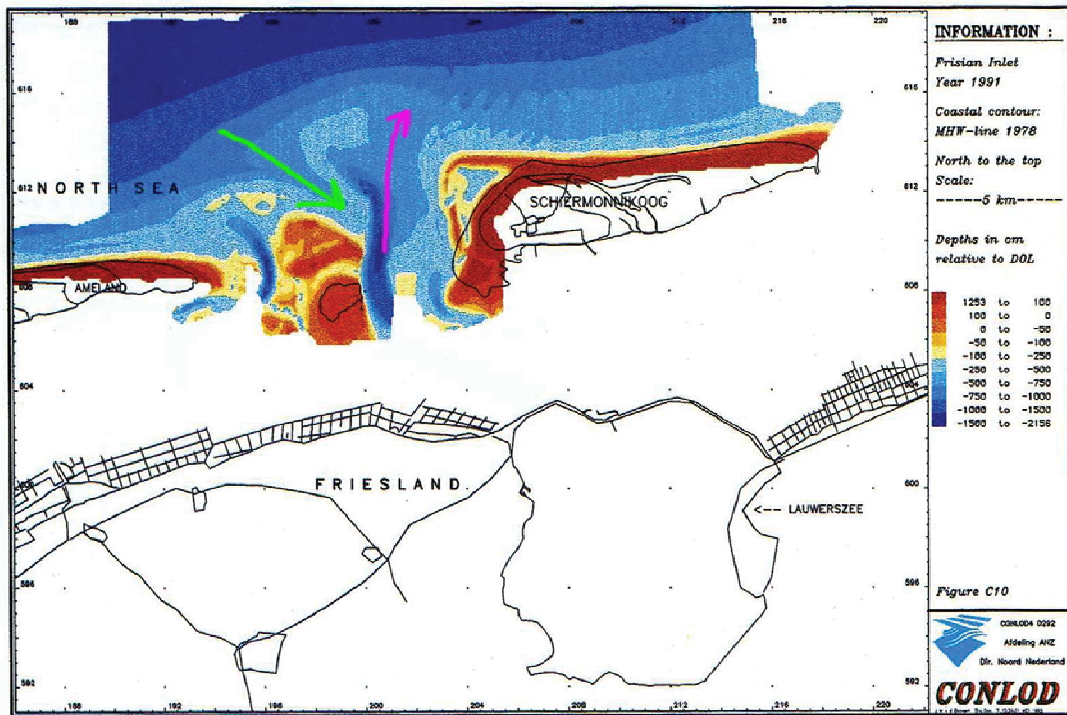
3.2.2 De vloeddelta

In de tweede plaats werd het getij prisma verkleind. Er kan minder water geborgen worden dan voorheen. Het zeegat en de hoofdgeul hadden hierdoor een te grote stroomvoerende doorsnede en waren te diep voor de verminderde komberging. Als gevolg van de nieuwe komberging en de voor het getij prisma te diepe geulen loopt de getijgolf sneller door het getijdebekken van het Friesche Zeegat naar het oosten. Daardoor is in de eerste jaren na de afsluiting van de Lauwerszee het wantij (licht blauwe lijn) onder Schiermonnikoog verschoven in oostelijke richting. Dit is duidelijk te zien wanneer de locatie van het wantij in figuur 30 en figuur 31 vergeleken wordt. Een relatie tussen verkleining van de komberging en het verschuiven van het wantij is overigens een vaker voorkomend verschijnsel, het oostwaarts verschuiven van het wantij is ook waargenomen bij andere Waddeneilanden in zowel Nederland als Duitsland [Oost, 1992]. In figuur 31 is duidelijk te zien hoe in 1982 onder Schiermonnikoog twee relatief diepe en brede geulen zijn gevormd. De noordelijke geul, gevormd door het Gat van Schiermonnikoog en de Grootte Siege, en de zuidelijke geul, de Zoutkamperlaag worden gescheiden door een inter-getijden zandbank, de Brakzand. Daarnaast is er nog een derde geul richting de jachthaven, de Piebe, die na het afsluiten van de Lauwerszee niet meer levensvatbaar lijkt. Deze geul was voor de afsluiting nog niet ontwikkeld tot een goede geul met een stabiele diepte.



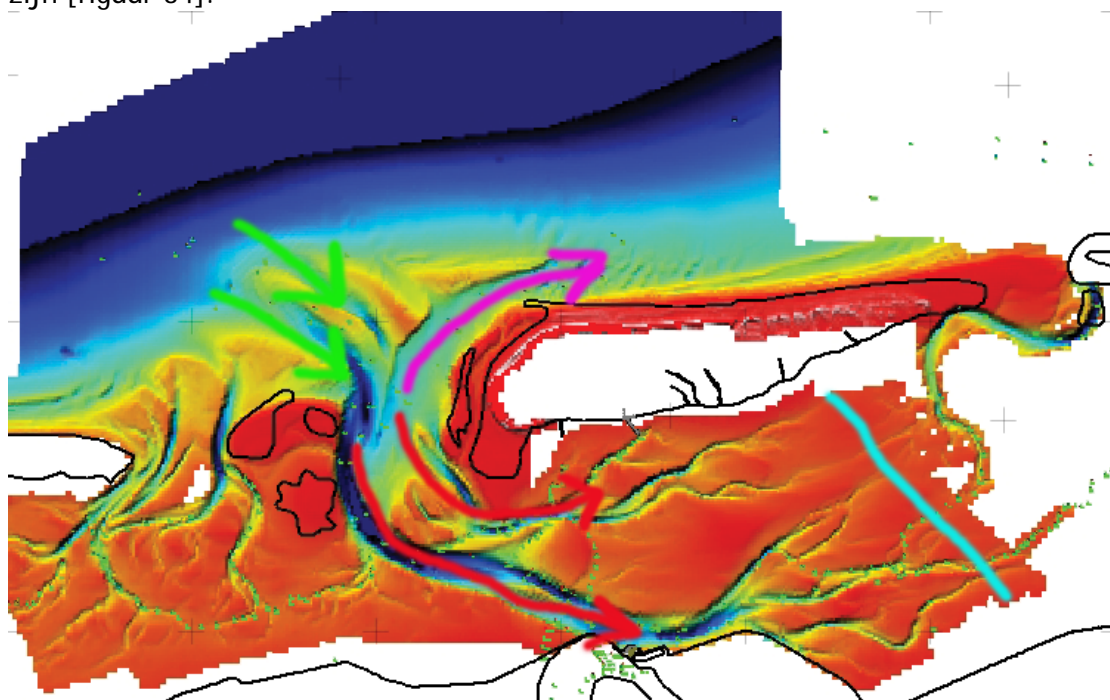
Figuur 32: Geometrie Friesche Zeegat 1987 (Oost, 1995)

Al voor de afsluiting van de Lauwerszee ontstonden in de hoofdgeul een aantal banken. De huidige Kuipersplaat werd na de afsluiting hoger en er ontstond voor de splitsing van de noord- en de zuidgeul nog een zandplaat, het Roode Hoofd



Figuur 33: Geometrie Friesche Zeegat 1991 (Oost, 1995)

[Oost, 1995]. In figuur 32 wijst nog niets op de problemen die de afgelopen jaren zich meer en meer voordeden. De noordelijke geul, Groote Siege, stroomt nog tot ver onder het eiland. Uit 1991 [figuur 33] zijn er geen peilingen van de vloeddelta, maar als de lodingen van 2006 bekeken worden blijkt er het nodige veranderd te zijn [figuur 34].



Figuur 34: Geometrie Friesche Zeegat 2006 (Rijkswaterstaat [9])

In de eerste plaats is de splitsing van de noordelijke en zuidelijke geul van de Zoutkamperlaag naar het westen verschoven. Het Roode Hoofd is hoger geworden en ook de Kuipersplaat heeft zich verder ontwikkeld in de hoogte. Het oostelijke gedeelte van de Groote Siege is verzand, maar het Brakzandstergat stroomt nog wel tot ver onder het eiland naar het oosten. Ook de Piebe verzandt verder en zal op ten duur opgaan in de zandplaten onder het eiland.

3.2.3 Het eiland

De westelijk kant van Schiermonnikoog heeft zich naar de afsluiting verder versterkt. Het strand is hoger en breder geworden. Toch is de grote zandbank aan de noordwest kant in volume afgenomen. In de toekomst zou dit gevolgen kunnen hebben voor de veiligheid van de noordwest kant van het eiland, maar vooralsnog lijkt het erop dat het strand en de duinen aan deze zijde van het eiland voldoende sterk zijn om noordwester stormen te kunnen weerstaan.

Het Rif aan de zuidkant van het eiland wordt steeds groter en hoger. Het breidt zich uit in de richting van de jachthaven.

Het bekken is dus na de afsluiting van de Lauwerszee uit evenwicht gebracht. Maar hoe ver het herstel van dit evenwicht op dit moment is, is onbekend. Uit deze analyse van eerdere onderzoeken over het Friesche Zeegat en theoretische analyse van een getijdebekken wordt de volgende hypothese opgesteld:

Hypothese 1

Door de afsluiting van de Lauwerszee is het evenwicht in het Friesche Zeegat getijdebekken verstoord. Het wantij is als gevolg hiervan in eerste instantie opgeschoven naar het oosten. De recente hypsometrie en de veranderingen in de doorsneden van de geulen tonen aan dat het evenwicht zich aan het herstellen is

en als gevolg daarvan verschuift het wantij weer naar het westen terug. Door deze verschuiving verzandt de vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog sneller dan waar bij de aanleg van de nieuwe steiger vanuit is gegaan.

3.3 De geschiedenis en ontwikkelingen van de vaarroute naar Schiermonnikoog

3.3.1 Geschiedenis van de vaarroute

Tot 1905 kon Schiermonnikoog per zeilboot bereikt worden of per stoomboot vanuit Groningen. Op het eiland was geen vaste steiger waar men van of aan boord kon stappen. In 1912 werd er aan de zuidkant van Schiermonnikoog een houten steiger gebouwd van 150 meter lang. Wel bleef het noodzakelijk om de laatste etappe van het van of aan boord gaan met paard en wagen te doen. In 1914 werd de veerdienst naar Schiermonnikoog commercieel. De rederij Wagenborg ging de route Groningen - Zoutkamp - Schiermonnikoog exploiteren. Nadat het afsluiten van het Reitdiep een goede verbinding tussen Groningen en Zoutkamp onmogelijk had gemaakt werd de verbinding Zoutkamp - Oostmahorn - Schiermonnikoog. In opdracht van Graaf von Bernstorff en de gemeente Schiermonnikoog werd in 1927 besloten tot het bouwen van een stenen dam. Tot dat moment werd de houten steiger in de winter afgebroken en in het voorjaar weer opgebouwd. Dit werd gedaan om de steiger tijdens de ongunstige herfst- en winterperiode niet te verliezen aan de zee.

Met de komst van een stenen dam werden paard en wagen overbodig en de stoomschepen langzamerhand vervangen door motorschepen. Toch kon de verbinding met het vaste land niet altijd gegarandeerd worden. Met zeer laag water of zware ijsgang moesten er andere mogelijkheden gezocht worden om het eiland te bevoorraden en om personen van en naar het eiland te brengen. Zo kwam het nog regelmatig voor dat met paard en wagen bij extreem laag water de mensen naar de geul, waarin wel voldoende water stond, werden gebracht om met een sloepje overgezet te worden naar de veerboot. Tijdens extreem koude winters en een dichtgevroren Waddenzee is het een enkele keer voorgekomen dat er een luchtbrug is opgezet. Vliegtuigen brachten post en personen door te landen op het Noordzeestrand ter hoogte van de vuurtoren. Goederen en brandstoffen werden met zwaardere schepen aan de noordkant van het eiland afgegeven.

In 1962 werd het onmogelijk om met laag water de stenen dam uit 1927 te bereiken en er werd een nieuwe dam enkele kilometers oostwaarts gebouwd, liggend aan een diepe geul. De oude veersteiger werd de jachthaven van Schiermonnikoog die tot op de dag van vandaag alleen in de periode van twee uur voor tot twee uur na hoogwater binnen gevaren kan worden en dan ook nog met een beperkte diepgang.

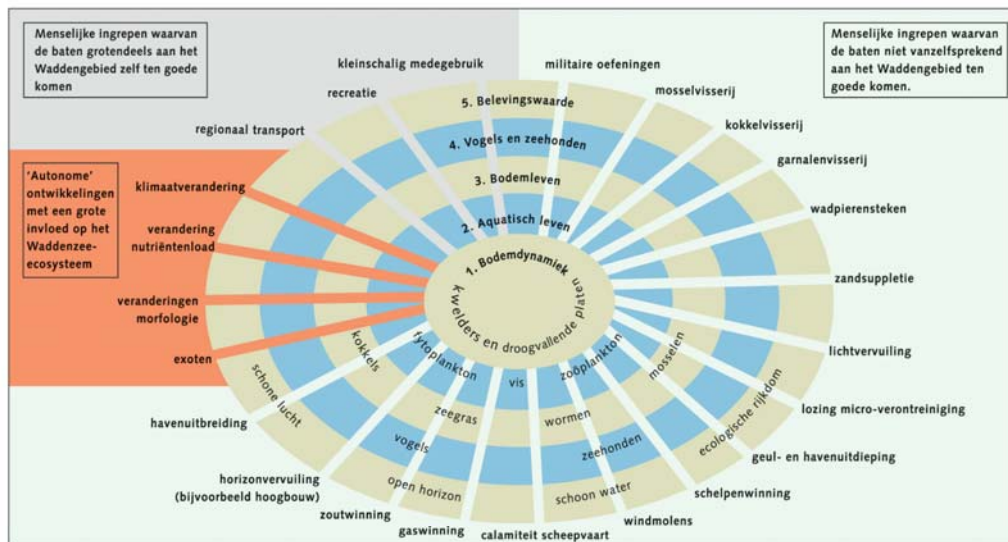
De afsluiting van de Lauwerszee was in 1969 een feit en daarmee werd de aankomst aan het vasteland bij Oostmahorn verhuisd naar Lauwersoog. Vanaf die tijd groeiden zowel de schepen van de rederij Wagenborg als de hoeveelheid personen en goederen die per jaar naar het eiland vervoerd moeten worden. Het verplaatsen van de veerdam had niet alleen voordelen, zoals beter bevaarbaarheid en de mogelijkheid om te varen met grotere schepen [7][8].

Wanneer naast de eerder besproken lodingen ook de zeekaarten van 2003, 2007 en 2008 geraadpleegd worden kan in vergelijking met de zeekaart van 1973 (vlak na de afsluiting van de Lauwerszee) het volgende opgemerkt worden [Appendix D].

- A. Het Westgat, de vloedgeul, is van noordelijke richting verplaatst naar noordwestelijke richting.
- B. De Kuipersplaat in het midden van de Zoutkamperlaag is in vijf jaar tijd 50 centimeter hoger geworden

- C. De Zoutkamperlaag aan de zuidwest (1) kant van de Kuipersplaat blijft diep. Aan de noordoost kant (2) van de Kuipersplaat wordt de bestaande geul steeds dieper maar ook smaller.
- D. De Schildknoopen aan de zuidkant van het getijdebekken worden dieper en smaller.
- E. De Sprutel, de Groote Siege en het Gat van Schiermonnikoog verzanden vanuit het oosten in westelijke richting. De Sprutel is zo verzandt dat er van een diepte van 4,60 meter in 1973 in 2008 nog maar 0,30 meter over is.
- F. Ter hoogte van de boei GL11 ontstaat een drempel. Deze drempel is sinds 2003 30 centimeter in hoogte toegenomen.
- G. De Geul van Brakzand is totaal opgegaan in de zandplaat Brakzand.
- H. De zandhaak aan de noordwest kant van Schiermonnikoog is na aanvankelijk een lagune gevormd te hebben, doorgebroken. De ebgeul Plaatgat stroomt weer net zoals in 1958 onder het strand door in noordoostelijke richting.
- I. Nadat de Piebe sinds 1973 eerst is verdwenen als goed bevaarbare geul naar de "Oude Steiger" is op de kaarten van 2003 en 2007 te zien dat deze geul op een aantal plekken niet verder verzandt of juist weer uitschuurt.²

Maar ook de afstand naar het dorp werd groter. Daarom wordt er sinds jaar en dag al, zoals te lezen valt in hoofdstuk 2, een discussie gevoerd om de veerdam weer meer bij het dorp te betrekken. Dichterbij het dorp betekent echter wel dat er of weer op getij gevaren moet worden of dat er grootschalige aanpassingen gedaan moeten worden. Aanpassingen in het wad zijn altijd aan veel maatschappelijke discussie onderhevig. Toch is gebleken dat er mogelijkheden zijn om tot een duurzame herinrichting van een haven in het Waddengebied te komen [IMSA, 2006]. Mede door gebruik te maken van het Cascademodel kunnen alle facetten meegenomen worden om een project succesvol en duurzaam te implementeren in een beschermd natuurgebied zoals de Waddenzee [figuur 35].



Figuur 35: Cascademodel (IMSA, 2004)

Het Cascademodel kan de invloeden berekenen van diverse ingrepen in het Waddengebied zoals visserij, aardgaswinning, maar ook nieuwe ontwikkelingen in de havengebieden [IMSA, 2004]. Zover zal dit onderzoek echter niet gaan.

² De opsomming A tot en met I in de tekst komt overeen met de letters op de vier zeekaarten.

3.3.2 De actuele ontwikkelingen in de vaarroute

Wanneer de veerboot de haven van Lauwersoog verlaat wordt er in westelijke richting koers gezet via de Zoutkamperlaag naar de boei Z8-GL1 [appendix D].³ Dit eerste stuk van de vaarroute zorgt normaliter niet voor problemen. De Zoutkamperlaag is voldoende diep en breed. Hooguit bij harde westenwind en sterke stromingen kan het voorkomen dat het invaren van de haven van Lauwersoog lastig wordt. Tot begin jaren negentig was het mogelijk voor de veerboot om bij de Z14-BZ15 tijdens hoogwater de Geul van Brakzand op te varen. De afstand en de vaartijd waren daarmee aanzienlijk korter. Door de snelle verzanding van de Geul van Brakzand en de groter wordende veerboten werd het onrendabel om deze geul open te houden voor de veerverbinding. Bij de Z8-GL1 maakt de vaarroute een bocht om het Roode Hoofd heen, om via de Glinder naar het Gat van Schiermonnikoog te varen. Hier beginnen de echte problemen. Doordat de hoofdgeul van het Friesche Zeegat hier splitst in de zuidelijke tak van de Zoutkamperlaag en de noordelijke tak Gat van Schiermonnikoog / Groote Siege ontstaat bij het Roode Hoofd een punt waar de stroomsnelheden laag zijn en waar dus sedimentatie van de Glinder optreedt. Het gevolg hiervan is dat er meer baggerwerkzaamheden moeten plaatsvinden dan waar in eerste instantie vanuit is gegaan. In tabel 2 staat een overzicht van de volumes baggermateriaal van de afgelopen tien jaar uit de vaarroute [9].

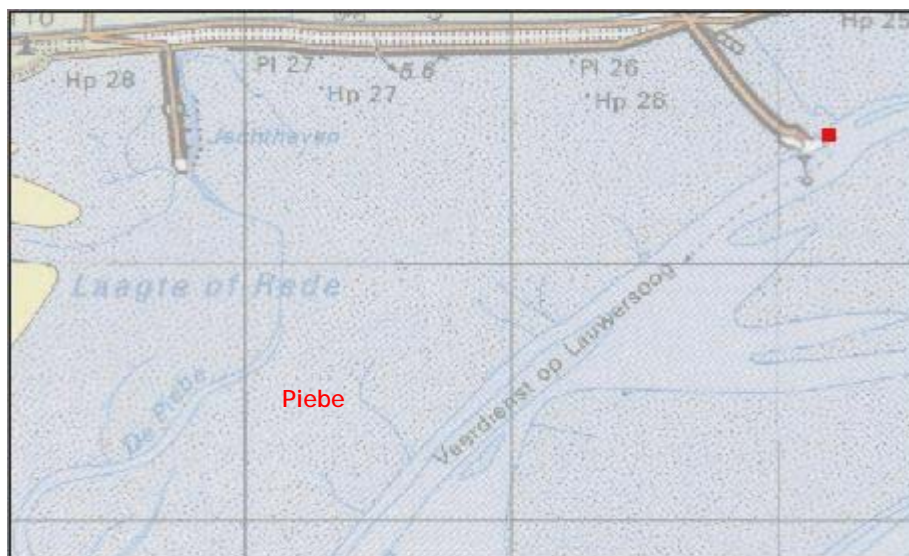
Object	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Totaal
Veerdam Schiermonnikoog	37.478	58.119	72.443	90.036	74.861	35.898	47.922	30.310	25.378	8.465	480.910
Veerhaven Lauwersoog	9.980	1.280	11.666	5.137	5.486	0	5.979	6.250	0	2.400	48.178
Groote Siege west	64.550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64.550
Groote Siege oost	0	11.652	74.782	42.999	0	0	1.075	4.600	24.940	71.652	231.700
Groote Siege oost op de wal gelost		156	9.572	0	21.850	45.695	21.730	28.060	16.610	7.582	151.255
Glinder	43.558	25.782	53.213	42.426	4.355	0	1.290	2.070	4.370	17.733	194.797
Glinder op de wal gelost		25.782	6.092	0	6.210	0	14.950	19.320	23.517	34.788	130.659
veerverbinding naar SCHIERMONNIKOOG	155.566	122.771	227.768	180.598	112.762	81.593	92.946	90.610	94.815	142.620	1.302.049

Tabel 2: Kubieke meters weggebaggerd materiaal uit de geulen die de vaarroute naar Schiermonnikoog vormen

In gesprekken met de rederij [11] is naar voren gekomen dat de komende jaren de Glinder een serieus probleem gaat worden. Voorsnog doen de problemen zich voor bij laag water, maar de verwachting is dat over korte tijd ook tijdens hoogwater de veerboten hier met lage snelheid zullen varen en een risico lopen aan de grond te lopen. Wanneer de Glinder is gepasseerd gaat het via het Gat van Schiermonnikoog de Groote Siege op in oostelijke richting. Het Gat van Schiermonnikoog geeft geen problemen. Hier is voldoende diepte en ruimte om op een veilige manier te varen. Wel is het Gat van Schiermonnikoog een druk punt in de vaarroute omdat naast de veerboten hierlangs ook alle recreatievaart naar het eiland toe of naar buiten vaart. In de Groote Siege is het voornamelijk tijdens laag water of afgaand water in combinatie met een sterke oostenwind een verhoogd risico op vastlopen op één van de drempels bij de GS3, GS7 en de GS9 [appendix D]. Ook bij de nieuwe veerdam treedt er de afgelopen jaren steeds meer sedimentatie op. De zwaikom wordt kleiner doordat het einde van de Groote Siege zich steeds meer naar het westen verplaatst.

³ De vaarroute en genoemde boeien zijn met oranje gestippelde lijn in appendix D weergegeven

De geul naar de jachthaven, de Piebe, wordt niet actief uitgebaggerd en op diepte gehouden, het jachthavenbekken zelf wel. De baggerspecie uit de jachthaven wordt tussen de veerdam en de jachthaven gestort.



Figuur 36: De Piebe, vaargeul naar de jachthaven

De maximale diepte van de geul is 1.50 meter en daardoor is de haven enkel twee uur voor en twee uur na hoogwater te bereiken voor de pleziervaart [figuur 36].

Tot 2003 was er sprake van streefafmetingen en van ingrijpafmetingen voor het onderhoud van de vaarroute van de veerboot.

De streefafmetingen van de geul waren 60 meter breed en een diepte van NAP-4.10 meter. Op het moment dat de geul een breedte van 50 meter had of de diepte van NAP-3.30 meter werd er ingegrepen en werd de geul terug gebracht naar de streefafmetingen. Na 2003 is er contractueel afgesproken om de ingrijpafmetingen te handhaven en pas in te grijpen als deze afmetingen in het geding komen [9][10]. De problematiek van de verzanding van de huidige vaarroute doet denken aan de situatie in de jaren vijftig toen bleek dat de geul naar de "Oude Steiger" niet meer onder alle omstandigheden bevaarbaar was. Er werd een nieuwe veersteiger aangelegd, die nu ook te maken zal gaan krijgen met een beperkte bevaarbaarheid wanneer het onderhoud aan de Grote Siege achterblijft. Er kan een verband zijn tussen de levensduur van een waterbouwkundige constructie en de morfologische ontwikkelingen in de geulen onder Schiermonnikoog gezien de ontwikkelingen bij de oude steiger in de jaren zestig en de nieuwe steiger op dit moment. Het wad onder Schiermonnikoog verandert, maar niet zo snel dat er niet op te anticiperen valt. Een zware noordwester storm veroorzaakt wel dusdanige veranderingen dat de eerste tochten na zo'n storm wel extra aandacht van de bemanning vereisen [11].

Hypothese II

De effecten van de afsluiting van de Lauwerszee zijn onvoldoende meegenomen bij de ontwikkeling van de "Nieuwe Steiger" en de vaarroute daarnaar toe. Het is mogelijk om een vaarroute met aankomst dichtbij het dorp te creëren, die qua afmetingen voldoet aan de vraag en aanbod van zand en het getij prisma, hierdoor kan het onderhoud aan deze route geminimaliseerd worden.

Het uiteindelijke streefdoel voor een goed functionerende vaarroute is dat de geulen die deze route vormen stabiel zijn. In Harlingen en aan de Noord-Duitse wadkant is dat gebeurd door (deels) onderwater dammen aan te leggen om de

havenmonding te stabiliseren en te vrijwaren van sedimentatie. Overigens betekent over het algemeen wel dat het construeren van harde obstakels op locatie A problemen verhelpt, terwijl daardoor op locatie B problemen ontstaan.

Hypothese III

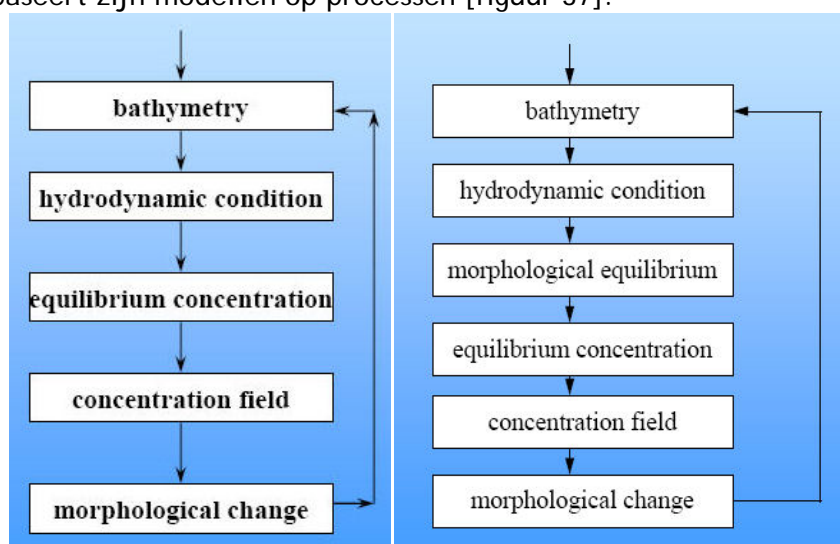
Het (kunstmatig) stabiliseren van de natte doorsneden en bochten van de Grootte Siege en het sturen van het prisma in het bekken zullen leiden tot een groter volume water dat door de Grootte Siege stroomt en minder sedimentatie in dat deel van de vaarroute tussen Schiermonnikoog en Lauwersoog.

3.4 Het Friesche zeegat als model

3.4.1 Algemeen

Er zijn twee verschillende soorten modellen om een getijde bekken te modelleren en de processen daarin te simuleren.

Modellen zoals ESTMORF of ASMITA zijn gebaseerd op (semi-)empirische relaties. Delft3D baseert zijn modellen op processen [figuur 37].



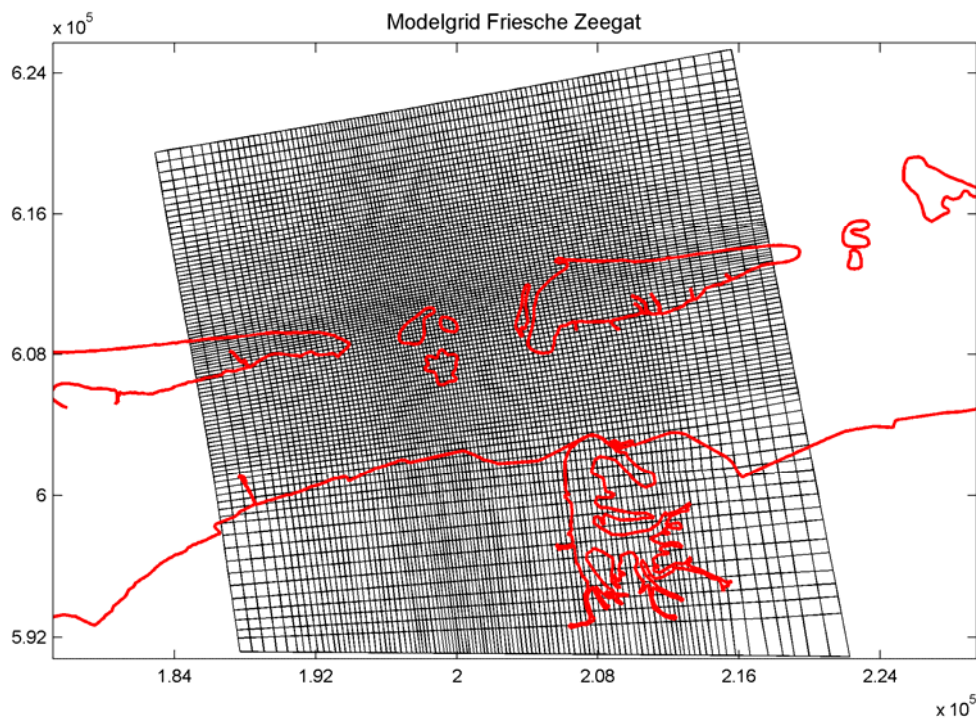
Figuur 37: Stappenplan procesmatig model (I) en stappenplan semi-empirisch model

Het grote verschil tussen de twee methodes is het wel of niet gebruiken van een morfologisch evenwicht. Juist in getijde bekkens is het lastig om het morfologisch evenwicht te bepalen en daarom wordt er in dit onderzoek een voorkeur gegeven om een model te gebruiken dat op de processen in het getijde bekken gebaseerd is. Toch zal in deze paragraaf ook kort ingegaan worden op de empirische relaties voor een getijdenbekken nadat het proces model dat gebruikt gaat worden, is beschreven.

3.4.2 Proces model

Voor dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van het numerieke softwarepakket Delft3D. In Delft3D is het mogelijk om met verschillende modules berekeningen te doen aan bijvoorbeeld een bekken zoals het Friesche Zeegat. De modules Flow en Wave zijn de meest gebruikte modules, zij kunnen los van elkaar, maar ook gecombineerd gebruikt worden. Voor dit onderzoek wordt er alleen gebruik gemaakt van de Flow-module. Met deze module wordt aan de hand van de hydrodynamische condities, de initiële sedimentatie en erosie onderzocht. Er wordt gebruik gemaakt van een rekenrooster [figuur 38] met bodemdata van 1992. Dit model is gebruikt voor onderzoek naar de bodemdaling in het Waddengebied door gaswinning in 2002 en 2005. Voor het in dit onderzoek gebruikte model is geen

gebruik gemaakt van de beschikbare data van eerdere onderzoeken zoals in de vorige paragrafen is beschreven, de bodemdata van 1992 zijn eigenlijk een uitbereiding op de laatste lodingen van 1991 in figuur 33. Deze informatie is gebruikt om een beeld te krijgen van de vorming van geulen in het bekken en kan achteraf gebruikt worden bij het analyseren van de uitkomsten en de mogelijke



Figuur 38: Rekenrooster van het gebruikte Delft3D model

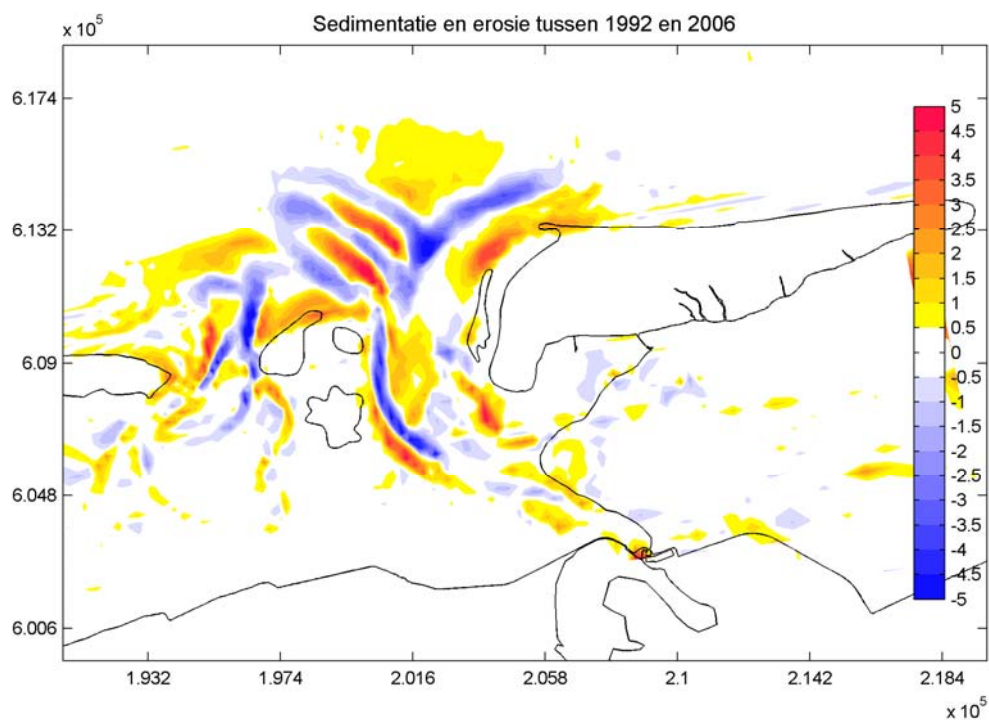
cycli, die in de ontwikkelingen te ontdekken zijn. Er zijn recentere bodemdata beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat [9]. Voor het gehele gebied zijn er lodingen uit 2006 en lodingen vanaf 2004 tot 2008 van de complete vaarroute. Rijkswaterstaat peilt elk jaar deze

Morfologische factor	Tijdperiode (dagen)	
1	32	≈ 1 maand
6	192	≈ 6 maanden
12	384	≈ 1 jaar
24	768	≈ 2 jaar
36	1152	≈ 3 jaar
48	1536	≈ 4 jaar
60	1920	≈ 5 jaar
120	3840	≈ 10 jaar

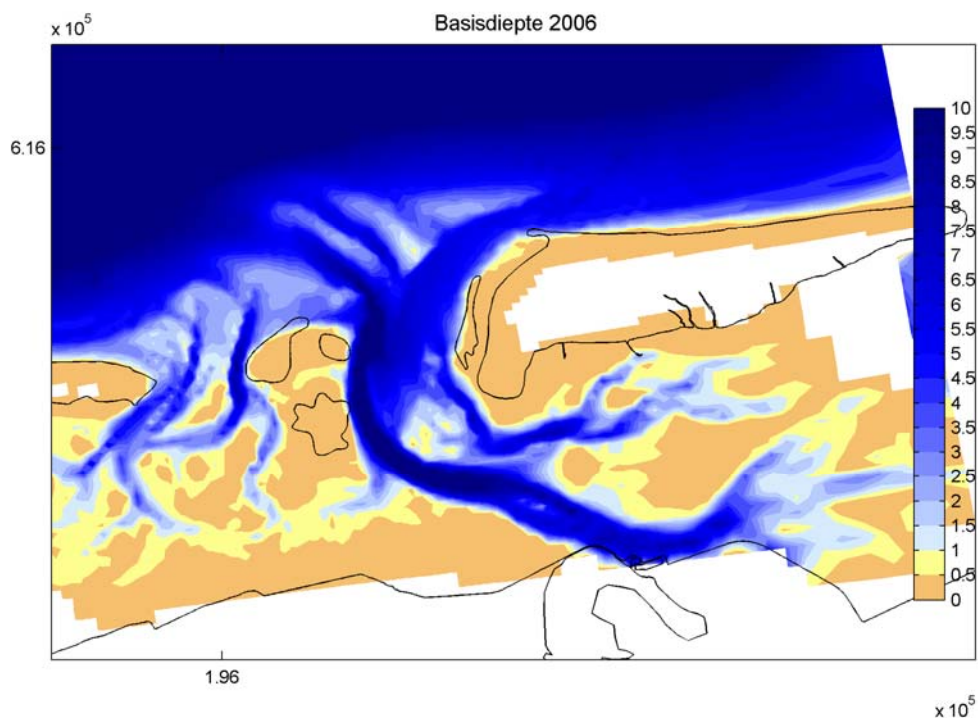
Tabel 3: Morfologische acceleratie factoren gebruikt in het model

vaarroute. Deze basisdata geven al een eerste indicatie over de sedimentatie en erosie gedurende 18 jaar waarbij de positieve waarden de mate van erosie van 2006 ten opzichte van 1992 weergeeft en de negatieve waarden de sedimentatie [figuur 39]. Het model is alleen uitgevoerd met het proces sedimentatie van zand met een diameter van $160\mu\text{m}$. (startconcentratie $0,05\text{ kg/m}^3$) en een harmonische waterstand als stroomconditie. Er wordt een periode gebruikt van twee keer een doortij-springtij cyclus (= 32 dagen) met tijdstappen van 5 minuten (voor scenario I is deze tijdstap later aangepast naar 0,5 minuut vanwege de betrouwbaarheid). Door te variëren met de morfologische acceleratie factor is het mogelijk om

resultaten te genereren over een langere periode dan qua invoer is gegeven. Tabel 3 geeft een overzicht van de morfologische acceleratie factoren en bijbehorende tijdsperioden. Het model bestrijkt het gebied vanaf de oostpunt van Ameland tot het wantij van Schiermonnikoog. De basisdiepte voor het model, opgebouwd uit de lodingen van 2006 en op de witte vlekken aangevuld met de data uit 1992, staat afgebeeld in figuur 40.



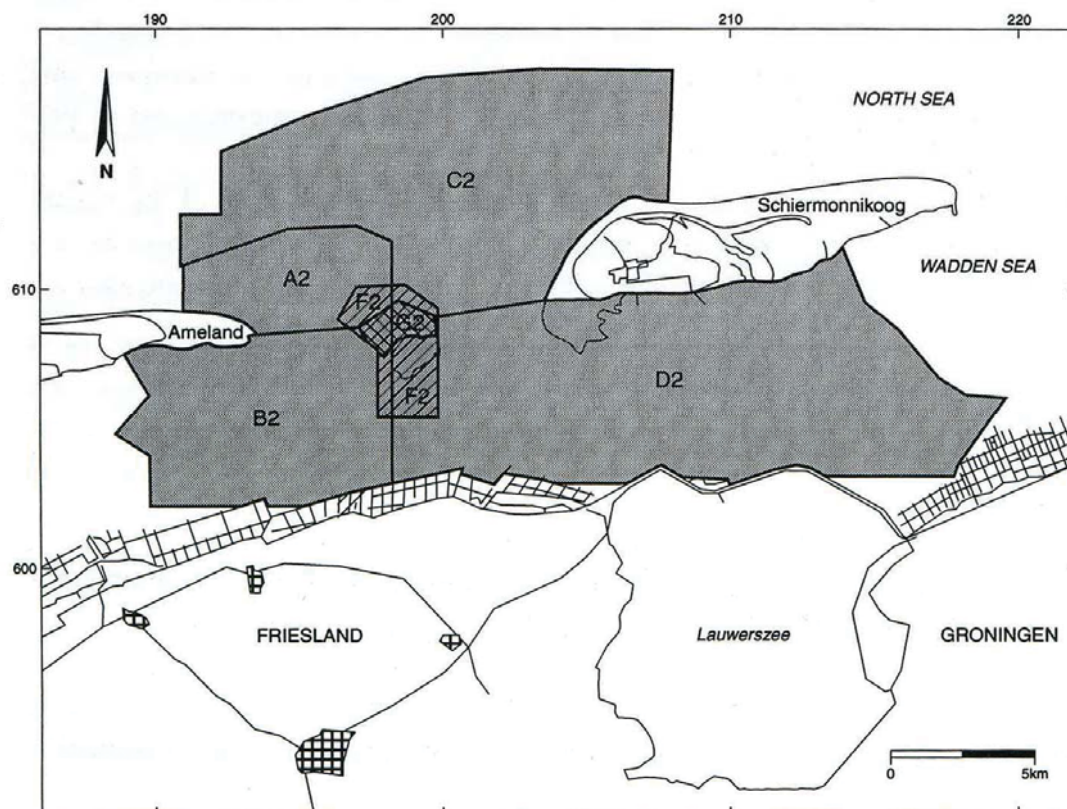
Figuur 39: Sedimentatie (negatief) en erosie (positief) in 2006 ten opzichte van 1992



Figuur 40: Basisdiepte 2006

3.4.3 Semi-empirische model

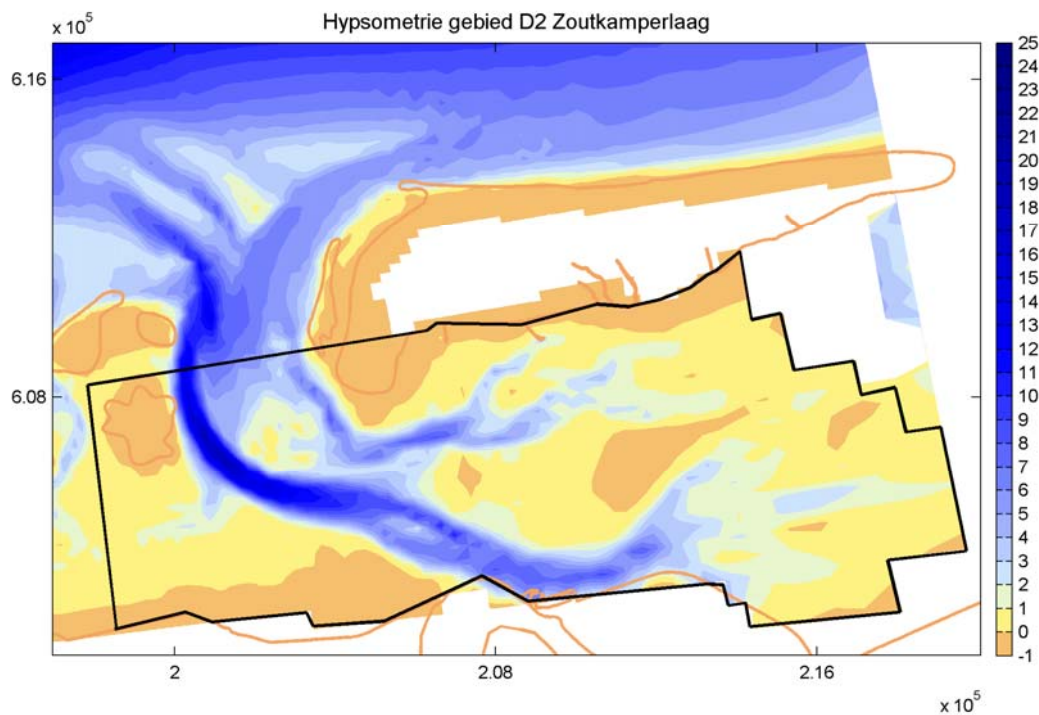
In hoofdstuk 2.2 wordt al kort aangehaald hoe het volume en het oppervlakte van een getijdebekken in relatie met elkaar staan en uit die relatie kan de hoeveelheid water worden bepaald dat per cyclus van het getij door een zeegat stroomt [vergelijking 3] of geborgen wordt in een bekken [vergelijking 24]. Dit wordt de hypsometrie genoemd. In figuur 41 is het gebied D2 afgebeeld dat gebruikt wordt



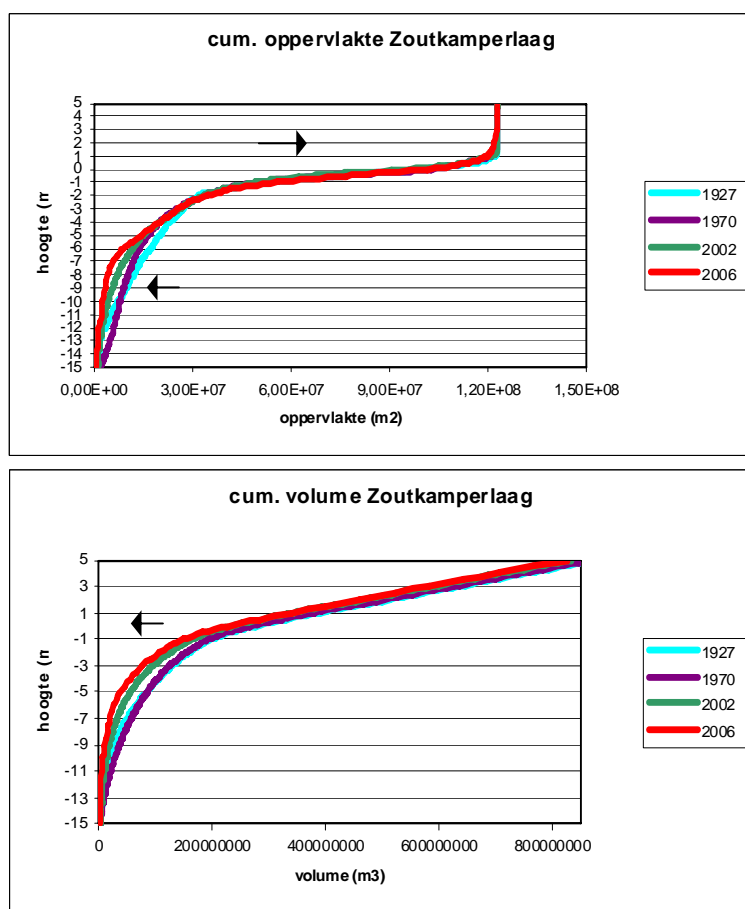
Figuur 41: Gebieden voor hypsometrie bepaling eerdere onderzoeken. D2 is Zoutkamperlaag (Wang, 2007)

voor dit onderzoek en eerdere onderzoeken om de hypsometrie te bepalen. In figuur 42 staat nogmaals het deel van het Friesche Zeegat, de Zoutkamperlaag, afgebeeld alleen dan vanuit Delft3D met een polygoon, die D2 moet benaderen.

De hypsometrie curven in figuur 43 geven het natte oppervlakte $A(z)$ op en het natte volume $V(z)$ onder verschillende dieptes weer. Daarbij is z_0 de diepte waarbij het oppervlakte en het volume ongeveer 0 zijn en z_L heeft een waarde boven het referentieniveau groter dan de gemiddelde hoogwaterstand. De relatie tussen $V(z)$ en $A(z)$ wordt in vergelijking 24 weergegeven. Met gegevens uit eerdere studies (Wang, 2007) is de volume- en oppervlakteverandering van de Zoutkamperlaag weergegeven in figuur 43. Bij de waarde van z_L is $A(z)$ het totale oppervlakte van het bekken. De volumeveranderingen op het niveau z_L kunnen daarom ook beschouwd worden als de totale sedimentatie-erosie in het getijdebekken wat de volgende relaties geeft in vergelijking 25. Vergelijking 26 toont hoe het oppervlakte en het volume op de drie belangrijke waterstanden (hoogwater (HW); gemiddelde waterstand op NAP (MW); laagwater (LW)) gedurende één cyclus van het getij in relaties staan tot de waarde z uit vergelijking 24.



Figuur 42: De Zoutkamperlaag D2, vanuit Delft3D



Figuur 43: Cumulatieve oppervlakte en volume van de Zoutkamperlaag tot 2006 [appendix A voor groter formaat]
 Hierin is de waarde van a de getijdeamplitude, voor dit onderzoek is dat $\text{NAP}+1,04\text{m}$. bij hoogwater en $\text{NAP}-1,24\text{m}$. bij laagwater [12]. In eerdere

onderzoeken is gebruik gemaakt van een getijde amplitude van 1,14m. voor zowel hoogwater als laagwater. Beide amplitudes zijn in Delft3D gebruikt en zijn in de figuren weergegeven als Delft3D (1) voor NAP+1,04m. en Delft3D (2)

$$A_b = A(z_L)$$

$$V_{tot} = V(z_L)$$

Vergelijking 25: Totale oppervlakte en totale sedimentatie-erosie van het bekken

$$A_{HW} = A(a)$$

$$V_{HW} = V(a)$$

$$A_{MW} = A(0)$$

$$V_{MW} = V(0)$$

$$A_{LW} = A(-a)$$

$$V_{LW} = V(-a)$$

Vergelijking 26: Volumes en oppervlaktes ten opzichte van de getijdeamplitude

voor NAP±1,14m. Met deze relaties bekend verondersteld kan de volgende stap gemaakt worden naar de empirische relaties, die moeten leiden tot het bepalen van het morfologisch evenwicht. Er zijn twee belangrijke relaties voor een getijdebekken. De eerste relatie is de relatie tussen het geulvolume en het getijdeprisma. De tweede belangrijke relatie is die tussen het oppervlakte van het bekken en het plaatareaal.

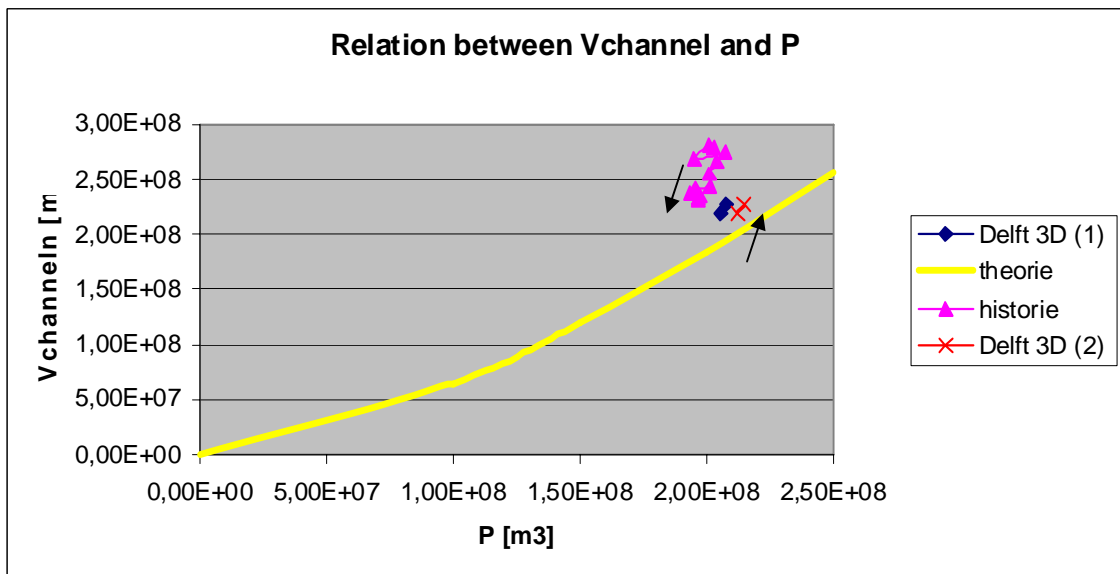
De eerste relatie is in wezen de relatie tussen het natte volume onder NAP (V_{MW}) en het getijdeprisma (P). Deze relatie wordt gegeven in vergelijking 27, waarbij P het verschil is in de inhoud van het bekken tussen hoog- en laagwater. De waarde van de constante α is $6.5 \cdot 10^{-7}$ voor het Friesche Zeegat in evenwicht.

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

$$P = V_{HW} - V_{LW}$$

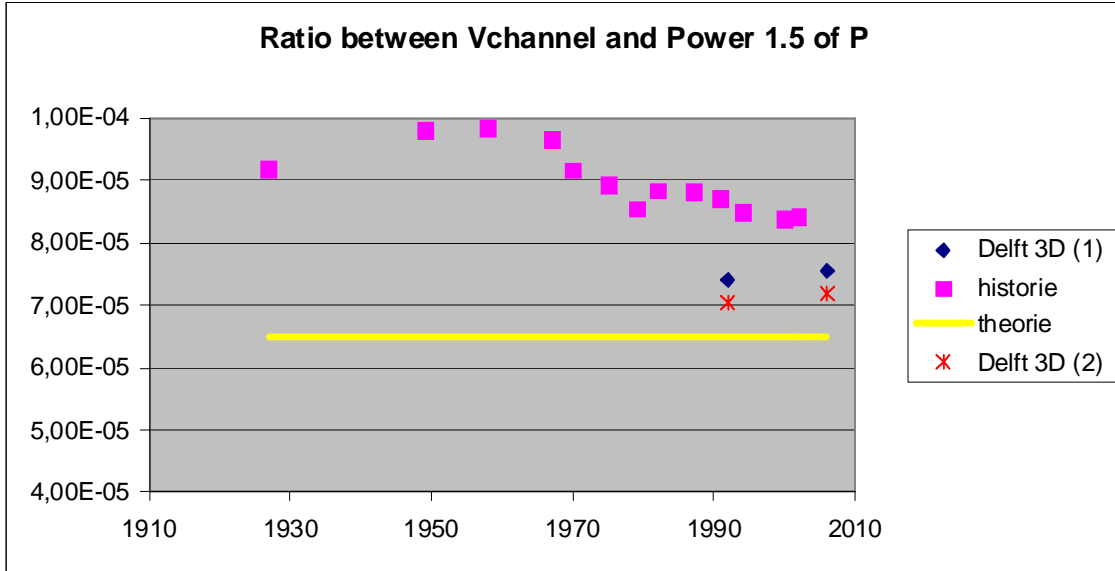
Vergelijking 27: Empirische relatie natte volume en getijdeprisma

De waarde van de constante α kan veranderen omdat er in een getijdebekken



Figuur 44: Relatie tussen geulvolume en getijprisma

eigenlijk altijd sprake is van een dynamisch evenwicht. Voor deze beschrijving is er gebruik gemaakt van gefixeerde grenzen, zoals het wantij, en is er een zeespiegelstijging aangenomen van 18 centimeter per eeuw (Wang, 2007). Echter de gevolgen van zeespiegelrijzing op de morfologie zijn op dit moment nog niet geheel bekend (Goor, 2003). De relatie tussen geulvolume en getijdeprisma is in figuur 44 weergegeven. Het prisma (volume in het bekken) blijft ongeveer hetzelfde terwijl het oppervlakte van het bekken afneemt en na de afsluiting van de Lauwerszee het volume ook [figuur 43 en 44]. De ontwikkeling van α is



Figuur 45: ontwikkeling van α in tijd

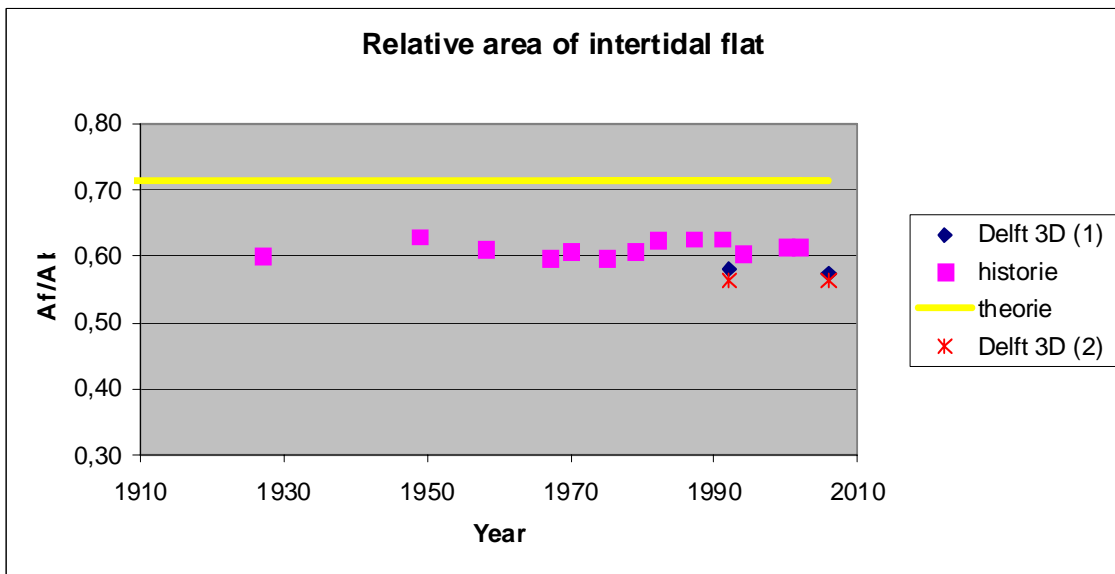
weergegeven in figuur 45. Voor de tweede empirische relatie tussen het totale oppervlakte van het bekken en het areaal kan gebruik gemaakt worden van de

$$A_f = A_{HW} - A_{LW}$$

Vergelijking 28: Bepaling oppervlakte inter-getijdengebied

$$\frac{A_f}{A_b} = 1 - 0,025\sqrt{A_b}$$

Vergelijking 29: Empirische relatie oppervlakte bekken en oppervlakte inter-getijdengebied



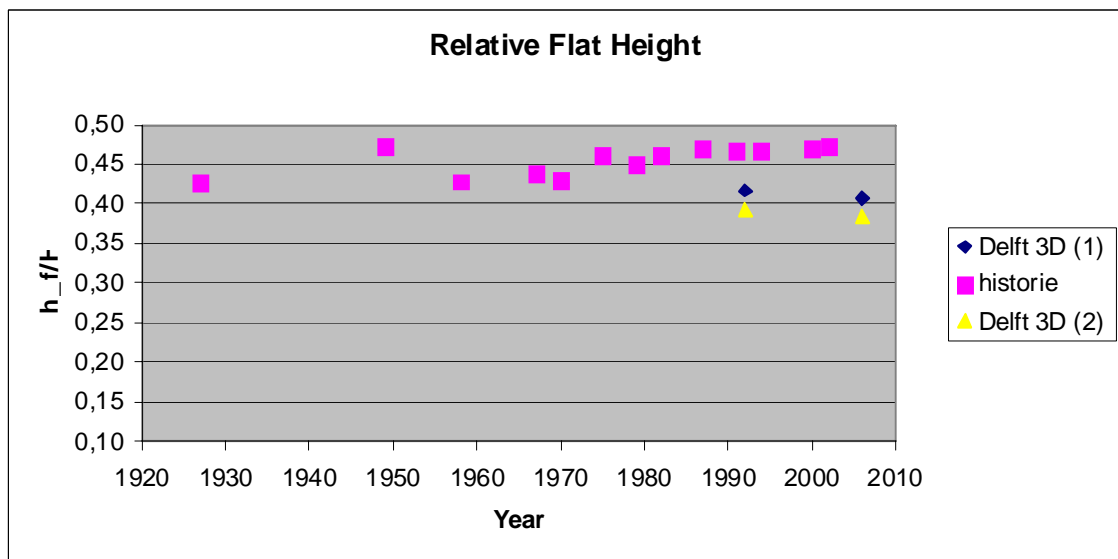
Figuur 46: Relatief oppervlakte van inter-getijdengebied afgelopen decennia

parameters A_b en het oppervlakte van het inter-getijdengebied A_f . Deze oppervlakte wordt op de volgende wijze bepaald zoals in vergelijking 28 wordt weergegeven.

De tweede empirische relatie ziet er dan uit zoals in vergelijking 29 wordt getoond. In figuur 46 is te zien hoe deze relatieve areaal ontwikkelingen voor de Zoutkamperlaag eruit ziet voor de afgelopen decennia, waarbij opgemerkt moet worden dat er wederom met vaste grenzen van het bekken gewerkt is en dat deze grenzen in het echt na de afsluiting van de Lauwerszee veranderd zijn. Het wantij van Schiermonnikoog is door toedoen van deze afsluiting wel oostwaarts verplaatst. Een andere manier om de ontwikkelingen van de platen voor de tweede empirische relatie uit te leggen kan met vergelijking 30. Hierin worden de hoogte en oppervlakte van het inter-getijdengebied in relatie tot het getijdeprisma en de getijdeamplitude bepaald. Wanneer de relatieve plaathoogte van de Zoutkamperlaag vergeleken wordt met de andere getijdebekken in Nederland blijkt dat de relatieve hoogtes in de Zoutkamperlaag veel hoger zijn dan bij de andere bekken in het Nederlandse wadengebied (Wang, 2007), de ontwikkeling van deze hoogte voor de Zoutkamperlaag is afgebeeld in figuur 47.

$$h_f = \frac{V_f}{A_f} = \frac{A_{HW} H - P}{A_f}$$

Vergelijking 30: Relatie hoogte en oppervlakte van inter-getijdengebied tot getijdeprisma en -amplitude



Figuur 47: Relatieve plaathoogte in de Zoutkamperlaag

Op basis van deze semi-empirische relaties zijn de bodemdata van 1992 en 2006 in Delft3D geanalyseerd. In tabel 4 staan de waarden vermeld die nodig zijn voor de verdere uitvoering van het semi-empirische model.

D2	A_{LW} (m ²)	V_{LW} (m ³)	A_{MW} (m ²)	V_{MW} (m ³)	A_{HW} (m ²)	V_{HW} (m ³)	P (m ³)
1992	4,85E+07	1,30E+08	1,00E+08	2,19E+08	1,20E+08	3,35E+08	2,05E+08
2006	4,94E+07	1,36E+08	1,01E+08	2,27E+08	1,20E+08	3,44E+08	2,08E+08

Tabel 4: Waarden voor het semi-empirisch mode uit Delft3D (1)

De hypsometrie curve van 2006 die voortkomt uit de data analyse is toegevoegd in figuur 49 [volledig overzicht van alle jaren in appendix A]. Deze curven geven een afname weer in 2006 van het oppervlakte in het gebied ten opzichte van 2002 tot het niveau van NAP-5,00m. waarna het oppervlakte tot op het niveau NAP+1,00m. ten opzichte van 2002 weer is toegenomen. Voor het volume geldt een algehele afname ten opzichte van 2002. Het bekken is echter niet in evenwicht. Met de empirische relatie uit vergelijking 24 komt voor α een waarde van respectievelijk $74,2 \cdot 10^{-6}$ en $75,7 \cdot 10^{-6}$ voor 1992 en 2006. In figuur 50 is weergegeven hoe deze waarden zich verhouden tot de theoretische waarde in de semi-empirische relatie tussen V_{MW} en P. De te grote waarde van α houdt in dat er in de geul van de Zoutkamperlaag nog altijd een zandhonger is en het relatieve inter-getijdengebied nog te laag is (Wang, 2007), het bekken wil zich nog steeds opvullen.

Voor de Zoutkamperlaag vloeddelta is het oppervlakte op grote diepte (NAP-15m. tot NAP-5m.) [figuur 43, rode lijn] afgenomen, maar een aantal geulen zijn dieper en smaller geworden. Het aangrenzende inter-getijdengebied is lager geworden en het totaal oppervlakte van het inter-getijdengebied is afgenomen door toename van het oppervlakte op laagwater niveau [vergelijking 28, tabel 4 en figuur 43]. Voor de bepaling van A_b is de waarde van het cumulatief oppervlakte op NAP+5m. gebruikt, $1,23 \cdot 10^8 \text{ m}^2$. Voor de tweede empirische relatie, de verhouding tussen het inter-getijdengebied en het oppervlakte van het complete bekken, geeft dit een waarde van respectievelijk 0,58 en 0,57 voor 1992 en 2006. Met een toename van het prisma [noemer in vergelijking 30] en een afname van het inter-getijdengebied [teller in vergelijking 30] wordt de plaathoogte lager. Uitgedrukt in de hoogte van het inter-getijdengebied tot het gemiddelde getijverschil ontstaat dus een lichte daling. De veranderingen in de doorsneden van de geulen laten het volgende zien: de zuidelijke geulen zijn dieper geworden en vaak ook smaller. De noordelijke tak van de Zoutkamperlaag (Grote Siege en Brakzandstergat) is zoals verderop duidelijk wordt aan grote veranderingen onderhevig [Appendix A].

Doorsnede	Cumulatieve debiet over 32 dagen [m^3]			
	1992		2006	
Zoutkamperlaag - keel	5,25E+08	Eb	5,25E+08	Eb
Zoutkamperlaag - sluis	3,35E+08	Vloed	2,74E+08	Vloed
Gat van Schiermonnikoog	2,25E+08	Eb	1,85E+08	Eb
Groote Siege - begin	2,65E+07	Vloed	1,60E+07	Eb
Brakzandstergat - begin	1,23E+08	Eb	7,80E+07	Eb

Tabel 5: cumulatieve debiet door doorsneden (prisma)

Doorsnede:	Prisma per getijdencyclus			Oppervlakte doorsnede		
	1992 [m^3]	2006 [m^3]	verandering [-]	1992 [m^2]	2006 [m^2]	verandering [-]
Zoutkamperlaag - keel (ZK)	3,05E+08	2,85E+08	-6,5 %	2,63E+04	2,83E+04	+7,62%
Zoutkamperlaag - sluizen (ZK)	1,30E+08	1,35E+08	+4 %	1,13E+04	1,16E+04	+3,33%
Gat van Schiermonnikoog (GvS)	7,92E+07	6,88E+07	-13 %	5,40E+03	6,65E+03	+23,15%
Groote Siege (GS)	1,60E+07	1,53E+07	-4,4 %	3,00E+03	1,95E+03	-35,00%
Brakzandstergat (BZG)	3,63E+07	3,85E+07	+6,1 %	3,80E+03	4,20E+03	+10,53%

Tabel 6: veranderingen in prisma door doorsnede per getij cyclus

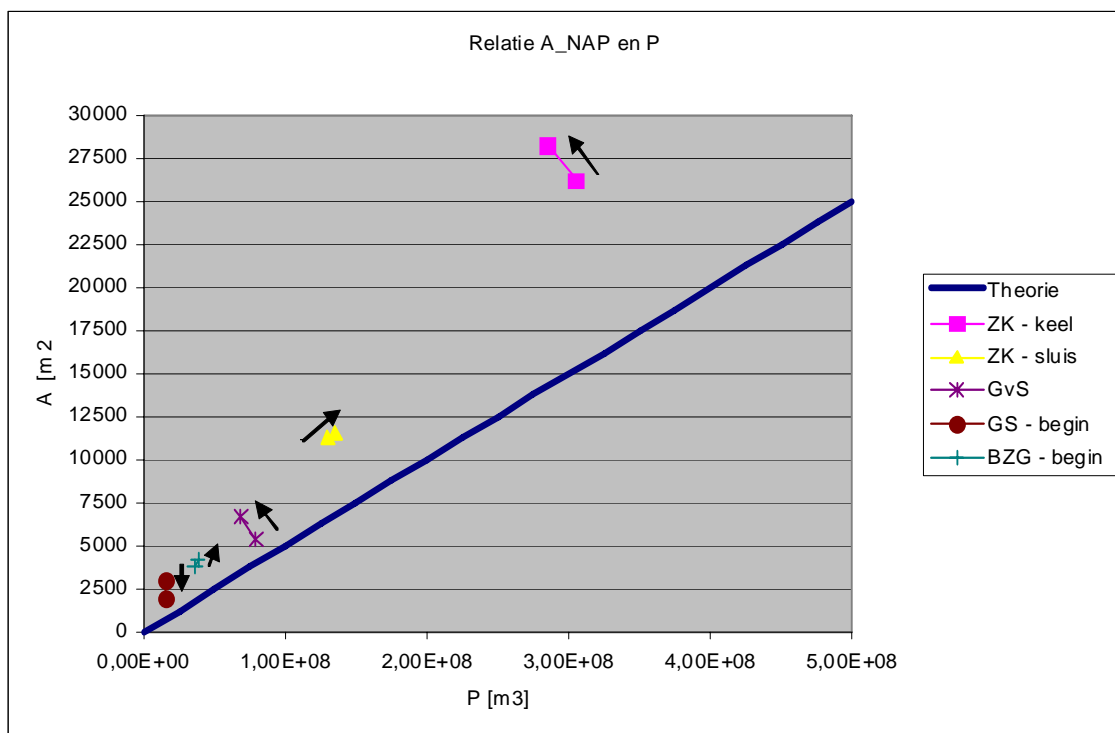
De verdeling van het getijprisma over de verschillende delen van de vloeddelta is ook geanalyseerd met de gegevens van 1992 en 2006. Daarvoor is gekeken naar de cumulatieve debiet door een aantal doorsneden van de Zoutkamperlaag vloeddelta [appendix A]. Een positieve waarde houdt in dat het een vloedgedomineerde geul is met een reststroming en -transport de geul in, voor een negatieve waarde geldt het omgekeerde: een ebgedomineerde geul met een reststroming en -transport de geul uit.

Tabel 5 geeft weer wat het debiet door de verschillende doorsneden is en of de geul een vloedgedomineerde of een ebgedomineerde geul is gedurende een periode van 32 dagen. Tabel 6 toont de veranderingen in het prisma tijdens springtij en de veranderingen in de stroomvoerende oppervlakten van de doorsnede bepaald met vergelijking 4.

Uit deze gegevens kan de relatie bepaald worden tussen het oppervlakte van de doorsnede en het prisma door de doorsnede met de semi-empirische relatie uit vergelijking 31.

$$A_{NAP} = 5,0 * 10^{-5} P$$

Vergelijking 31: Semi-empirische relatie tussen oppervlakte doorsnede op NAP en getijprisma door de doorsnede



Figuur 48: Semi-empirische relatie tussen A_{NAP} en P

Wanneer deze vergelijking uitgezet wordt in een grafiek [figuur 48] dan is duidelijk zichtbaar dat er geen evenwicht is. Alleen de Grote Siege is op weg naar een evenwichtssituatie. De keel van de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog verwijderen zich meer van de evenwichtssituatie terwijl de Zoutkamperlaag - sluisen en het Brakzandstergat zich langs de evenwichtslijn verplaatsen. Gezien de gevolgen van de zeespiegelrijzing (18 centimeter per eeuw) is een te hoge waarde geen uitzondering, echter de afwijking die de Zoutkamperlaag doorsneden laten zien is te groot en kan niet alleen door de zeespiegelrijzing gecompenseerd worden. De vloeddelta is nog steeds zoekende

naar haar evenwichtstoestand. De geulen worden dieper en smaller terwijl de platen groter worden, maar niet hoger.

3.5 Conclusie semi-empirisch model

Alleen al op basis van de begincondities en -gegevens uit 1992 en 2006 in het Delft3D model kan gesteld worden dat er in de tussenliggende 18 jaar veel veranderd is in de Zoutkamperlaag vloeddelta.

Een in het oog springend feit is dat de data analyse in Delft3D afwijkt van de data uit de historie. Waar in figuur 50 de historische gegevens een neergaande lijn vertonen in de richting van de theoretische evenwichtslijn vertoont Delft3D een stijging.

Dit kan te maken hebben met het verschil in aanpak van de VOP-studies van Rijkswaterstaat en deze analyse, het gebied D2 dat enigszins kan verschillen in beide benaderingen en dat voor de 2006 analyse de witte plekken in de lodingen zijn opgevuld met data uit 1992. Daarnaast kan opgemerkt worden dat gegevens over bijvoorbeeld de getijde amplitudes gedateerd zijn op 1991 en wellicht in verschoven zijn.

De vloeddelta is nog niet in evenwicht na de afsluiting en wordt verder opgevuld met zand. Dit heeft tot gevolg dat het inter-getijdengebied A_f afneemt door een toename in het oppervlakte van A_{LW} en het gelijk blijven van A_{HW} .

In Delft3D is een toename in het prisma te zien voor het hele bekken. Deze toename is te verklaren met het feit dat de geulen zich meer oostwaarts ontwikkelen mede door het verschuiven van het wantij en het langer worden van Schiermonnikoog. Meer water door minder geulen betekent dat de bestaande geulen meer uitgeslepen worden. Het resultaat is dus smallere en diepere geulen.

In appendix A zijn voor een vollediger beeld de veranderingen in alleen de vaarroute vanaf 2004 tot 2008 weergegeven. Hiermee is nogmaals duidelijk te zien dat de geulen aan de randen sedimenteren en in het midden uitslijpen. Smallere en diepere geulen zijn zoals eerder al genoemd daarvan het gevolg.

Hiermee is de daling van het inter-getijdengebied ook te verklaren. Een toename in het prisma met een gelijkblijvend A_{HW} en H zorgt voor een afname van V_f gecombineerd met een afname van A_f levert een daling van h_f .

De opmerkelijkste verandering is dat de Groote Siege een ebgedomineerde geul is geworden. Het achterland van de Groote Siege is in vergelijking met de jaren zeventig [appendix D] compleet veranderd. Maar of deze veranderingen de oorzaak zijn van het omslaan van vloed gedomineerd naar eb gedomineerd karakter is niet uit de gegevens van 1992 en 2006 te halen. Het enige wat bekend is, is de verandering in het baggerbeleid. De doorsnede en het volume water in de Groote Siege zijn hierdoor sterk veranderd. Het lijkt erop dat deze ontwikkelingen voordelig uitpakken voor het Brakzandstergat. Wat dit uiteindelijk voor invloed heeft op de verdere levensvatbaarheid van de Groote Siege wordt in hoofdstuk 4 verder behandeld. De simpele stelregel dat een splitsing van een geul plaatsvindt op een locatie waar de diepte de helft is van de oorspronkelijke diepte van de hoofdgeul zou een mogelijke verklaring zijn waarom de Groote Siege langzamerhand verzandt en net zoals het geultje naar de jachthaven enkel met baggeren op diepte te houden is. Een dieper wordende hoofdgeul (Gat van Schiermonnikoog met in het verlengde het Brakzandstergat) zorgt voor een verschuiving van het splitsingspunt meer naar het oosten.

Op de vraag of het prisma zich aanpast aan het stroomvoerende oppervlakte of dat het oppervlakte zich aanpast aan het prisma kan maar gedeeltelijk antwoord gegeven worden met deze uitkomsten. Na de afsluiting van de Lauwerszee hebben de doorsneden zich aangepast aan het veranderde prisma. De hele vloeddelta is sindsdien zoekend naar een nieuw evenwicht. Een theoretisch evenwicht dat gezien het dynamische karakter van het bekken en de invloed van de

zeespiegelrijzing nooit bereikt zal worden. In de geulen die de vaarroute vormen en dan specifiek de Grootte Siege hebben aanpassingen in de doorsneden ervoor gezorgd dat het prisma door deze geulen zich moet aanpassen.

Tot slot kan op basis van de gegevens uit de doorsneden een antwoord gegeven worden op de vraag of het bekken sediment importeert of exporteert [vergelijking 23]. De bovenste figuur op pagina 70 [Appendix A] geeft het bodemniveau weer van de keel van de Zoutkamperlaag in 1992 en in 2006. Daarmee wordt bepaald wat de bodembreedtes zijn op de hoogwaterkentering en de laagwaterkentering.

Hieruit blijkt dat vergelijking 23 met een H^+ van NAP+0,50m., een H^- van NAP-0,75m., een b_K^+ van 4125m. en een b_K^- van 3775m. nog altijd een waarde voor α heeft die kleiner is dan 1. Dit houdt in dat zowel in 1992 als in 2006 de vloeddelta van de Zoutkamperlaag theoretisch gezien nog altijd zand exporteert. Echter de figuren 43 en Appendix A1 geven een duidelijke trend van import van zand weer in de curven.

4. Verschillende scenario's

In dit hoofdstuk worden drie scenario's behandeld, die moeten leiden tot een antwoord op de in hoofdstuk 3 gestelde hypothesen.

De eerste paragraaf is het scenario waarin de natuur haar gang kan blijven gaan en er niet meer ingegrepen wordt dan er op dit moment gedaan wordt. Paragraaf twee van dit hoofdstuk wordt het scenario behandeld waarbij de natuur alleen bijgestuurd wordt door middel van ingrijpdieptes en -breedtes en streefdieptes en -breedtes.

Tot slot wordt in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk een scenario bekeken waarbij er een vaarroute komt tot dichtbij het dorp. Hierbij moeten enkele geulen, al dan niet kunstmatig, gestabiliseerd worden.

Voor alle scenario's geldt dat voor een goede bevaarbaarheid een diepte van NAP-4,10m. wordt aangenomen als veilig en NAP-3,50m. als minimale diepte waarbij ingegrepen moet worden. De breedte van de vaarroute mag geen gevaarlijke situaties opleveren, alleen is het niet noodzakelijk overal 60 meter als breedte te hanteren [9][10][11]. Figuren bij dit hoofdstuk zijn te vinden in appendix B.

4.1 De natuur gaat zijn gang

In het eerste scenario wordt er gekeken naar de ontwikkelingen in het Friesche Zeegat over langere tijd zonder dat er ingrepen wordt. Het moet een beeld geven van de ontwikkelingen in de komende decennia.

Aandachtspunten in dit model zijn de verspreiding van het getijprisma door het bekken en de initiële sedimentatie/erosie. Speciale aandacht gaat uit naar de geulen die samen de vaarroute vormen naar Schiermonnikoog.

Voor dit scenario zijn zes simulaties gemaakt. Per simulatie is de morfologische factor aangepast, waarmee in feite de uitkomsten van de simulatie uitkomsten over een langere periode zijn berekend.

Simulatie_id	Morfologische factor
Sc1_5	12
Sc1_6	24
Sc1_7	36
Sc1_8	48
Sc1_9	60
Sc1_10	120

Tabel 7: Scenario 1: simulatie en morfologische factor

Om het duidelijk gescheiden te houden worden de ontwikkelingen in het bekken opgesplitst in ebdelta en vloeddelta.

4.1.1 Ebdelta

Aan de westkant van de ebdelta ontwikkelt de vloedschaar het Westgat zich. De drie ebscharen aan de noordwest, de noord en de noordoost kant roteren alle drie oostwaarts. Na jaren van erosie aan de ebdelta vindt er weer sedimentatie plaats aan de noordkant. De ebschaar Plaatgat aan de oostelijke kant van de ebdelta wordt ondieper door sedimentatie op ten duur en daarmee vormt zich een vloedschaar aan de westkant en na enkele jaren een vloedschaar aan de noordwest kant en een ebschaar aan de noordkant van de ebdelta. Het inter-getijdengebied aan de noordkant van het Rif en Engelsmanplaat (in het westelijke deel van de ebdelta) wordt ook hoger gedurende de jaren [figuren B1 tot en met B7 in appendix B].

4.1.2 Vloeddelta

De Zoutkamperlaag wordt in het laatste stuk voor de haven van Lauwersoog dieper. Aan de oostkant van de haven baant de Oort zich in het verlengde van de Zoutkamperlaag verder naar het oosten. Ook het Gat van Schiermonnikoog wordt zowel aan de westkant van het eiland als onder de zuidpunt van het eiland verder uitgeslepen. Dit uitslijpen heeft ook effect op het Brakzandstergat. Deze geul wordt dieper en ontwikkelt zich verder oostwaarts. Het wantij verplaatst zich niet duidelijk. De hoogteveranderingen en sedimentatie wordt wel gesignaleerd op diverse punten, maar een duidelijke beweging richting het westen of oosten is er niet [figuren B1 tot en met B7 in appendix B].

4.1.3 Effect op de bevaarbaarheid

Al deze ontwikkelingen in de vloeddelta komen de bevaarbaarheid van de vaarroute naar Schiermonnikoog niet ten goede. De Grootte Siege krijgt door de groeiende vraag naar water van het Brakzandstergat minder water. Hierdoor ontstaat vooral in het achterste gedeelte van de Grootte Siege rondom de veerdam een probleem. De diepte ligt hier op den duur tussen de NAP-1,0m. en NAP-2,0m. Gedurende een getijcyclus zal de veerdam dan enkele uren niet meer te bereiken zijn. Het gemiddelde laagwater bij Schiermonnikoog is NAP-1,24m. en de diepgang van de veerboten is maximaal 1,71m. en dan is een waterstand van 2-2,5 meter zeker nodig [figuren B8 tot en met B10 in appendix B].

4.2 De natuur wordt geholpen en begeleid

Het tweede scenario moet een beeld geven van de ontwikkelingen in het bekken wanneer er ingegrepen wordt in de bestaande situatie.

Onder de huidige omstandigheden wordt met regelmaat van de klok gebaggerd rondom de veerdam, in de Grootte Siege en in de Glinder. Het gebaggerde zand wordt vervolgens in het Gat van Schiermonnikoog gedumpt. Dit is geen ideale dumplocatie gezien het feit dat juist het Gat van Schiermonnikoog dieper wordt door de hoge stroomsnelheden. Het gedumpte zand stroomt waarschijnlijk dan ook met dezelfde snelheid weer terug naar de locatie waar het vandaan komt.

Simulatie_id	Maatregel	Morfologische factor
Sc2_1	Brakzandstergat afsluiten	6, 12, 60
Sc2_2	Onnatuurlijk drempels verwijderen	6, 12, 60
Sc2_3	Uitbaggeren tot streefdiepte	6, 12, 60
Sc2_4	Wanden geul verhogen	12, 60
Sc2_5	Combinatie van maatregelen	12, 60

Tabel 8: Scenario 2: simulatie, maatregel en morfologische factoren

Met de ingrepen wordt het getijprisma gestuurd, waardoor er een groter volume water moet gaan stromen door de Grootte Siege. Hierdoor wordt sedimentatie verminderd. Daarnaast wordt ook de dumpplek van baggerspecie verschoven meer stroomafwaarts om te voorkomen dat het gebaggerde zand weer op de oude plek terugkomt.

4.2.1 Brakzandstergat afsluiten

Door het Brakzandstergat af te sluiten met het volume baggerspecie dat nu elders gestort wordt na onderhoudswerk moet het mogelijk zijn om het volume water dat door de Grootte Siege stroomt te vergroten. Onder onderhoudswerk wordt verstaan de minimale diepte van de Grootte Siege op NAP-3,50m. houden. Omdat het volume baggerspecie uit de Grootte Siege niet voldoende zal zijn om het volume water in het Brakzandstergat te verkleinen wordt in het model ook onderhoudswerk in de

Piebe naar de jachthaven meegenomen. De Piebe wordt tot NAP-1,50m. op diepte gehouden.

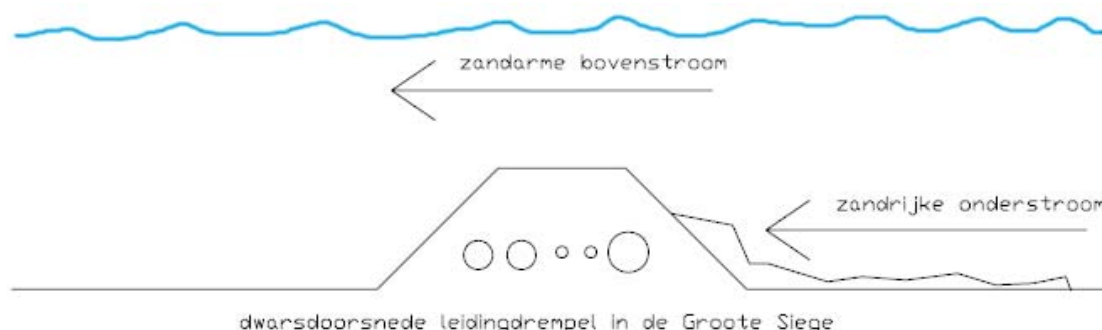
Het effect van deze maatregel is dat de Groote Siege duidelijk dieper wordt aan het einde. Het is echter niet genoeg. De diepte varieert tussen de NAP-2,0m. en NAP-3,0m. Met hoogwater geeft dit geen probleem, maar bij laagwater is het toch wederom kritiek.

Het extra uitbaggeren van de Piebe heeft verder geen positief effect op de levensvatbaarheid van de Piebe. Deze geul krijgt met het uitbaggeren niet het profiel qua doorsneden en doorstroming om ook echt een volwaardige geul te worden die zichzelf op diepte kan houden [figuren B11 tot en met B17 in appendix B].

4.2.2 Onnatuurlijke drempels verwijderen om uitstroom van zand te bevorderen

In de Groote Siege zijn op een aantal plaatsen drempels aanwezig die de uitstroom van zand bij afgaand water belemmeren. Deze drempels zijn geen natuurlijk gevormde drempels. Drempels gevormd door de vloed- en ebstroom liggen normaal gesproken in de langsrichting van een geul zoals in paragraaf 2.2 en 2.3 beschreven is. De drempels in de Groote Siege liggen in de dwarsrichting van de geul. Deze drempels vormen de leidingpaden naar Schiermonnikoog. Het is dan ook uitgesloten dat de drempels weggebaggerd kunnen worden. Alleen door het opnieuw aanleggen op juiste diepte van de diverse leidingen naar Schiermonnikoog is het mogelijk om deze drempels als obstakel uit de Groote Siege te verwijderen.

In de huidige situatie wordt de zandrijke onderstroom [figuur 20] bij het afgaand water gehinderd door een drempel [figuur 49] ter hoogte van de GS2a en de GS12 [appendix E]. Hierdoor treedt meer sedimentatie in de Groote Siege op dan wanneer er sprake is van vrije uitstroom.



Figuur 49: Mogelijke dwarsdoorsnede van de leidingdrempel in de Groote Siege

Ook bij deze maatregel is het effect positief. De Groote Siege krijgt een grotere diepte naar het einde van de geul toe. Maar ook hier is de marge te klein om te spreken van een structurele oplossing. Wederom mist de geul voldoende waterdiepte rondom laagwater, waardoor het onverantwoord is om in de richting van de veerdam te varen [figuren B18 tot en met B22 in appendix B].

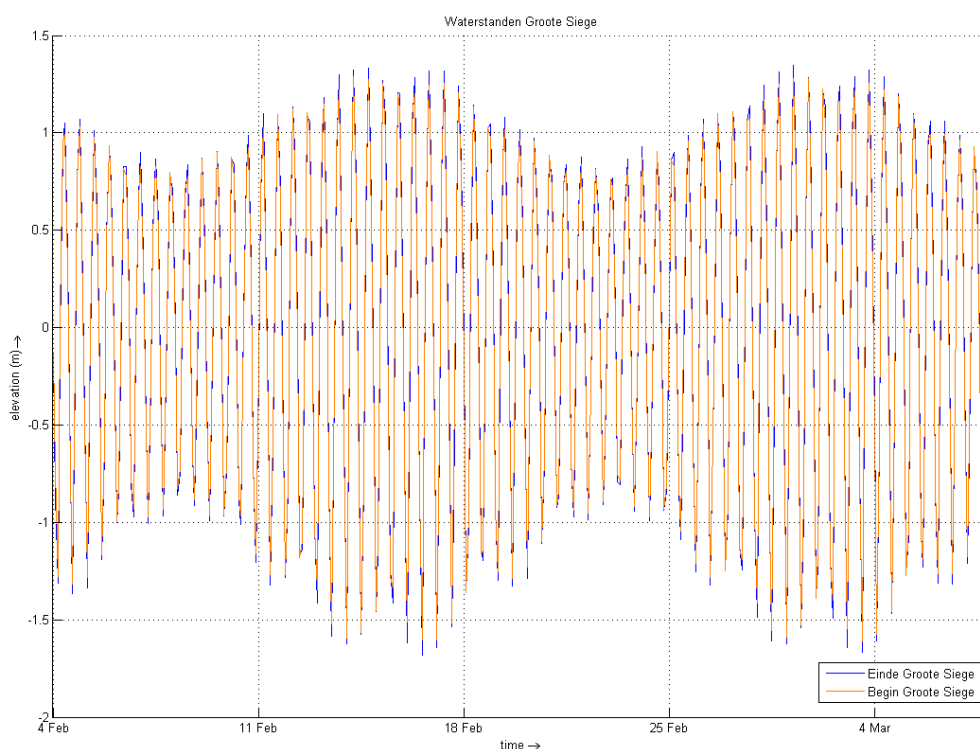
Wel moet opgemerkt worden dat in deze maatregel uitgegaan wordt van een dusdanige hoogte (1,1 meter in 2003, 1,5 meter in 2007, 2,2 meter in 2008) van de drempel dat deze ook daadwerkelijk de ebstroom kan hinderen.

4.2.3 De Groote Siege uitbaggeren tot streefdiepte

Tot 2003 had de vaarroute, waar de Groote Siege deel van uitmaakt, afmetingen van 60 meter breed en een diepte van NAP-4,10m. Dit waren zoals eerder genoemd de streefbreedte en -diepte. Uit kostenoverweging is besloten vanaf 2003 de voormalige ingrijpdiepte en -breedte van NAP-3,50m. en 50 meter breed te

hanteren. Kortweg betekent dit een afname van het stroomvoerend oppervlakte en in de waargeul van 26 % (van 309m² naar 227,5m²) bij hoogwater en van 34 % (van 172,2m² naar 113,5m²) bij laagwater. Dezelfde afnamen gelden voor het volume per strekkende meter. Voor de Grootte Siege met een lengte van 2500m. betekent dit een volumeafname voor berging van 203.750m³ en 146.750m³ bij respectievelijk hoog- en laagwater. De Grootte Siege uitbaggeren tot een streefdiepte en het vrijgekomen volume baggerspecie in het Brakzandstergat dumpen is de derde maatregel. Hiermee wordt de vraag naar water van het Brakzandstergat kleiner en moet het volume water in de Grootte Siege toenemen. Als er meer water door de Grootte Siege stroomt ontstaan er hogere stroomsnelheden, waardoor het meegevoerde zand minder kans krijgt om te bezinken in de vaarroute. De lengte van de Grootte Siege wordt ook vergroot. Op dit moment houdt de geul vlak na de veerdam op. Aan het einde van de geul bezinkt zand sneller dan elders in een geul, doordat de stroomsnelheden op het einde van een geul lager zijn. Door de lengte te vergroten nemen de stroomsnelheden langs de veerdam toe en daarmee neemt de sedimentatie op die locatie af.

Met de kennis uit de vorige hoofdstukken is het mogelijk om te bepalen wat de daadwerkelijke hoeveelheid water kan worden. Vervolgens is het met die gegevens mogelijk om een ideale lengte en diepte te bepalen. De waterstanden in de Grootte Siege op basis van scenario I [figuur 50] geven slechts enkele centimeters als verschil aan tussen het begin en het einde van de Grootte Siege.

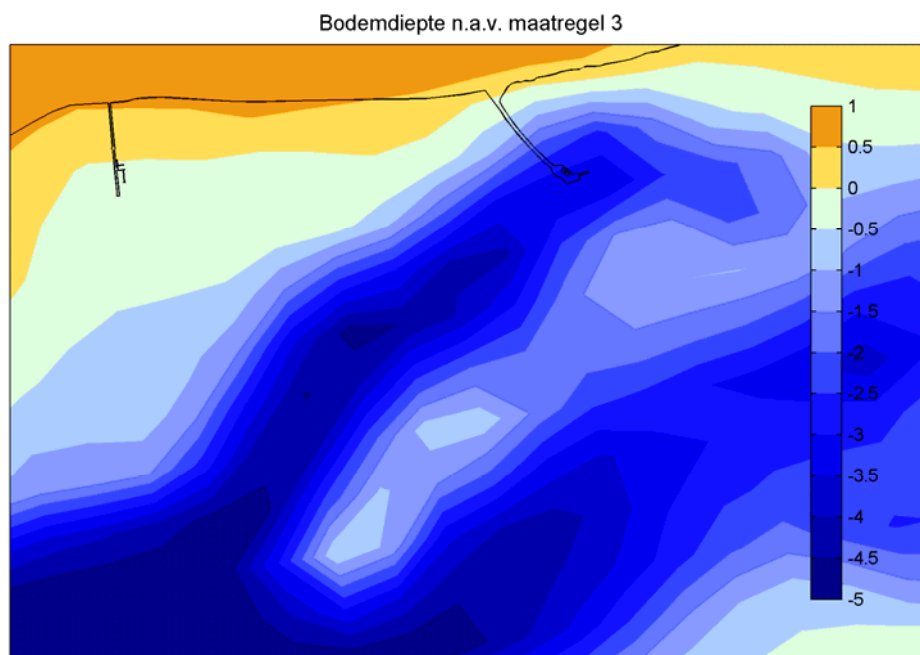


Figuur 50: Waterstanden Grootte Siege

In de simulaties met deze maatregel is er een gebied ter grote van de Grootte Siege uitgebaggerd tot NAP-4,50m. Vanwege het grove rekenrooster is er geen rekening gehouden met de streefbreedte. Daardoor is er geen duidelijk beeld is van de precies dwarsdoorsneden van de Grootte Siege. De lengte van de Grootte Siege is in de simulaties is niet bepaald aan de hand van de beschikbare gegevens vanwege

dezelfde moeilijkheid als bij de breedtebepaling. De Grote Siege heeft voor deze simulaties een lengte van ongeveer 2500m.

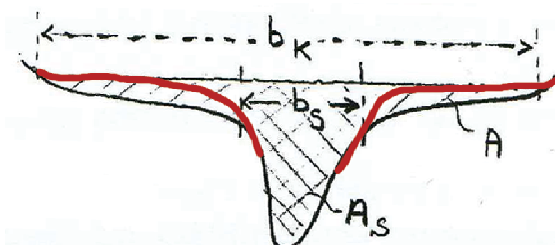
De effecten van deze maatregel zijn beter dan bij de eerste twee maatregelen. De geul heeft een diepte tussen de NAP-3,0m. en NAP-3,5m. [figuur 51] bij een startdiepte van NAP-4,50m. aan het einde van de tijdsperioden. Daarnaast levert deze maatregel gedurende één getij cyclus voldoende water op om veilig te kunnen varen. De waterstand bedraagt namelijk minimaal 2 meter [figuren B23 tot en met B28 in appendix B].



Figuur 51: Bodemdiepte Grote Siege n.a.v. maatregel 3 met mor.fac. 12 met laagwater

4.2.4 Wanden van de geulen ophogen door middel van mossel- en/of oesterbanken

Een oplossing waarmee de doorsnede van het Brakzandstergat aangepast wordt en hetzelfde volume water door een kleinere doorsnede stroomt. Hierdoor ontstaan hogere snelheden waardoor zand niet kan bezinken. Figuur 52 geeft weer hoe deze verhoging als veranderingen in een dwarsdoorsnede van de geul moet worden voorgesteld.



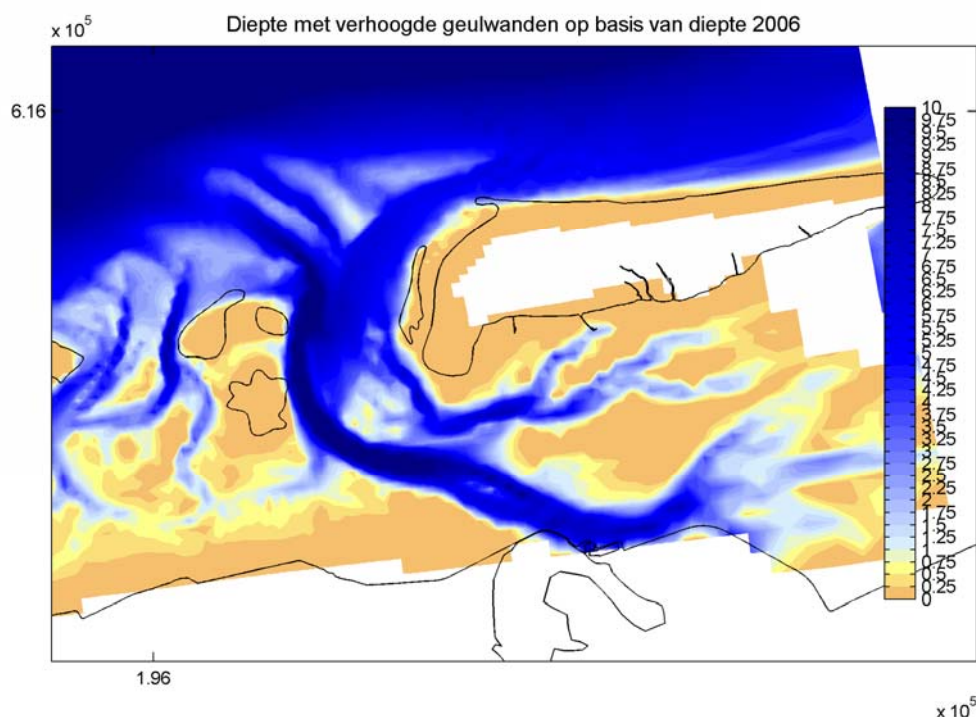
Figuur 52: Dwarsdoorsnede geul waarbij b_k en A worden verkleint.

Hierbij is een nieuwe basisdiepte gemodelleerd op basis van de basisdiepte uit de andere simulaties. Rondom het Brakzandstergat zijn de wanden van de geulen

verhoogd tot op het NAP niveau (MW = NAP+0,01). Deze nieuwe diepte staat in figuur 53 afgebeeld.

Het uitslijpen van de geul moet op de volgende wijze tot stand komen. Door het verhogen van de wanden van het Brakzandstergat duurt het langer voordat het water uit de geulen treedt en over de platen vloeit. Dit houdt in dat er meer water door het stroomvoerende oppervlakte van het Brakzandstergat en indirect ook de Grootte Siege moet. Die oppervlakte is niet veranderd waardoor er een hogere stroomsnelheid in de geul ontstaat [vergelijking 4]. Door de hogere stroomsnelheid moet theoretisch gesproken het zand minder kunnen sedimenteren en al naargelang de hoogte van de stroomsnelheid kan erosie optreden.

Deze maatregel kan gezien worden als een maatregel waarbij geprobeerd wordt het stuk wad zo min mogelijk te beschadigen. Ophogen van de geulwanden moet naast het verhogen van de stroomsnelheden in de geul, ook een meerwaarde voor de omgeving kunnen hebben. Wanneer de ophoging gebeurt met bijvoorbeeld mossel- of oesterbanken kan dit een impuls geven aan "streekgebonden lekkernijen". Echter geul/vaarroute door of omringt met kwelderlandschap is niet optimaal zoals men bij Holwerd op de lijn Holwerd - Ameland ervaart [11].



Figuur 53: Diepte met verhoogde geulwanden

De resultaten laten zien dat deze maatregel niet onderdoet voor de maatregelen 1 en 2. De Grootte Siege verzandt niet verder, maar net zoals bij de maatregelen 1 en 2 is de bodemdiepte in combinatie met de waterstand kan een veilige dienstregeling niet gegarandeerd worden [figuren B29 tot en met B37 in appendix B].

4.2.5 Combinatie van maatregelen

In deze simulaties zijn een aantal maatregelen gekoppeld met elkaar. De uitkomsten van de simulaties moeten duidelijkheid geven of een combinatie van drempels wegbaggeren, geulwanden ophogen en baggerspecie op een andere locatie dumpen leiden tot meer water door de Grootte Siege. De resultaten van deze simulaties zijn mager. De eerder genoemde problemen bij de losse maatregelen spelen hier ook een rol en de maatregelen lijken elkaar niet te

versterken op positieve wijze. In appendix B staan de figuren B38 tot en met B43 waarin de resultaten van deze maatregel afgebeeld zijn.

4.3 Rigoreus ingrijpen

Dit scenario moet uitsluitend geven over de mogelijkheden van een (kunstmatig) stabiele geul naar een aankomstplek aan de zuidkant van het eiland. Het gaat in dit scenario erom om een geul zodanig te modeleren dat de geul levensvatbaar is en met minimaal onderhoud een veilige vaarroute kan zijn. Door middel van de vergelijkingen uit hoofdstuk 2 en hoofdstuk 3 is het mogelijk om de doorsneden en volumes te bepalen die nodig zijn.

Simulatie_id	Actie	Morfologische factor
Sc3_1a	Piebe deels uitbaggeren	12, 60
Sc3_1b	Piebe uitbaggeren	12, 60
Sc3_2a	Geul vanaf Zoutkamperlaag baggeren	12, 60
Sc3_2b	Geul plus zwaikom baggeren	12, 60

Tabel 9: Scenario 3: simulatie, actie en morfologische factoren

4.3.1 De Piebe reanimeren

De eerste optie is het weer levensvatbaar maken van de Piebe, de geul naar de huidige jachthaven. Deze geul heeft nu een diepte van NAP-1,50m. en er wordt geen onderhoud aan gedaan. Actie 1a houdt in dat het begin van de Piebe de afmetingen krijgt van 60 meter breed en een diepte van NAP-4,10m. Het doel hiervan is om de vraag naar water te vergroten. Vervolgens moet deze grotere massa water zich door het gedeelte van de Piebe persen dat niet op de juiste afmetingen is gebaggerd. Hierdoor gaan de stroomsnelheden omhoog en ontstaat er erosie waardoor met hulp de Piebe door de natuur weer een grotere diepte krijgt. Het volume baggerspecie dat vrijkomt, wordt wederom in het Brakzandstergat gedumpt om de vraag naar water voor deze geul te verminderen.

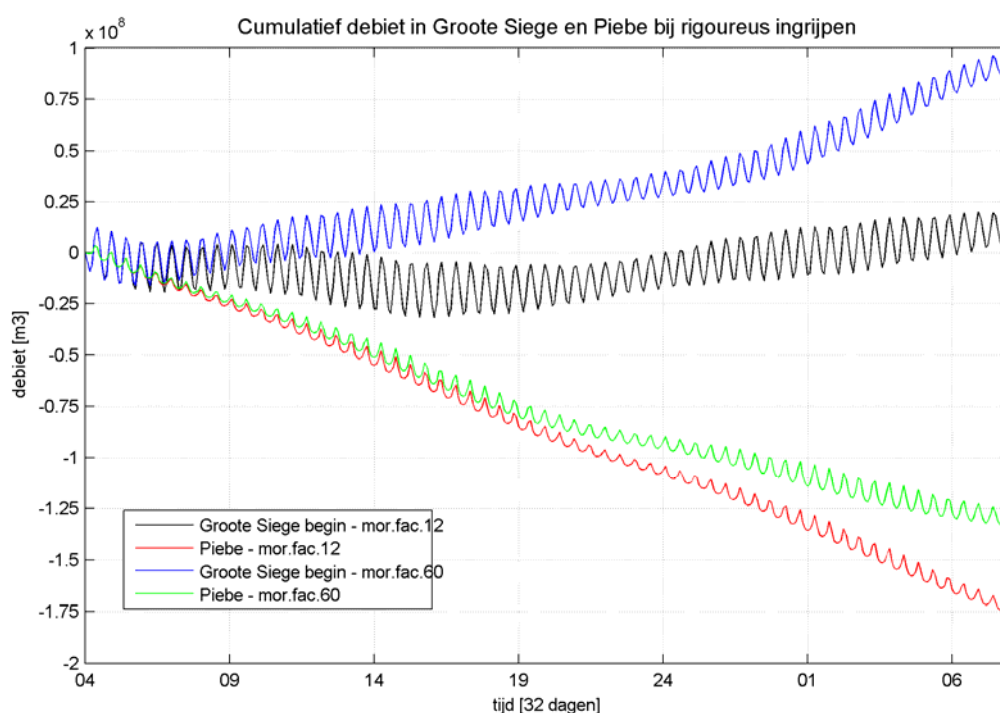
De Piebe eenmalig helemaal uitbaggeren tot de ideale afmetingen is actie 1b. Deze actie moet uiteindelijk hetzelfde resultaat geven als bij actie 1a.

Actie 1a heeft absoluut geen effect op de diepte van de geul. Zelfs het begin van de Piebe is na een jaar weer terug bij de oude diepte. Bij het uitbaggeren van het begin van de Groote Siege komt er te weinig baggerspecie vrij om daadwerkelijk de watervraag van het Brakzandstergat te beïnvloeden. Actie 1b sorteert wel meer effect. De contouren van de geul blijven stabiel, echter de diepte is niet voldoende om een veerdienst met de huidige schepen bij uit te oefenen. Blijkbaar is er nu wel voldoende baggerspecie om de vraag naar water in het Brakzandstergat te verkleinen. Beide acties hebben hoe dan ook geen positief effect op de huidige vaarroute. De Groote Siege blijft te ondiep voor een veilige verbinding tussen Lauwersoog en Schiermonnikoog [figuren B44 tot en met B49 in appendix B].

4.3.2 Kanaal vanaf het Gat van Schiermonnikoog naar de jachthaven

Met de vergelijkingen uit paragraaf 3.4.3 is het mogelijk voor een volledig nieuwe geul uit te rekenen wat het prisma door de doorsneden wordt en wat de berging is. Maar ook hiervoor geldt dat het rekenrooster te grof is om in detail dat allemaal door middel van simulaties in Delft3D uit te voeren. Naast de hoeveelheid water door een geul om voldoende stroomsnelheid te ontwikkelen zodat er geen sedimentatie optreedt in de nieuwe geul, is het van belang dat de stroomsnelheden en de diepte geen problemen opleveren voor de scheepvaart. Te hoge stroomsnelheden gaan zeker een rol spelen wanneer de geul naast de reguliere veerboot ook gebruikt wordt door de pleziervaart. De diepte van de geul kan met

een simpele vuistregel vastgesteld worden. Deze vuistregel is dat de diepte van de geul 1,4 maal de grootste diepgang is. Wanneer de geul slechts gebruik wordt is de maatgevende diepgang voor de veerboot is dit 1,71m. en bij gecombineerd gebruik is de maatgevende diepgang 1,90m. De geul moet dan respectievelijk 2,40m. en 2,66m. onder de laagste laagwaterstand NAP-1,70m. [Knaack, 2007 en 12]. De geul moet dan een diepte van NAP-4,10m. hebben voor enkel veerboot gebruik en NAP-4,40m. voor gecombineerd gebruik. De breedte van de nieuwe geul is 60 meter volgens de streefafmeting [9][10] met een natuurlijke helling van 1:15 voor de zijkanten van de geul. De diameter van de zwaikom is twee keer de breedte van de geul en de zijkanten van deze kom worden meer kunstmatig gestabiliseerd en hebben daardoor een steilere helling. Een nieuwe geul loopt vanaf het Gat van Schiermonnikoog tot aan de jachthaven. Aan het einde van de geul komt een zwaikom of een bassin waar de schepen kunnen draaien en afmeren. De lengte van deze nieuwe geul is 2500m. Zoals figuur 54 aantoont is het debiet in de Grootte Siege en in de nieuwe geul sterk veranderd in vergelijking tot het debiet in hoofdstuk drie. De Grootte Siege is weer een vloedgedomineerde geul geworden voor zover het nog een echte geul is. De nieuwe Piebe is een ebgedomineerde geul waar de ebdominantie op ten duur afneemt.

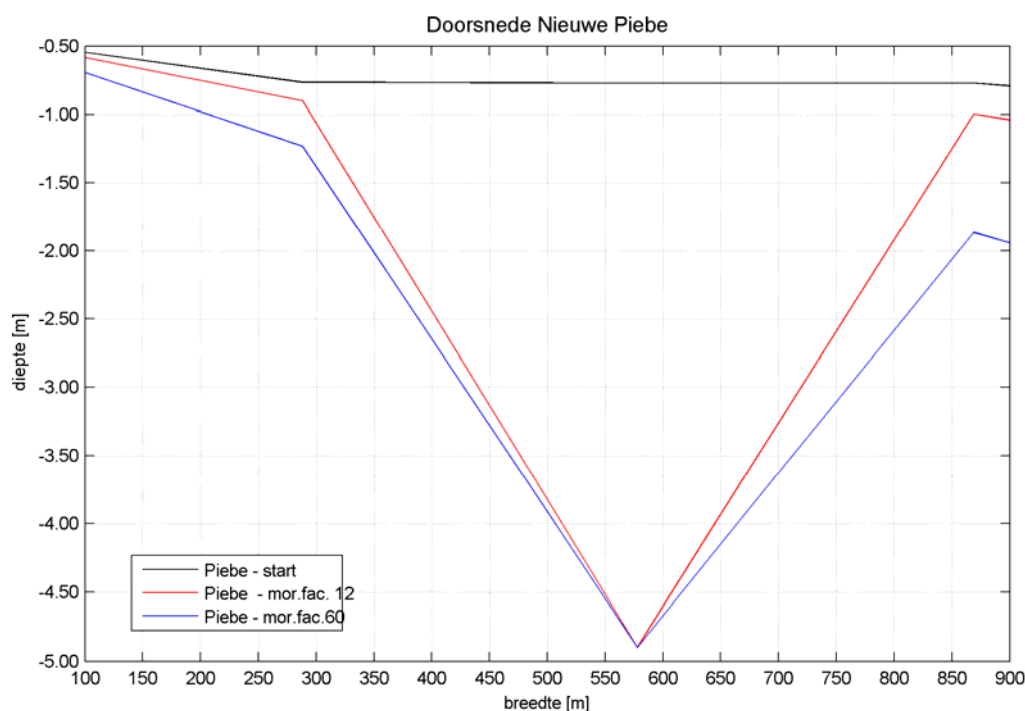


Figuur 54: Cumulatief debiet in Grootte Siege en Piebe bij scenario III, 2A

Ook de doorsneden voor de nieuwe Piebe zijn hoopgevend [figuur 55]. Voor de tweede actie wordt er aan de hand van de eerder besproken ideale geulafmetingen een nieuw kanaal gebaggerd vanaf de Zoutkamperlaag tot aan de dijk aan de zuidkant van Schiermonnikoog waar de huidige jachthaven begint (actie 2a) of een kanaal vanaf het Gat van Schiermonnikoog tot even voor het einde van de jachthaven. Daar wordt dan een zwaikom gebaggerd (actie 2b). Hierdoor ontstaat er een nieuwe vaarroute richting de jachthaven. Het is dan ook de bedoeling dat als deze vaarroute stabiel is, de jachthaven verbouwd wordt tot veerhaven en jachthaven ineen.

Beide acties zijn levensvatbaar. Actie 2a maakt een groot volume baggerspecie vrij om het Brakzandstergat in watervraag te beperken. Hierdoor kan de nieuwe Piebe redelijk goed op diepte blijven, maar de diepte blijft kritisch voor de

bevaarbaarheid. Met deze actie wordt ook een stuk van de Glinder uitgebaggerd.



Figuur 55: Doorsnede nieuwe Piebe

Op dit moment vormt een west-oost drempel aan het einde van de Glinder al voor problemen tijdens laagwater. Op een punt zoals de Glinder waar de hoofdgeul zich splitst in twee vloedscharen ontstaat altijd een delta met lagere stroomsnelheden en een grotere kans op de sedimentatie. Actie 2a toont aan dat een goede baggeraanpak de Glinder enige tijd op diepte houdt.

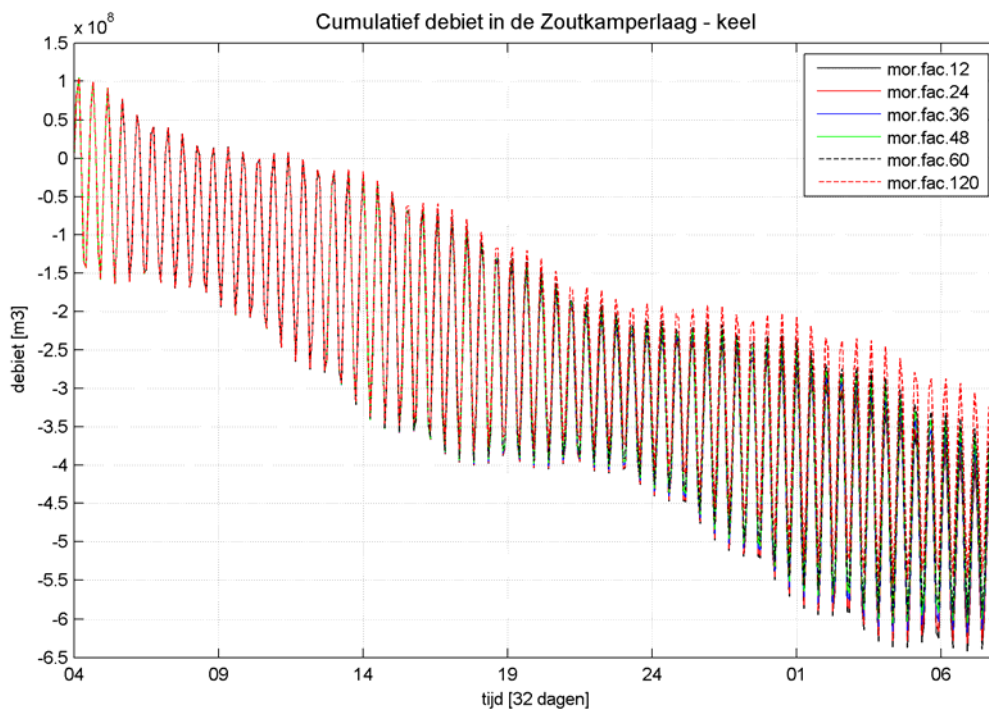
Actie 2b lijkt in eerste instantie minder succes vol wanneer er pas vanaf het Gat van Schiermonnikoog gebaggerd wordt. De zwaikom verzandt niet, maar de geul er naar toe is niet diep genoeg [figuren B50 tot en met B55 in appendix B].

4.4 Conclusie proces model

De simulaties van scenario I in Delft3D laten zien dat de in het semi-empirische model geconstateerde effecten zich doorzetten. De hoofdgeulen worden dieper en smaller en ontwikkelen zich richting het oosten.

Uit alle simulaties die gedaan zijn in Delft3D blijkt dat voor het bevaarbaar houden van de vaarroute en dan expliciet het laatste stuk van deze route, de Grootte Siege, het noodzakelijk is om meer water in dit stuk te krijgen. Op natuurlijk wijze is dit niet meer mogelijk. Eén verklaring daarvoor kan zijn dat de splitsing niet natuurlijk meer is. Daarmee wordt bedoeld dat normaal gesproken een hoofdgeul zich splitst op het punt waar de diepte de helft is van de diepte van de hoofdgeul. Als dit niet zo is dan is de kans aanwezig dat een splitsing zich verplaatst en dat er een geul verzandt. Voor zowel de Piebe naar de jachthaven als voor de Grootte Siege naar de nieuwe steiger kan dit het geval zijn.

Het noodzakelijke baggerwerk hangt uiteindelijk af van de veranderingen in het getij prisma. In figuur 56 en figuur 57 is voor de twee belangrijkste doorsneden, de Zoutkamperlaag - keel en het begin van de Grootte Siege, het cumulatieve debiet weergegeven.



Figuur 56: Cumulatief debiet Zoutkamperlaag - keel in scenario I voor 6 simulaties

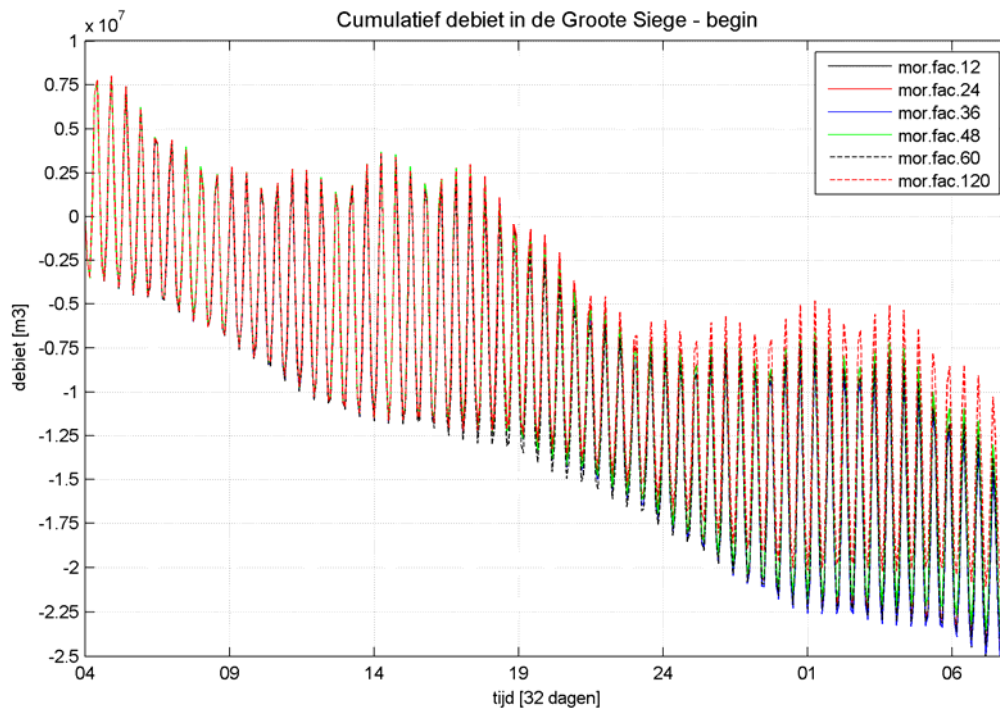
Daaruit blijkt dat voor scenario I zonder ingrepen het debiet in de Zoutkamperlaag - keel [figuur 56] de komende jaren verder afneemt. Het blijft echter wel een ebgedomineerde geul. Het debiet aan het begin van de Grote Siege [figuur 57] neemt ook verder af.

In scenario II zijn een aantal ingrepen gedaan waarmee geprobeerd is het systeem te beïnvloeden. Het probleem bij de uitvoer van deze maatregelen in het Delft3D model is dat het rekenrooster te grof is om de maatregelen gedetailleerd in te voeren. Grofweg kan er het volgende over gezegd worden. De Grote Siege weer vloed gedomineerd maken moet het doel zijn van de maatregelen.

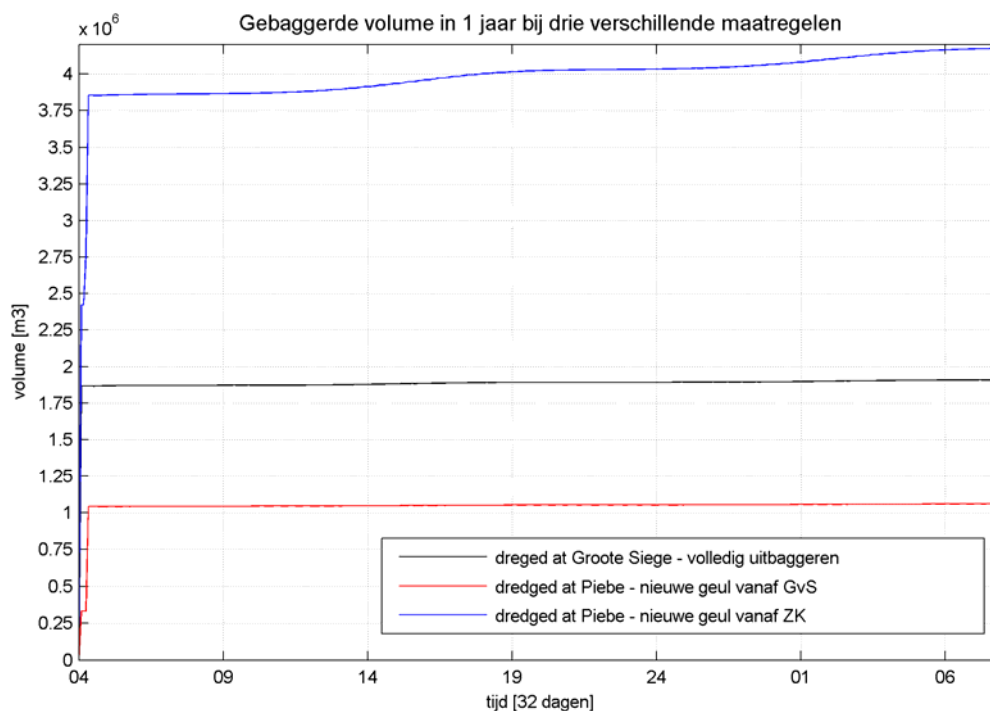
Het verdiepen en verlengen van de Grote Siege en het verplaatsen van de dumplocatie voor het gebaggerde materiaal lijken de beste opties voor het bevaarbaar houden van de vaarroute op korte termijn. Het is alleen de vraag of het gebaggerde volume in de Grote Siege groot genoeg is om na dumping de vraag naar water van het Brakzandstergat te temperen. Het probleem van de drempels in de Grote Siege speelt gezien de dimensies van deze drempels een minder grote rol dan gedacht. De effecten zijn dan ook kleiner dan gehoopt werd, dit geldt ook voor het verhogen van de geulwanden in het Brakzandstergat.

Voor lange termijn zal er permanent baggerwerk blijven in de vaarroute. In scenario III wordt een nieuwe route naar de jachthaven locatie, die ook begaanbaar is voor de veerboot bekeken. De mogelijkheden zijn er, maar ook nu weer speelt de grofheid van het rekenrooster een rol in de betrouwbaarheid van de uitkomsten. Het is de vraag of deze nieuwe geul al dan niet gefixeerd moet worden door middel van (semi)-harde geulwanden om levensvatbaar te blijven. Een nieuwe geul laat zien dat het op diepte blijft maar dit zal enkel mogelijk zijn met onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Bij optie 2a wordt er vanaf de Zoutkamperlaag door de Glinder naar de jachthaven op jaarbasis ongeveer 300.000 m³ weggebaggerd. Voor optie 2b ligt dat volume op ongeveer 25.000 m³. Het huidige onderhoud van de Grote Siege is ongeveer 150.000 m³ (in 2007) en bij maatregel 3,

het volledig opnieuw uitbaggeren van de geul, 50.000 m³ [figuur 58 en appendix B]. Hierbij moet rekening gehouden worden dat bij onderhoud van enkel de Grote Siege alleen de veerboot gebaat is, van een nieuwe geul kunnen dieper stekende plezierjachten Schiermonnikoog ook baat hebben. Verder is de nieuwe geul door het grove rekenrooster niet uitermate gedetailleerd ingetekend.



Figuur 57: Cumulatief debiet Grote Siege - begin in scenario I voor 6 simulaties



Figuur 58: Investerings- en onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor maatregel 3, actie 2a en actie 2b

Het gesignaleerde probleem van de Glinder [10][11] in de huidige vaarroute is niet permanent op te lossen met baggerwerk. Op deze splitsing zal altijd sedimentatie blijven plaatsvinden. Voor alle drie de scenario's is het verstandig om nog gedetailleerder te gaan kijken naar de ontwikkelingen en baggerwerkzaamheden, omdat in deze simulaties enkel het getij mee is genomen, andere factoren buiten beschouwing zijn gelaten en lokaal een fijner rooster gebruikt moet worden.

5. Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk is de afsluiting van het onderzoek. In de eerste paragraaf wordt de betrouwbaarheid van het model getoetst. De antwoorden op de hypothesen worden besproken in paragraaf twee van dit hoofdstuk. Van daaruit worden de conclusies getrokken de derde paragraaf. In de laatste paragraaf worden aanbevelingen gedaan richting de opdrachtgever.

5.1 Validatie

In deze paragraaf worden de hypothesen getoetst aan de uitkomsten van de verschillende scenario's. Daarnaast wordt aan de hand van de lodingen van de vaarroute gekeken hoe geldig het model is.

Voor de validatie is gebruik gemaakt van de eerste twee simulaties van scenario 1. Vanaf 2006 is zowel één jaar als twee jaar vooruit gesimuleerd. Deze uitkomsten van alleen het model met getij als motor van het sedimenttransport zijn naast de lodingen van de vaarroute van 2007 en 2008 gelegd [appendix C, figuren D1 en D2]. Hieruit kan geconcludeerd worden dat, met inachtneming van het feit dat de invloed van wind, golven en secundaire stroming niet is meegenomen, de gesimuleerde toestand van het bekken na één jaar en na twee jaar goed overeenkomt met de door Rijkswaterstaat gepeilde dieptes in 2007 en 2008.

De resultaten van de simulaties langer dan 3 jaar (dus met een morfologische factor groter dan 36) worden minder betrouwbaar. De contourlijnen lopen opvallend vaak gelijk aan de horizontale en verticale lijnen van het rekenrooster. Om te verifiëren of dit een afwijking in het model is of dat deze uitkomsten beïnvloedbaar zijn met veranderingen in de tijdstap, is er gekozen voor een aantal simulaties met de tijdstap 30 seconden in plaats van vijf minuten [appendix C].

Uit deze simulaties is duidelijk geworden dat bij kleinere tijdstappen de neiging van het model om de lijnen van het rekenrooster te volgen minder wordt. In hoeverre de resultaten vergelijkbaar zijn met de lodingen van Rijkswaterstaat kan niet gezegd worden, maar de betrouwbaarheid van het model wordt hiermee beter onderbouwd dan bij grote tijdstappen. Daarnaast is het goed zichtbaar dat de ontwikkelingen die geconstateerd zijn bij het semi-empirisch model, te weten het smaller en dieper worden van enkele hoofdgeulen, in de resultaten van Delft3D terugkomen.

Concluderend kan gezegd worden dat met in acht nemen van allen het gebruiken van de getij stroming in dit Delft3D model de uitkomsten een goede overeenkomst tonen met de daadwerkelijke ontwikkelingen in het Friesche Zeegat, zoals Rijkswaterstaat deze in 2007 en 2008 heeft aangepeild.

5.2 Discussie

In deze paragraaf wordt er een antwoord gegeven op de vraag of de hypothesen uit hoofdstuk 3 goed gesteld zijn. En tot slot een antwoord op de onderzoeksvragen uit het eerste hoofdstuk van dit rapport.

Hypothese I

Door de afsluiting van de Lauwerszee is het evenwicht in het Friesche Zeegat getijdebekken verstoord. Het wantij is als gevolg hiervan in eerste instantie opgeschoven naar het oosten. De recente hypsometrie en de veranderingen in de doorsneden van de geulen tonen aan dat het evenwicht zich aan het herstellen is en als gevolg daarvan verschuift het wantij weer naar het westen terug. Door deze

verschuiving verzandt de vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog sneller dan waar bij de aanleg van de nieuwe steiger vanuit was gegaan.

- a. Het gebruikte model is niet toereikend genoeg om een antwoord te geven op de vraag of het wantij zich verplaatst in de westelijke richting of dat het verder naar het oosten verplaatst. Hiervoor missen teveel data aan de zuidkant van het eiland en aan de oostkant van de vloeddelta.
- b. Uit de hypsometrie curven van 2006 is ten opzichte van 2002 te zien dat V_f en A_f zijn afgenomen door de veranderingen in V_{LW} en A_{LW} . Dit betekent dat het oppervlakte van de platen en de geulen kleiner is geworden. De geulen worden smaller. Het prisma is toegenomen. Het water dat nu door de geulen kan stromen zorgt ervoor dat deze geulen dieper worden.
- c. De veranderingen van het wantij zijn minimaal, echter een aantal geulen laat wel duidelijk verandering zien. Zo is de doorsnede van de Groote Siege afgenomen en is het in plaats van een vloedgedomineerde geul een ebgedomineerde geul geworden. De Oort, het Brakzandstergat en de Zoutkamperlaag worden dieper en groeien richting het oosten qua lengte.

Hieruit kan de volgende conclusie getrokken worden: het evenwicht is zich inderdaad (nog) aan het herstellen, maar of het wantij zich weer in westelijke richting verplaatst is niet duidelijk. Hierbij moet ook meegenomen worden dat het eiland in oostelijke richting groeit, dus de natuurlijke locatie van het wantij op basis van de getijstromen ligt hierdoor automatisch meer oostwaarts. De verzanding van de Groote Siege is wel een direct gevolg van de veranderingen in het bekken. De herverdeling van het prisma door het bekken, de splitsing van het Gat van Schiermonnikoog in het Brakzandstergat en de Groote Siege en de erosie/sedimentatie van andere geulen zijn hiervan de oorzaak. Op den duur zorgt dit ervoor dat het laatste deel, de Groote Siege, van de vaarroute gedurende de dag twee keer onbevaarbaar wordt wanneer de huidige baggerdiepte en gemiddelde laagwaterstand gehandhaafd blijven.

Hypothese II

De effecten van de afsluiting van de Lauwerszee zijn onvoldoende meegenomen bij de ontwikkeling van de "Nieuwe Steiger" en de vaarroute daarnaar toe. Het is mogelijk om een vaarroute met aankomst dichterbij het dorp te creëren, die qua afmetingen voldoet aan de vraag en aanbod van zand en het getij prisma, hierdoor kan het onderhoud aan deze route minimaliseren.

- a. De impact op stroomsnelheden, prisma en diepte in de Groote Siege na afsluiting van de Lauwerszee konden moeilijk voorspeld worden, maar op basis van de historische ontwikkelingen in het bekken en de theoretische kennis over kombergingen en geulen die toen beschikbaar was, is er een beslissing genomen om de Nieuwe Steiger oostelijk van de Oude Steiger (jachthaven) aan te leggen. Dit besluit is naar nu blijkt minder goed uitgekapt als gehoopt was.
- b. De problematiek bij de Glinder wordt veroorzaakt door het splitsen van de hoofdgeul in twee vloedscharen. Ter plekke van de splitsing vormt zich dan een delta [figuur 18b]. Dit zal altijd voor problemen blijven zorgen.
- c. Een gekanaliseerde Piebe vanaf de Zoutkamperlaag is levensvatbaar mits de Groote Siege en het Brakzandstergat in hun vraag naar water worden geremd. Een gedetailleerder onderzoek moet uitwijzen of het daadwerkelijke onderhoud in gebaggerd volume meer of minder is dan de 150.000 m^3 die nu jaarlijks uit de Groote Siege gebaggerd wordt.

Tijdens de besluitvorming rondom de nieuwe veerdam eind jaren vijftig had men beter ook de mogelijkheid van het verlengen van de jachthaven naar dieper water mee kunnen overwegen. Nu blijkt dat de gekozen oplossing, het verplaatsen naar het oosten, andere problemen met zich meebrengt. Het verplaatsen van een veerdam naar het einde van een geul brengt het risico met zich mee dat op den duur verzanding of zelfs dichtslibben van de geul de haven onbereikbaar maakt. Dat proces is nu gaande.

Mede door het jarenlang nalaten onderhoud te plegen aan de Piebe, is het onmogelijk om deze geul naar de jachthaven op natuurlijke wijze weer op diepte te krijgen zodat onder andere de veerboot er weer doorheen kan varen. Met daarbij genomen het verzanden van de Groote Siege, is het niet ondenkbaar dat over een aantal jaren beide geulen onbevaarbaar zijn voor de grote schepen zoals de veerboot. Het eiland wordt daarmee gedurende een aantal uren per dag onbereikbaar.

Een nieuwe Piebe, kunstmatig aangelegd, toont in de simulaties met alleen het getij aan vijf jaar levensvatbaar te zijn, waarbij aangenomen moet worden dat onderhoudsbaggerwerkzaamheden wel degelijk uitgevoerd moeten blijven worden. De problematiek van de Groote Siege wordt hiermee ook opgelost. Schiermonnikoog krijgt een aankomstplek voor de veerboot en de pleziervaart aan het einde van de nieuwe geul.

Het Waddengebied is een dynamische omgeving die na elke storm er weer anders bij kan liggen [11]. Die veranderingen zijn niet meegenomen in de simulaties. Toch kan met zekerheid gesteld worden dat het een utopie is dat er een oplossing is waarbij geen baggerwerkzaamheden nodig zijn. Wel moet het streven zijn om deze werkzaamheden zo minimaal mogelijk te houden. Tijdens het onderzoek werd opgemerkt "waarom het Wad ons moet volgen en waarom wij niet het Wad volgen" [11]. Dit is een wens die gebruikers van een gebied zoals de Wadden nastreven, echter op basis van de uitkomsten van het eerste scenario wordt het bereiken van Schiermonnikoog dan alleen mogelijk met hoogwater of wanneer de huidige veerdam doorgetrokken wordt tot aan het Brakzandstergat.

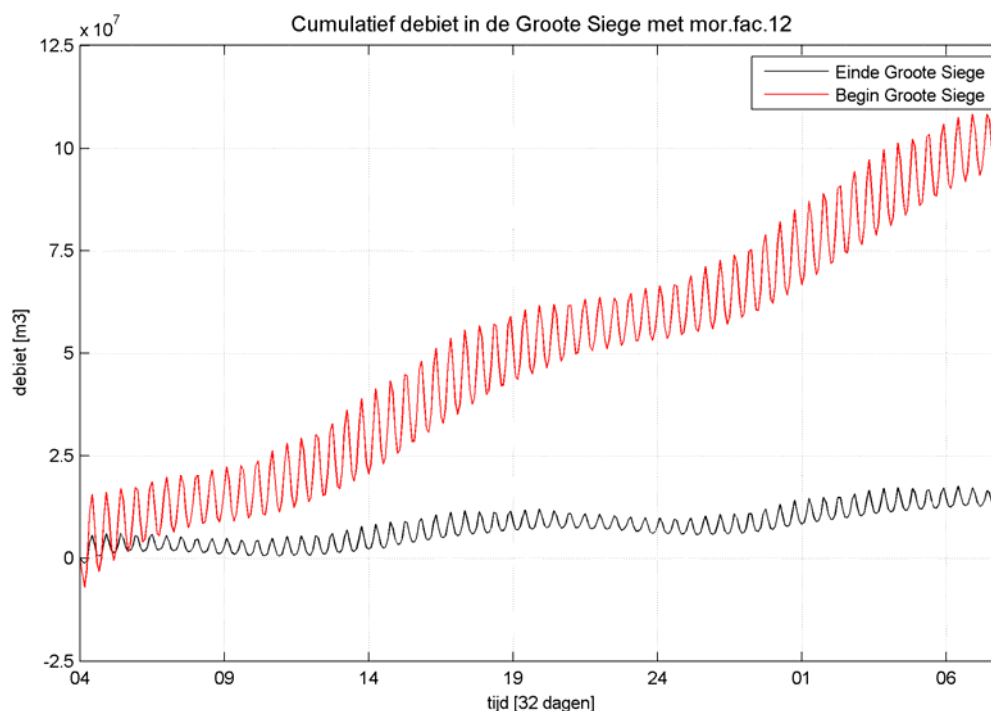
Hypothese III

Het (kunstmatig) stabiliseren van de natte doorsneden en bochten van de Groote Siege en het sturen van het prisma in het bekken zullen leiden tot een groter volume water dat door de Groote Siege stroomt en minder sedimentatie in dat deel van de vaarroute tussen Schiermonnikoog en Lauwersoog.

- a. Het sturen van het prisma heeft een positief effect op de diepte van de vaarroute. Hierbij moet opgemerkt worden dat van de gehele vaarroute Lauwersoog - Schiermonnikoog alleen de Groote Siege problemen geeft met de diepte door toedoen van sedimentatie en een tekort aan water/te klein prisma.
- b. De lengte van de Groote Siege draagt ook bij tot verzanding van het laatste stuk van de vaarroute. Bij aanleg van de Nieuwe Steiger liep de Groote Siege nog enkele kilometers naar het oosten door. Dat is verdwenen. Op dit moment is het einde van de Groote Siege meteen de zwaairom voor de veerboot. Uit de historische analyse blijkt dat de Groote Siege een bypass is geweest van het Brakzandstergat. Nu het Gat van Schiermonnikoog dieper wordt schuift de natuurlijke splitsing van de Groote Siege en het Brakzandstergat op. Hierdoor sterft de Groote Siege af.
- c. De verandering in baggerbeleid in de vaarroute in 2003 heeft er toe bijgedragen dat de doorsnede van de geul is verkleind en daarmee het volume en de vraag naar water. Minder water houdt in een lagere horizontale stroomsnelheid. Wanneer deze snelheid lager wordt dan de

bezinkingssnelheid in verticale richting van het zand zal het zand bezinken. Dit gecombineerd met het onder b. genoemde verschijnsel versterkt de verzanding.

Er zijn diverse maatregelen mogelijk om de huidige vaarroute begaanbaar te houden zoals in paragraaf 4.2 naar voren is gekomen. Zij hebben allemaal als hoofddoel het volume water in de Grootte Siege te vergroten en daarmee de stroomsnelheden te verhogen waardoor het zand minder kans krijgt om te bezinken in de geul. Daarnaast moet de vraag naar water in de andere geul, het Brakzandstergat, worden verkleind. Het herstellen van het baggerbeleid van voor 2003 geeft de meeste kans van slagen, wanneer het Brakzandstergat als dumplocatie wordt aangewezen. De drempels, die door de leidingpaden in de Grootte Siege gevormd worden, worden daarmee ook volledige verwijderd. Daarnaast moet ook de lengte van de Grootte Siege groter worden. Hiermee wordt voorkomen dat bij de Nieuwe Steiger in de zwaairom van de veerboot sedimentatie blijft voorkomen. Heeft de Grootte Siege voldoende lengte, dan blijven de stroomsnelheden rondom de steiger hoog genoeg om het bezinken van zand tegen te gaan. Het doel is door deze ingrepen de Grootte Siege weer een vloedgedomineerde geul te laten worden [figuur 59].



Figuur 59: De Grootte Siege weer als vloed geul na het volledig op diepte baggeren (maatregel 3)

5.3 Conclusies

In de voorgaande paragraaf zijn de hypothesen uit hoofdstuk drie kort herhaald en gekoppeld aan de uitkomsten van de simulaties. Tot slot de conclusies als antwoorden op de onderzoeksvragen uit hoofdstuk één. De antwoorden op deze hoofdvraag en twee deelvragen luiden als volgt:

Is het mogelijk om met data uit eerdere onderzoeken en een computermodel een voorspelling te doen naar de ontwikkelingen in de geulen die de vaarroute van Lauwersoog naar Schiermonnikoog vormen voor de komende vijftig jaar?

Het is mogelijk om een voorspelling te doen voor de ontwikkelingen in het bekken gebaseerd op enkel de getij stroming. Echter het model is niet toereikend om een langere periode dan 10 jaar te bestrijken. De resultaten van 10 jaar zijn al discutabel en moeilijk te controleren zoals in paragraaf 5.1 wordt vermeld. Daarnaast worden essentiële factoren als wind en golven buiten beschouwing gelaten.

Ondanks de beperkingen van het model wordt duidelijk dat verzanding van de Grootte Siege niet zal afnemen en eerder zal toenemen. Deze ontwikkeling kan als zorgelijk beschouwd worden.

Wat zijn de gevolgen van deze ontwikkelingen voor de bevaarbaarheid van de geulen?

Op basis van de resultaten uit het gebruikte model met enkel getij zijn de gevolgen voor de bevaarbaarheid negatief voor de Grootte Siege. Deze geul verzandt en is op den duur enkel met hoogwater nog tot aan de Nieuwe Steiger te bevaren voor de huidige veerboot. Uiteraard zal de bevaarbaarheid door de verantwoordelijke instanties altijd gegarandeerd worden, maar het is duidelijk dat met enkel onderhoudsbaggerwerkzaamheden het probleem niet aangepakt wordt. De oorzaak ligt een level hoger in het systeem. Er moet een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen ingrepen en resultaten op korte termijn en wat er op langere termijn gedaan moet worden en mogelijk is om de bevaarbaarheid te kunnen garanderen.

Is het mogelijk de geulen onder Schiermonnikoog in het model zodanig te beïnvloeden met als resultaat een (kunstmatige) vaarroute naar een nieuwe locatie voor de veerhaven dichtbij het dorp?

Een nieuwe vaarroute ontwikkelen is mogelijk. De Piebe kan gereconstrueerd tot volwaardige vaargeul met al dan niet "harde" geulwanden voor zowel pleziervaart als de huidige veerboot. Toch zal verder onderzoek en een uitgebreider model vooraf moeten gaan aan een daadwerkelijke beslissing. Zoals ook al in de conclusies van hoofdstuk drie en vier vermeld wordt, is een splitsing van geulen in dit gebied blijkbaar onnatuurlijk en zal het altijd nodig blijven om de vaarroute op diepte te houden.

5.4 Aanbevelingen

Tot slot enkele aanbevelingen naar aanleiding van dit onderzoek. De gemeente Schiermonnikoog kan mede op basis hiervan haar verdere traject bepalen om de problemen met de vaarroute op te lossen.

In de eerste plaats is het verstandig om een begin te maken met het uitvoeren van een aantal maatregelen die de Grootte Siege de komende jaren bevaarbaar houdt. Dit zal vooral gedaan moeten worden door middel van kleine ingrepen. Een nieuwe dumplocatie is één optie. Het proberen in te dammen van de watervraag voor het Brakzandstergat is een ander optie. Het effect van deze ingrepen moet wel meetbaar zijn bij de jaarlijkse peilingen van Rijkswaterstaat.

Besluitvorming en procedures omtrent een nieuwe geul en nieuwe haven nemen enkele zo niet tientallen jaren in beslag. Blijft men tot die tijd op de huidige manier doorgaan met het beheren van de Grootte Siege, dan zal de bevaarbaarheid achteruit gaan en de problemen voor een gegarandeerde dienstregeling groeien. Bagger de Grootte Siege eenmalig weer uit tot de streefafmetingen om de bevaarbaarheid en dienstregeling in stand te houden.

Ten tweede moet er gekeken worden of de huidige dumplocaties van het gebaggerde materiaal uit de Grootte Siege niet meer schade aanrichten dan de bedoeling is. Het vermoeden bestaat dat het dumpen van baggerspecie in het westelijke gedeelte van de vloedscharen ervoor zorgt, dat dit materiaal met dezelfde snelheid weer op de oude plek terugkomt. Natuurlijk spelen milieuwet- en -regelgeving hierbij een rol, maar uit het oogpunt van stromingen en transporten gezien is het stroomopwaarts dumpen van baggermateriaal geen verstandige keuze.

Ten derde is de impact van wind, secundaire stroming, golven op het bekken niet meegenomen. Het kan goed dat wanneer deze elementen wel in het model worden geïmplementeerd de uitkomsten een andere richting opgaan dan nu. Onderzoek naar de impact van de genoemde elementen op het bekken wordt dan ook aangeraden. Daarnaast is er enkel gewerkt met 2D simulaties met een diepte gemiddelde snelheid. De derde dimensie, de processen op verschillende dieptes in een geul, kan in Delft3D ook meegenomen worden voor een beter beeld van de processen in het bekken. Tot slot is het ook van belang om de maatregelen of de nieuwe te baggeren geul in een fijner rekenrooster te bekijken. Er is nu gebruik gemaakt van een grof rooster, met een fijner rooster zullen lokaal de effecten van de baggerwerkzaamheden beter aangetoond kunnen worden. Daarmee kan er meer waarde gehecht worden aan de resultaten.

Tot slot is dit onderzoek uitgevoerd zonder te kijken naar milieuwetgeving, kosten, baten en financiering. De gemeente Schiermonnikoog doet er verstandig aan voordat een daadwerkelijk besluit genomen wordt gespecialiseerde bureaus te benaderen om deze aspecten ook in beeld te brengen.

6. Referenties

6.1 Literatuur en rapporten

- d'Angremond K., E.T.J.M. Pluim-Van der Velden (2001) *Introduction Coastal Engineering, lecture notes CT4300. Delft: Technische Universiteit Delft, september 2001*
- Buro Vijn B.V. (2005), *Structuurplan Schiermonnikoog. Oenkerk: Buro Vijn B.V., 2005*
- Elling, R., B. Andeweg, J. de Jong en C. Swankhuizen (2005) *Rapportagetechiek, 3^{de} druk, Groningen: Wolters Noordhoff*
- FitzGerald, Duncan M. (1987), *Backbarrier dynamics of the east Friesian Islands, blz 747 - 749. Boston: Boston University, department of Geology, januari 1987*
- Hayes, M.O. (1980), *General Morphology and Sediment Patterns in Tidal Inlets. Elsevier scientific publishing company.*
- Gemeente Schiermonnikoog (2006) *Raadsprogramma Schiermonnikoog 2006-2010. Schiermonnikoog: Gemeenteraad Schiermonnikoog, 2006*
- Goor, M.A. van, T.J. Zitman, Z.B. Wang, M.J.F. Stive (2003) *Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. Marine Geology 202 blz. 211-277*
- IMSA (2004), *Cascademodel en Fryske Akademy Beraad, instrument om de duurzame ontwikkeling van estuaria te evalueren. Amsterdam: december 2004*
- IMSA (2006), *Harlingen, echt WAD anders, verkenning naar duurzame havenontwikkeling. Amsterdam: juni 2006*
- Knaack, H., R. Kaiser, H.D. Niemeyer (1993), *Dominant processes and synthesis - Norderney case, blz 21-23. Nourtec, 1993*
- Knaack, W. (2007) *Nieuwe Veerhaven Schiermonnikoog, de aankomst terug bij het dorp, Delft: Technische Universiteit Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, bachelor eindwerk, december 2007*
- Oost, A.P., H. de Haas (1992) *Het Friesche Zeegat, morfologische - sedimentologische veranderingen in de periode 1970 -1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht. Utrecht: Universiteit Utrecht, 1992*
- Oost, A.P., H. de Haas (1993) *Het Friesche Zeegat, morfologische - sedimentologische veranderingen in de periode 1927 - 1970, cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem. Utrecht: Universiteit Utrecht, november 1993*
- Oost, A.P. (1995) *Dynamics and sedimentary developments of the Dutch Wadden Sea with a special emphasis on the Frisian Inlet: a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. Utrecht: Universiteit Utrecht, faculteit Aardwetenschappen, maart 1995*

Stive, M.J.F., H.J. de Vriend, J. Dronkers, A. Van Dongen, Z.B. Wang (2006) *Coastal Inlets and Tidal Basins, lecture notes CT5303. Delft: Technische Universiteit Delft, augustus 2006*

Veen, Johan van (1950) *Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren. Tijdschrift voor Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap 67 blz. 303-325*

Wang, Z.B. (1991) *A morpho-dynamic Model for a Tidal Inlet; Het Friesche Zeegat. Delft: Delft Hydraulics, april 1991*

Wang, Z.B. (1991) *Morphodynamic Modelling for a Tidal Inlet in the Wadden Sea; Het Friesche Zeegat, progress report. Delft: Delft Hydraulics, december 1991*

Wang, Z.B. (2007) *Morfologische Ontwikkelingen van het Rif en de Engelsmanplaat. Delft: Delft Hydraulics, december 2007*

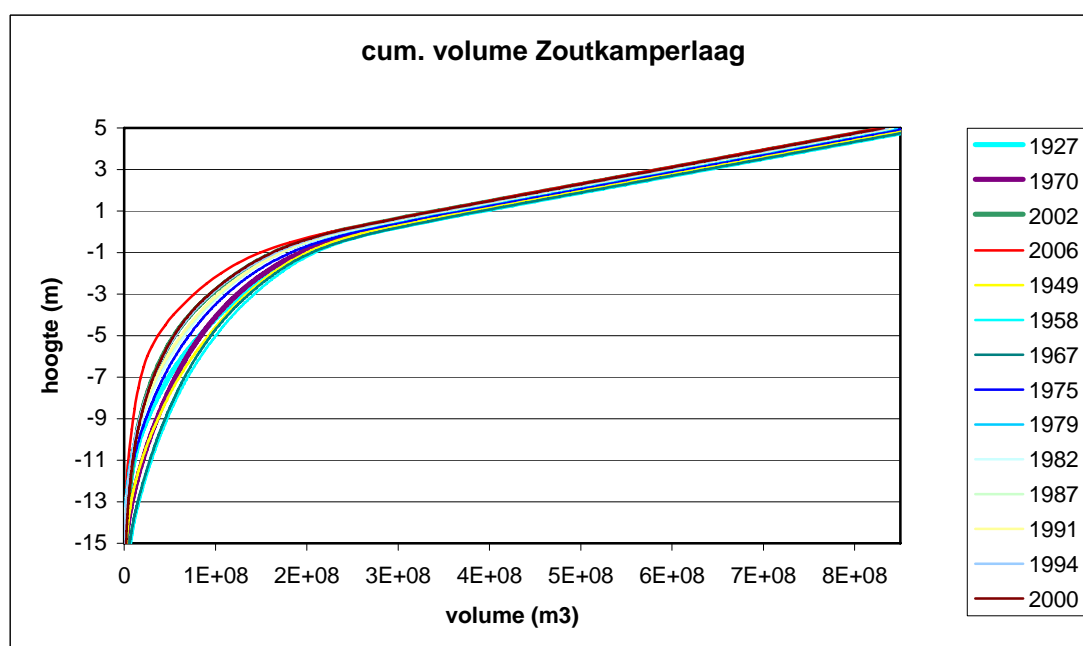
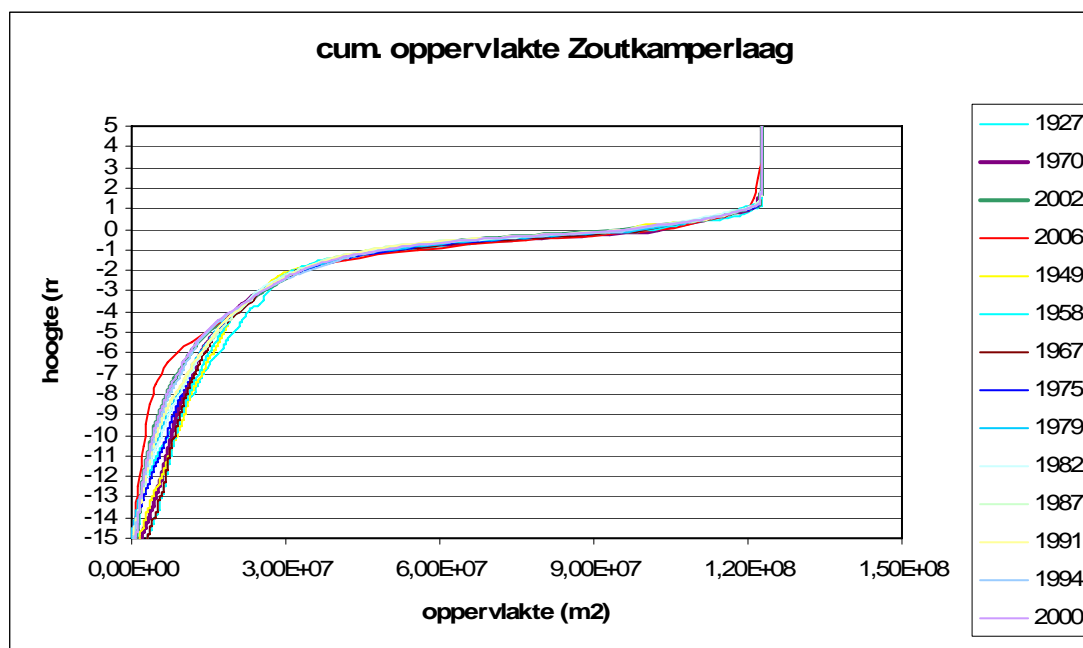
Waes, M.J.F van, M.A. Muntinga (2001) *Schiermonnikoog 2015; Authentiek eiland. Amsterdam: Onderzoeksbureau Van der Bunt, 2001*

6.2 Websites en digitale correspondentie

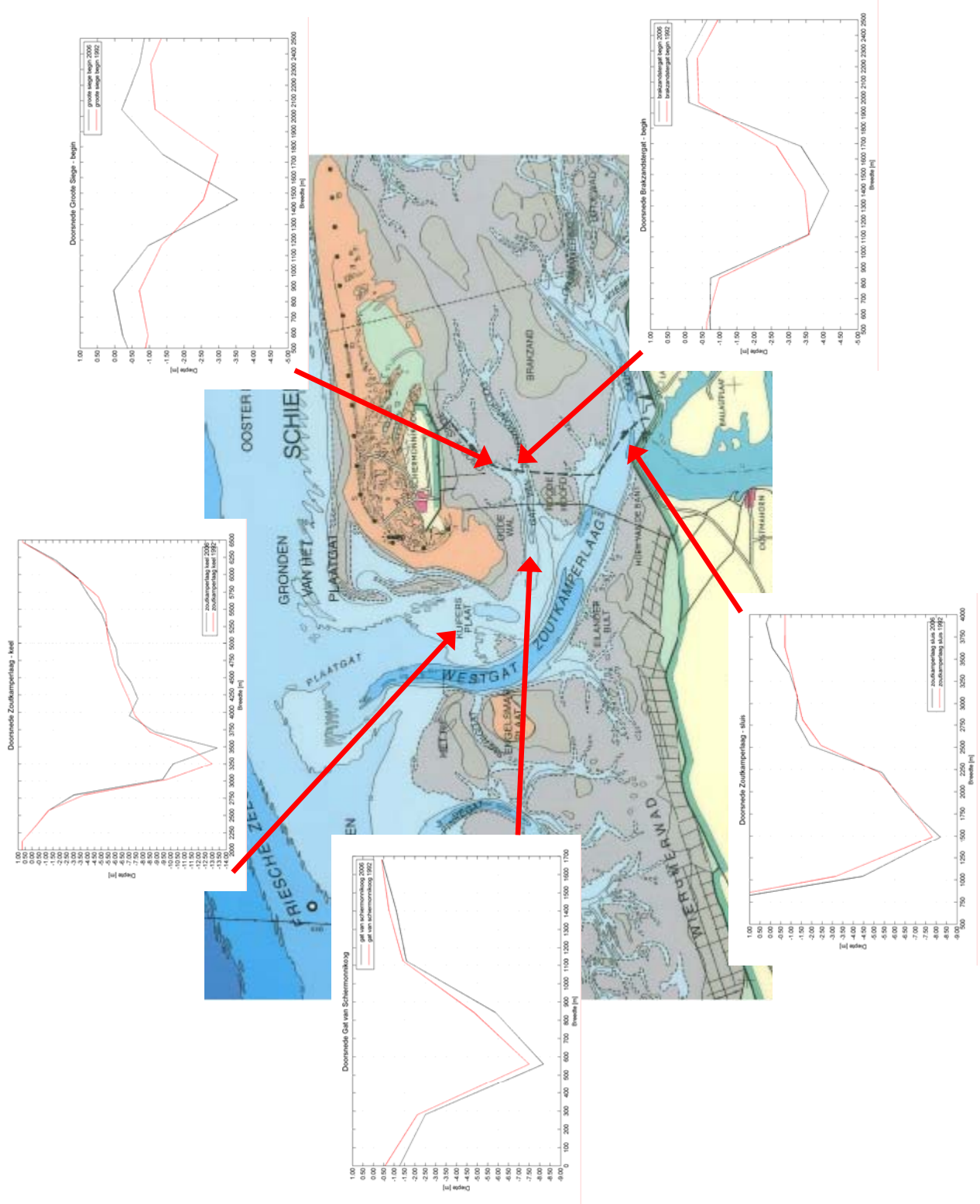
- [1] <http://www.eilaun.nl>, website van stichting "It Eilaun"
- [2] <http://www.dorpsbode.nl>, website van De Dorpsbode, tweemaandelijks informatiebulletin van de Vereniging Dorpsbelangen
- [3] https://www.marum.de/en/Effects_of_the_tidal_flow_dynamics_on_the_bedform_variability_and_sediment_flux_in_the_tidal_inlets.html
- [4] <http://www.natuurinformatie.nl/ecomare.devleet/natuurdatabase.nl/i001094.html>, informatie over de verdwenen dorpen Westerburen en Dampen op Schiermonnikoog
- [5] http://www.lauwersmeer.org/detail_page.phtml?act_id=140, informatie over de afsluiting van de Lauwerszee
- [6] <http://www.natuurinformatie.nl/ecomare.devleet/natuurdatabase.nl/i001147.html>, informatie over de afsluiting van de Lauwerszee
- [7] http://www.zeeinzicht.nl/vleet/index.php?item=zee&pageid=veerdiensten-schier.htm&use_template=vleet_template.html, geschiedenis veerdienst naar Schiermonnikoog
- [8] <http://www.schierweb.nl/240a.htm>, geschiedenis jachthaven/oude steiger Schiermonnikoog
- [9] e-mail correspondentie met de heer J. Swierstra van Rijkswaterstaat, dienstkring Waddenzee
- [10] e-mail correspondentie met de heer J. Hoekstra van Wagenborg Passagiersdiensten
- [11] interviews met de ochtend- (boot 6:30 vanaf Lauwersoog) en avondploeg (boot 18:30 vanaf Schiermonnikoog) van Wagenborg Passagiersdiensten op de veerdienst Lauwersoog - Schiermonnikoog v.v. op woensdag 14 januari 2009
- [12] <http://www.waternormalen.nl>, website van Rijkswaterstaat met alle waternormalen langs de Nederlandse kust. Meetstation Schiermonnikoog, slotgemiddelden datum 1991

A. Figuren bij hoofdstuk 3

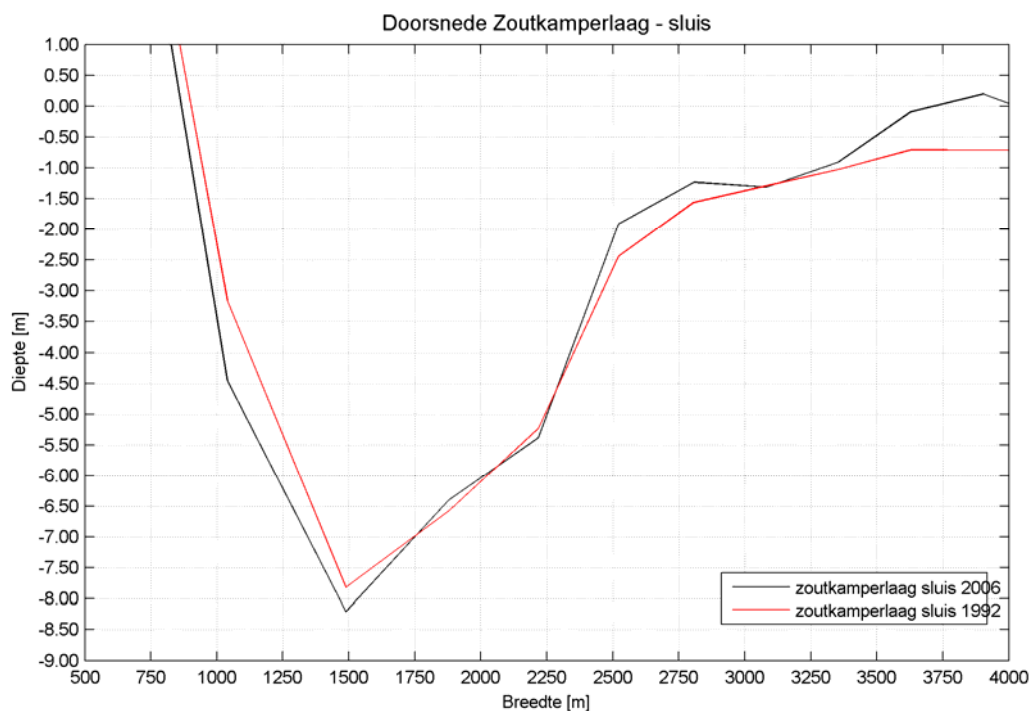
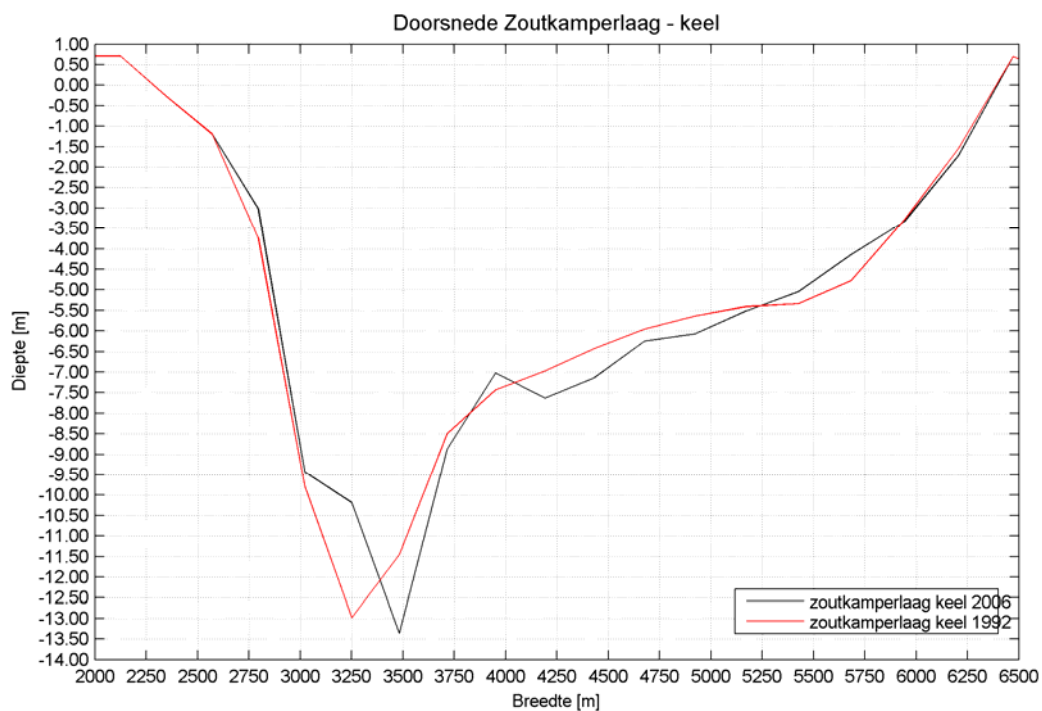
1. Hypsometrie curven Zoutkamperlaag met alle beschikbare data.

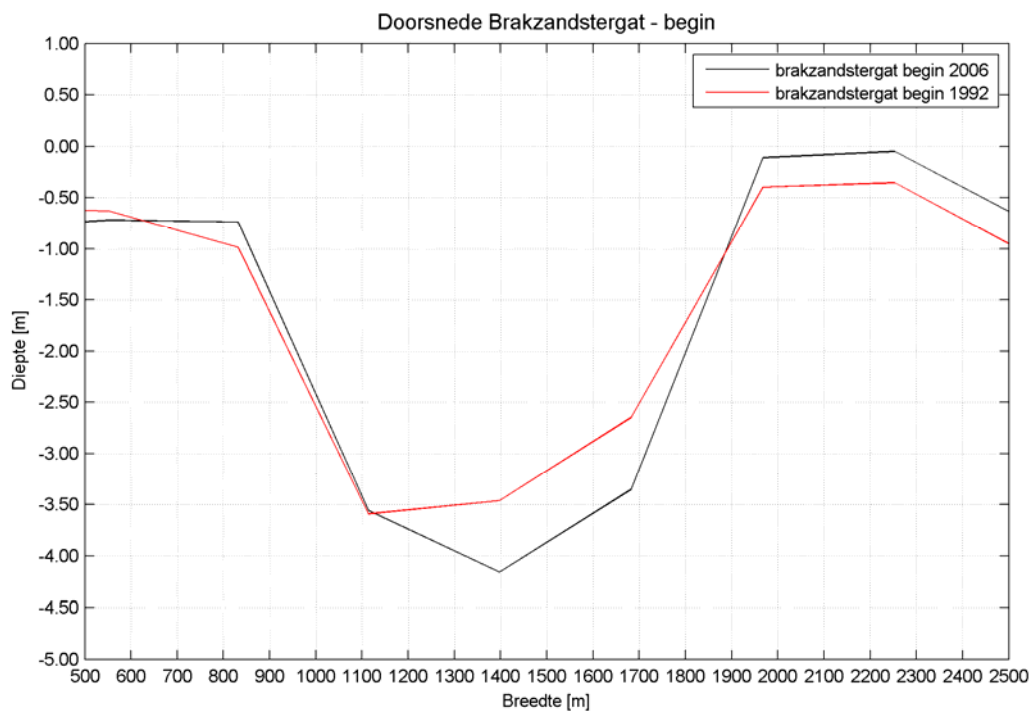
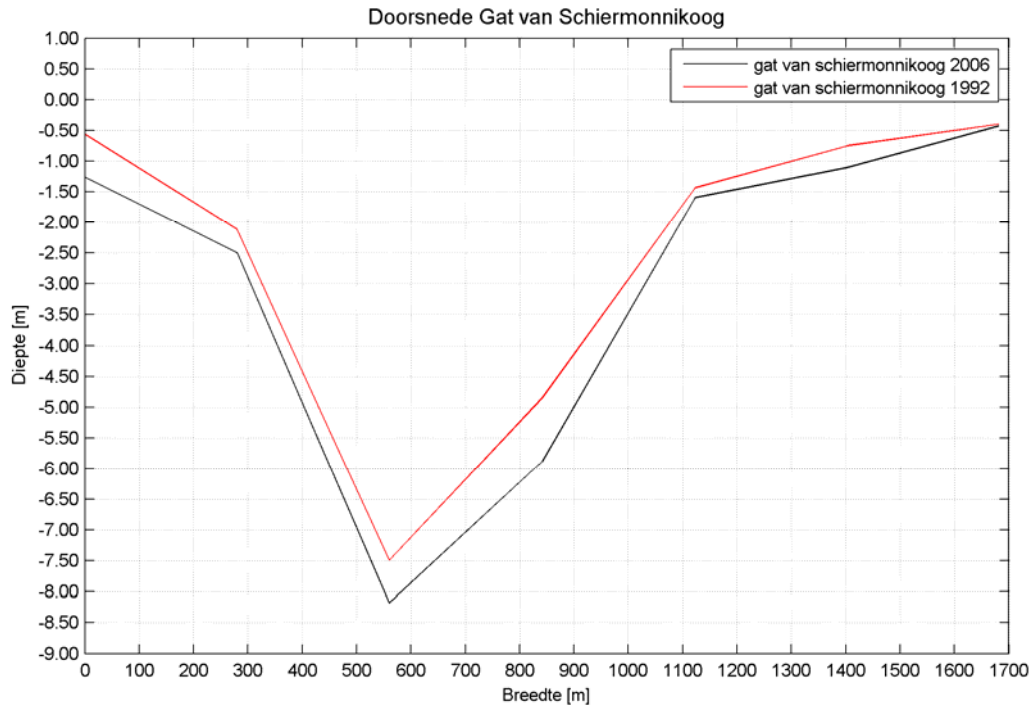


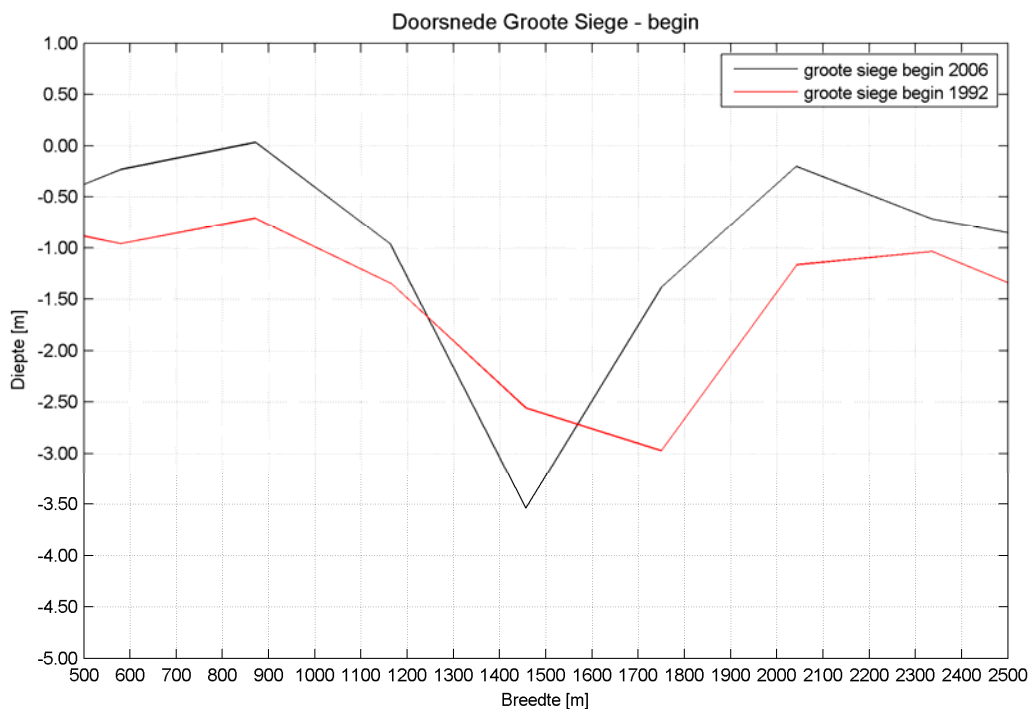
2. Zoutkamperlaag vloeddelta en de locaties van de doorsneden



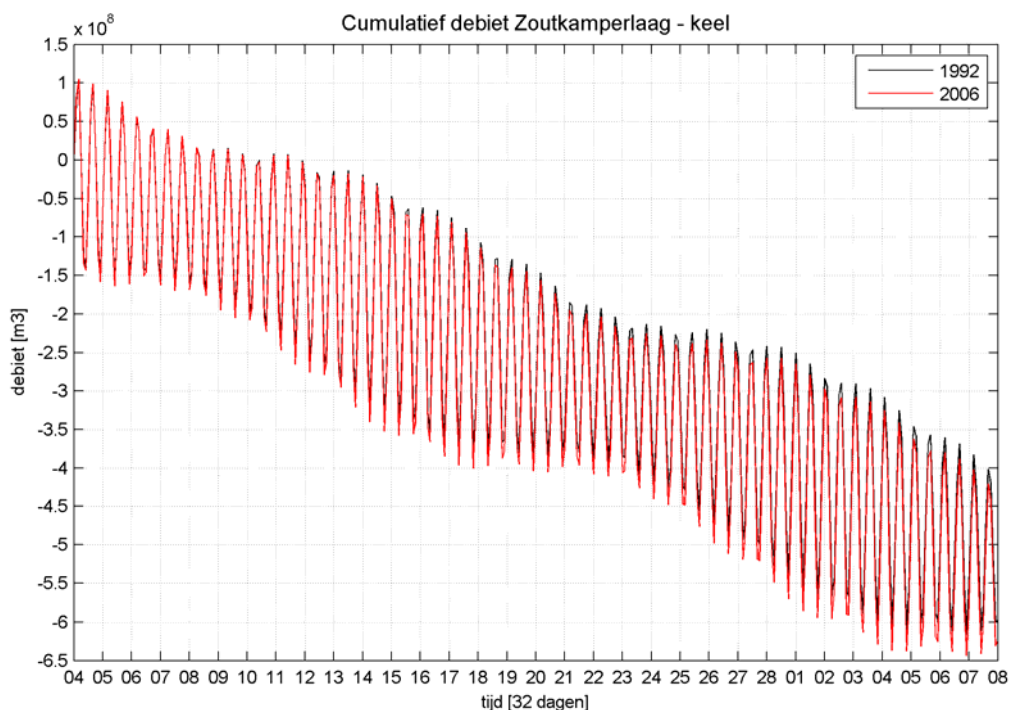
3. Doorsneden en bodemprofiel van de belangrijkste geulen

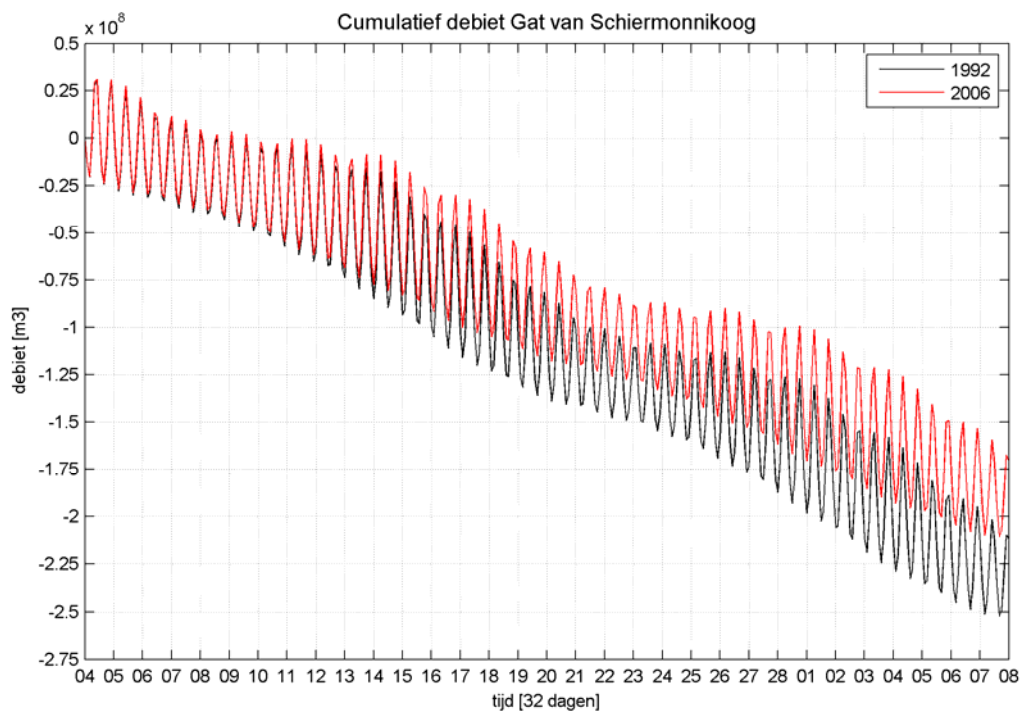
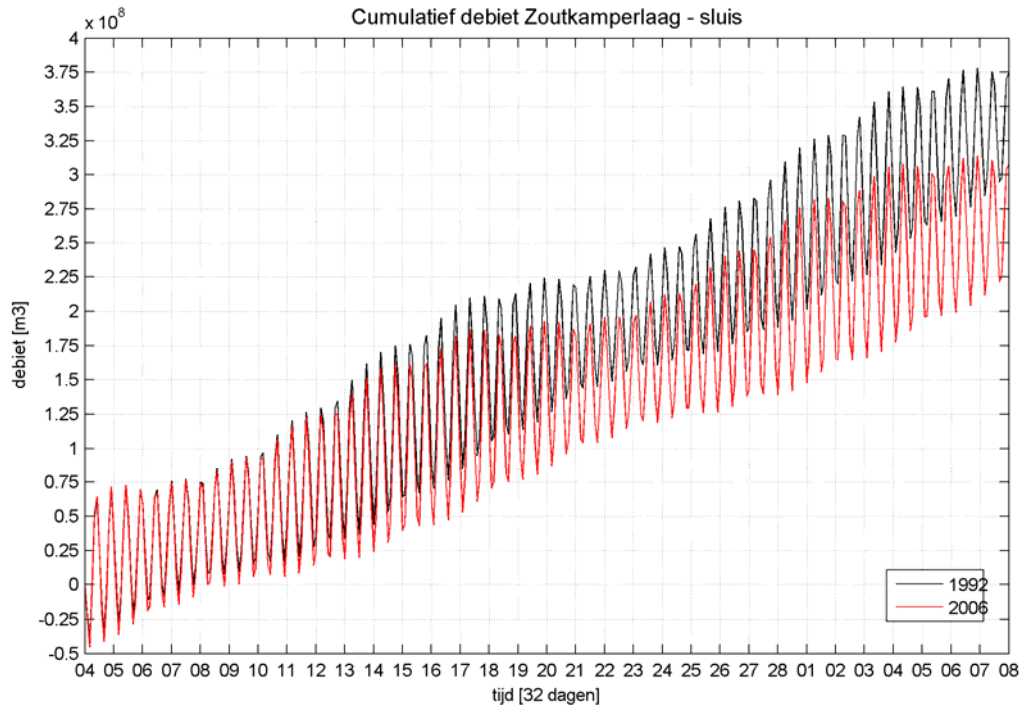


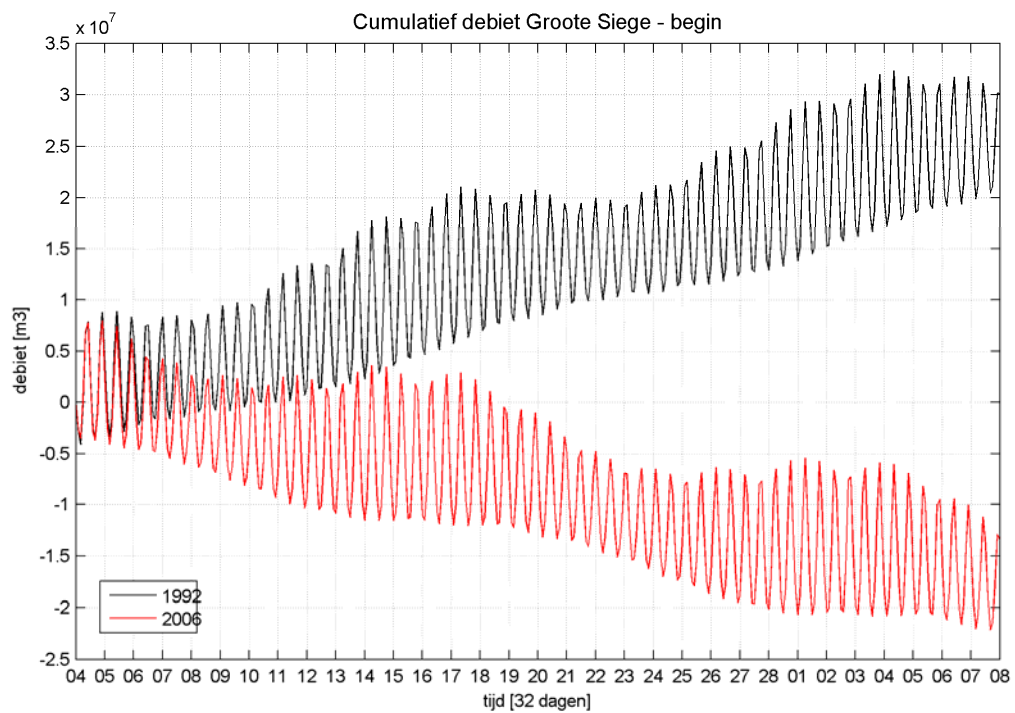
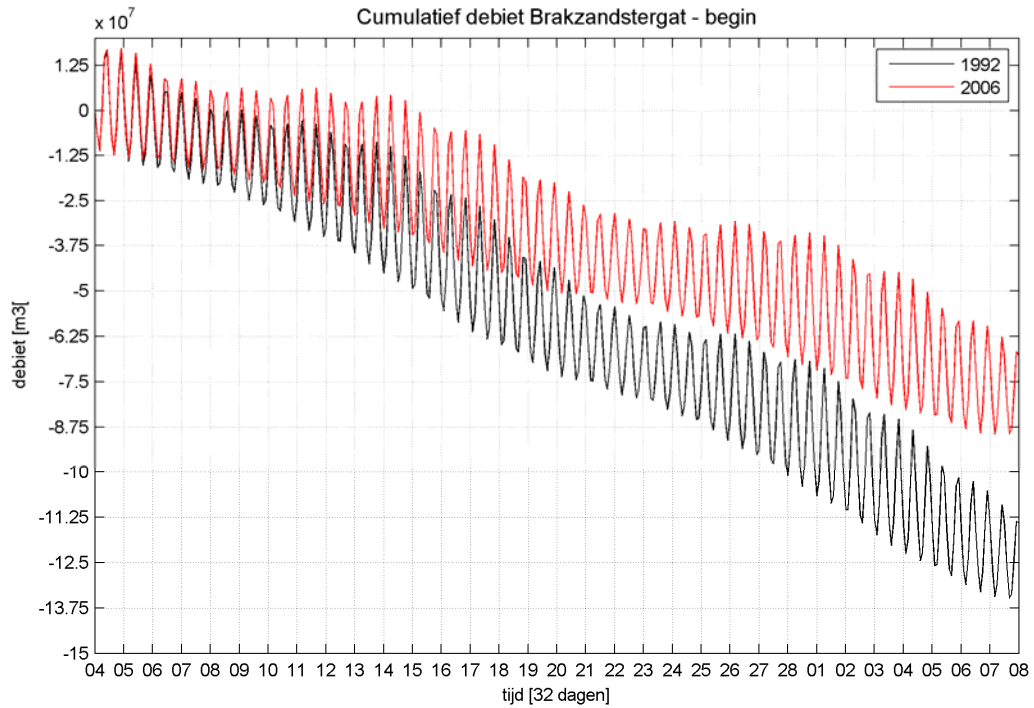




4. Cumulatieve debiet door de vijf doorsneden in 1992 en 2006.







5. Sedimentatie en erosie in de vaargeul 2004 - 2008

A1 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 1992 en 2006

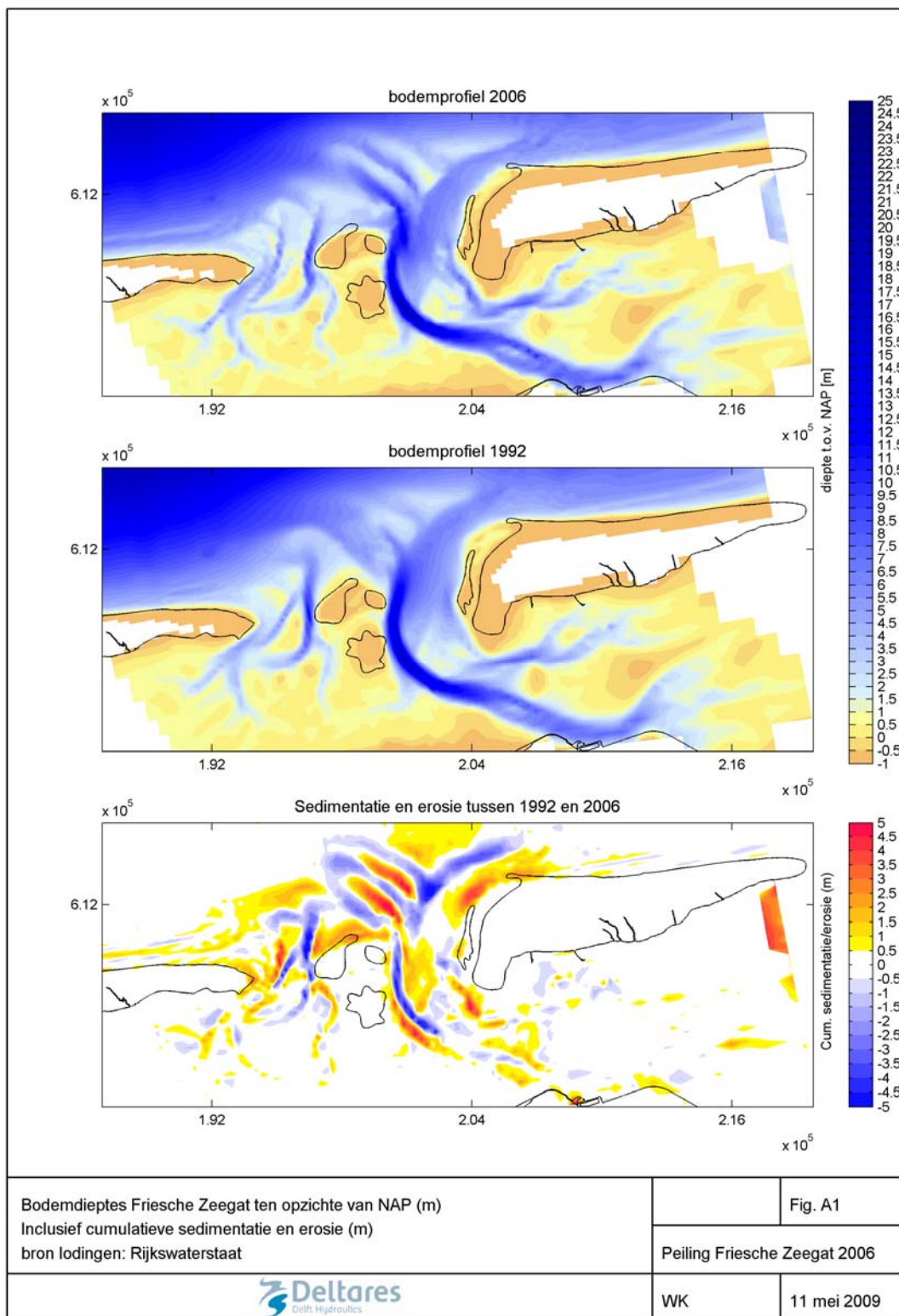
A2 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 2004 en 2006

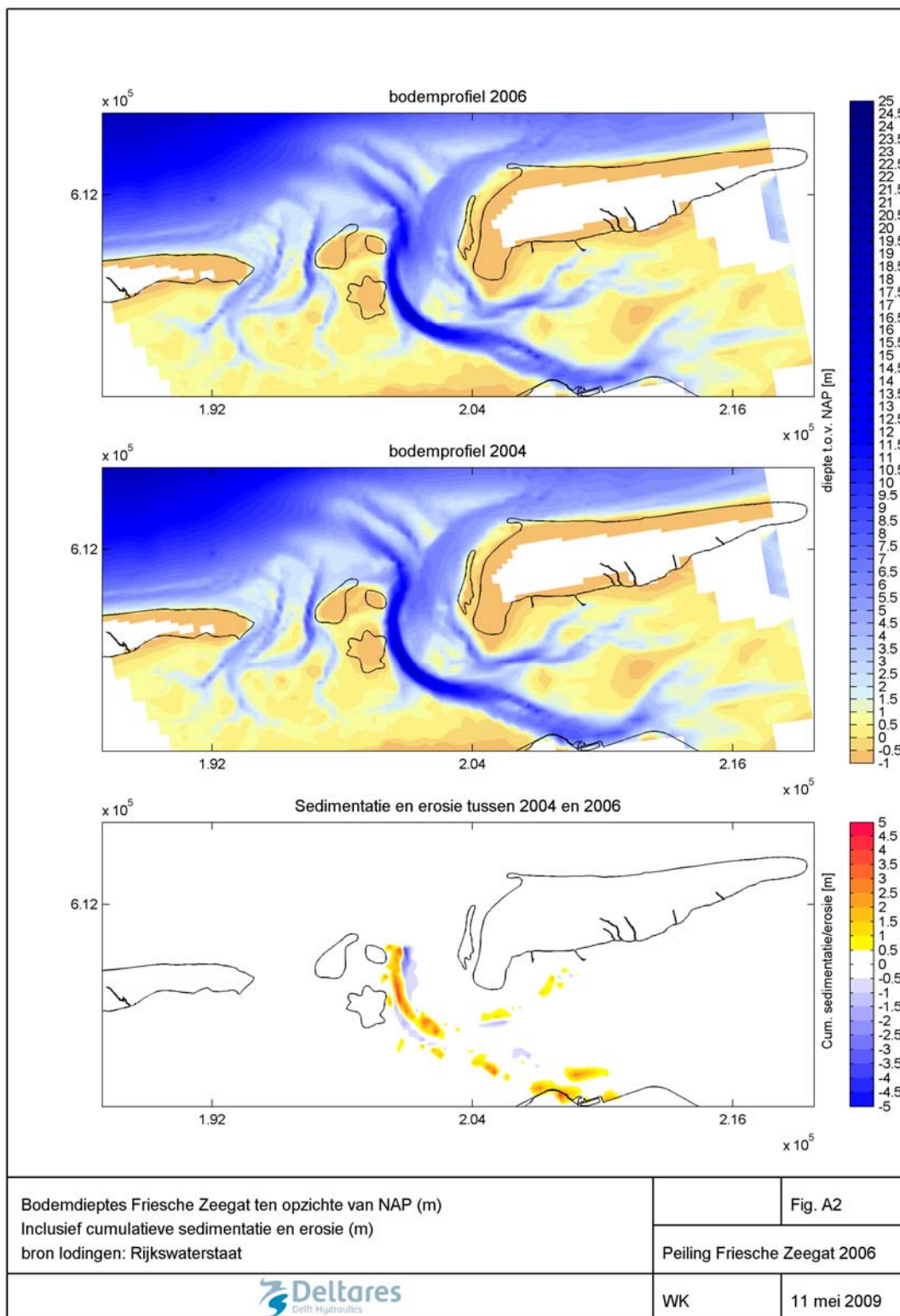
A3 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 2005 en 2006

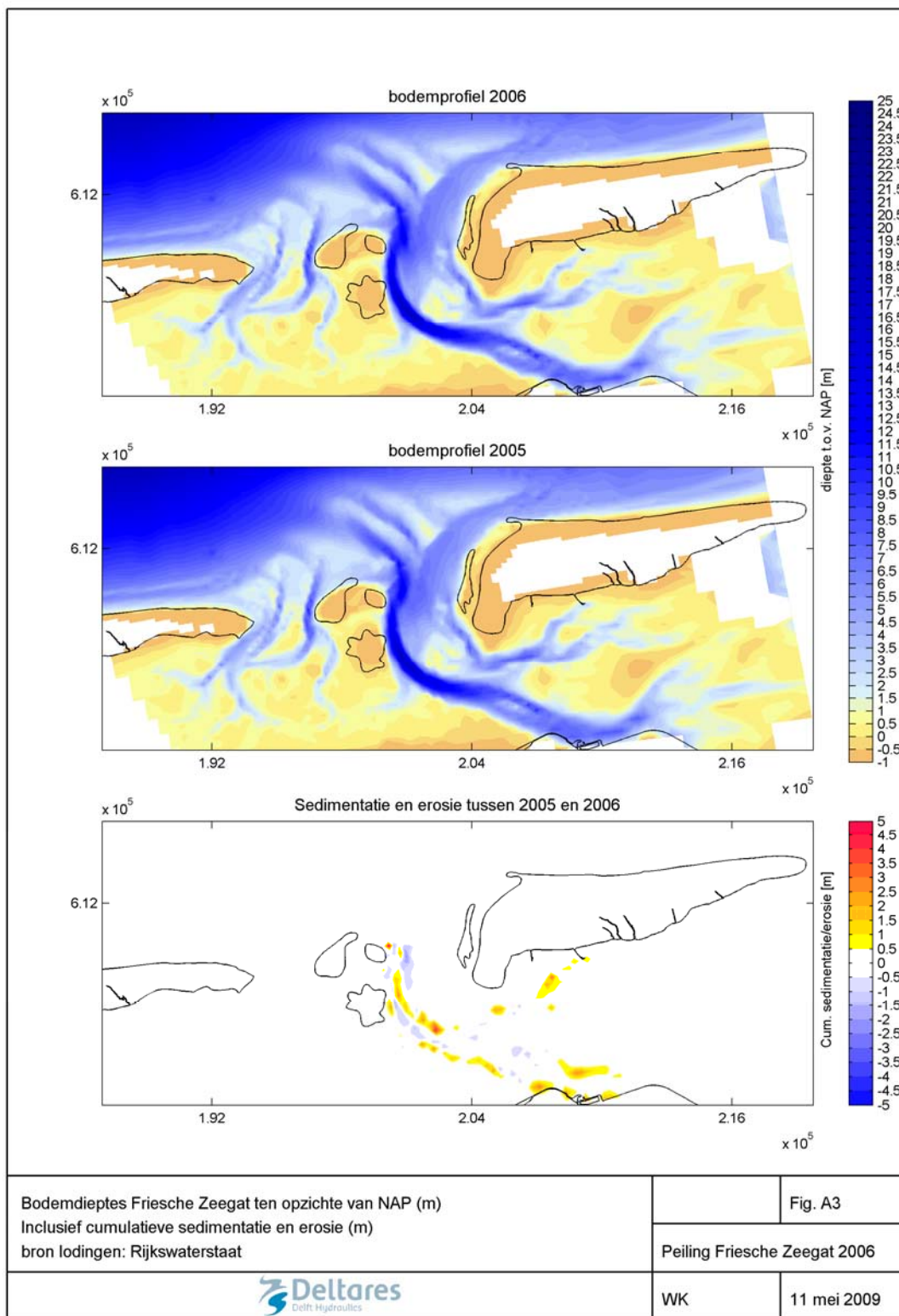
A4 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 2006

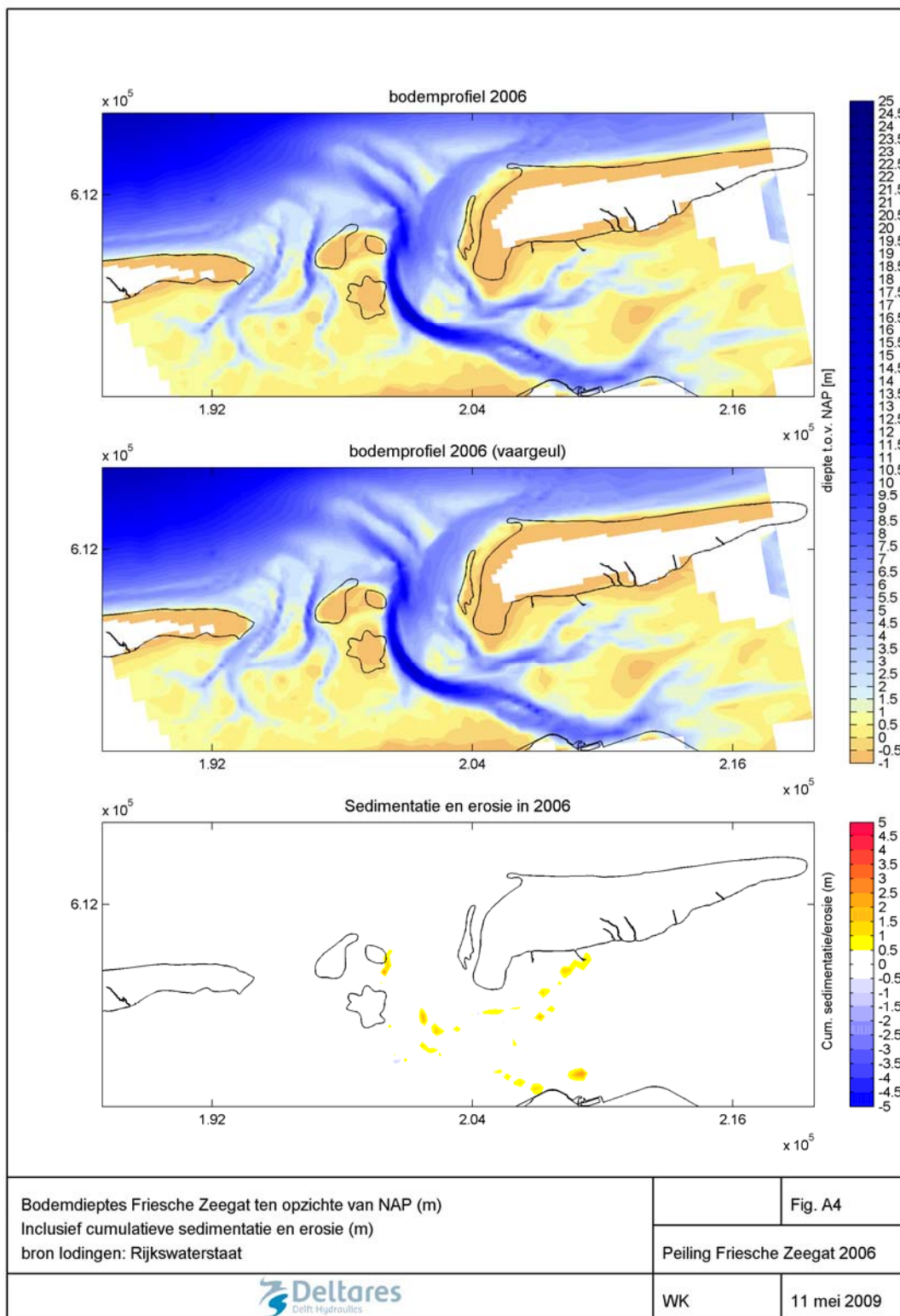
A5 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 2006 en 2007

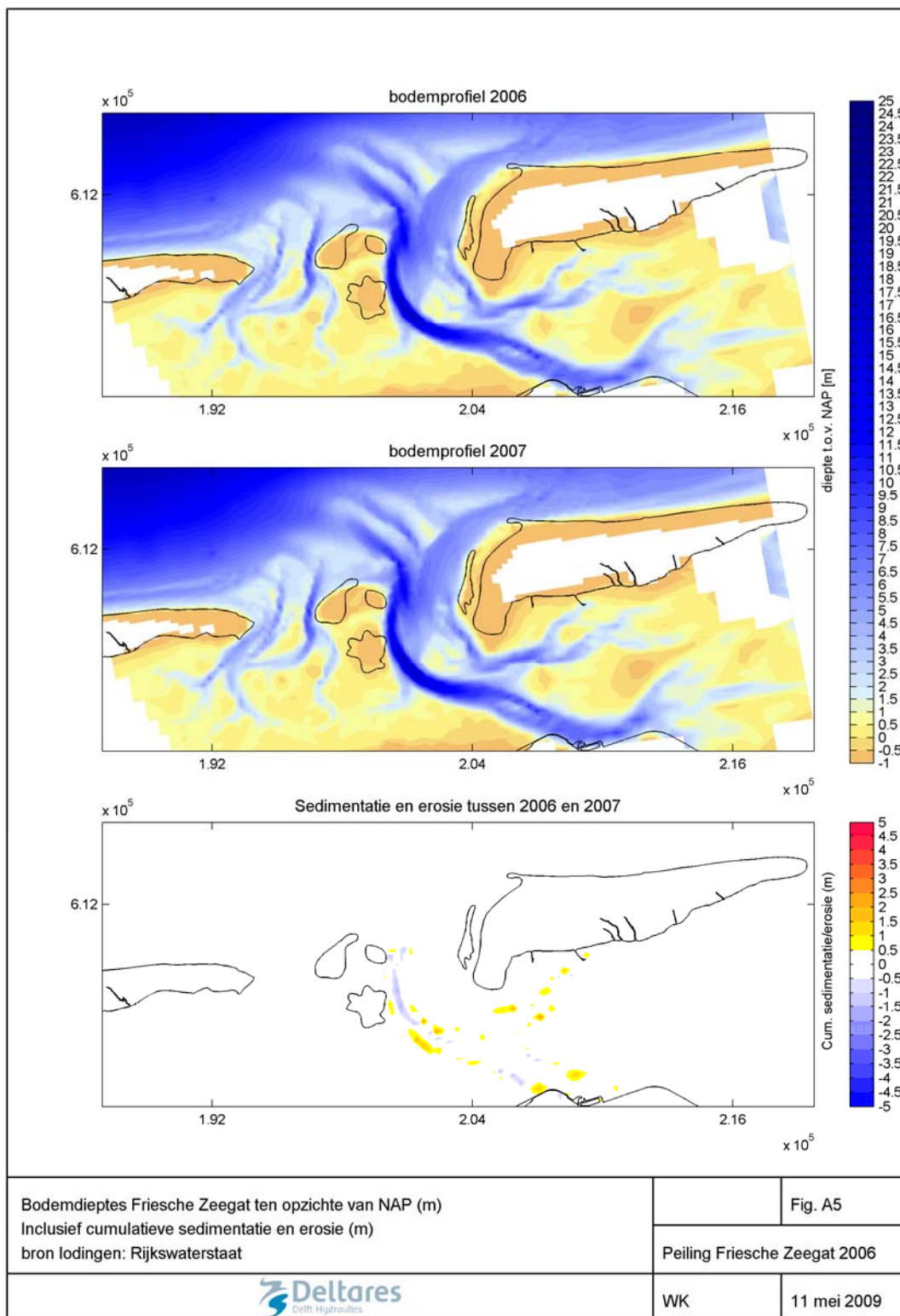
A6 - bodemprofiel en cumulatieve sedimentatie/erosie 2006 en 2008

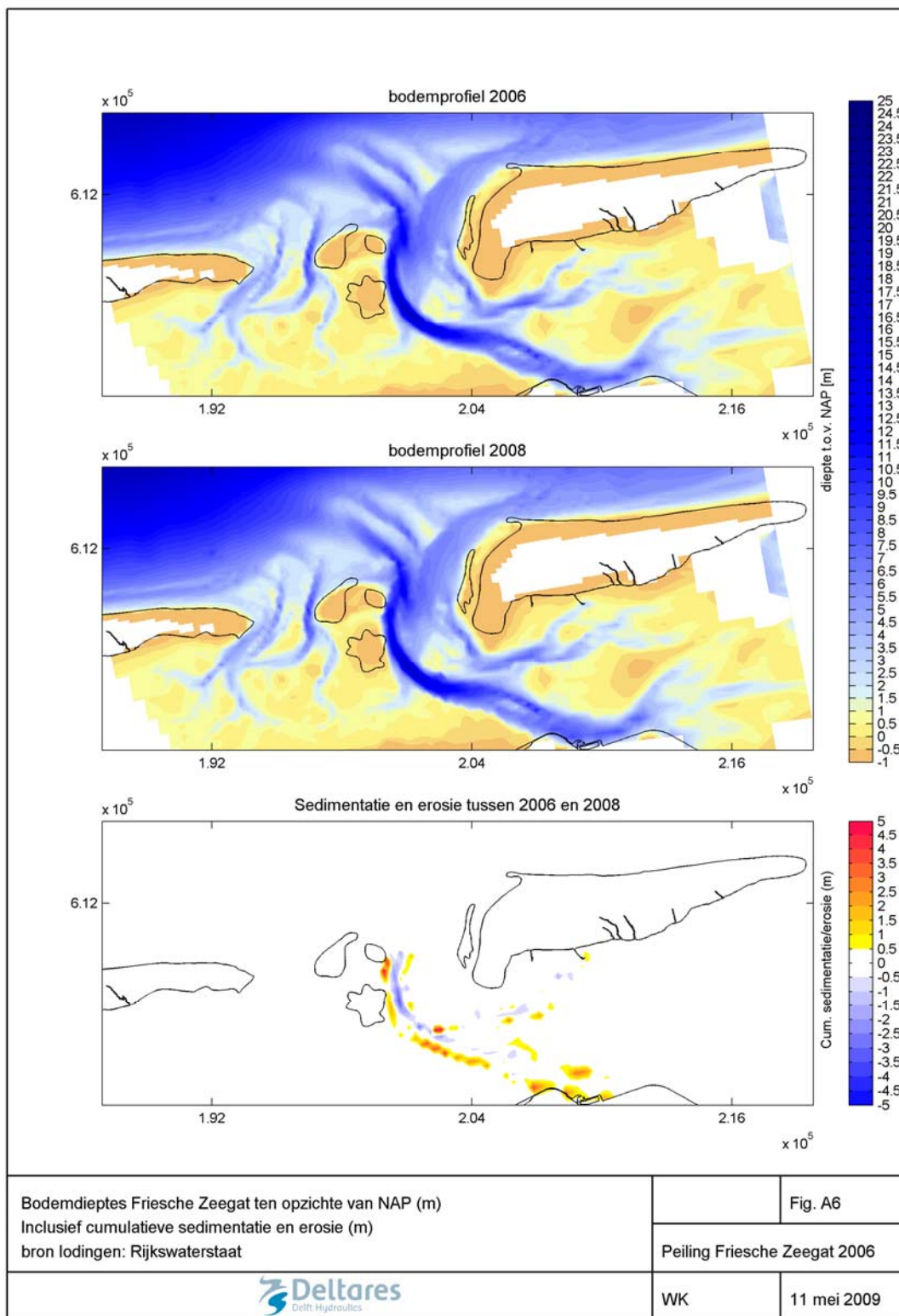








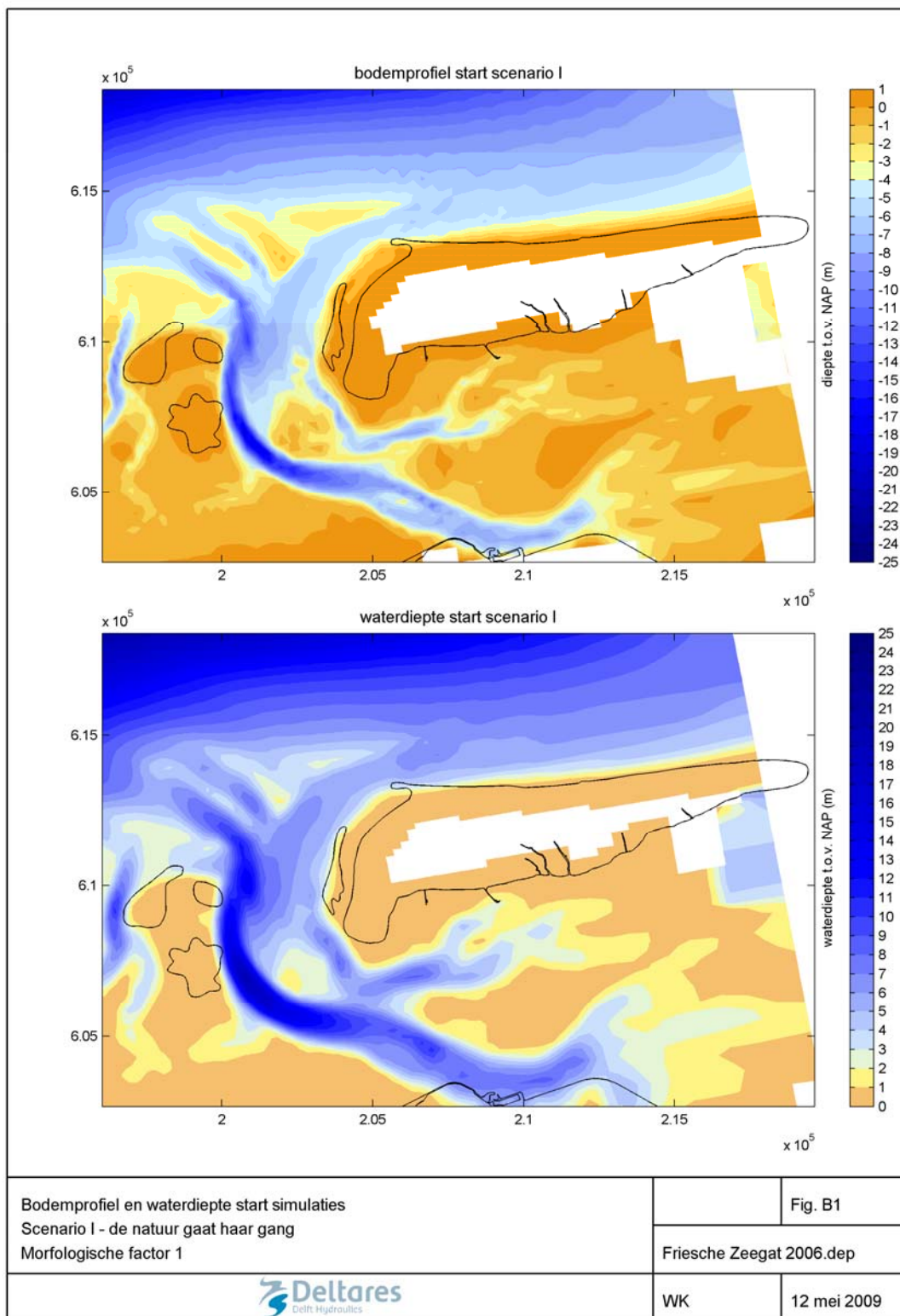


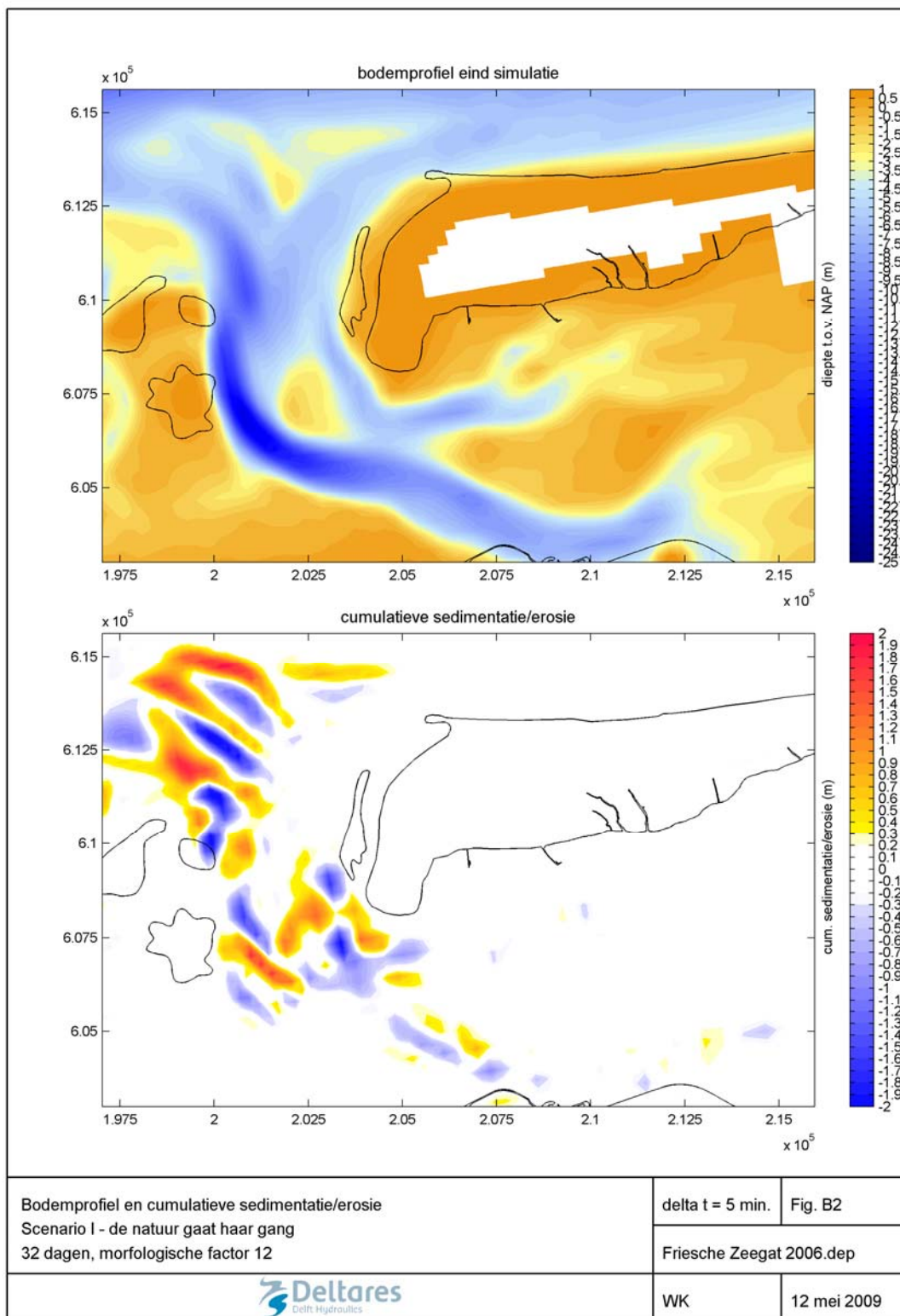


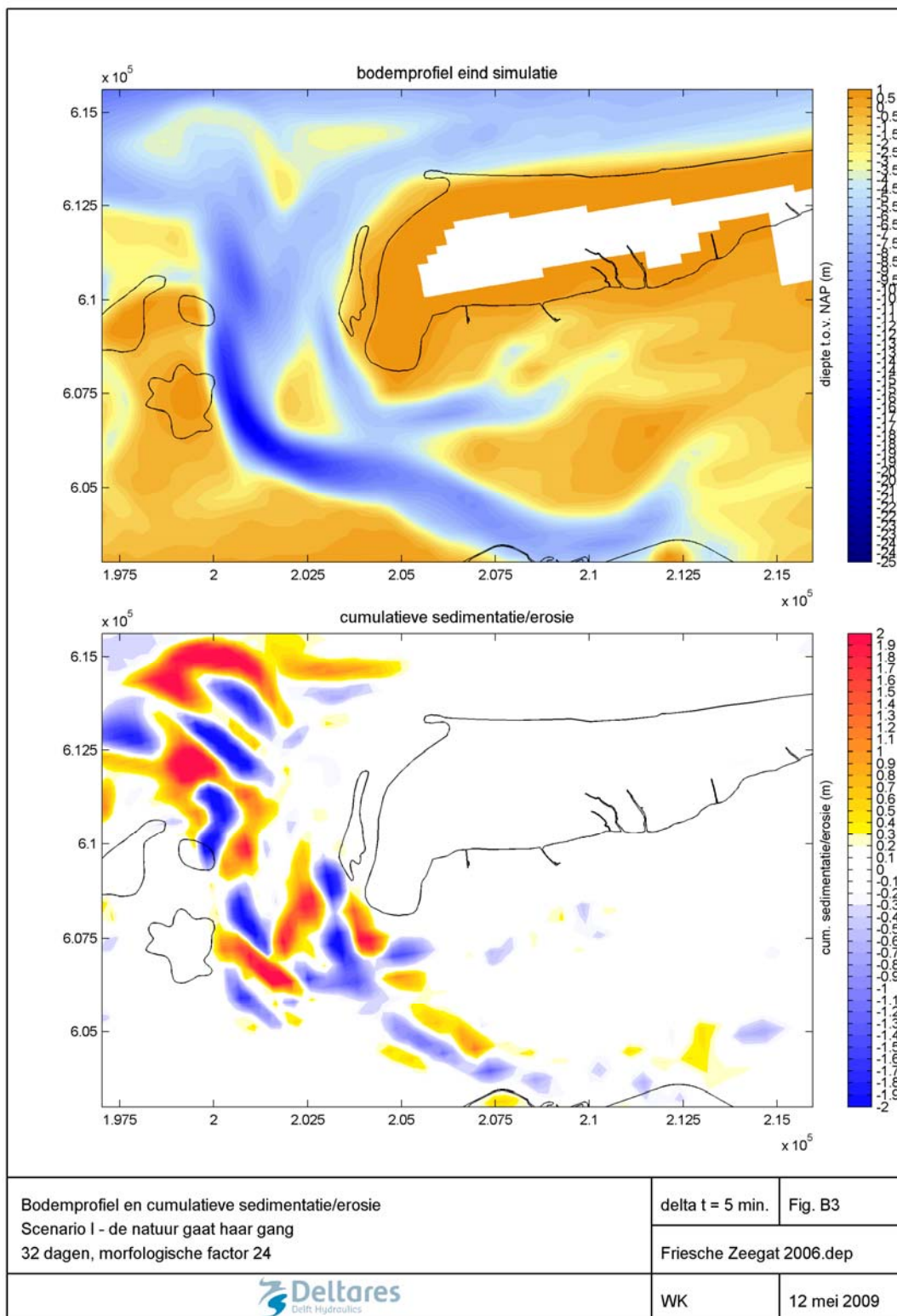
B. Figuren bij hoofdstuk 4

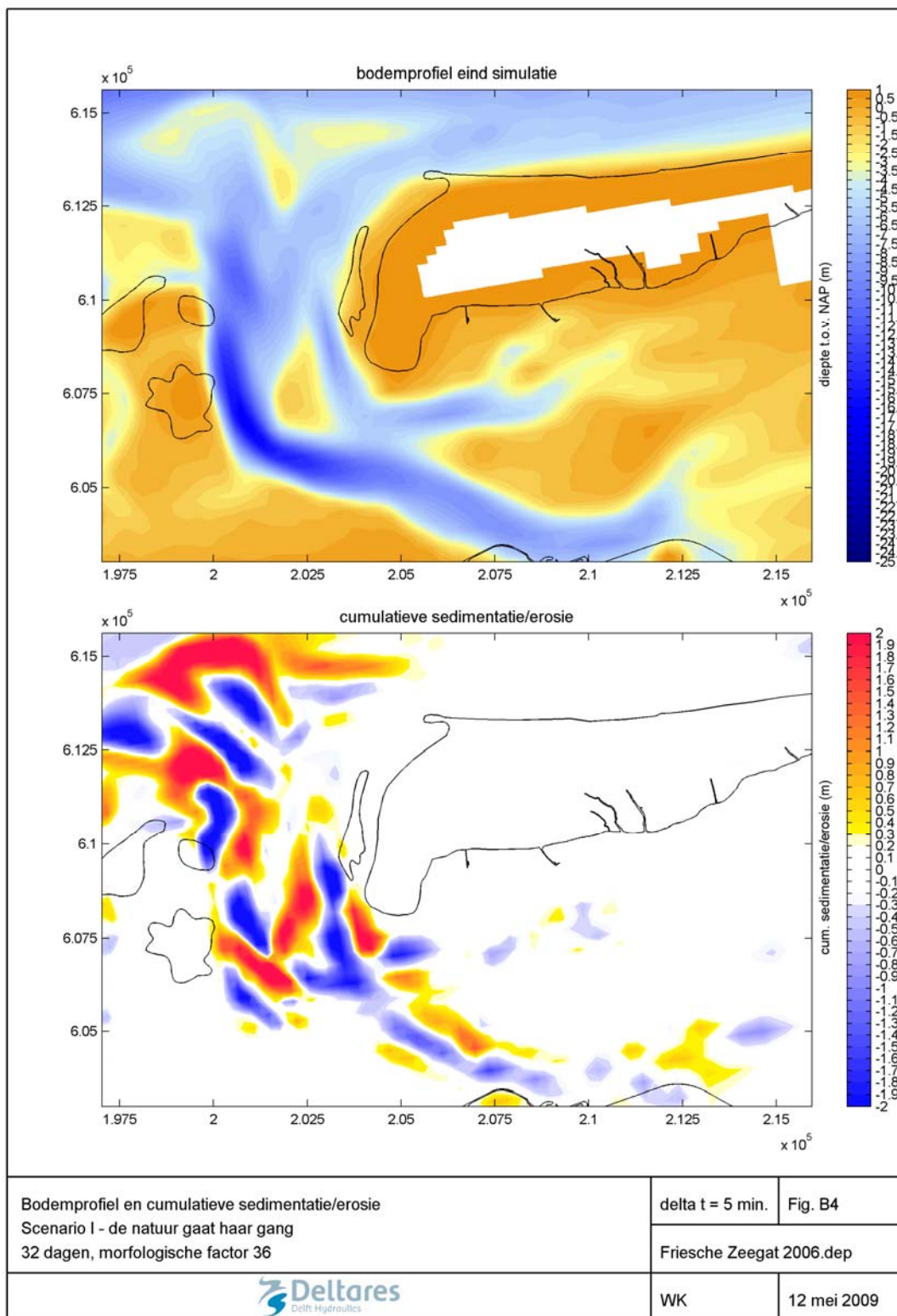
1. Scenario I

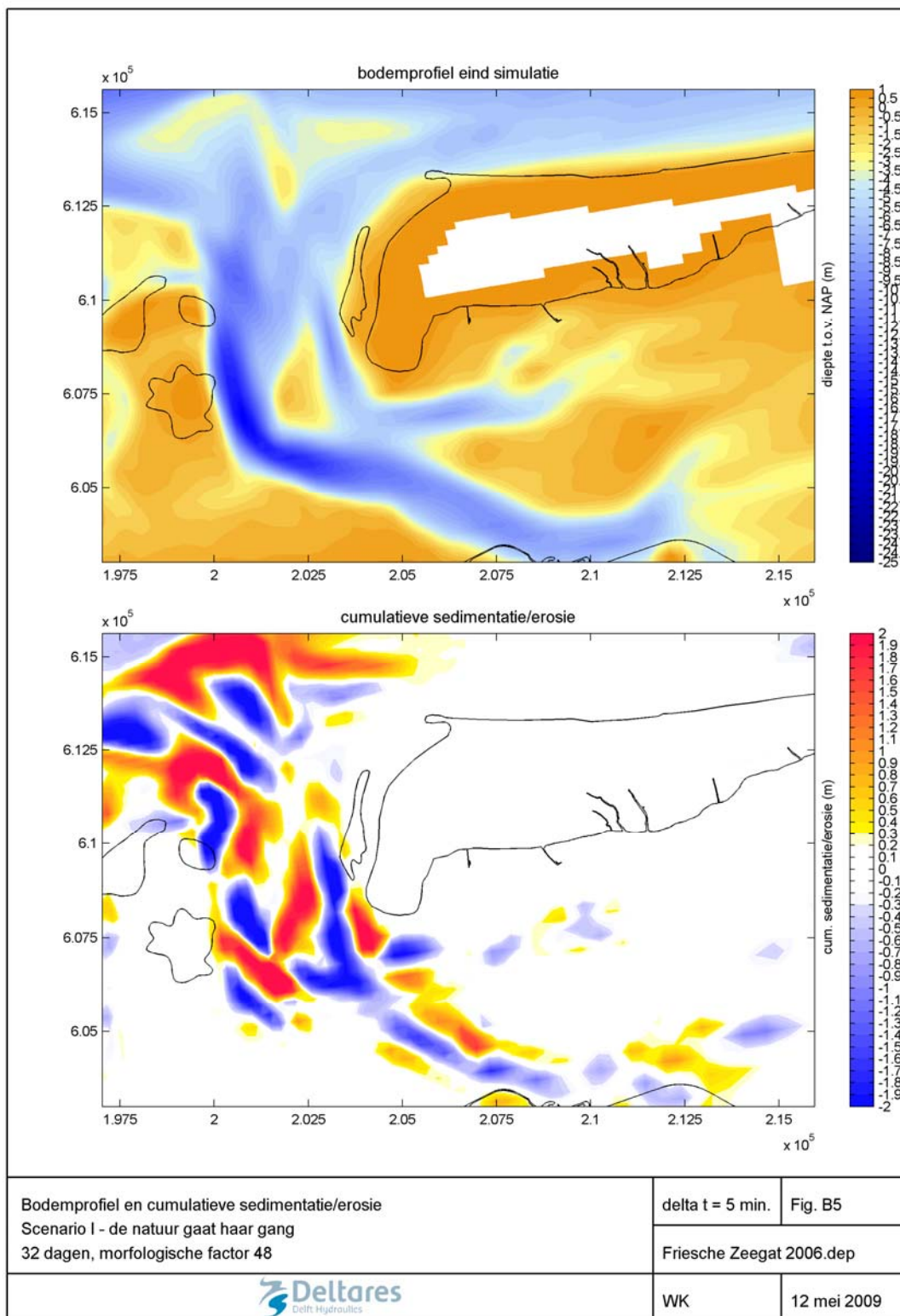
- B1 - bodemprofiel scenario I - startprofiel
- B2 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 12
- B3 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 24
- B4 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 36
- B5 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 48
- B6 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 60
- B7 - bodemprofiel scenario I - morfologische factor 120
- B8 - waterdieptes scenario I - morfologische factor 12
- B9 - waterdieptes scenario I - morfologische factor 60
- B10 - waterdieptes scenario I - morfologische factor 120

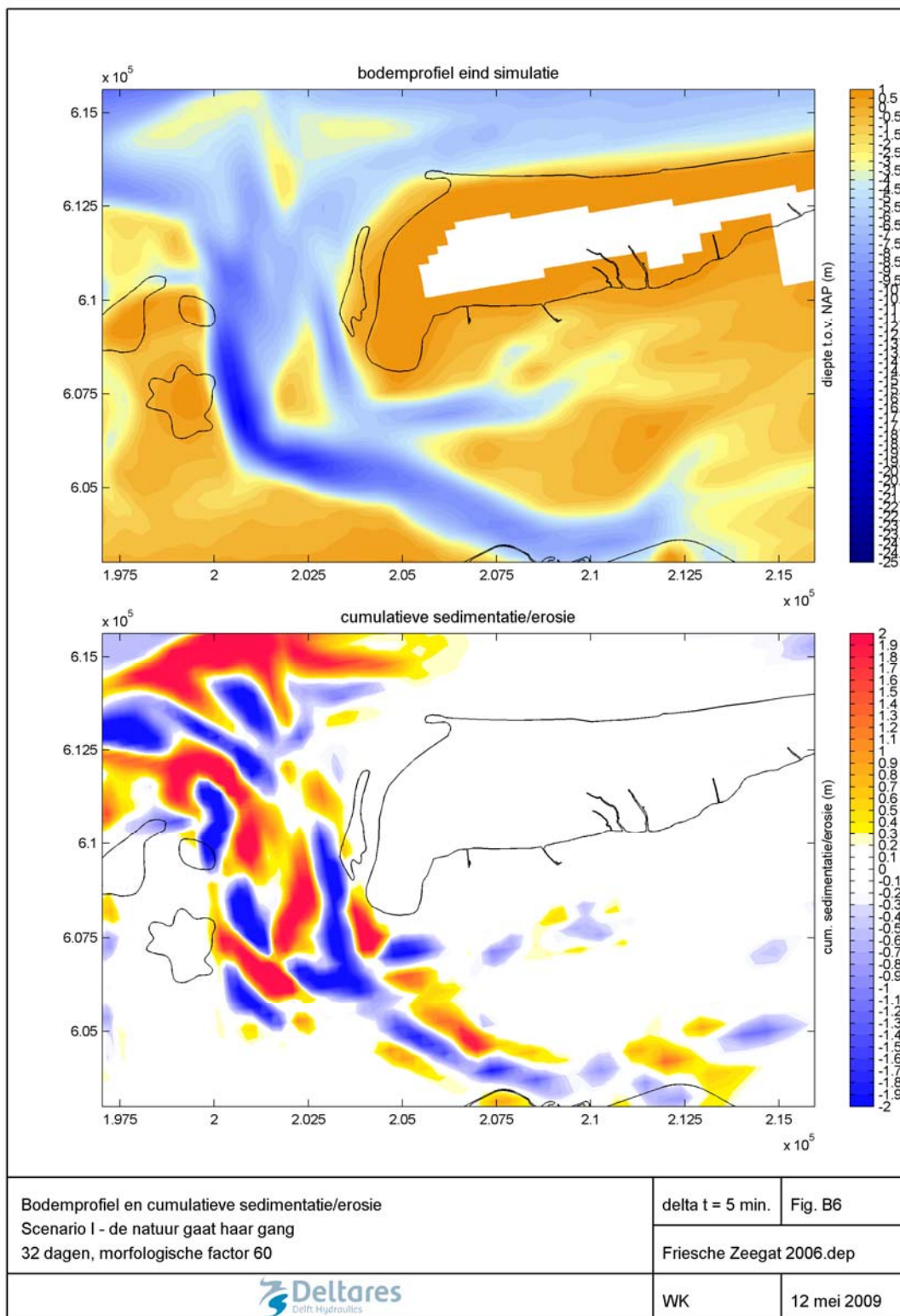


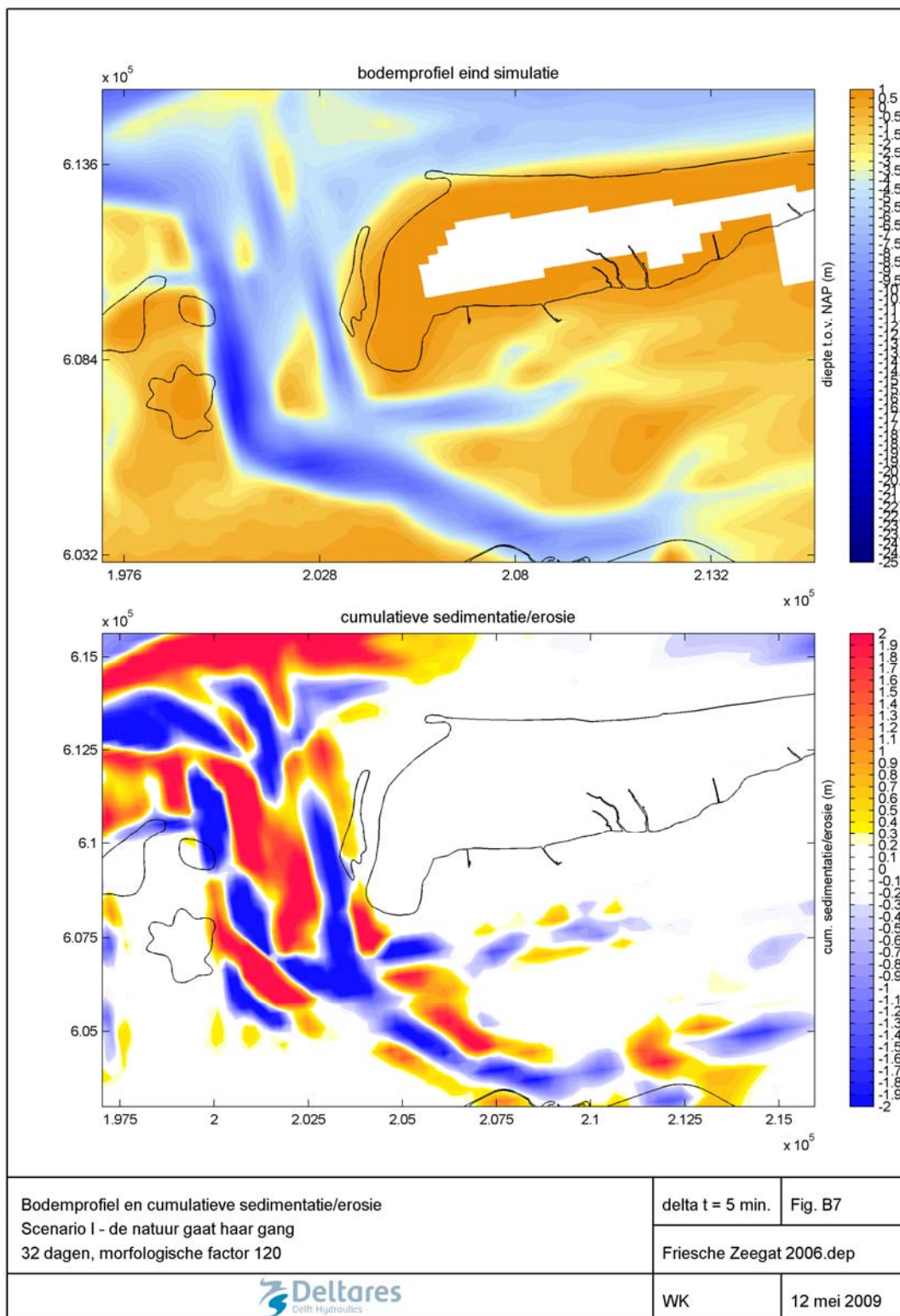


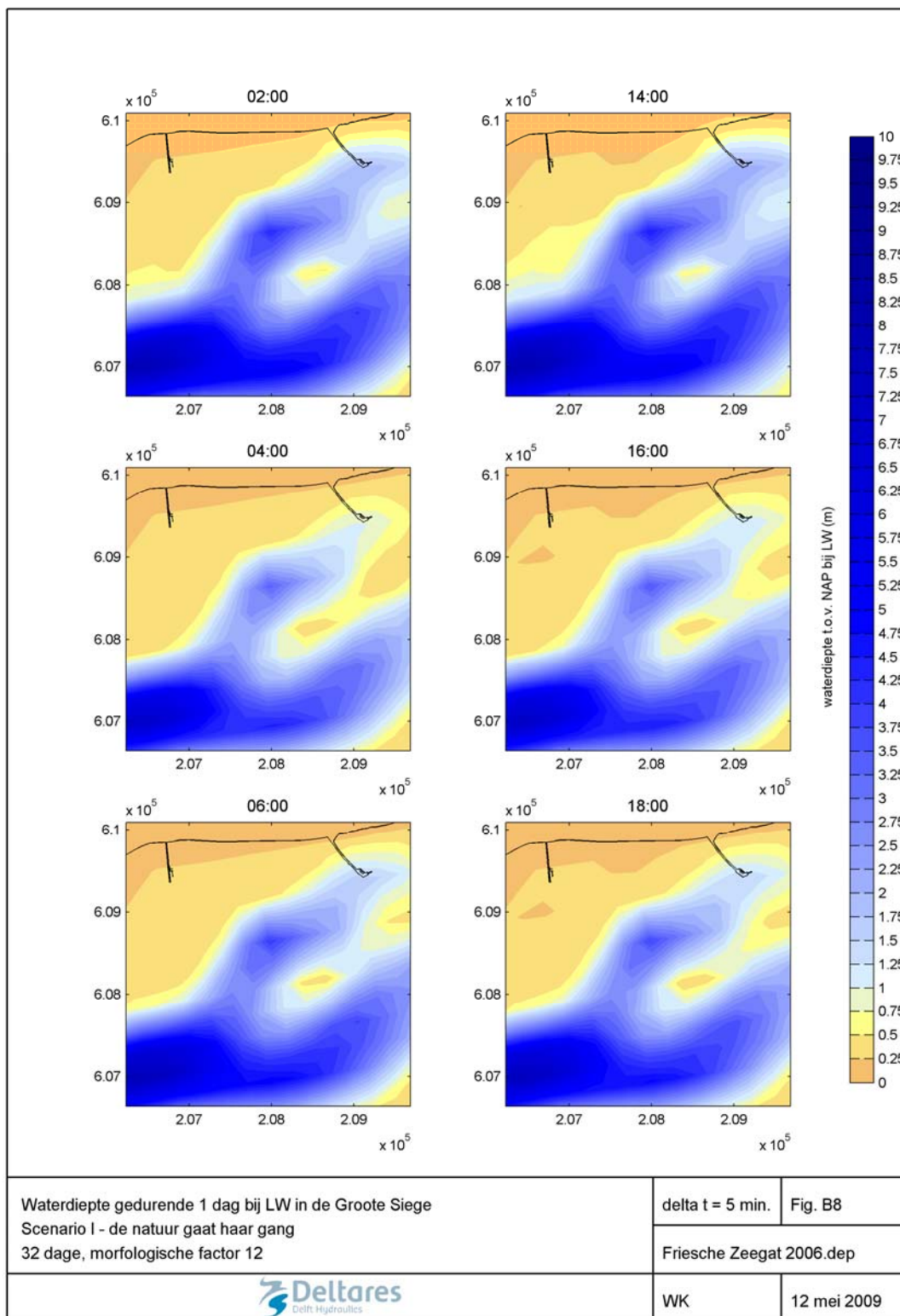


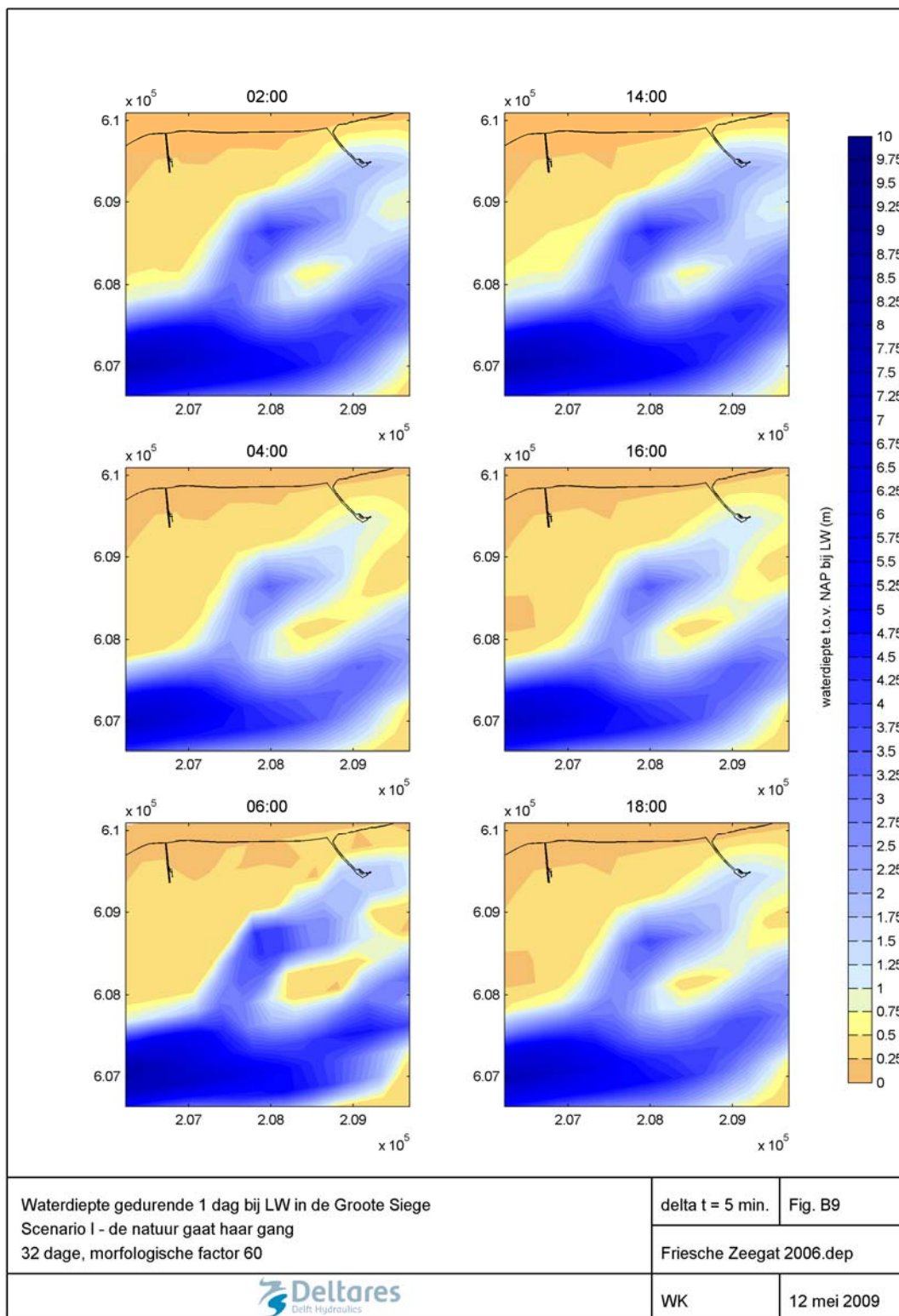


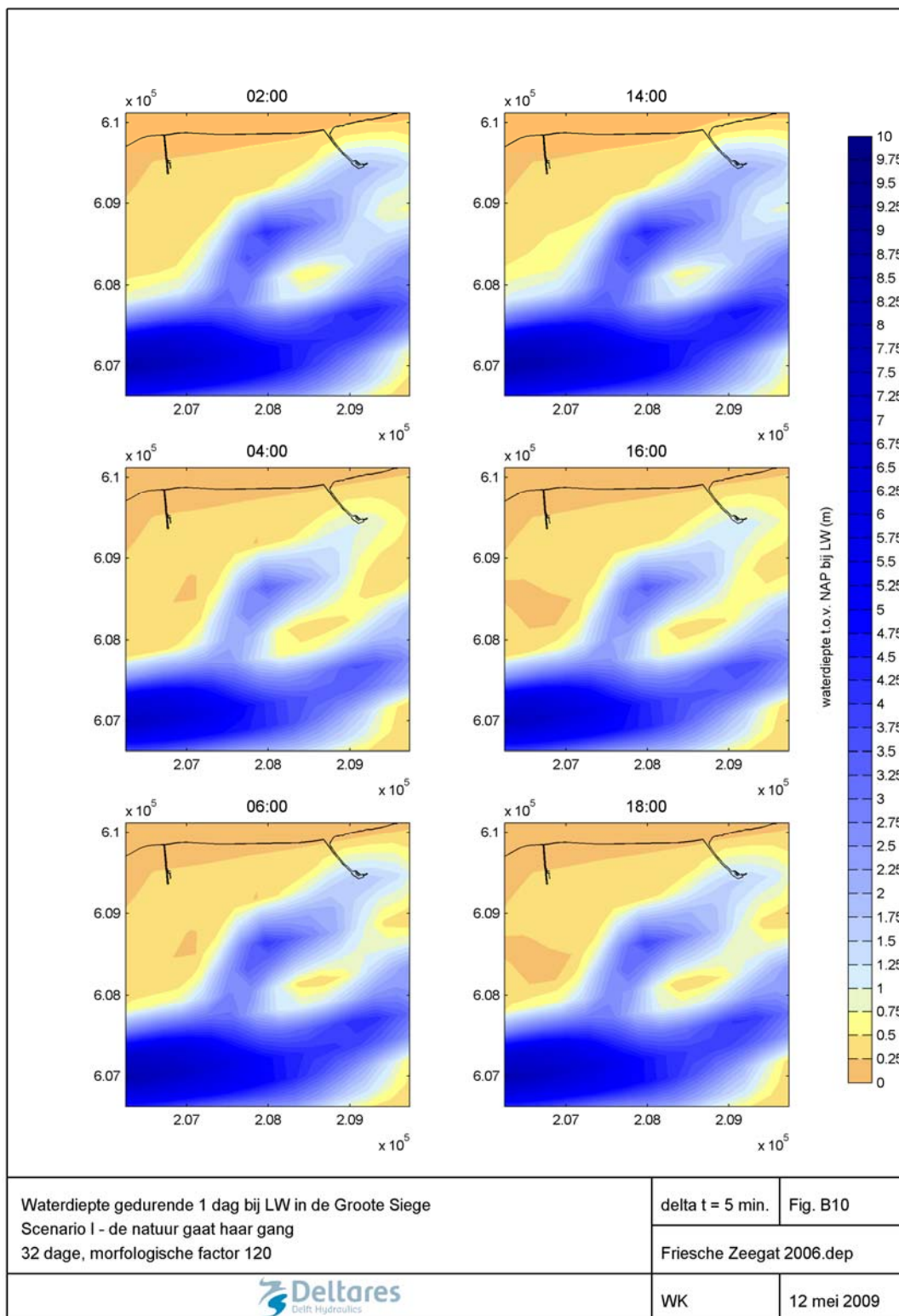






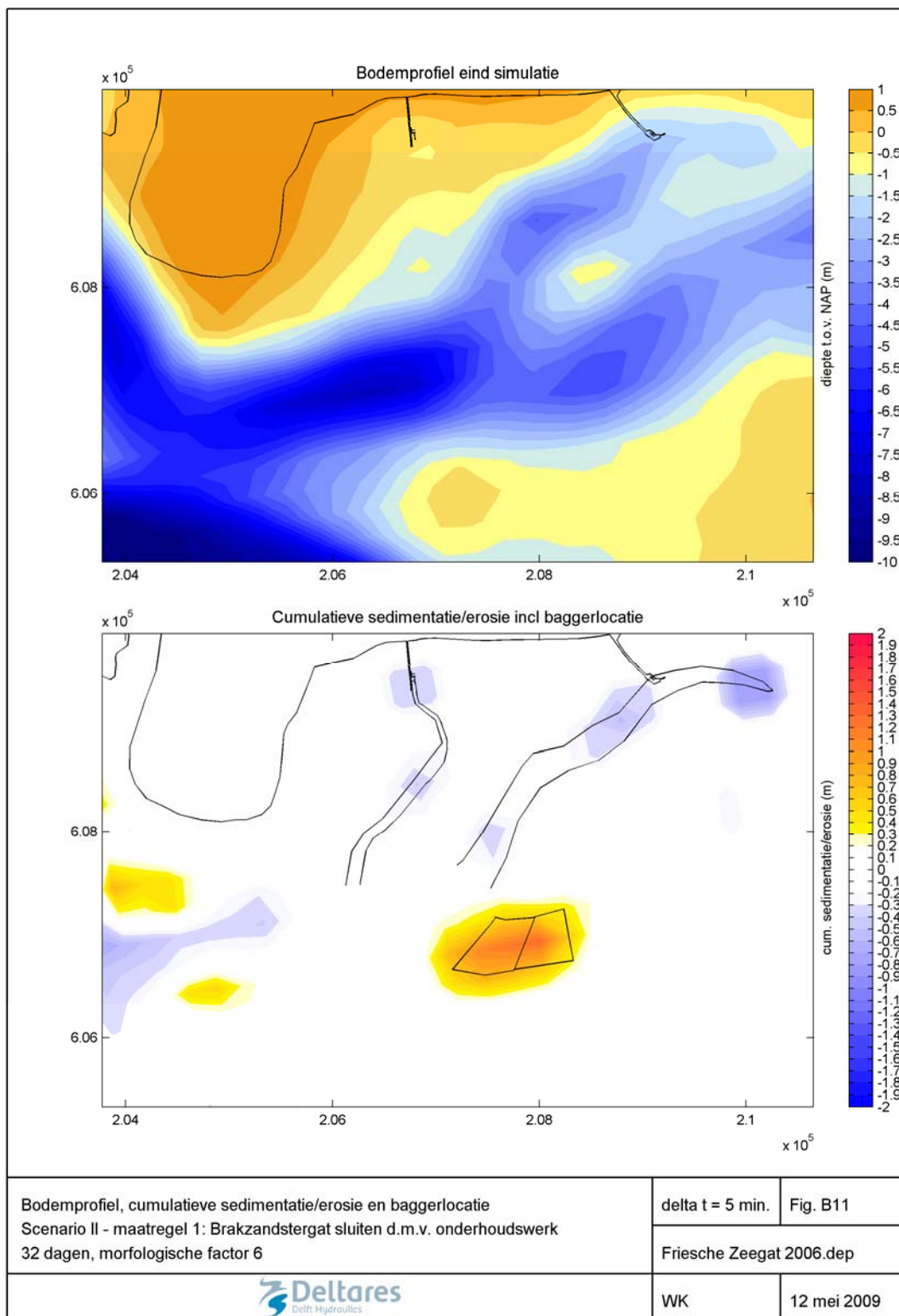


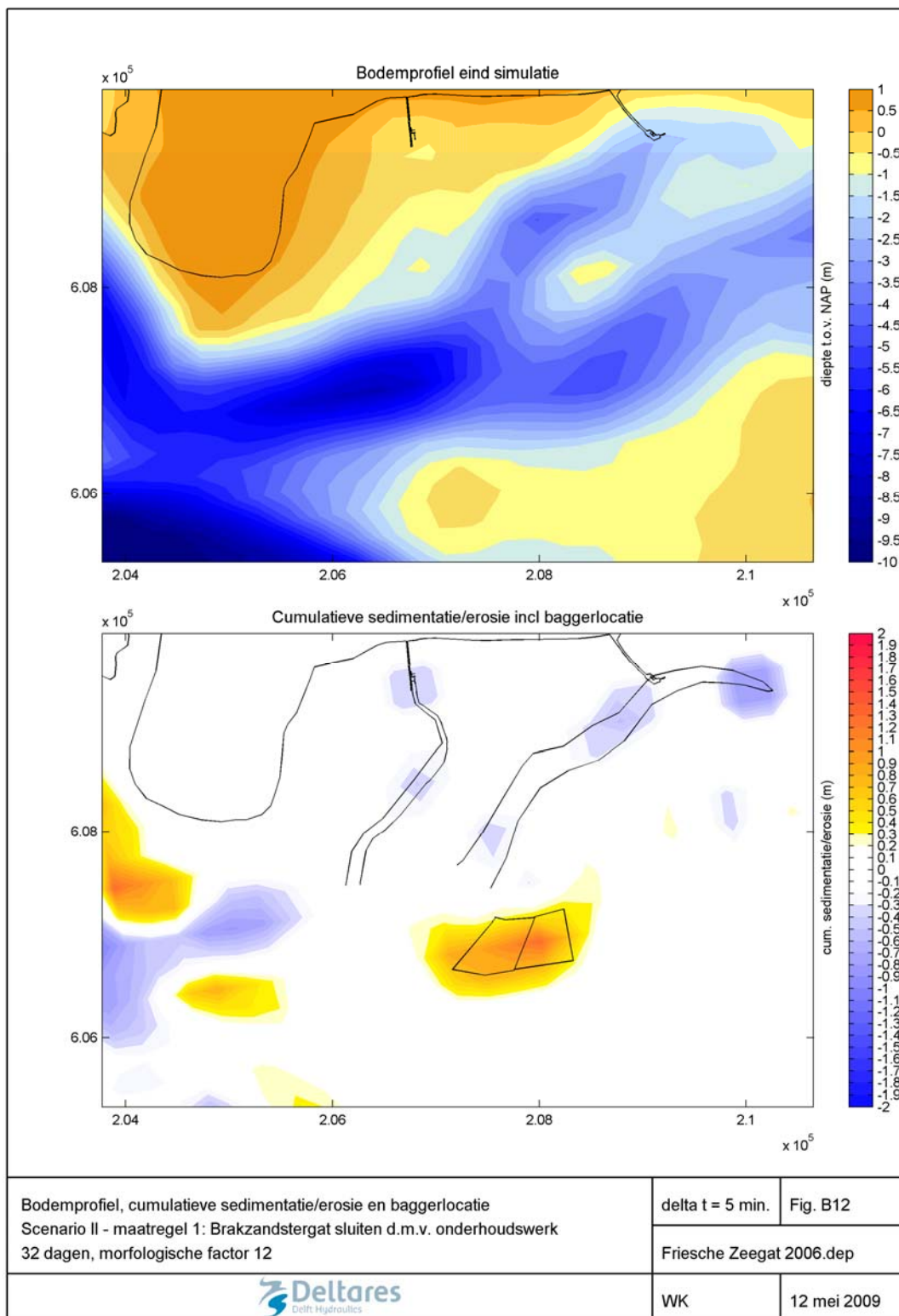


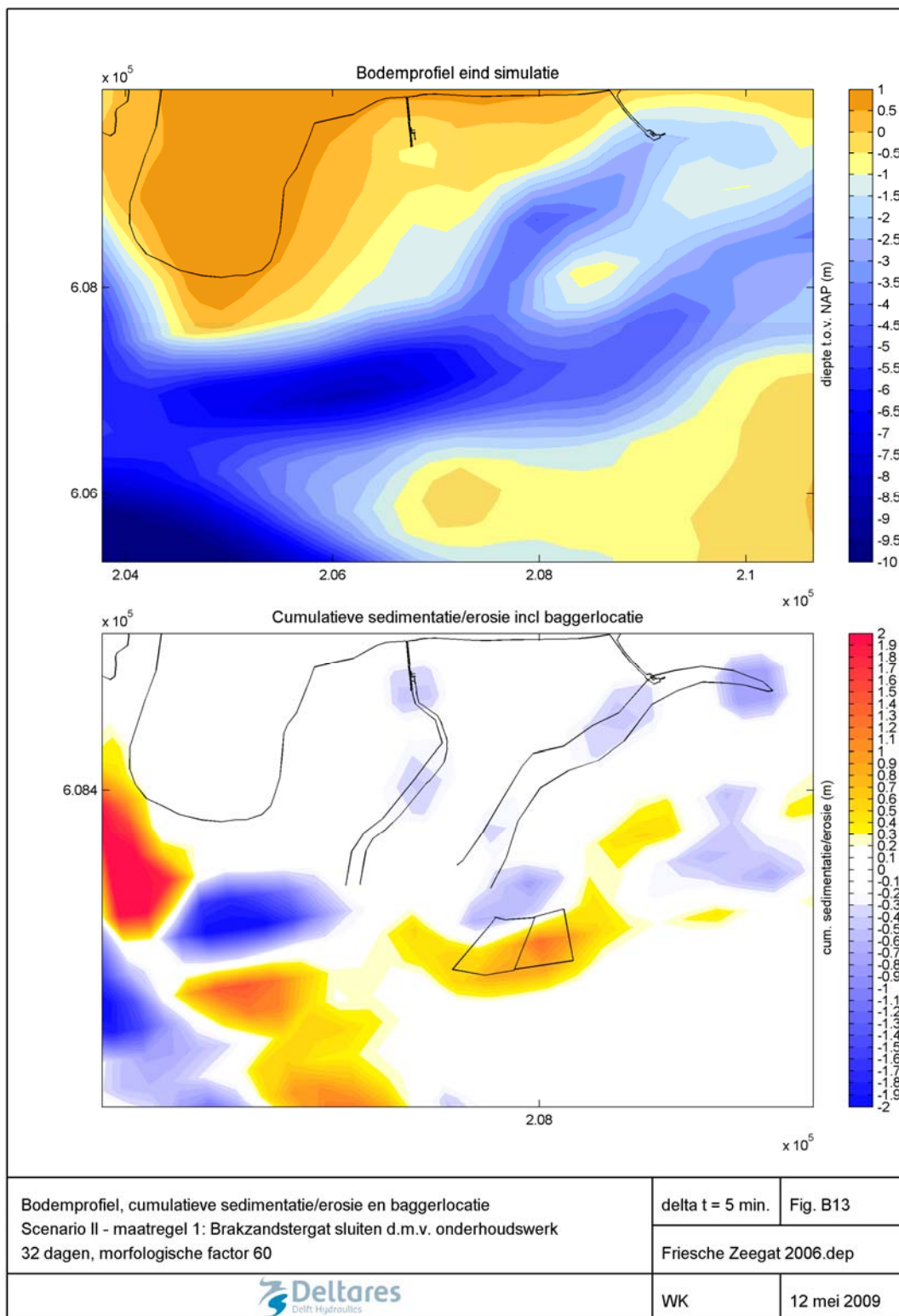


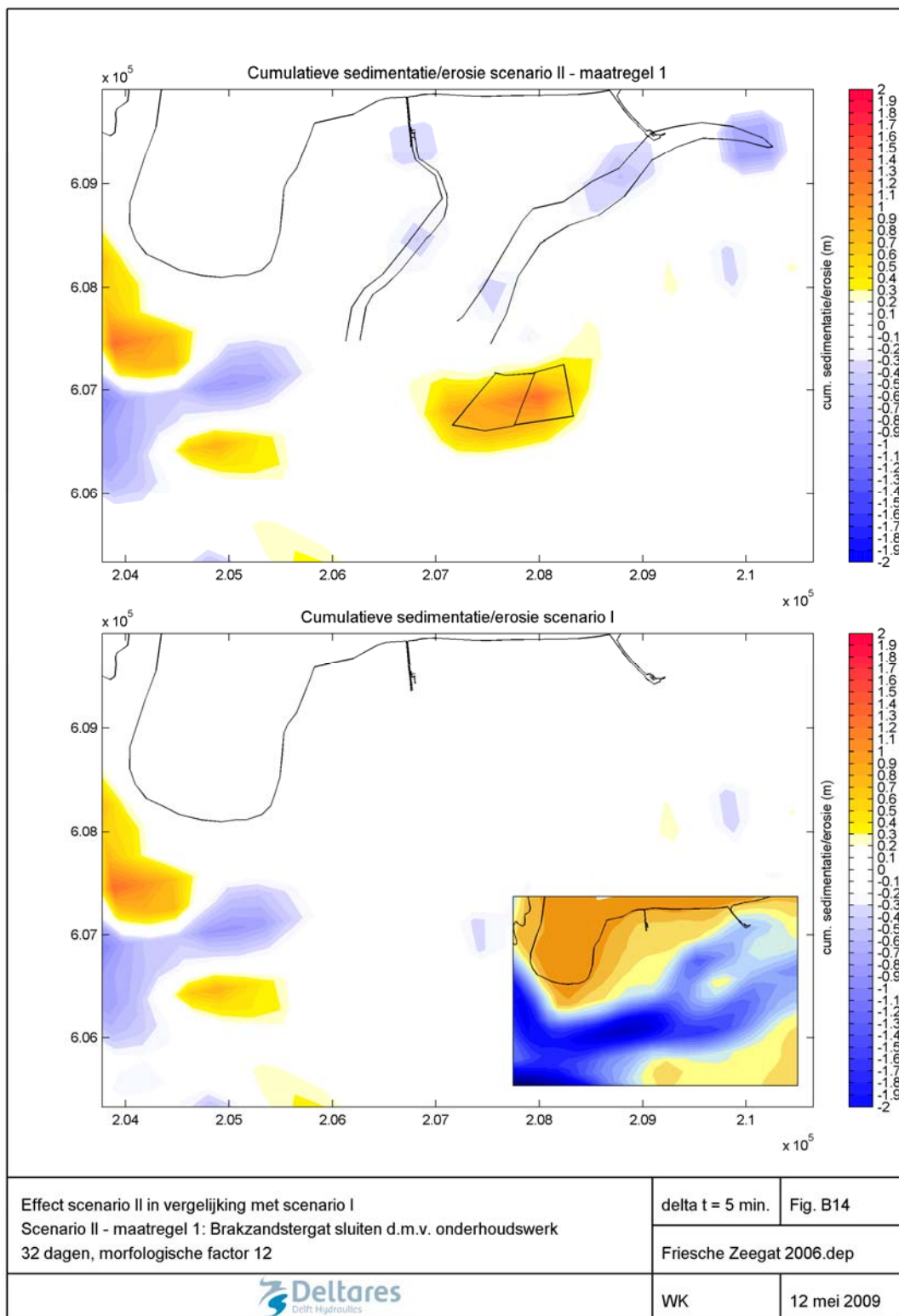
2. Scenario II

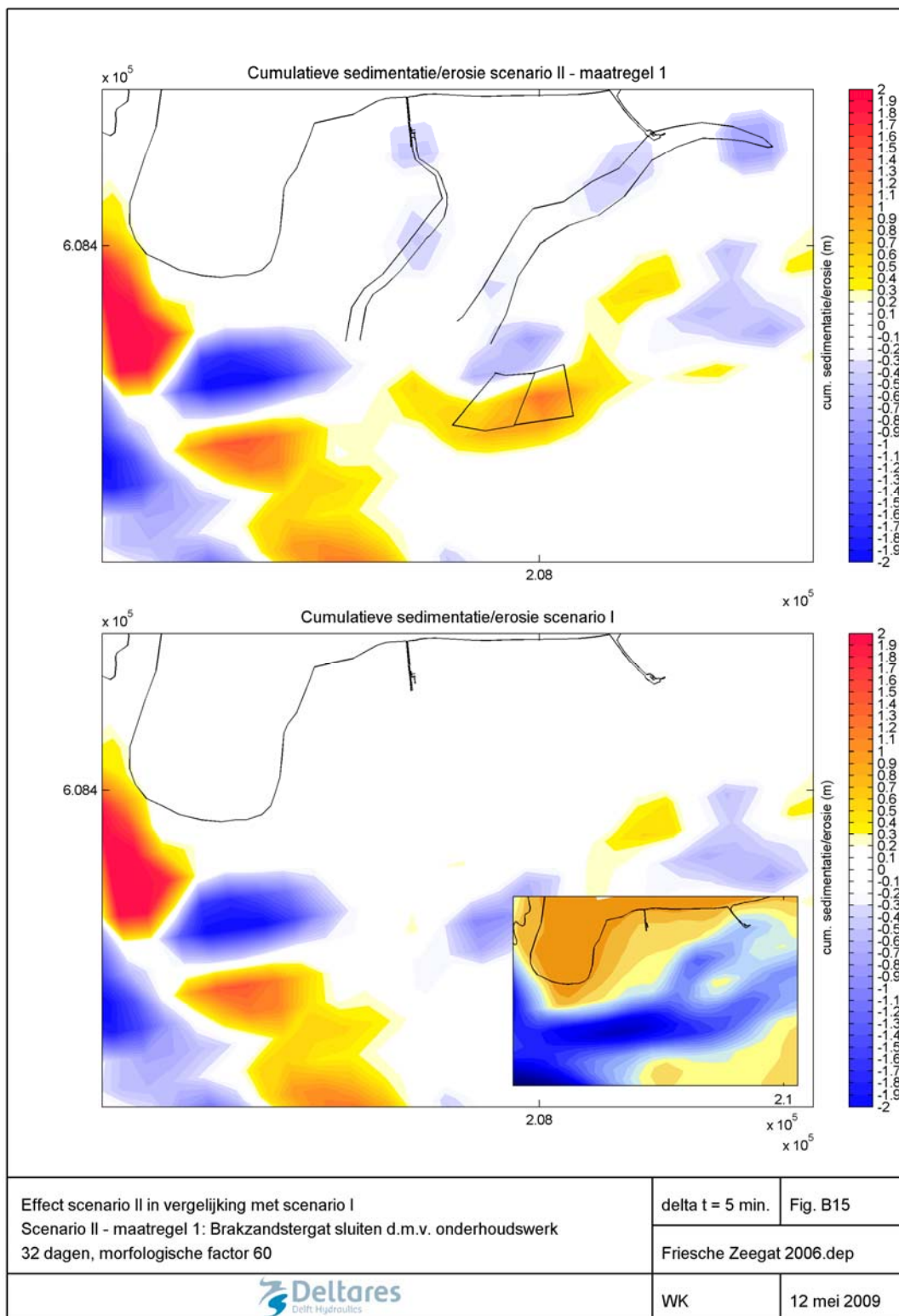
- B11 - bodemprofiel scenario II, maatregel 1 - morfologische factor 6
B12 - bodemprofiel scenario II, maatregel 1 - morfologische factor 12
B13 - bodemprofiel scenario II, maatregel 1 - morfologische factor 60
B14 - effecten maatregel 1 - morfologische factor 12
B15 - effecten maatregel 1 - morfologische factor 60
B16 - waterdieptes maatregel 1 - morfologische factor 12
B17 - waterdieptes maatregel 1 - morfologische factor 60
- B18 - bodemprofiel scenario II, maatregel 2 - morfologische factor 12
B19 - bodemprofiel scenario II, maatregel 2 - morfologische factor 60
B20 - effecten maatregel 2 - morfologische factor 12
B21 - effecten maatregel 2 - morfologische factor 60
B22 - waterdieptes maatregel 2 - morfologische factor 12
- B23 - bodemprofiel scenario II, maatregel 3 - morfologische factor 12
B24 - bodemprofiel scenario II, maatregel 3 - morfologische factor 60
B25 - effecten maatregel 3 - morfologische factor 12
B26 - effecten maatregel 3 - morfologische factor 60
B27 - waterdieptes maatregel 3 - morfologische factor 12
B28 - waterdieptes maatregel 3 - morfologische factor 60
- B29 - bodemprofiel scenario II, maatregel 4 - morfologische factor 12
B30 - bodemprofiel scenario II, maatregel 4 - morfologische factor 60
B31 - bodemprofiel scenario II, maatregel 4 - morfologische factor 120
B32 - effecten maatregel 4 - morfologische factor 12
B33 - effecten maatregel 4 - morfologische factor 60
B34 - effecten maatregel 4 - morfologische factor 120
B35 - waterdieptes maatregel 4 - morfologische factor 12
B36 - waterdieptes maatregel 4 - morfologische factor 60
B37 - waterdieptes maatregel 4 - morfologische factor 120
- B38 - bodemprofiel scenario II, maatregel 5 - morfologische factor 12
B39 - bodemprofiel scenario II, maatregel 5 - morfologische factor 60
B40 - effecten maatregel 5 - morfologische factor 12
B41 - effecten maatregel 5 - morfologische factor 60
B42 - waterdieptes maatregel 5 - morfologische factor 12
B43 - waterdieptes maatregel 5 - morfologische factor 60

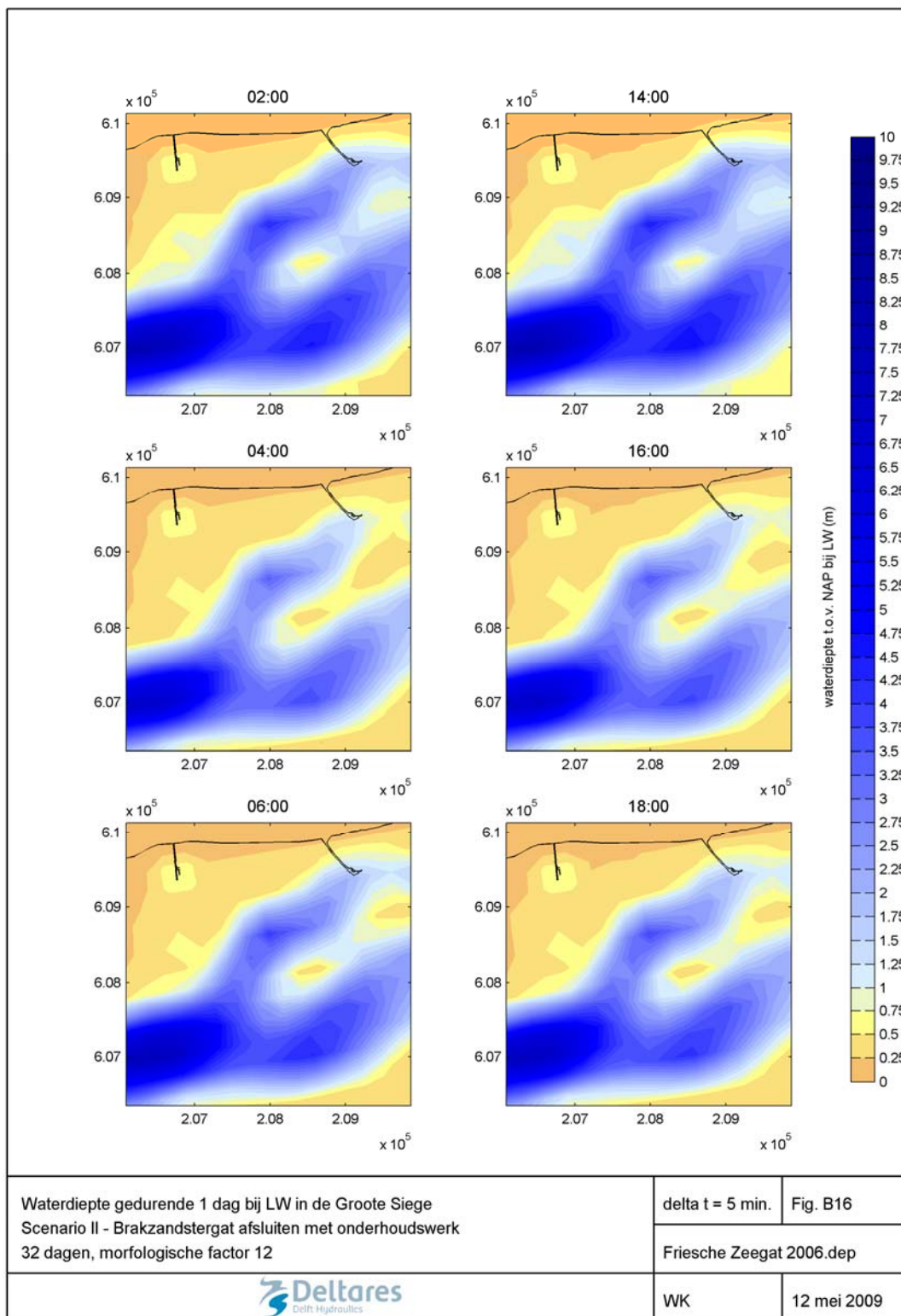


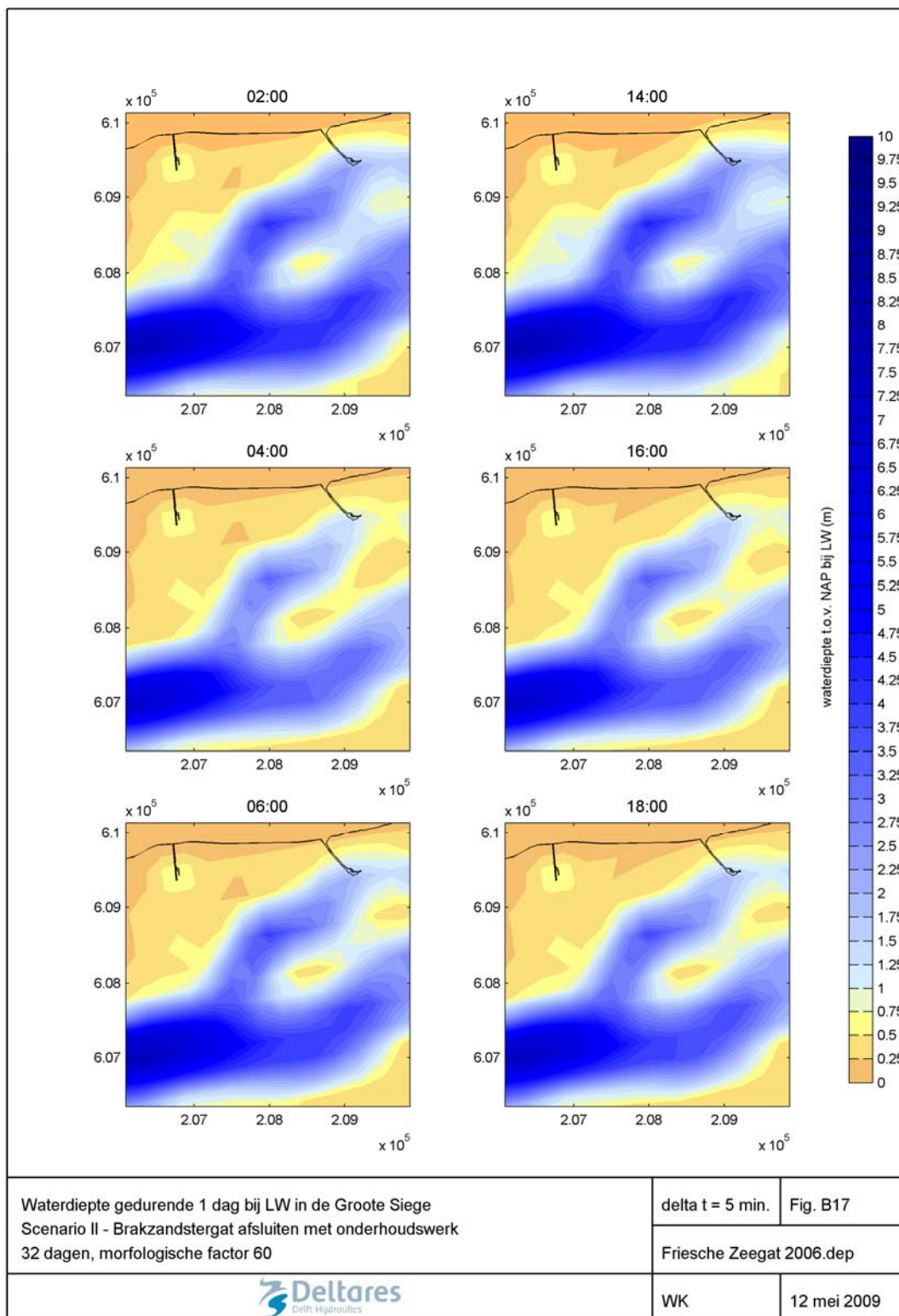


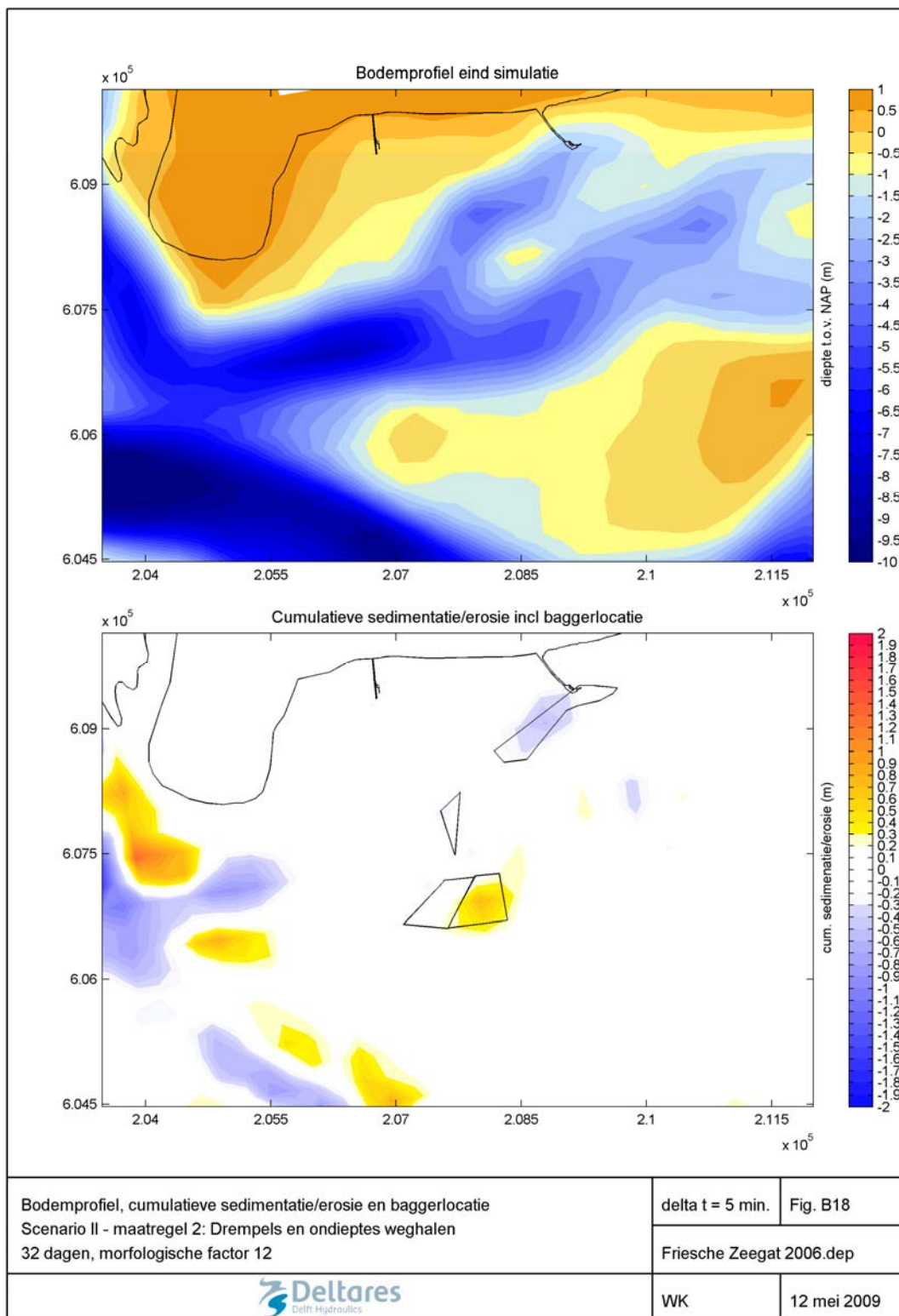


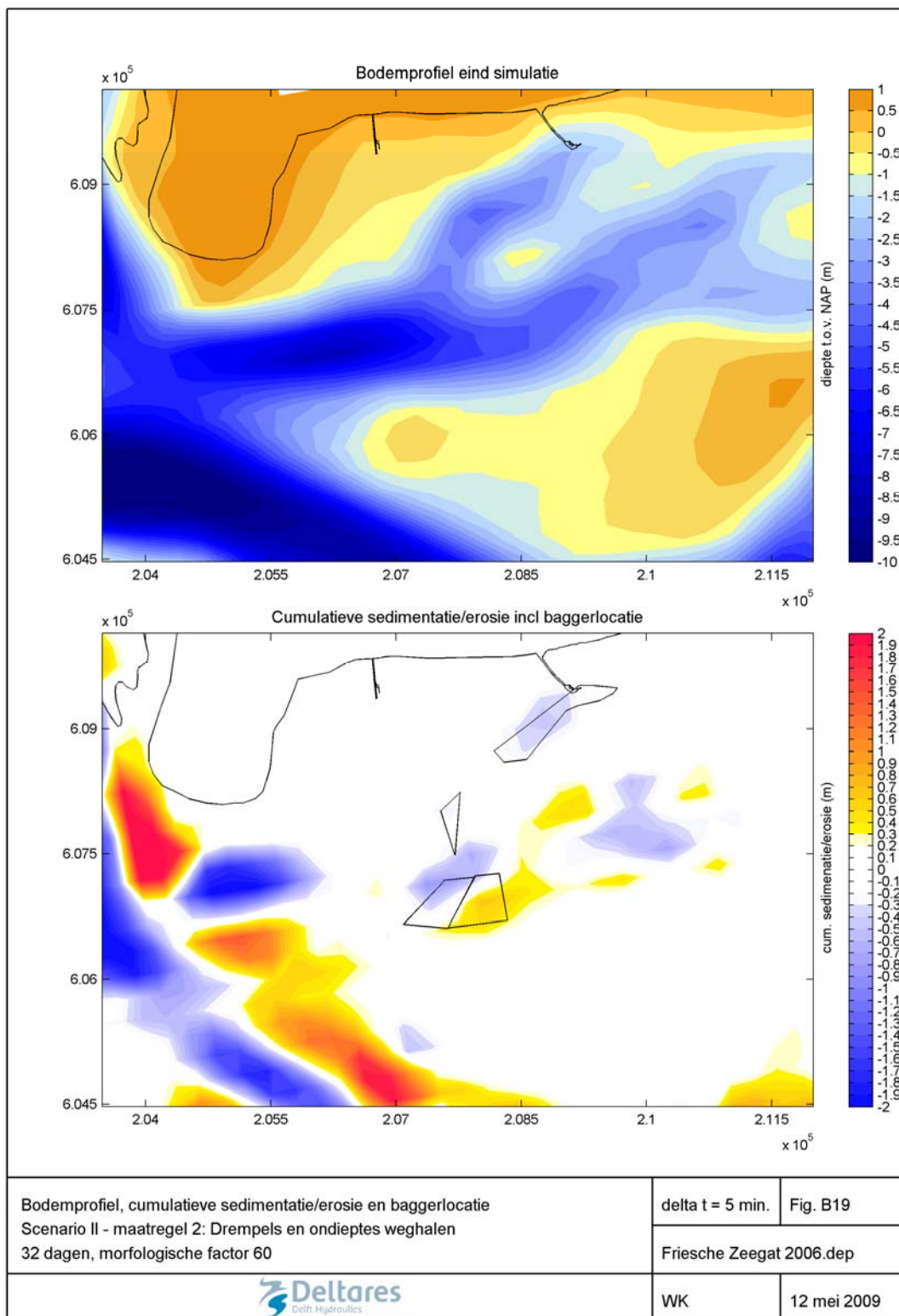


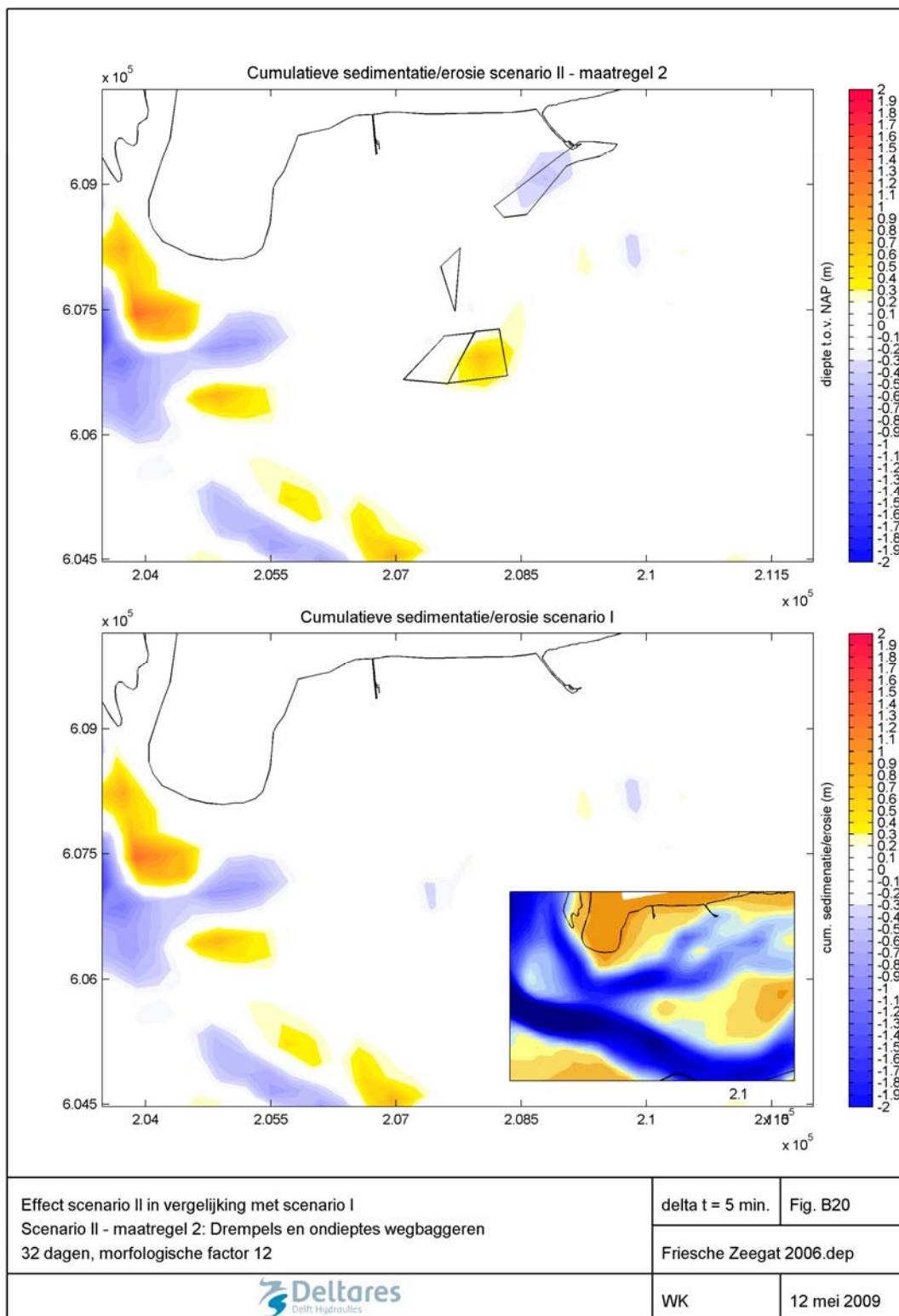


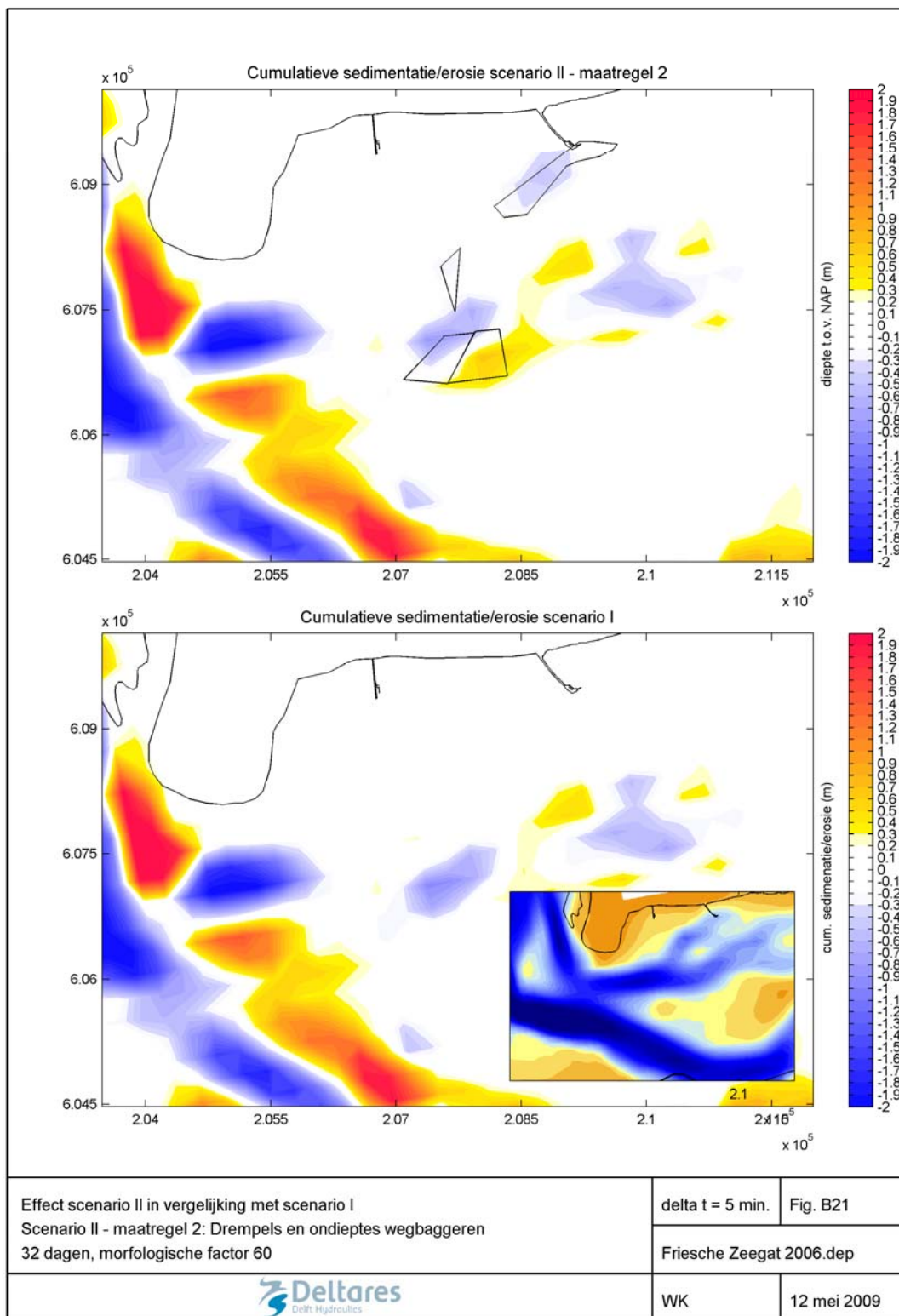


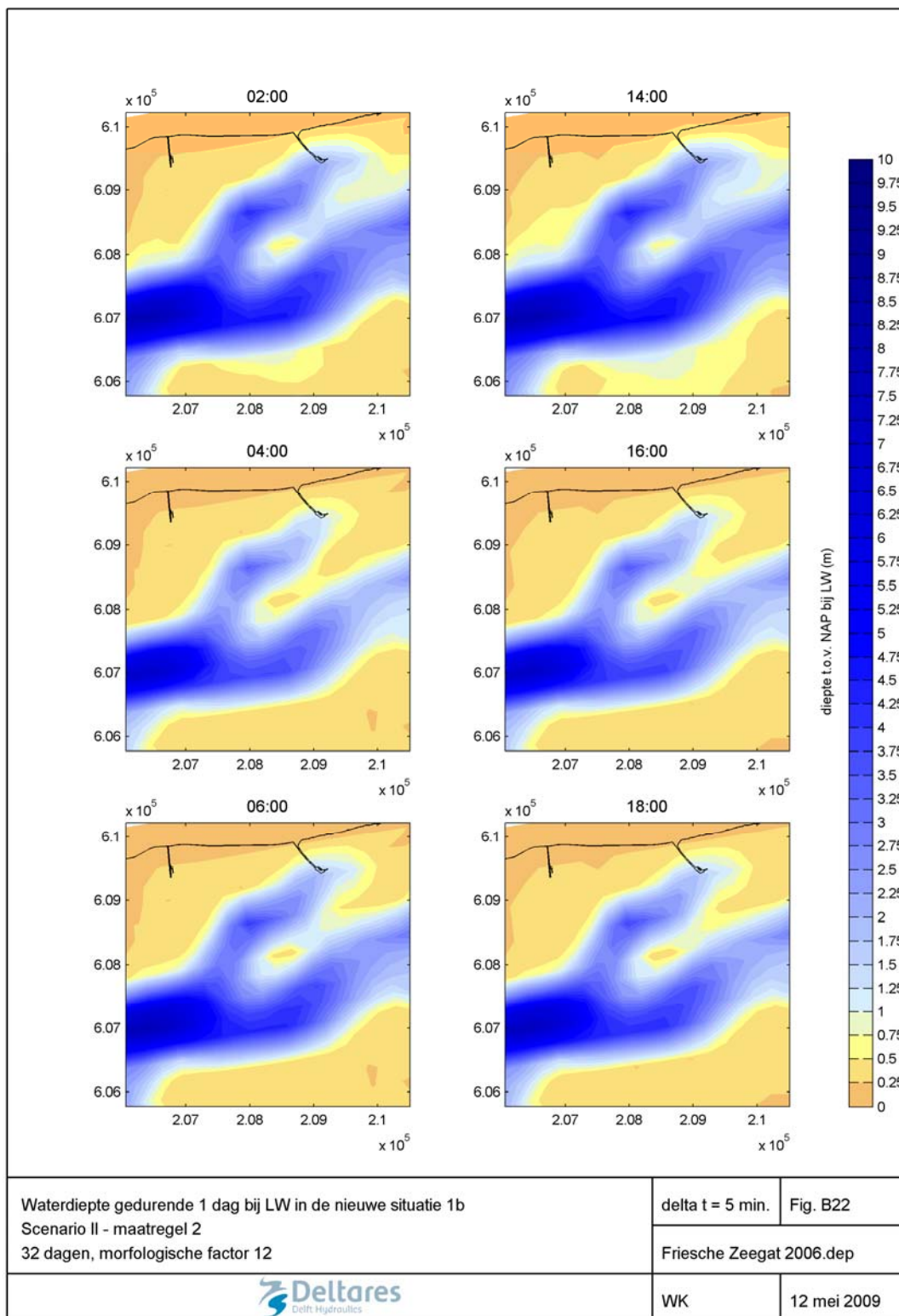


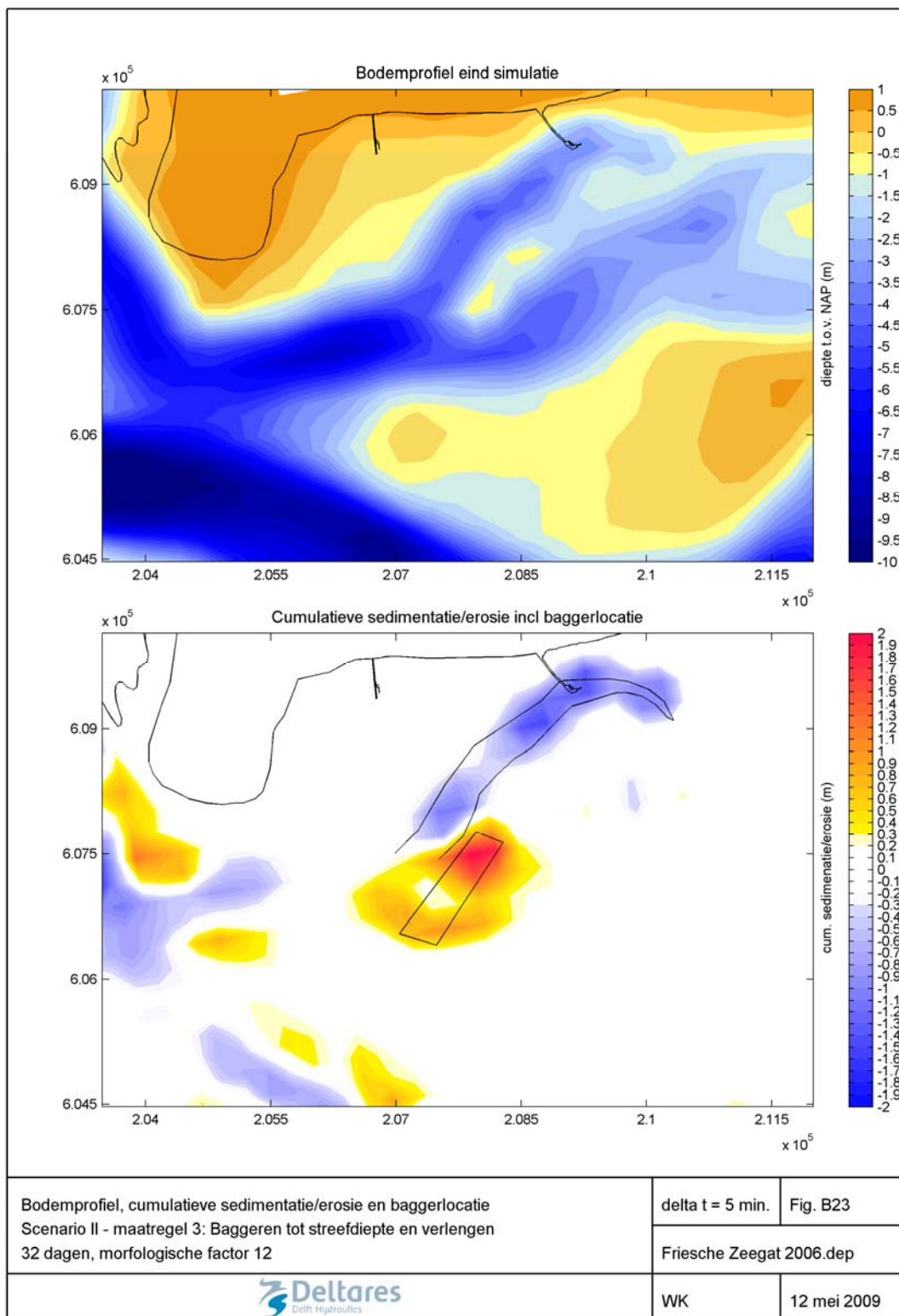


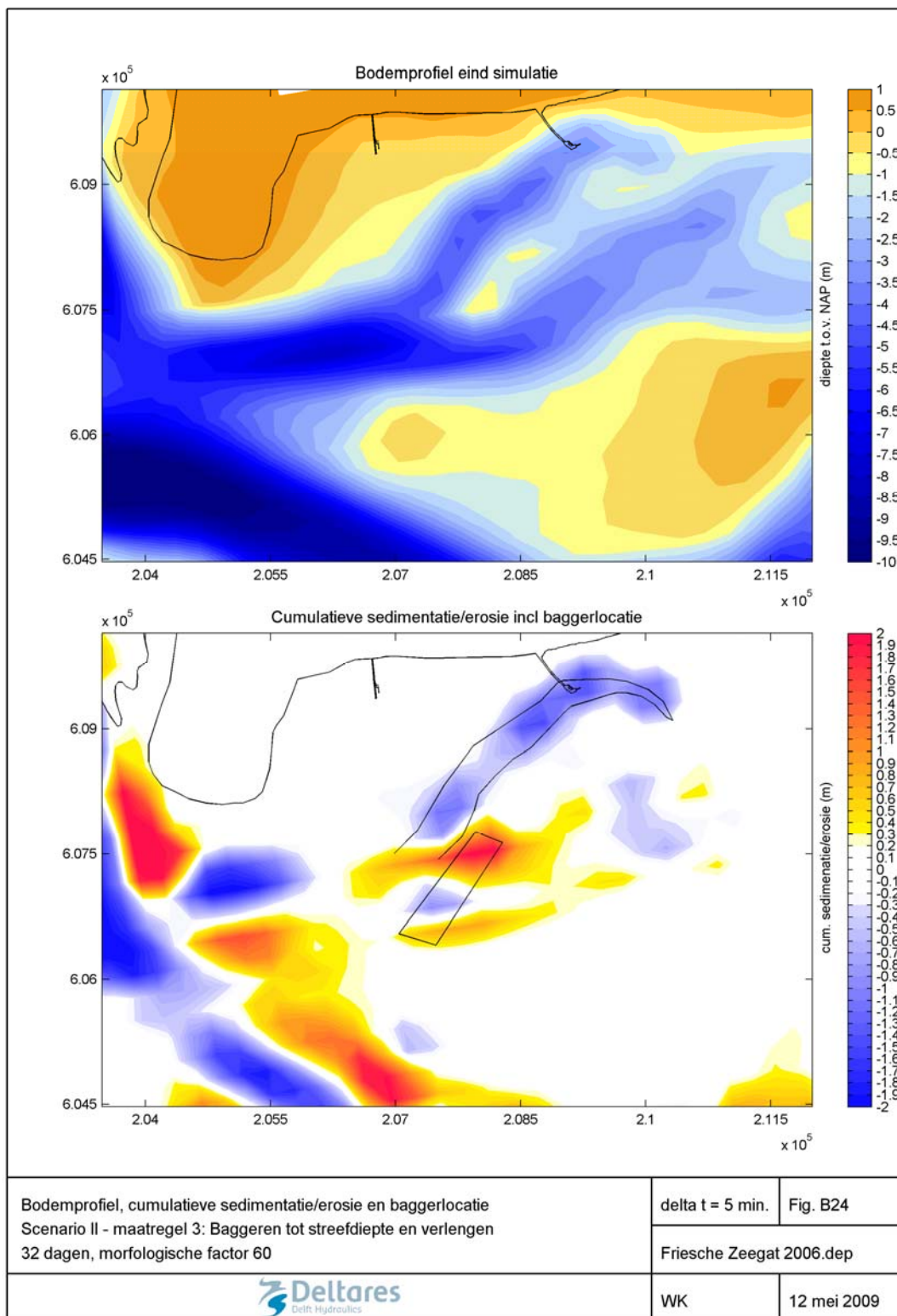


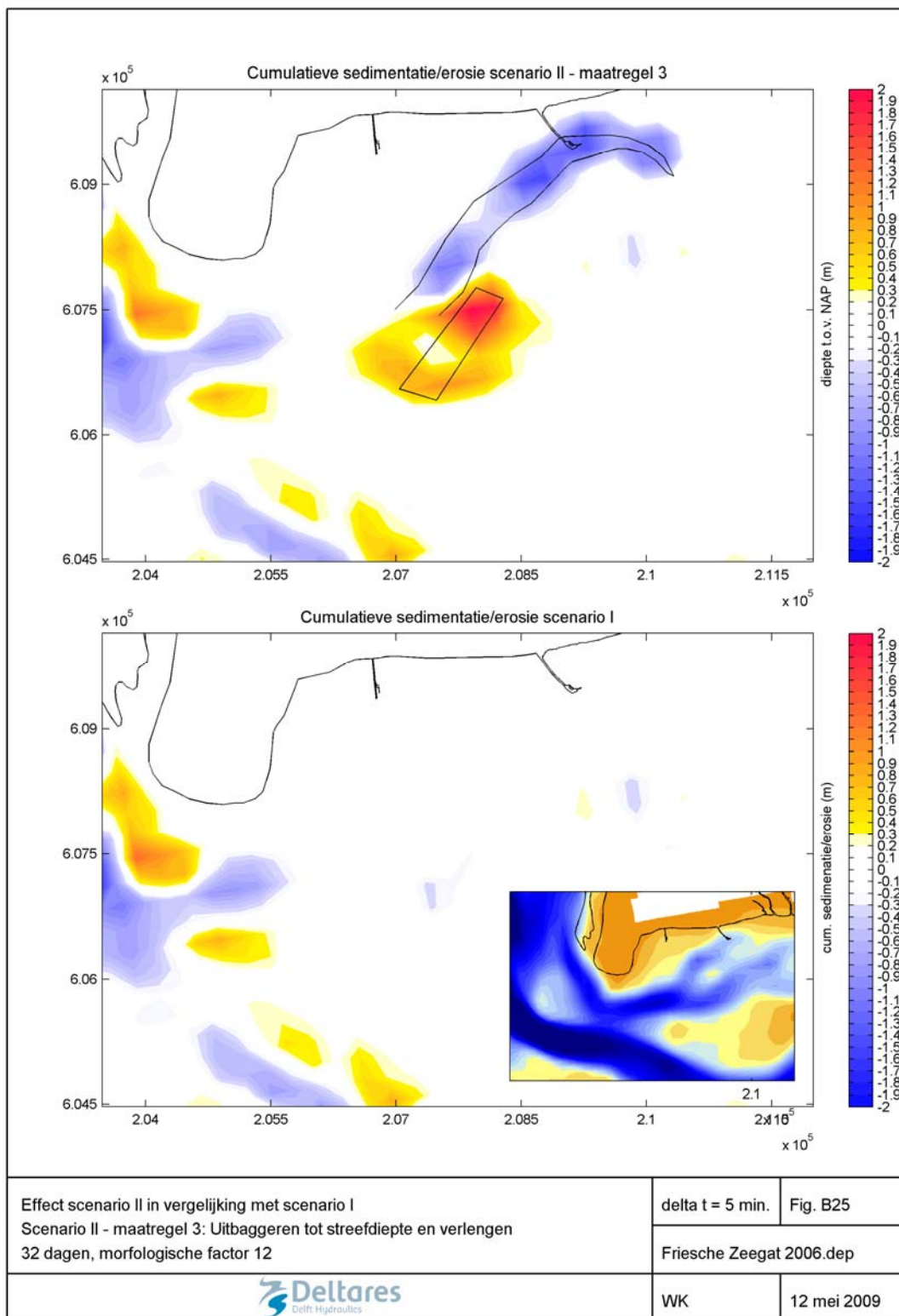


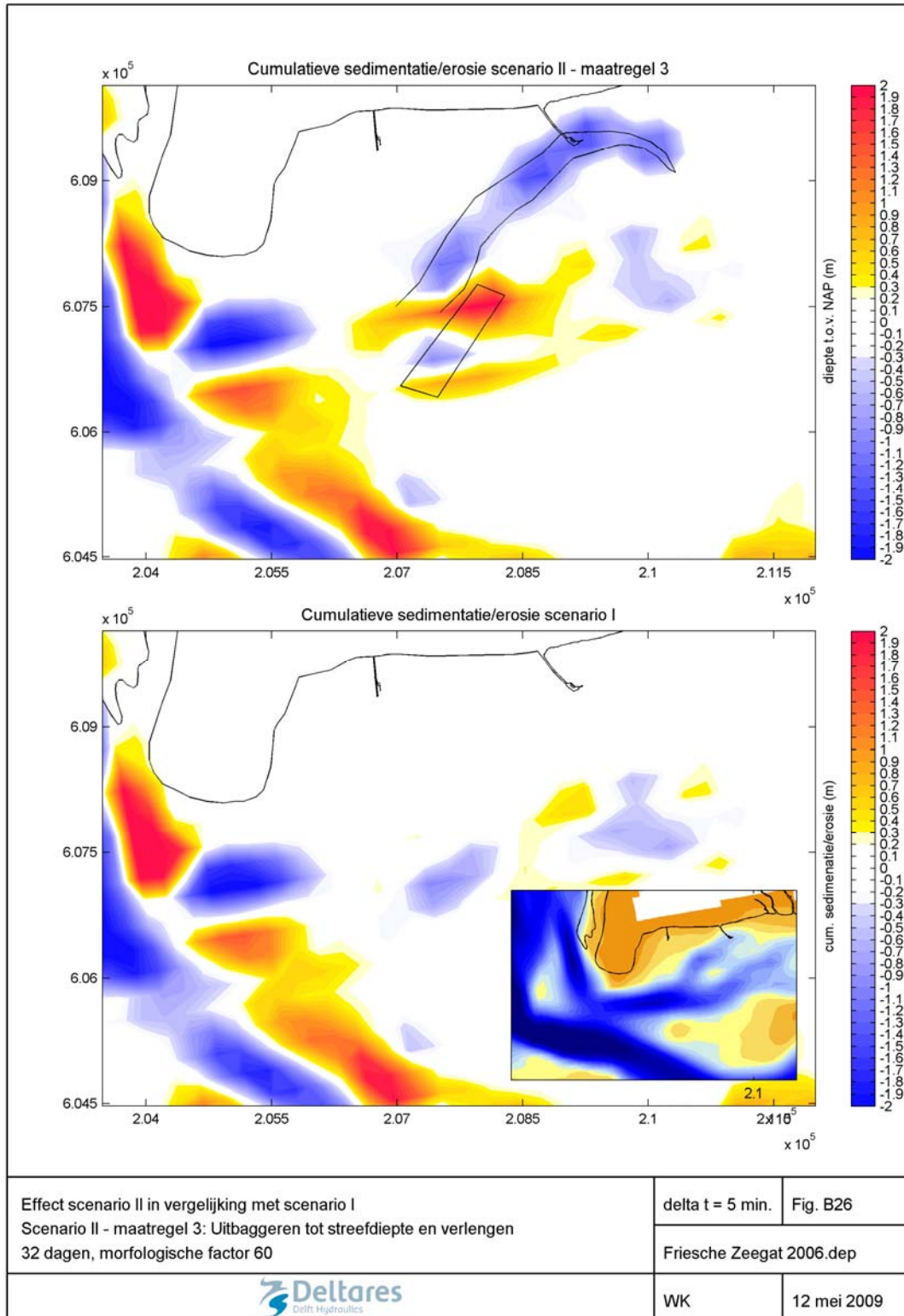


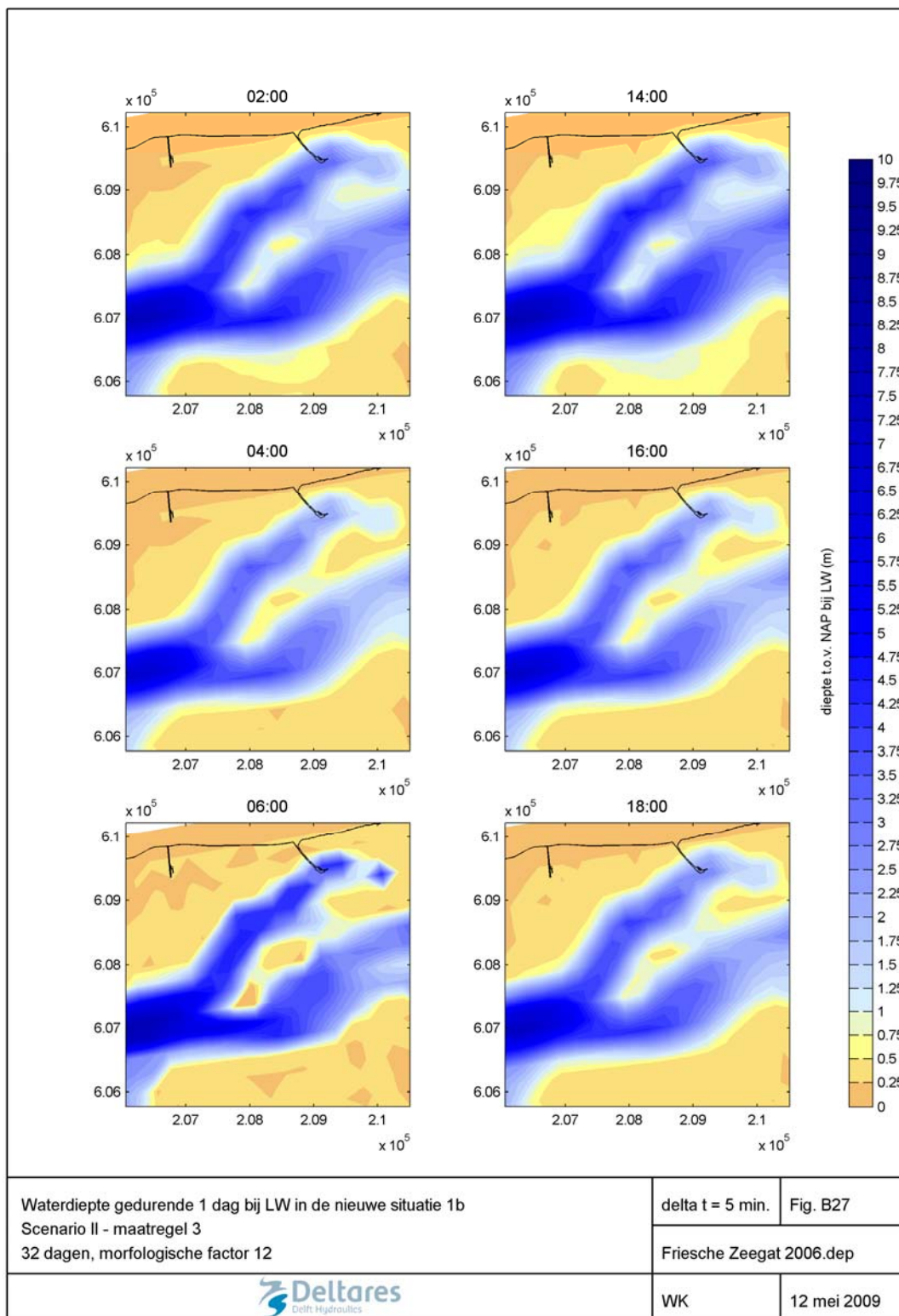


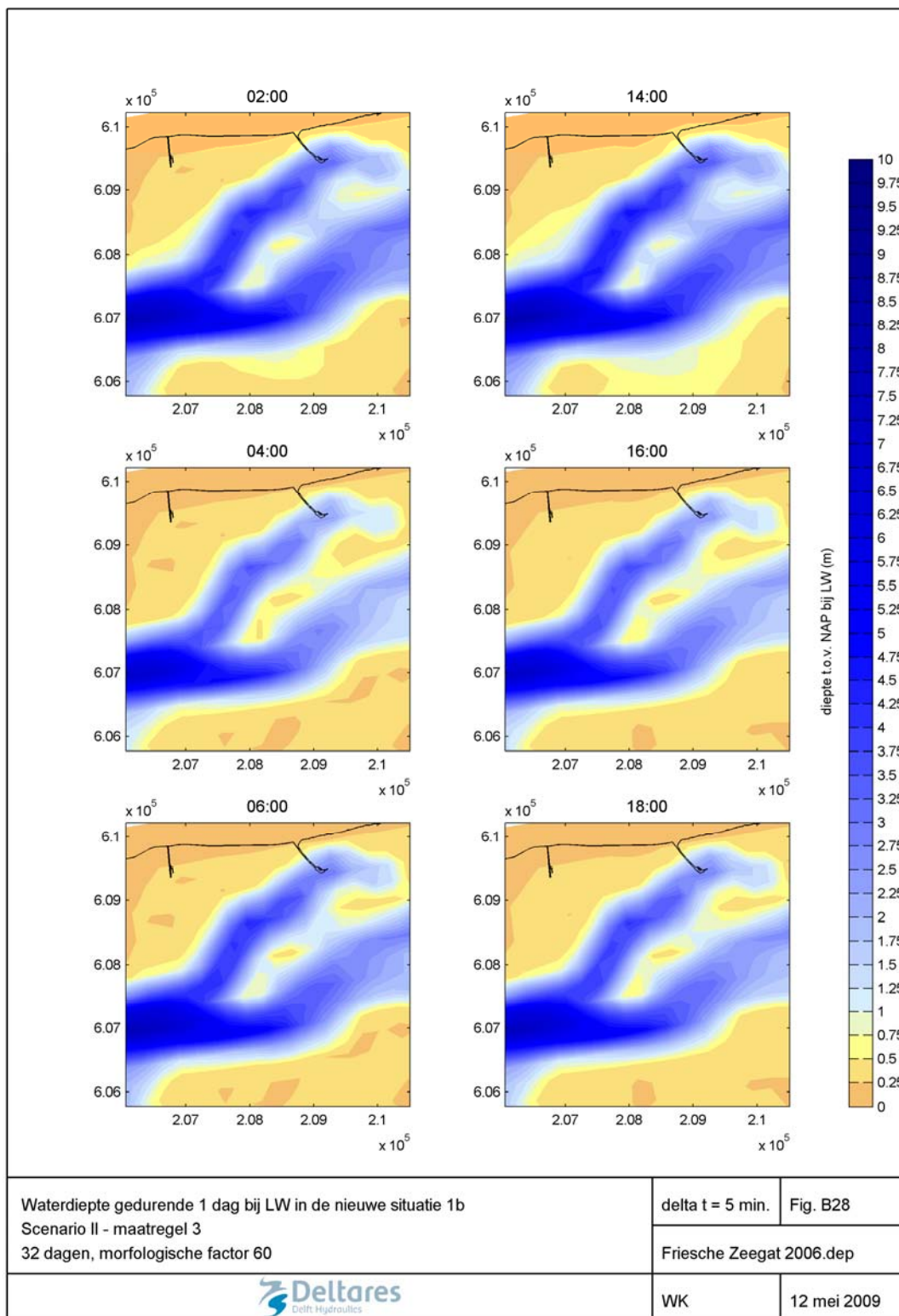


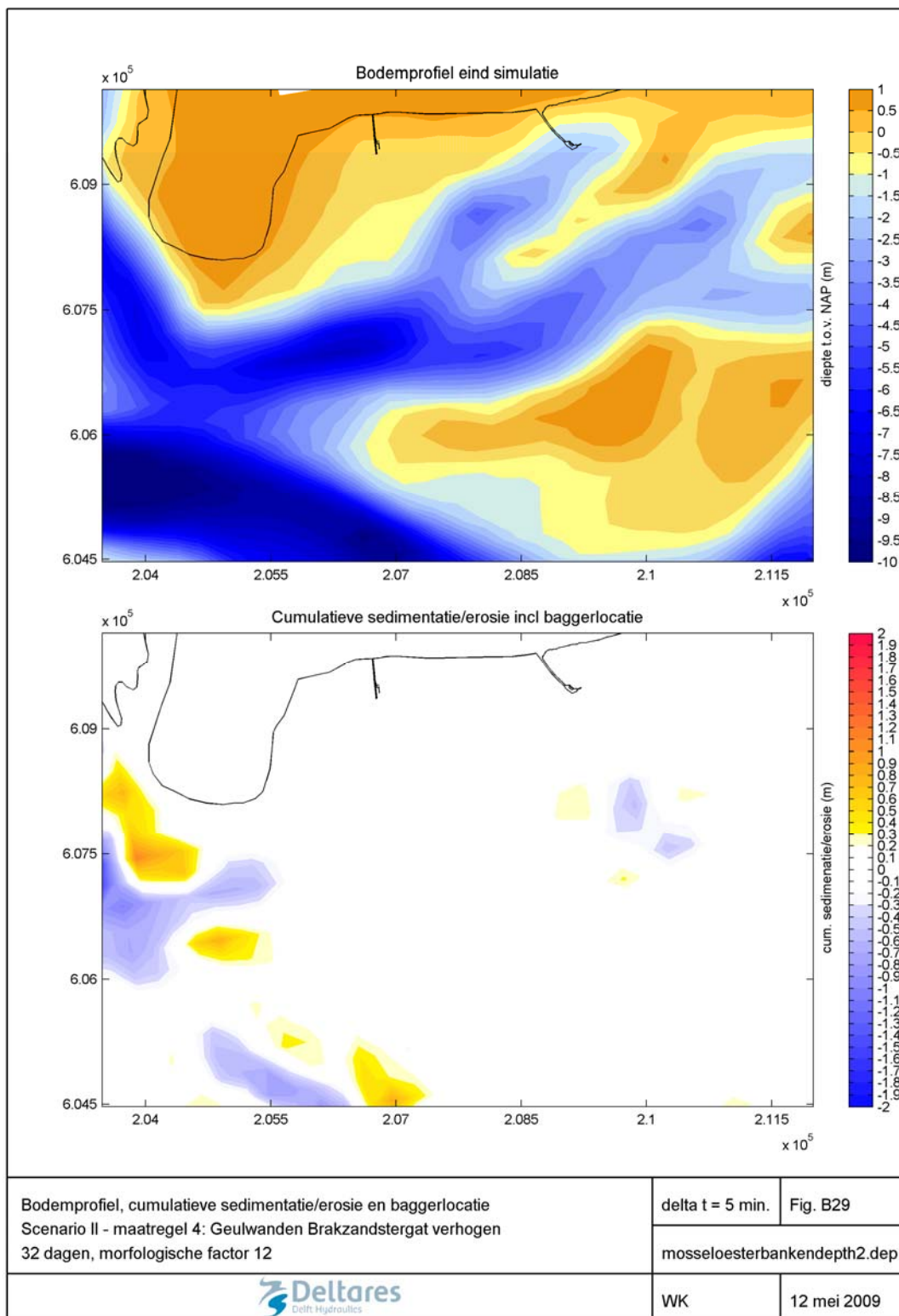


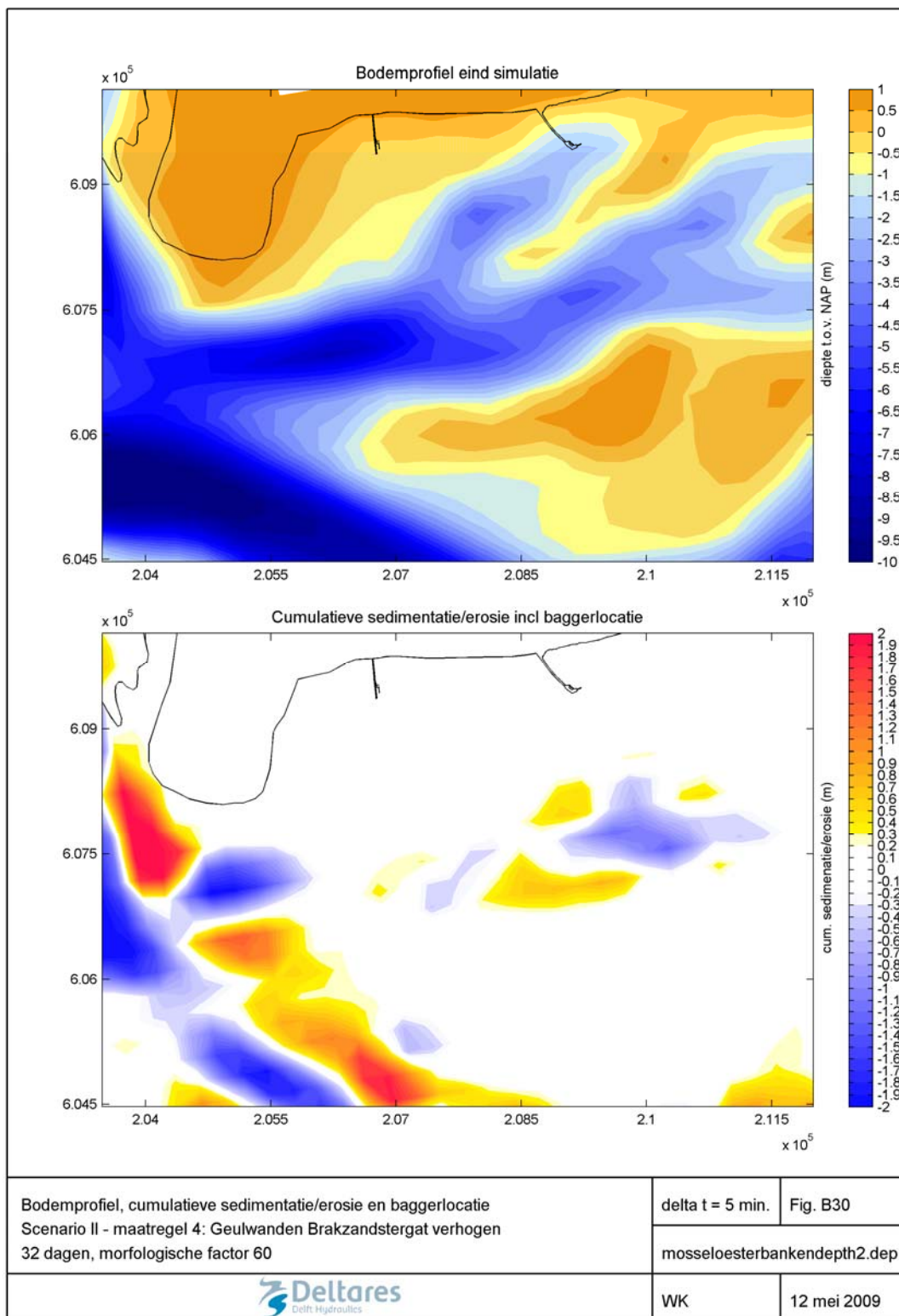


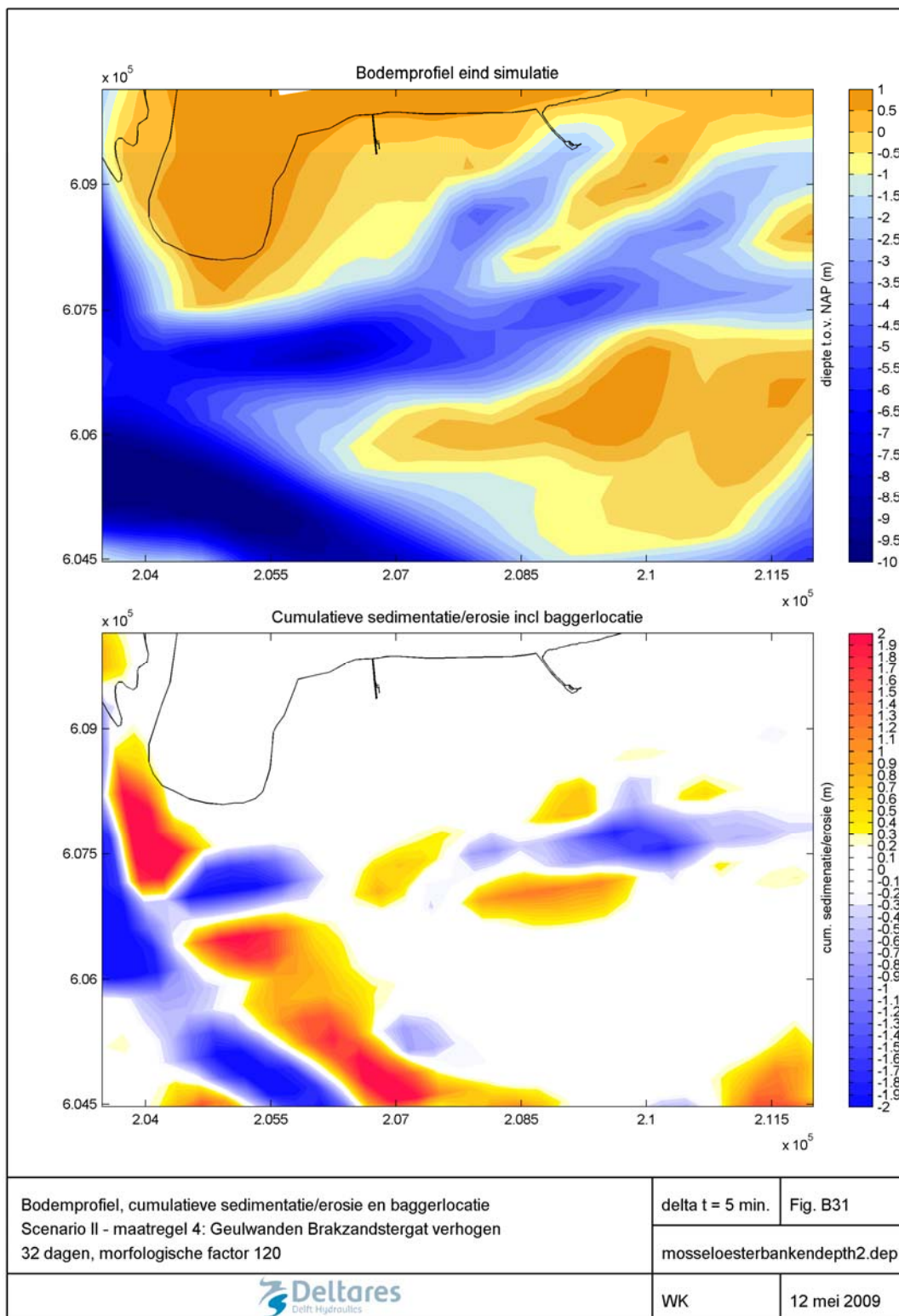


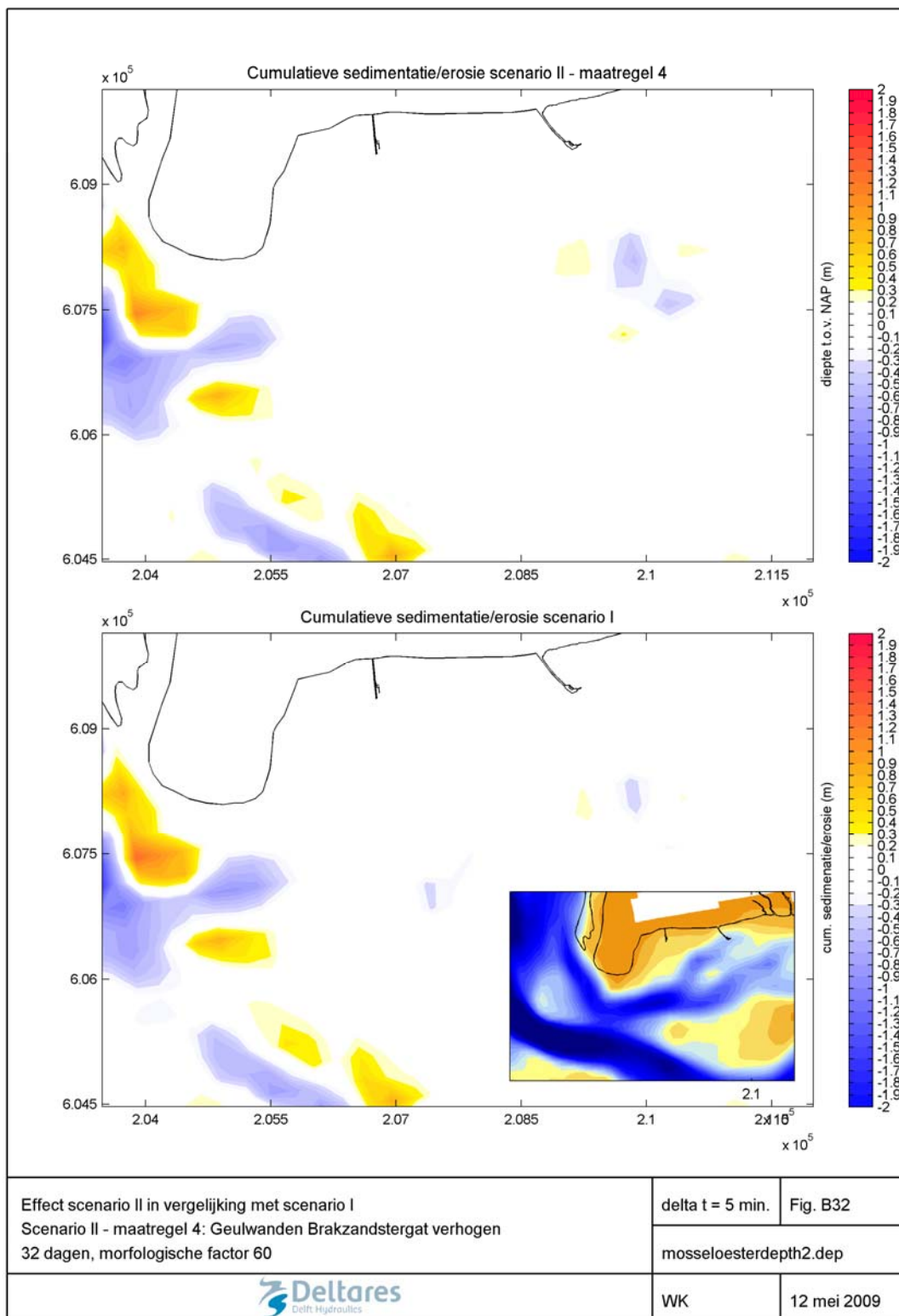


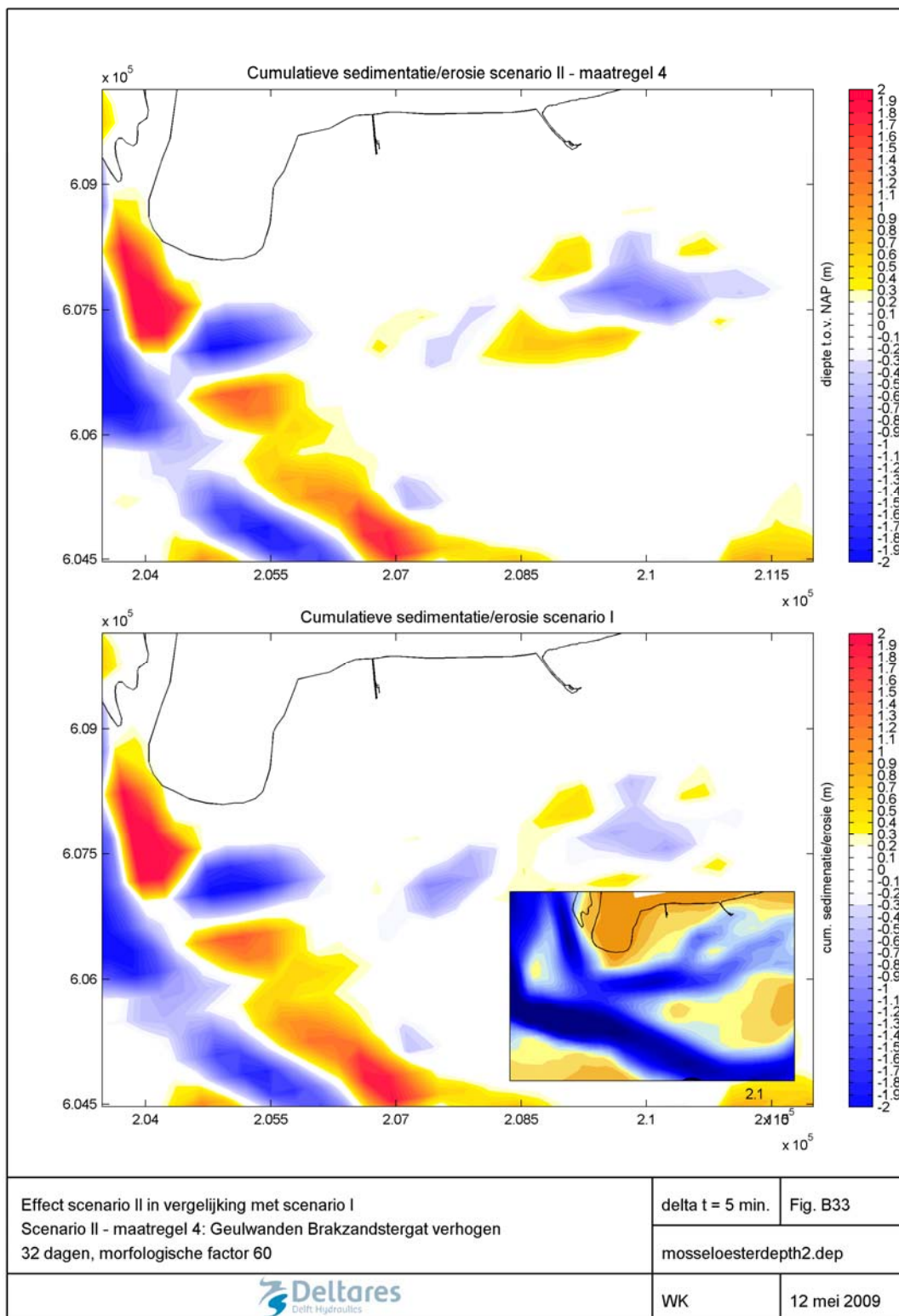


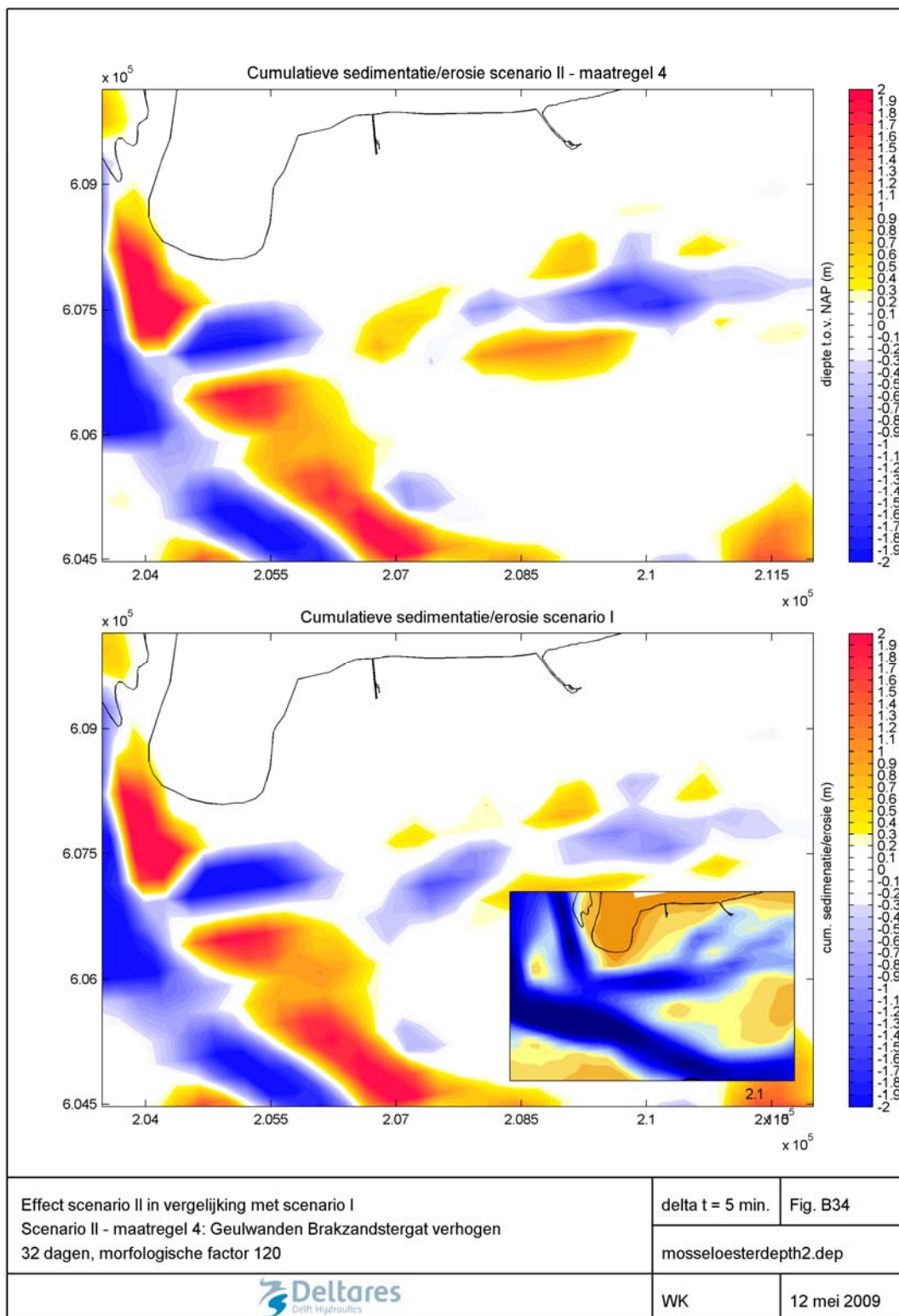


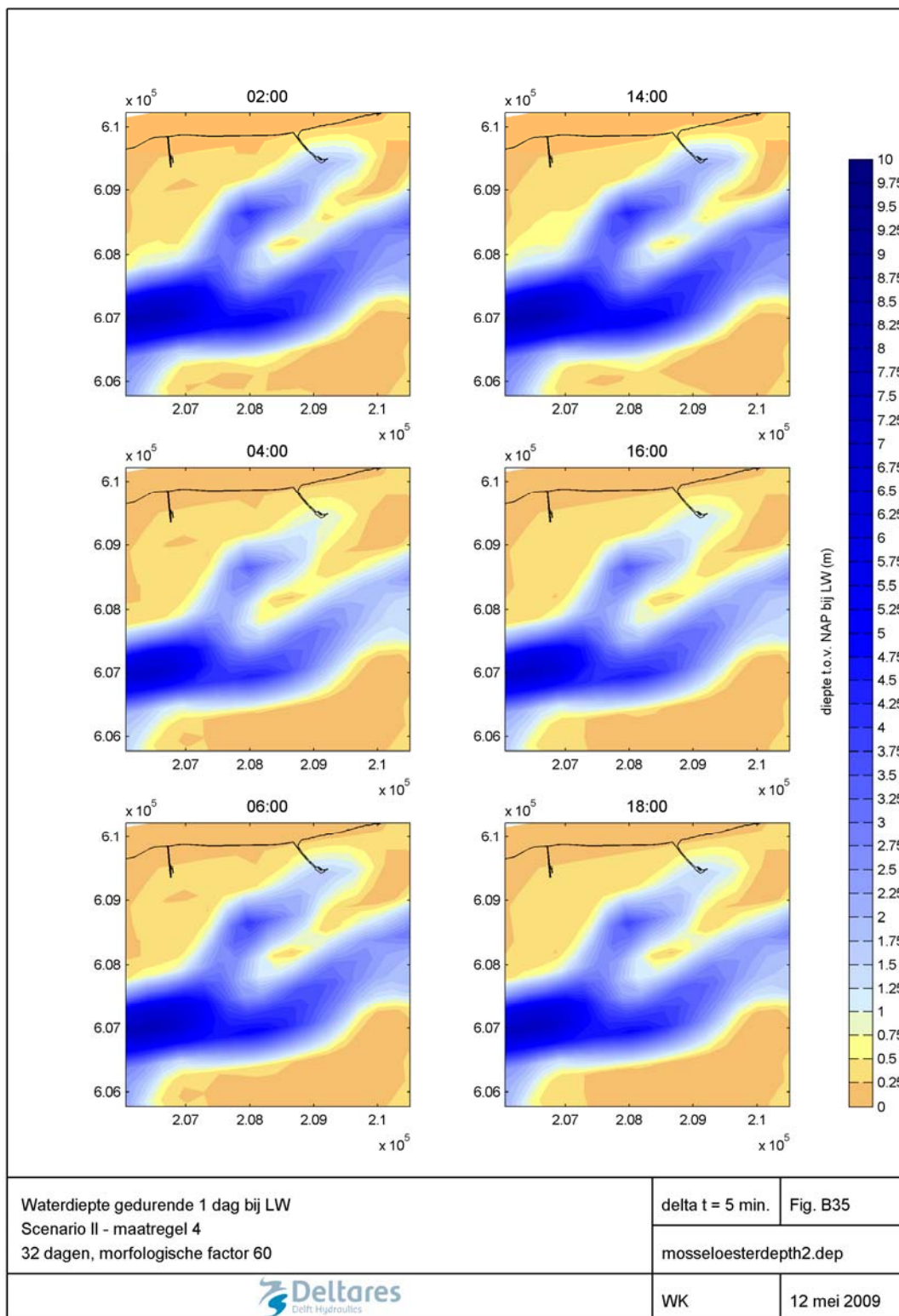


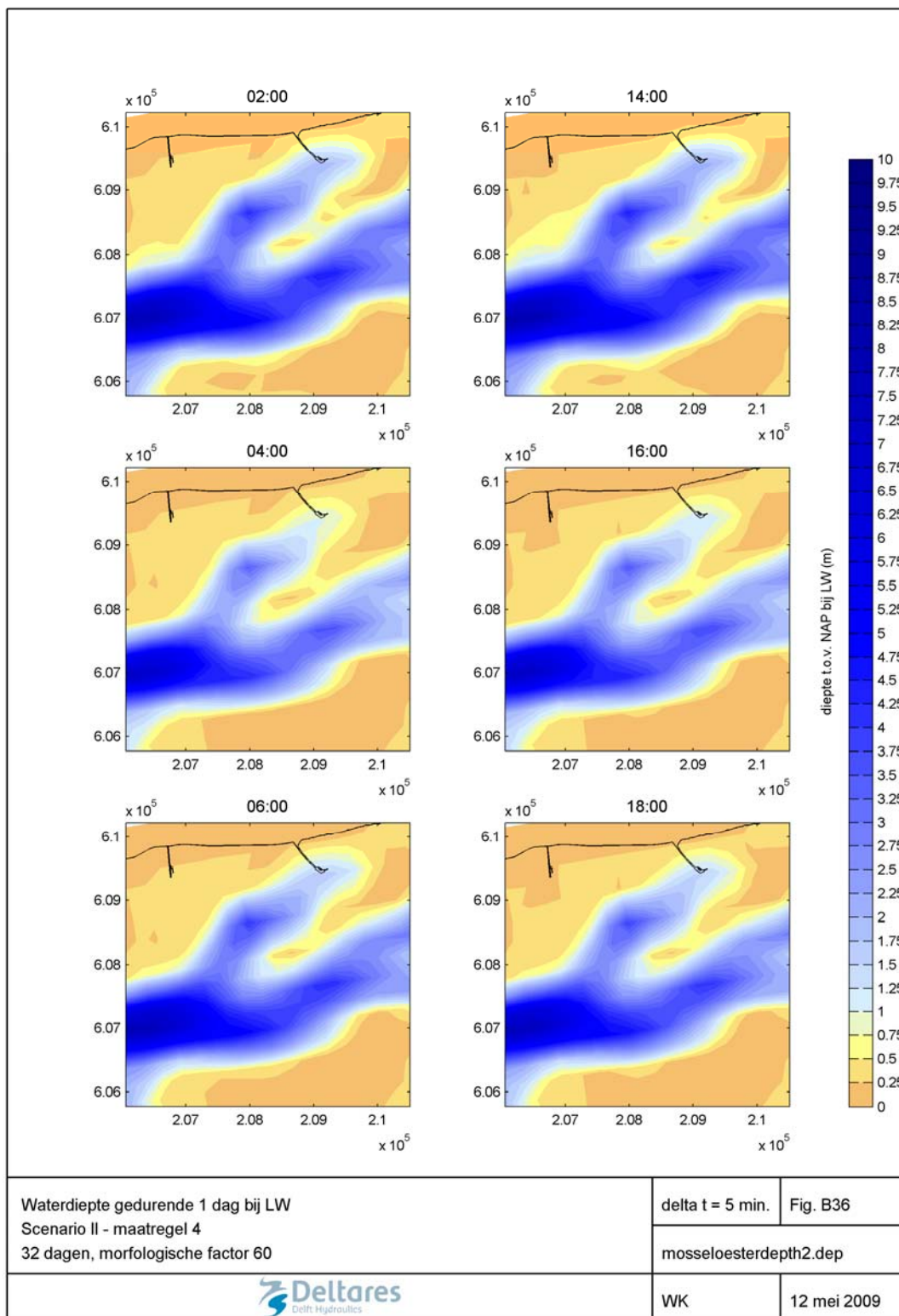


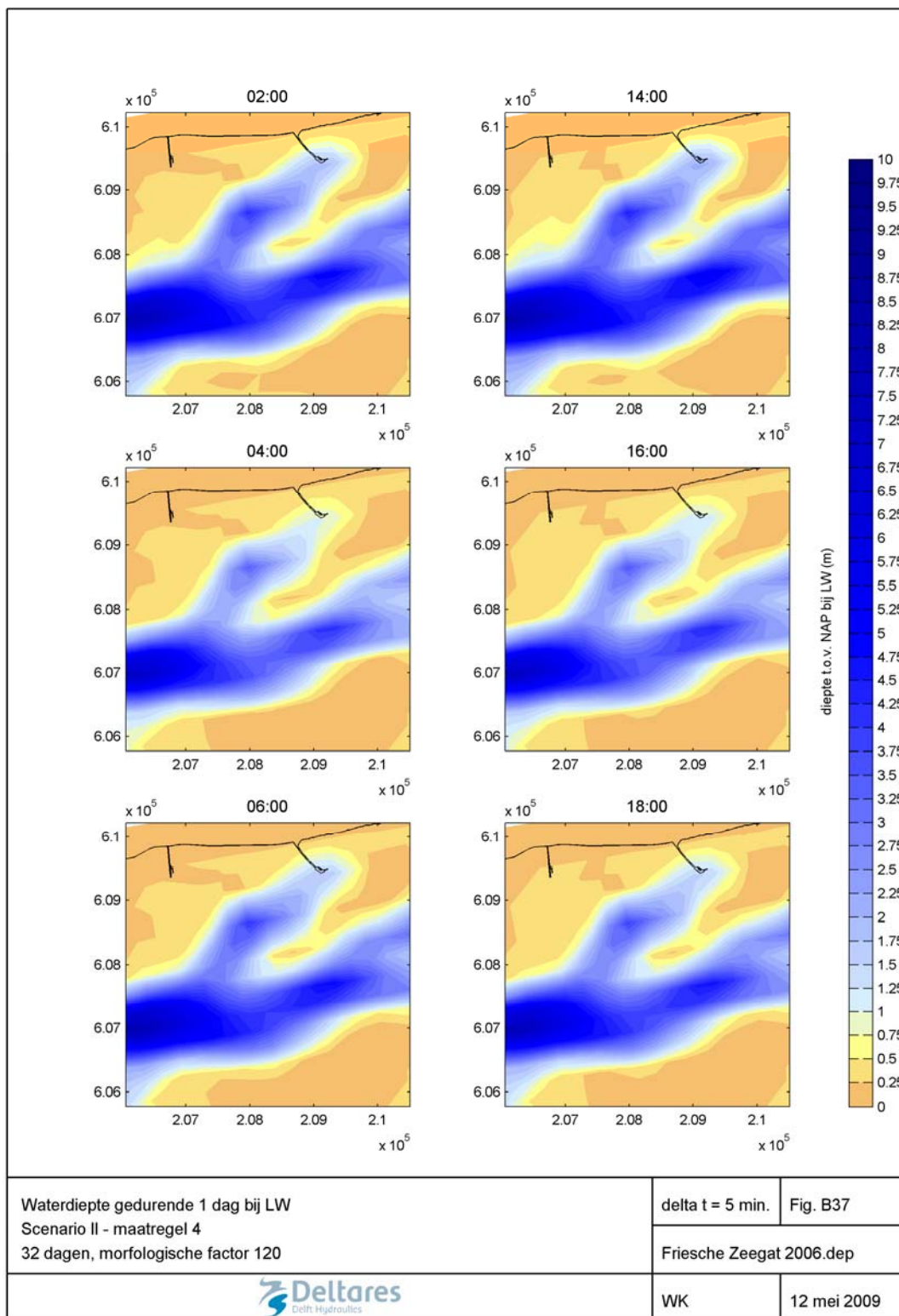


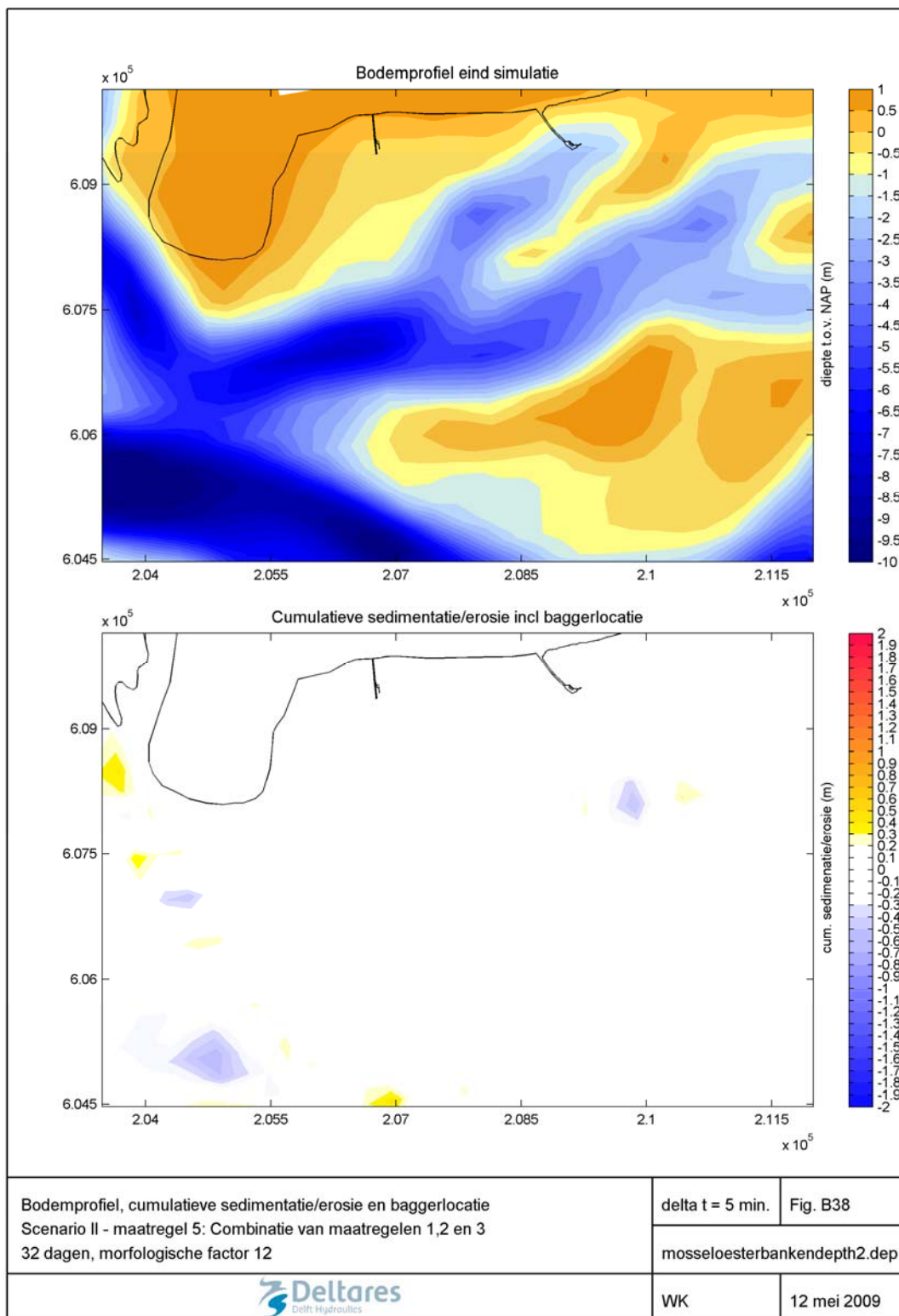


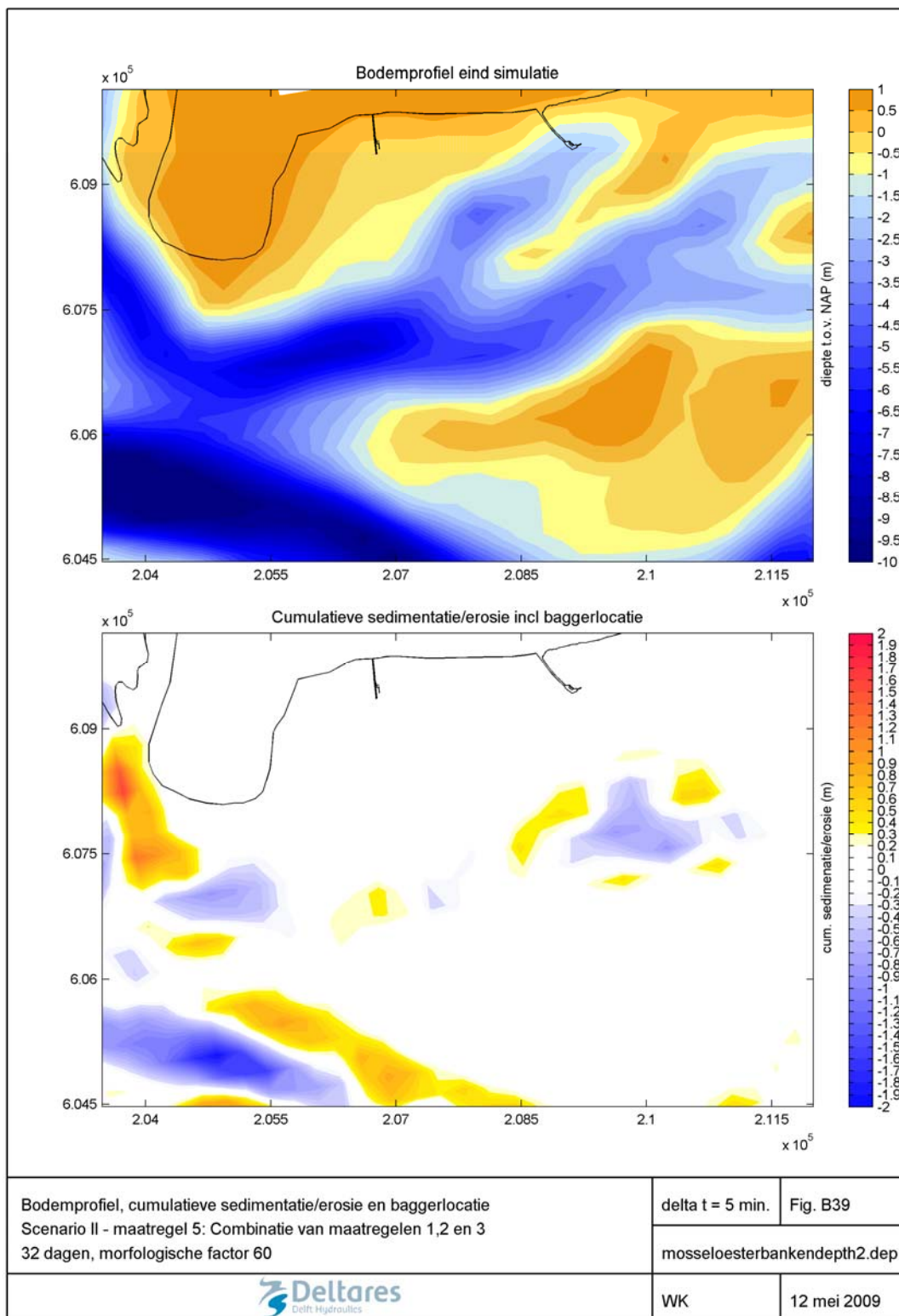


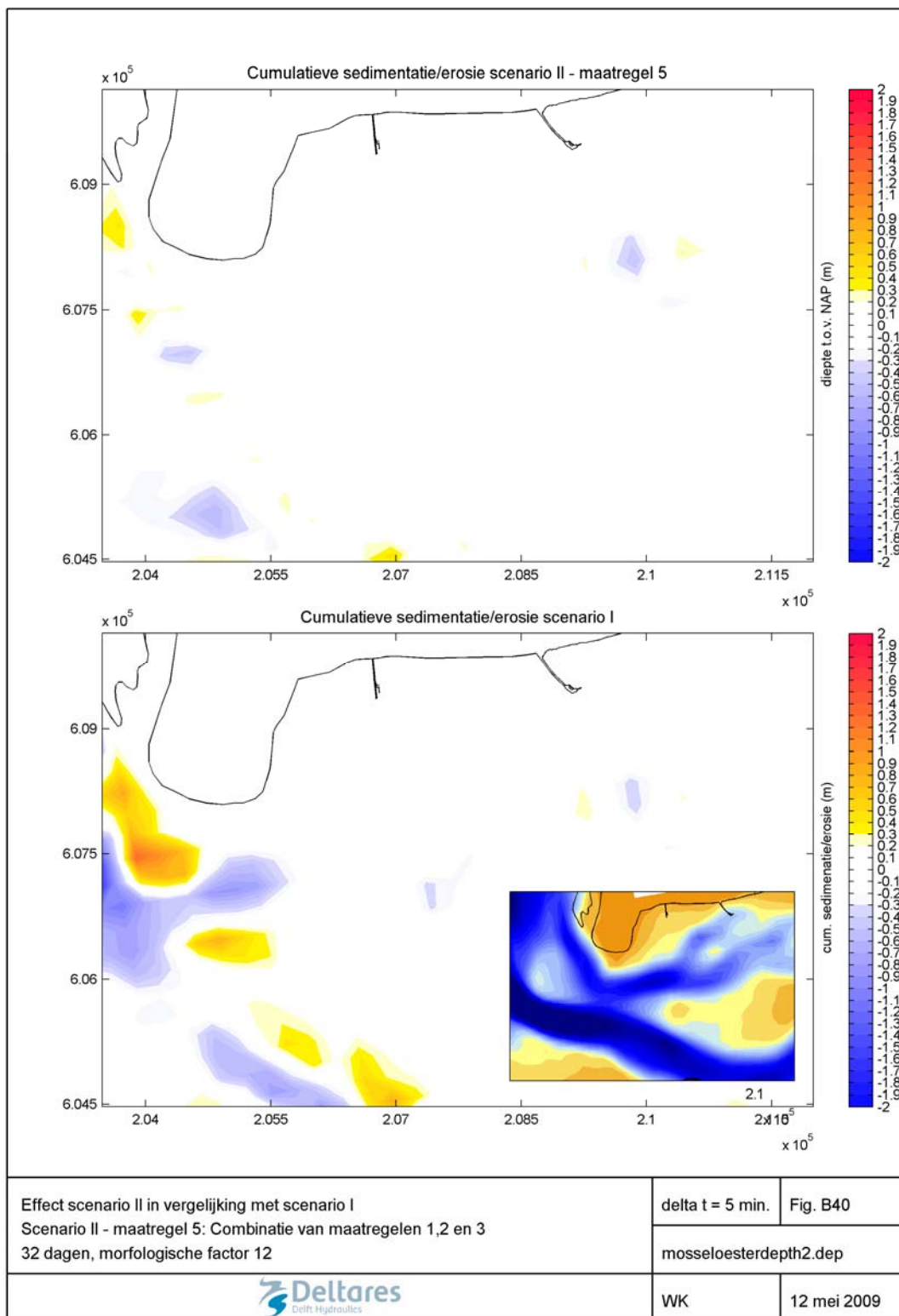


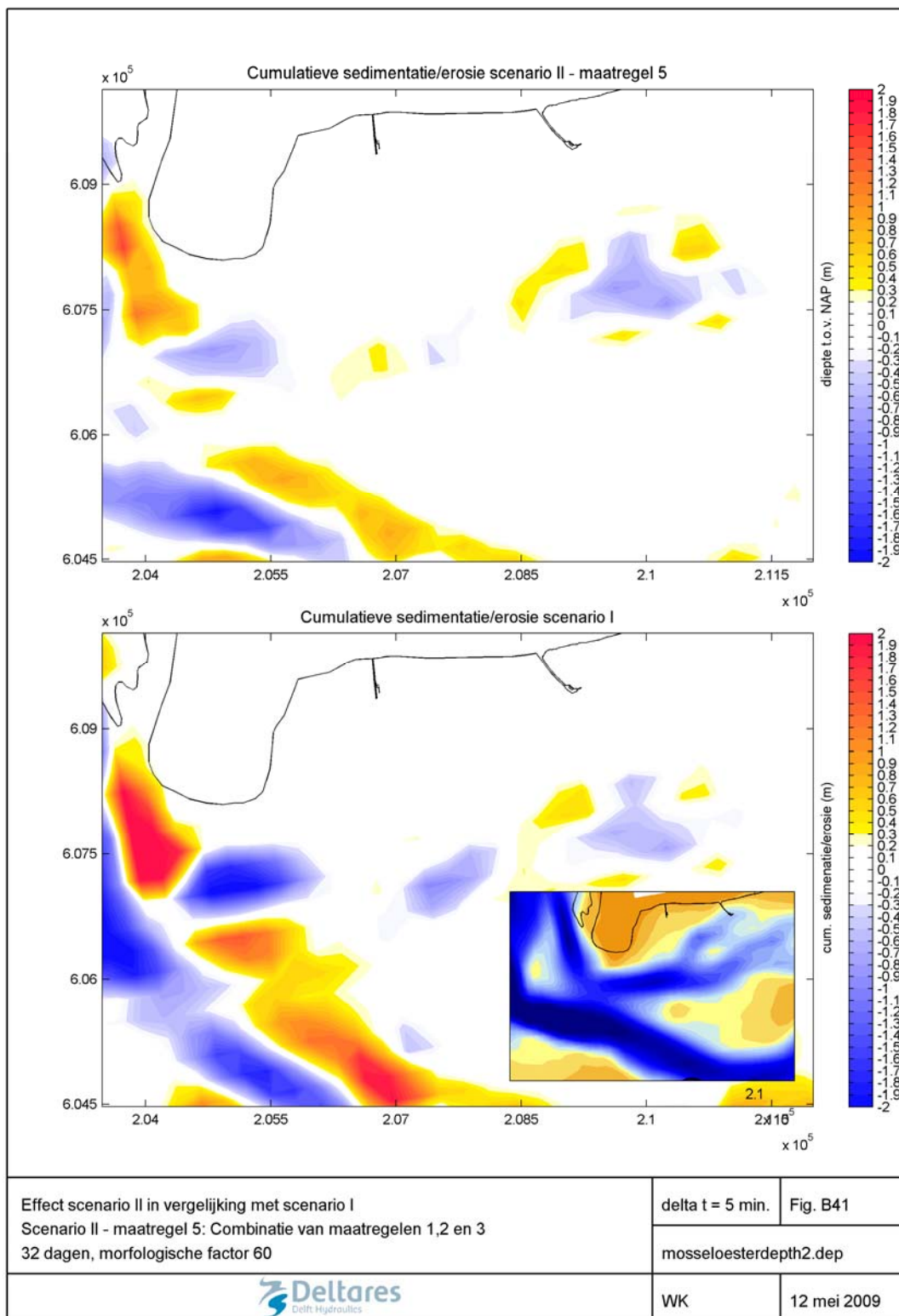


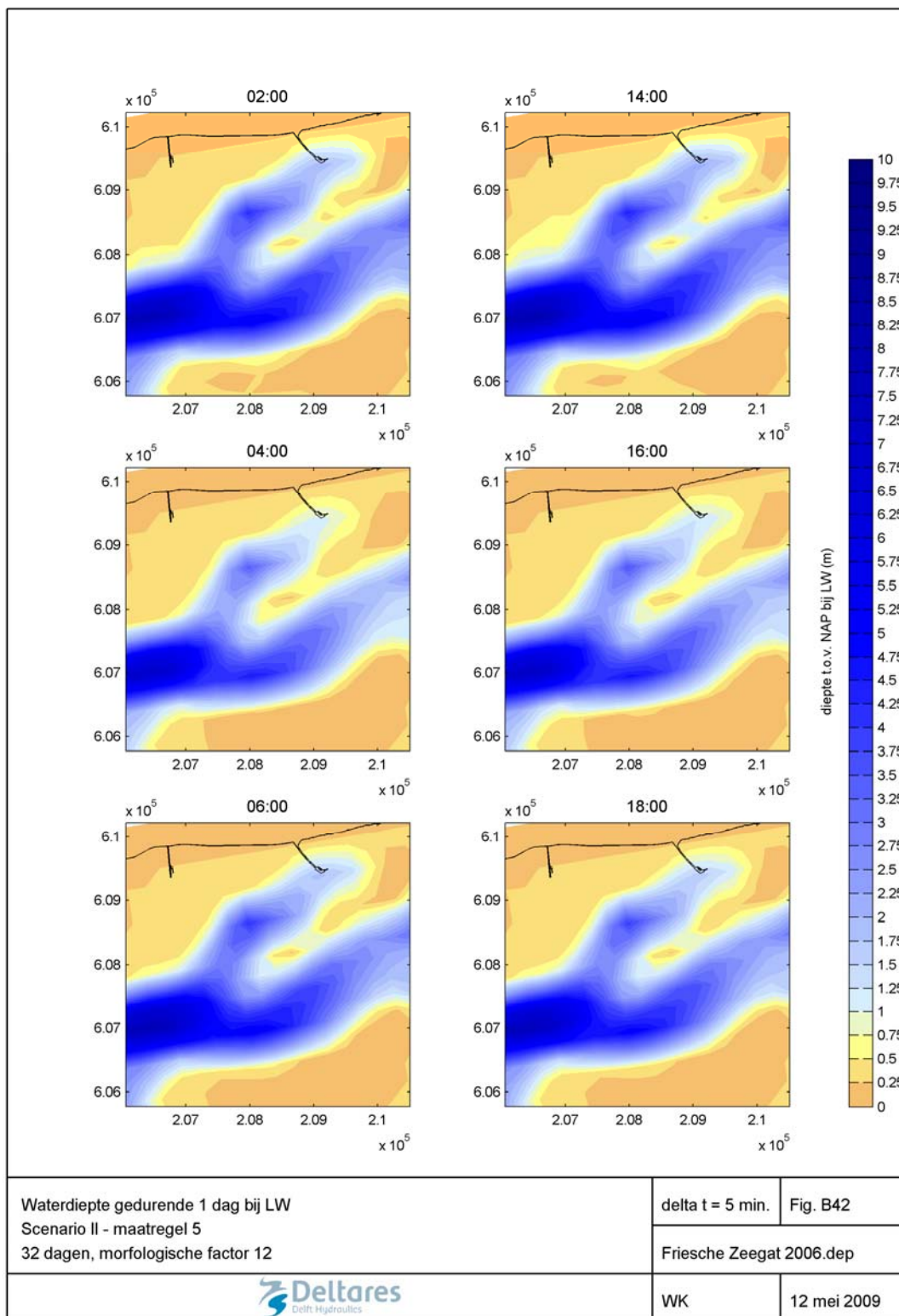


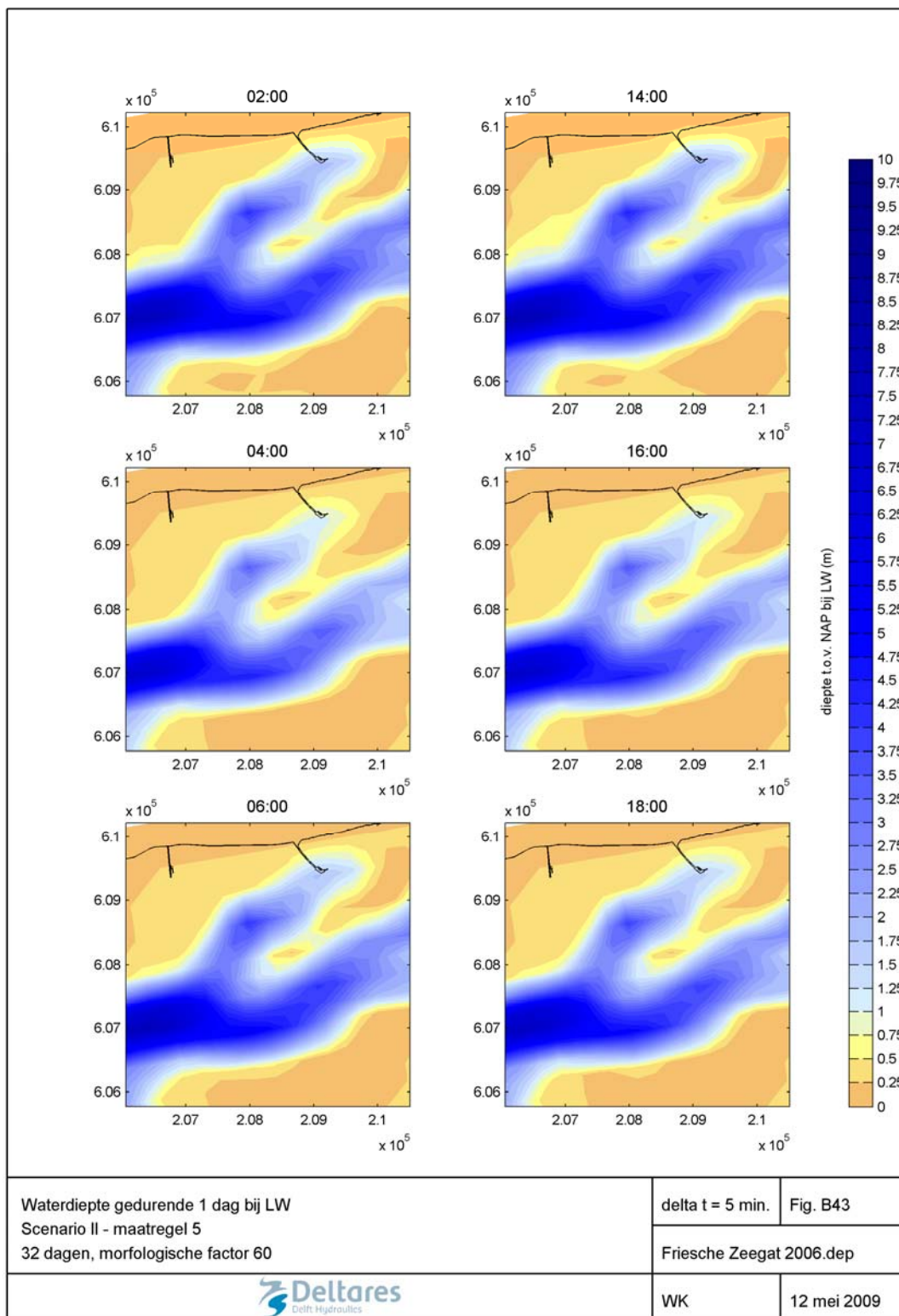












3. Scenario III

B44 - bodemprofiel scenario III, ingrepen 1a en 1b - morfologische factor 12

B45 - bodemprofiel scenario III, ingrepen 1a en 1b - morfologische factor 60

B46 - effecten ingrepen 1a en 1b - morfologische factor 12

B47 - effecten ingrepen 1a en 1b - morfologische factor 60

B48 - waterdieptes ingreep 1b - morfologische factor 12

B49 - waterdieptes ingreep 1b - morfologische factor 60

B50 - bodemprofiel scenario III, ingrepen 2a en 2b - morfologische factor 12

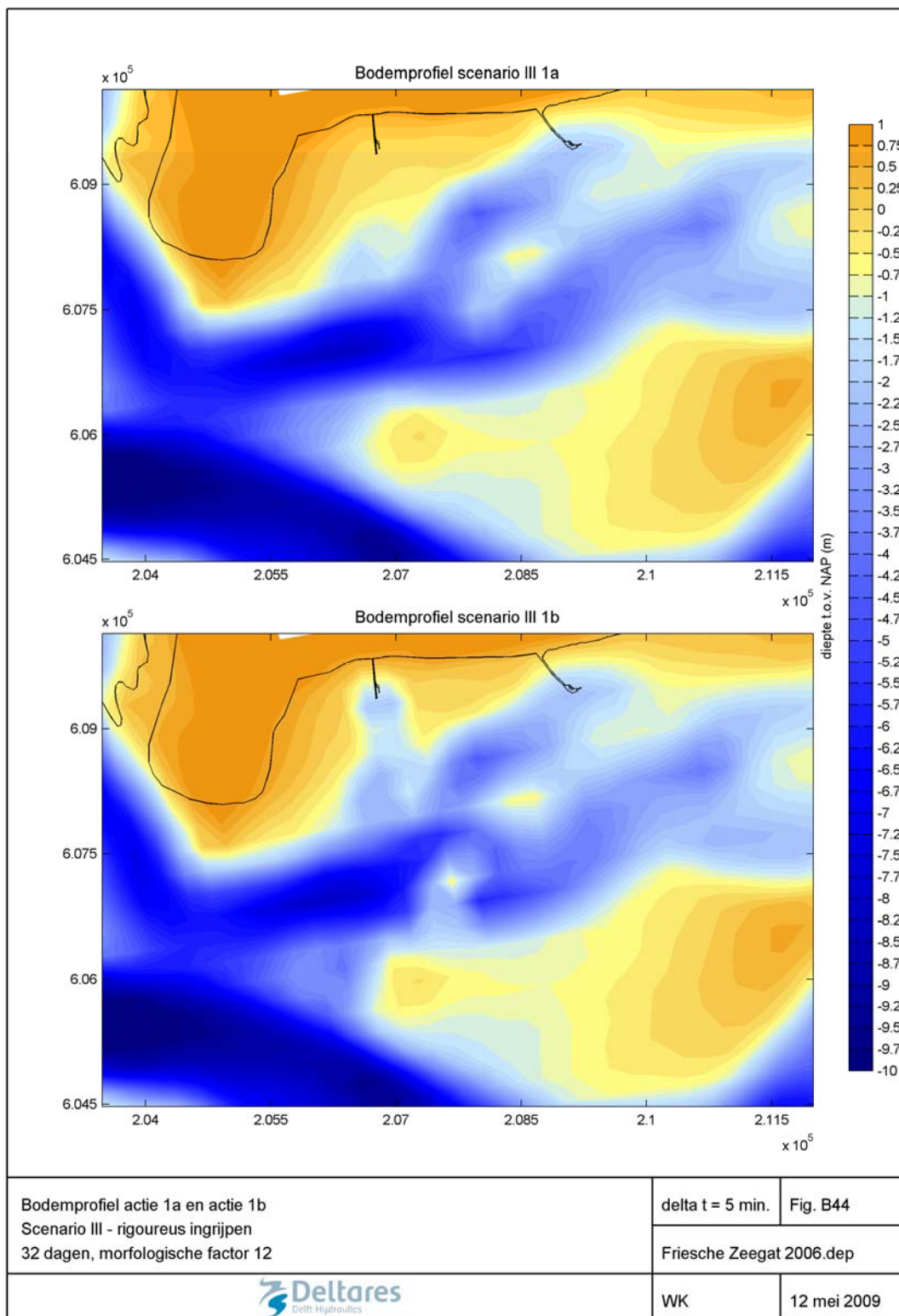
B51 - bodemprofiel scenario III, ingrepen 2a en 2b - morfologische factor 60

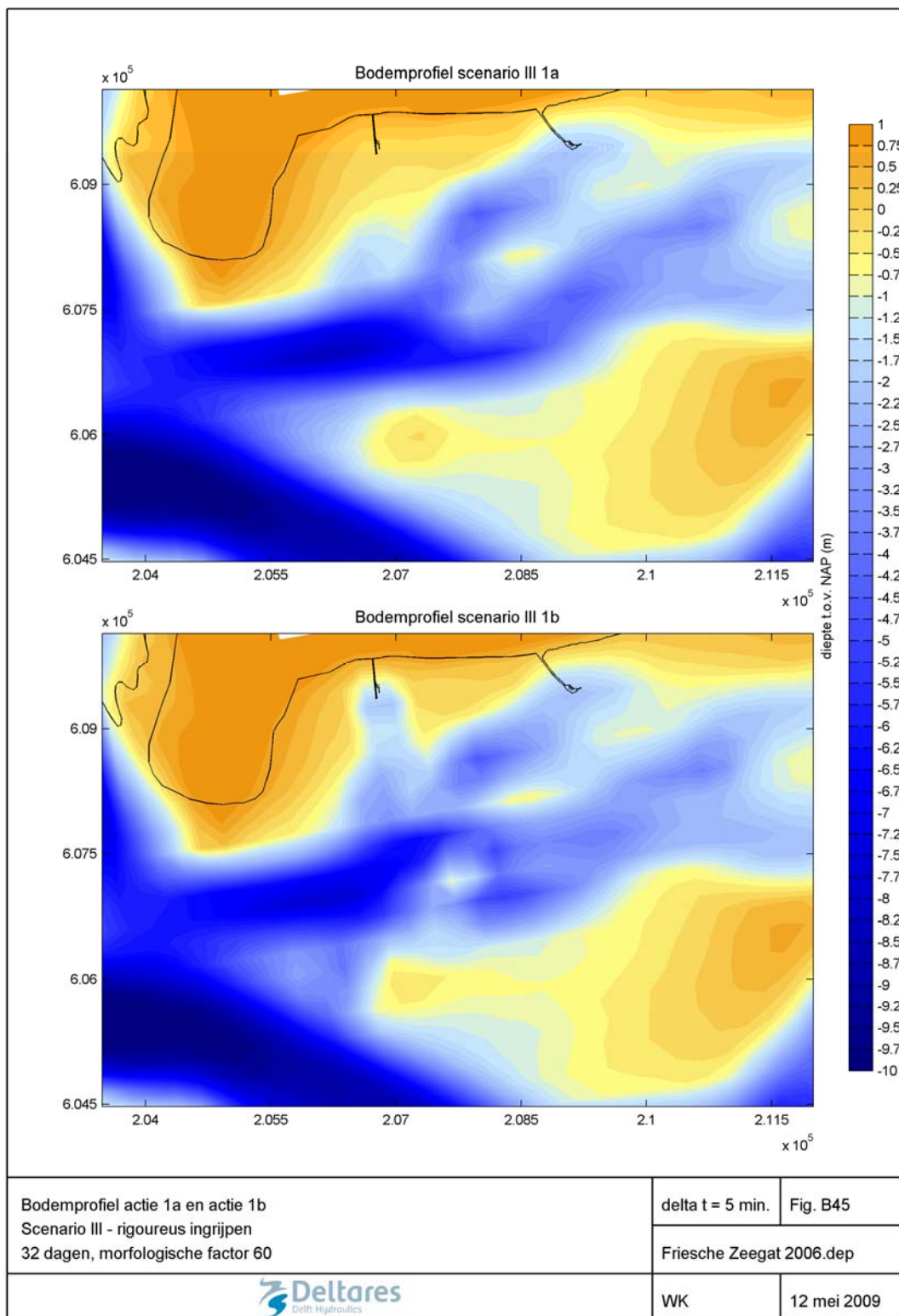
B52 - effecten ingrepen 2a en 2b - morfologische factor 12

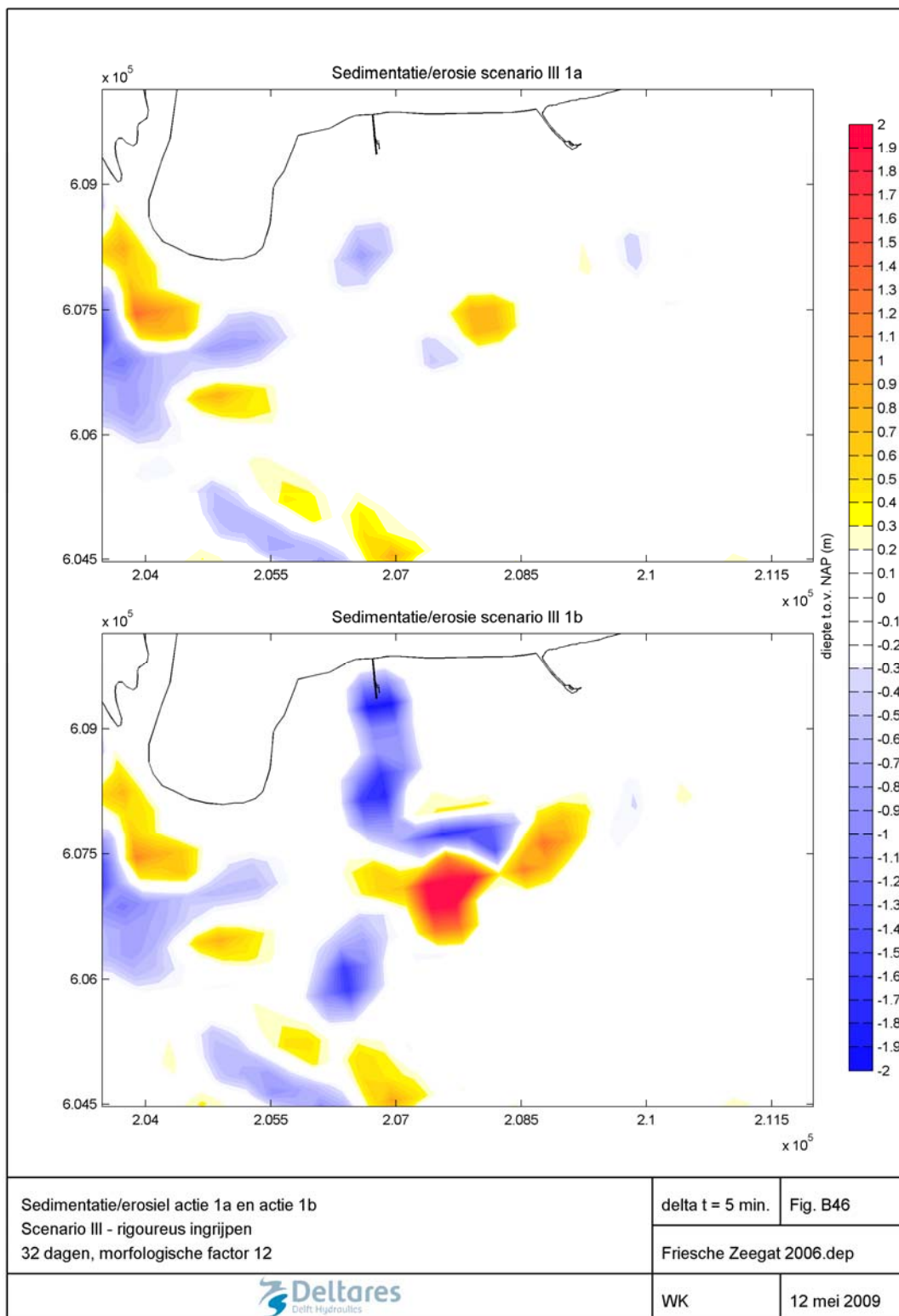
B53 - effecten ingrepen 2a en 2b - morfologische factor 60

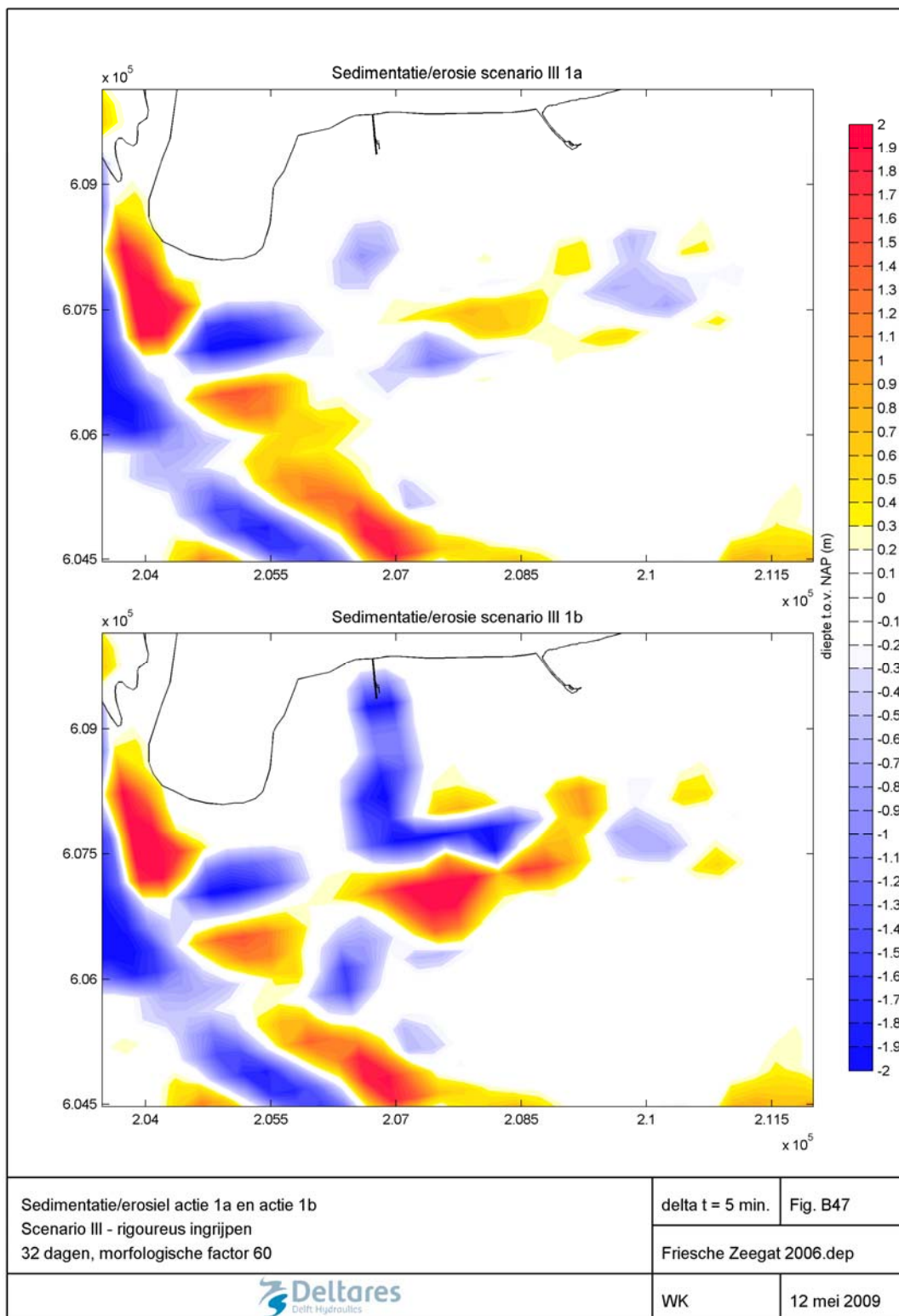
B54 - waterdieptes ingreep 2a - morfologische factor 12

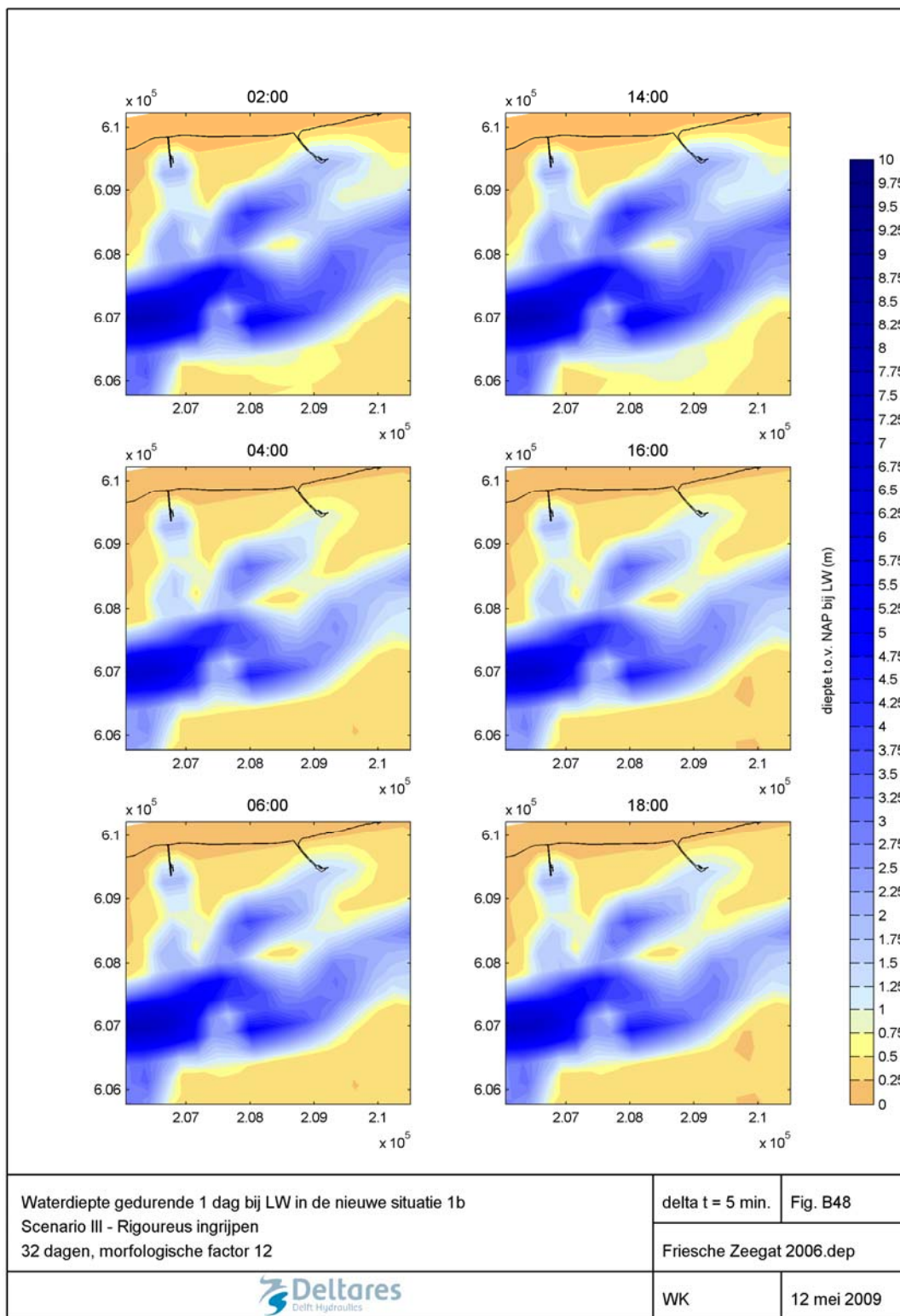
B55 - waterdieptes ingreep 2a - morfologische factor 60

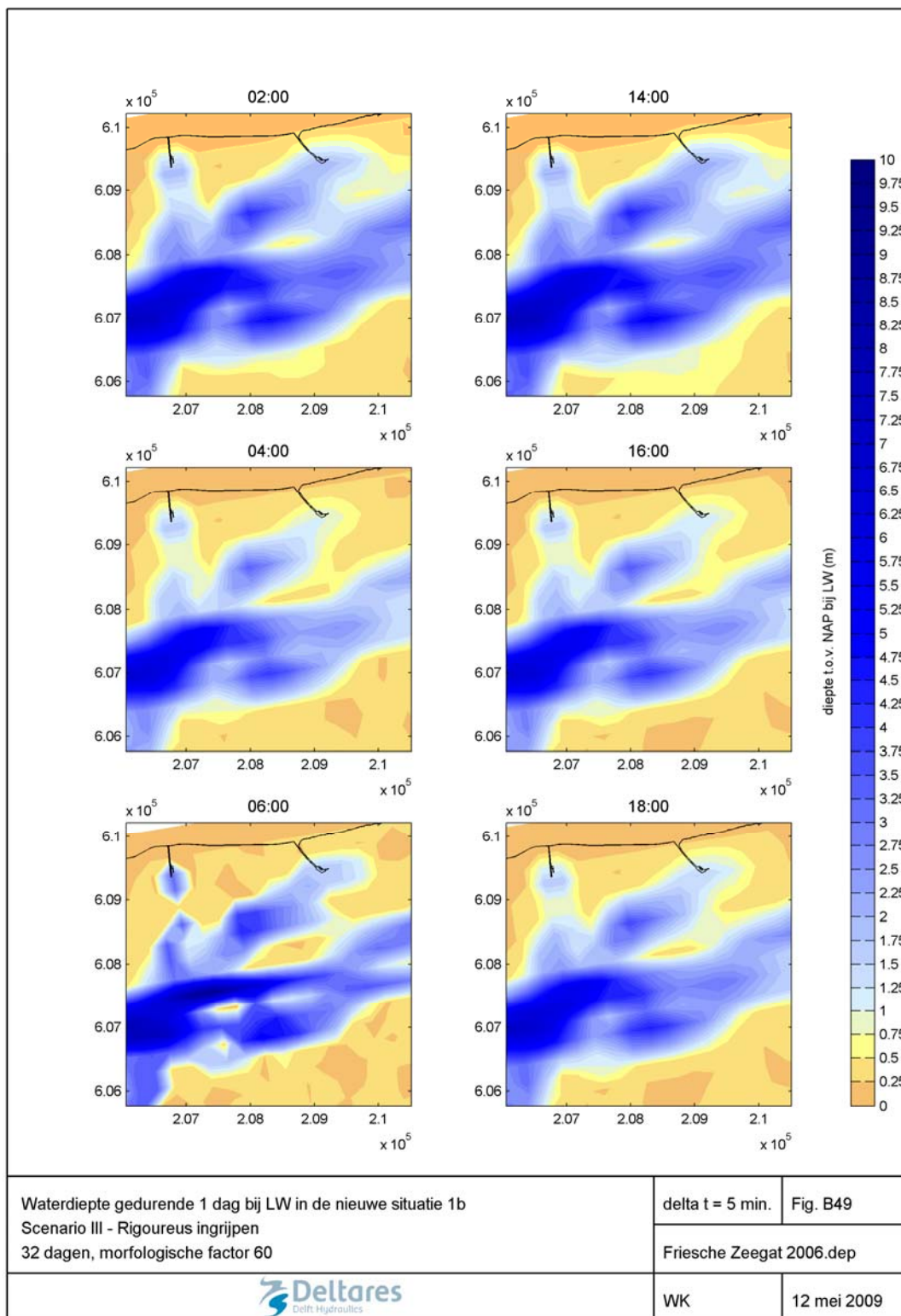


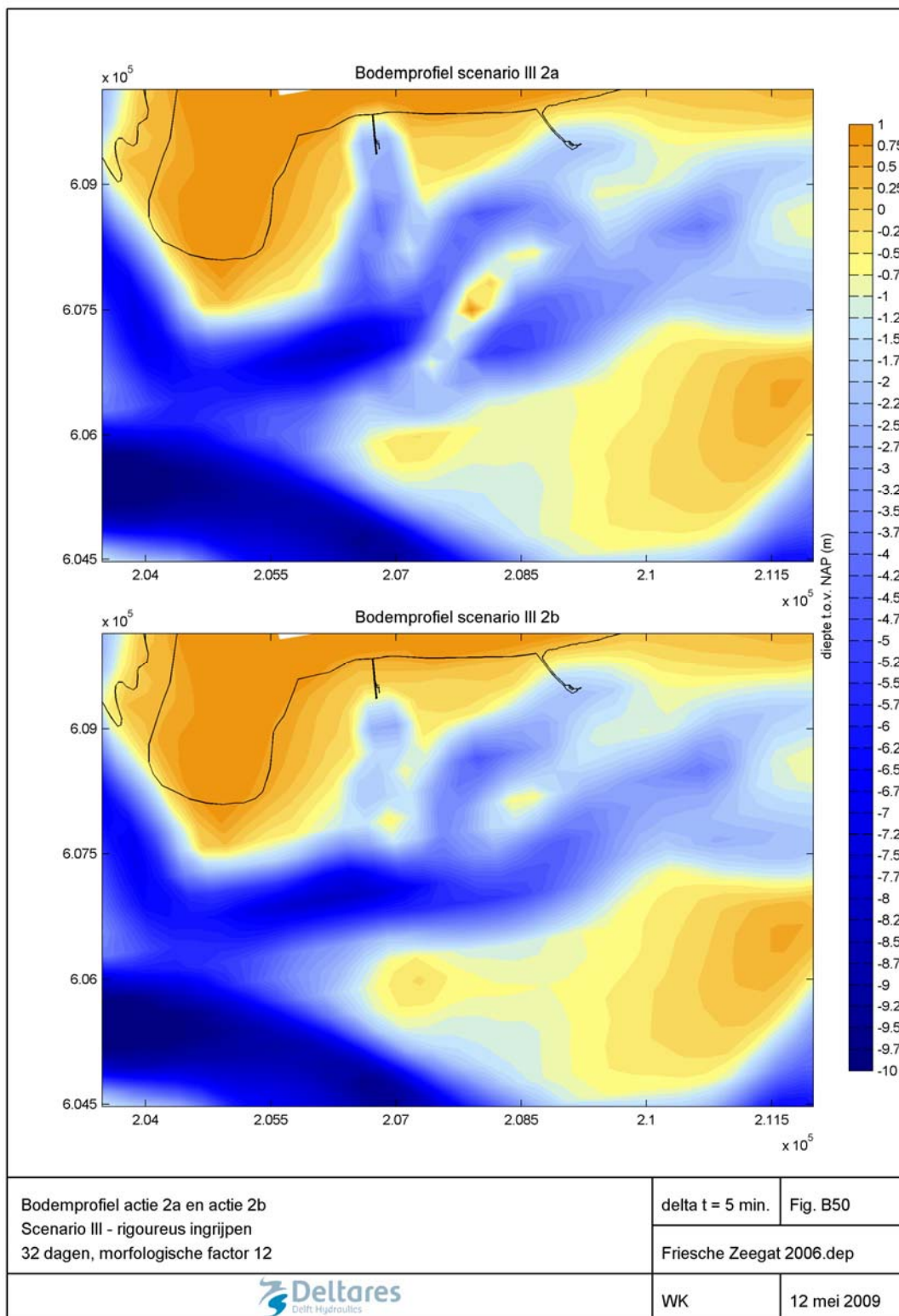


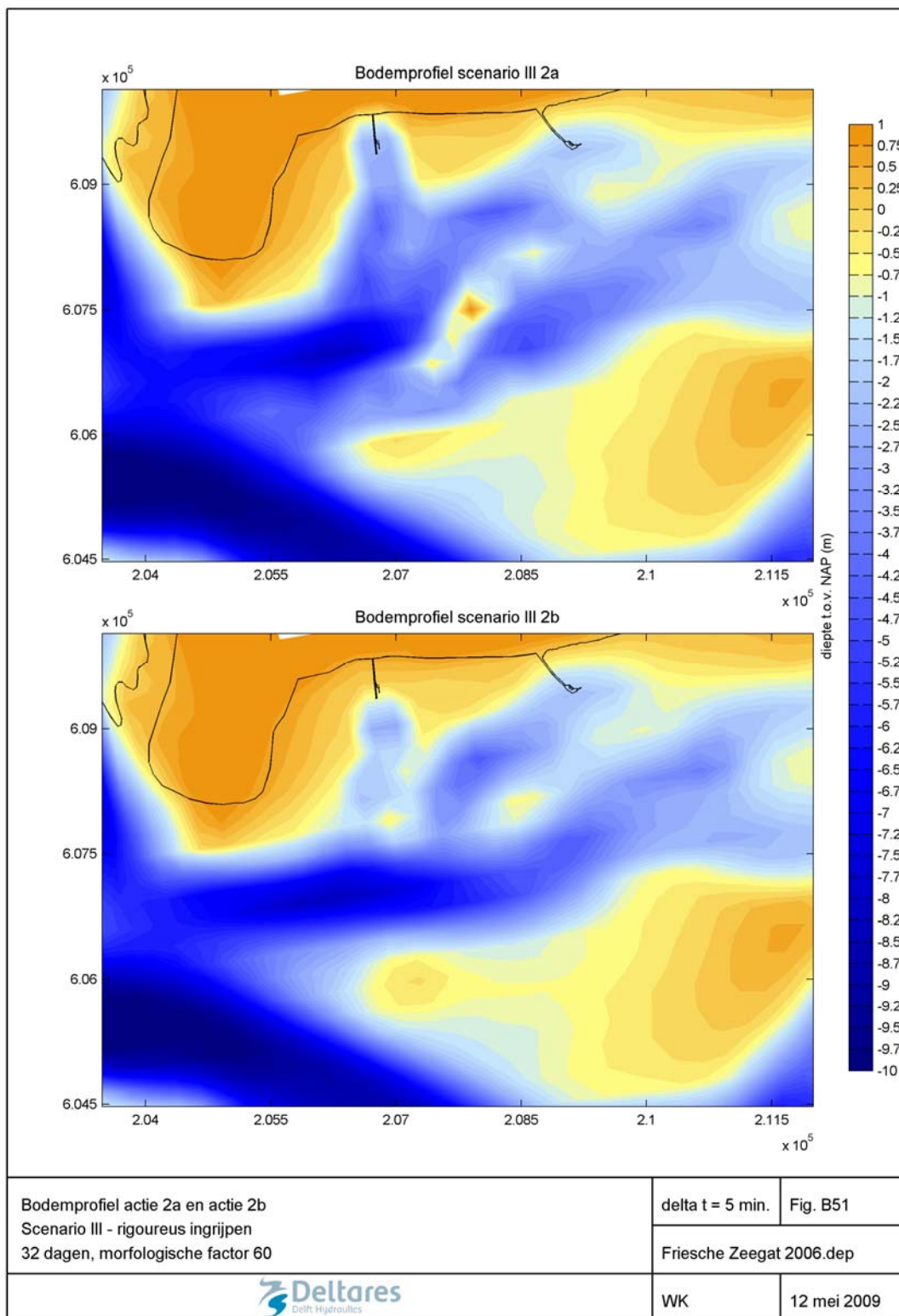


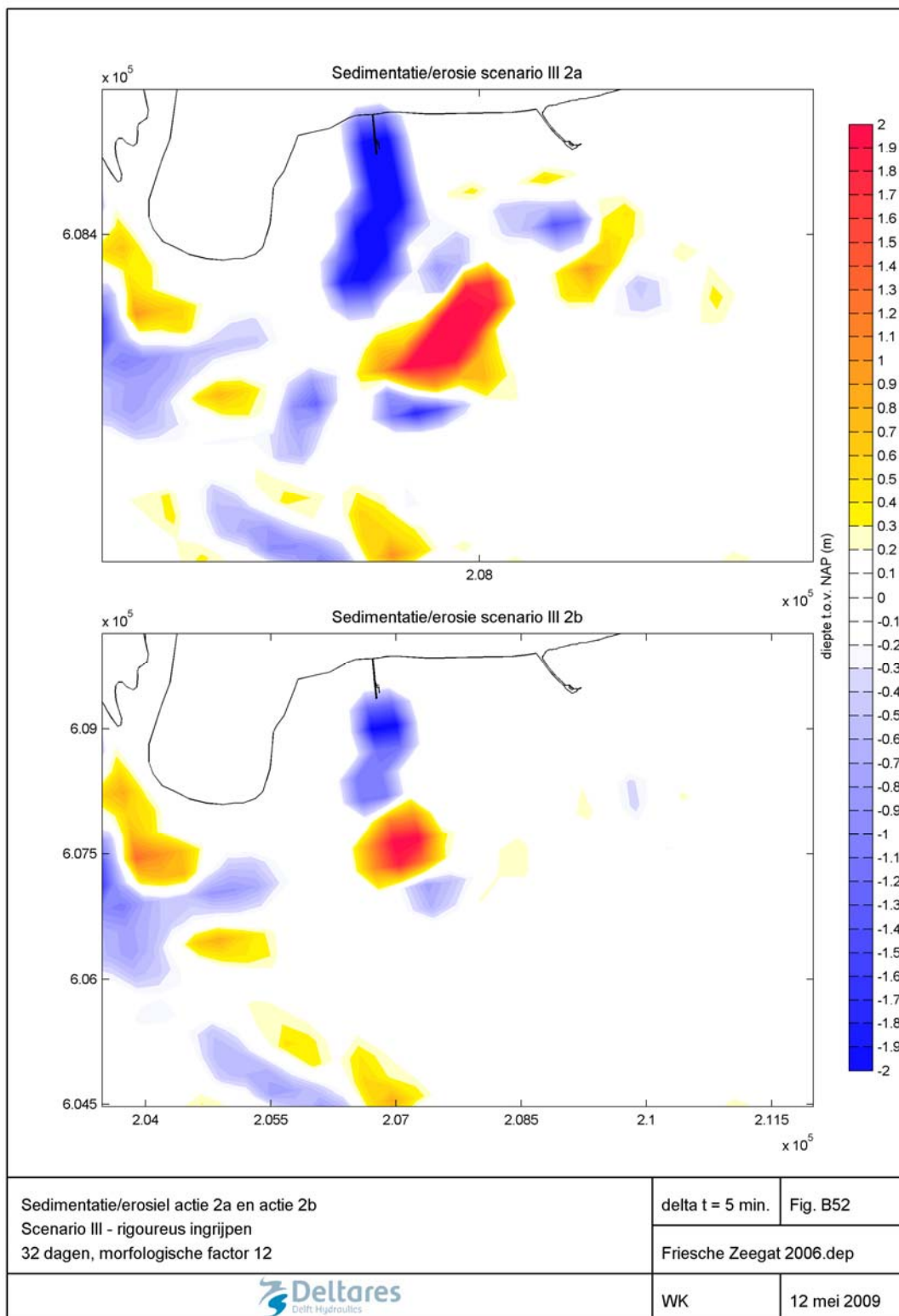


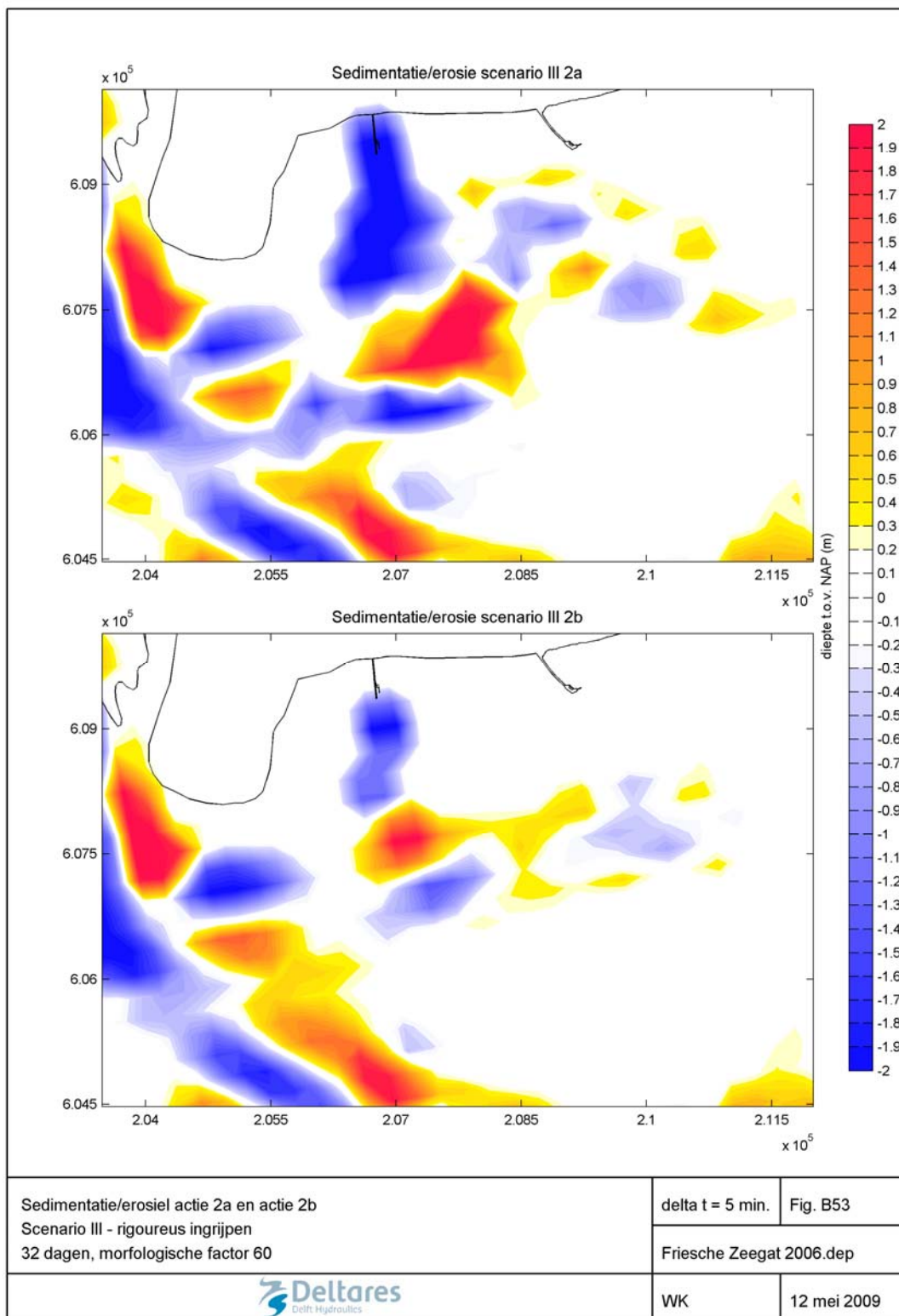


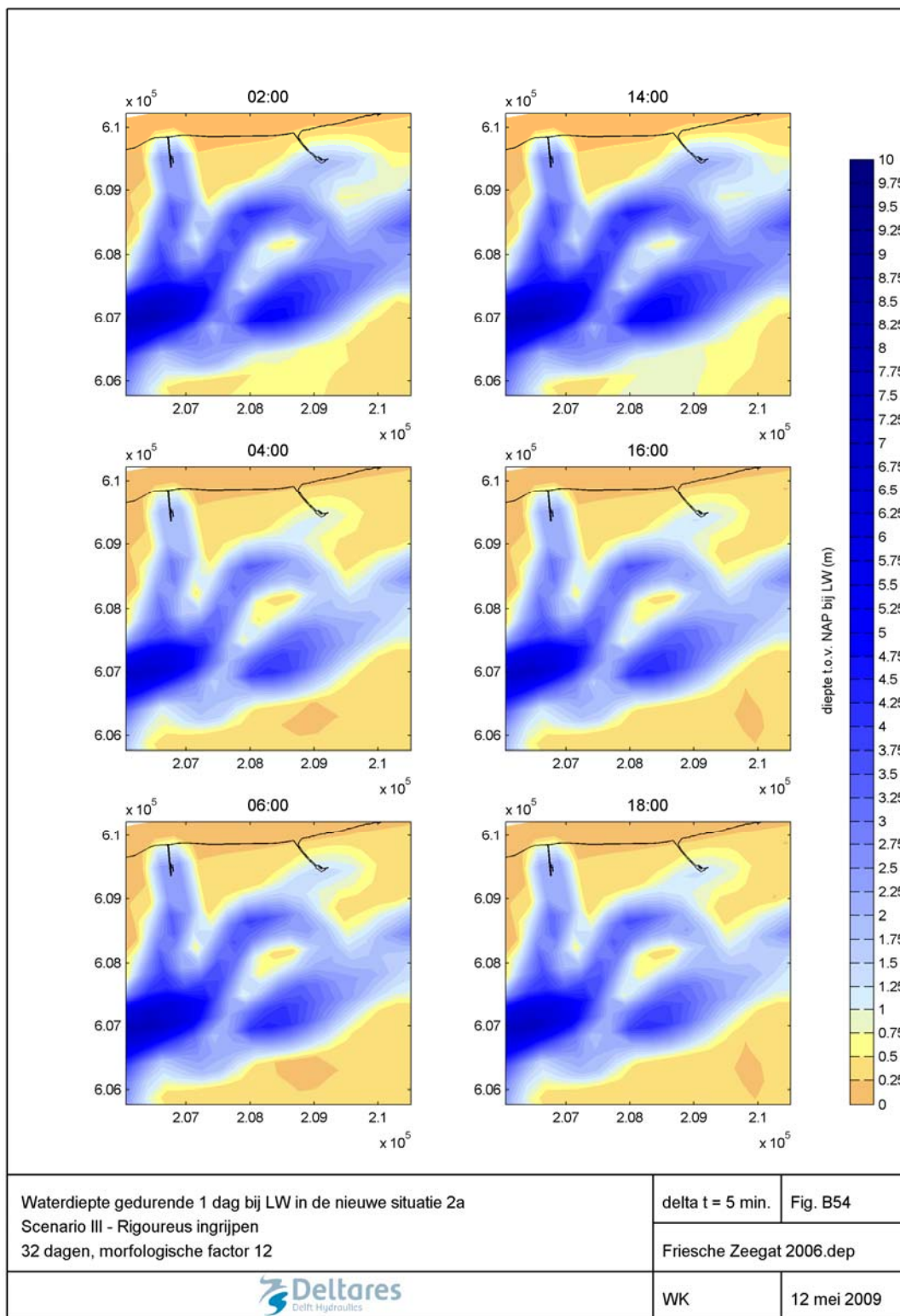


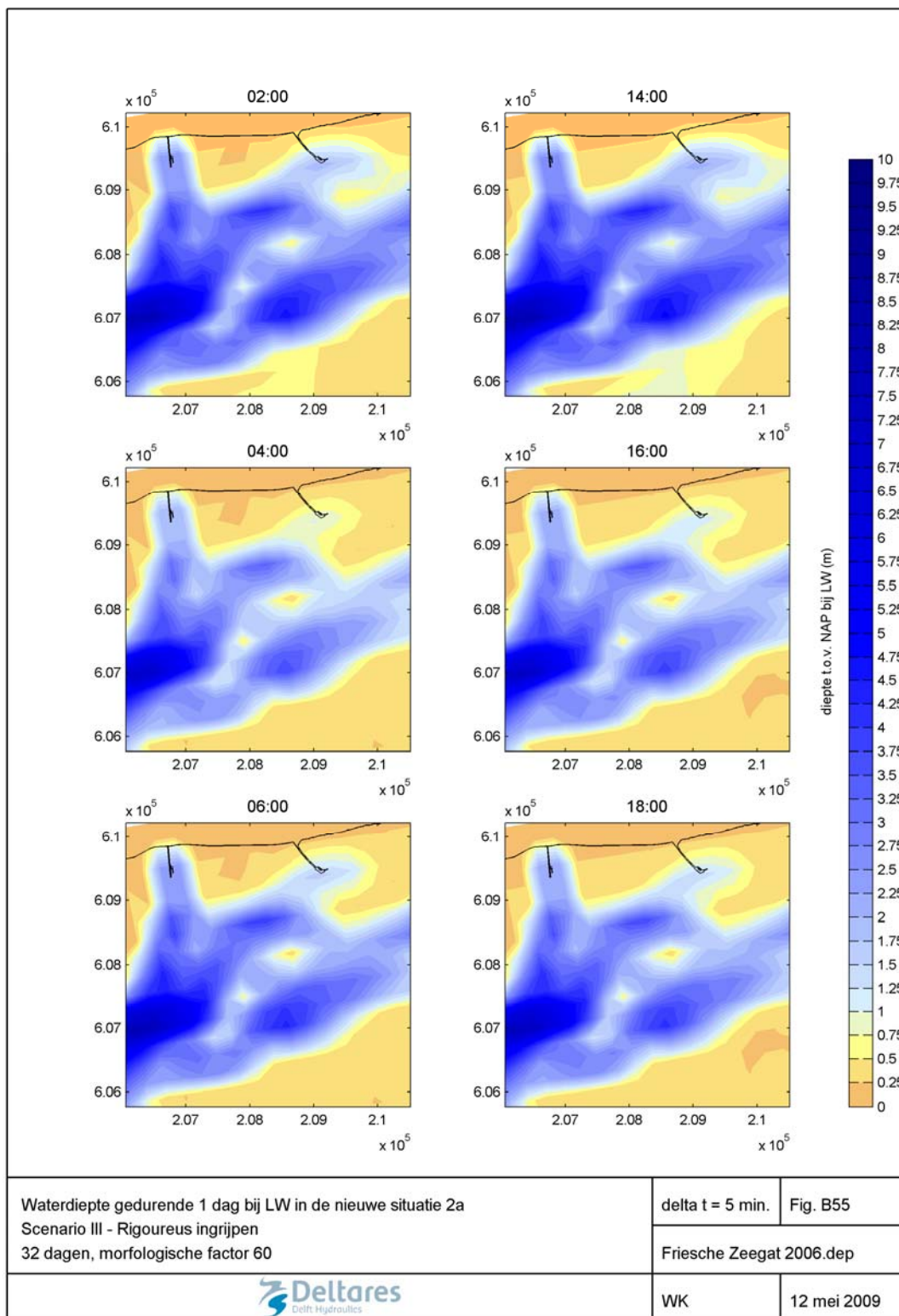




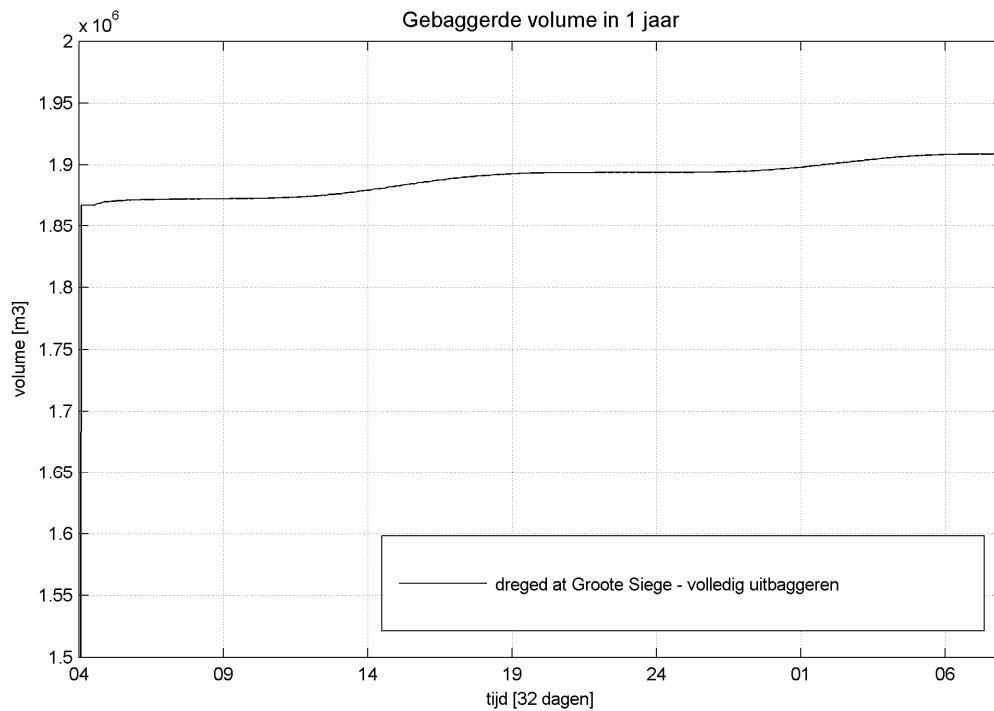
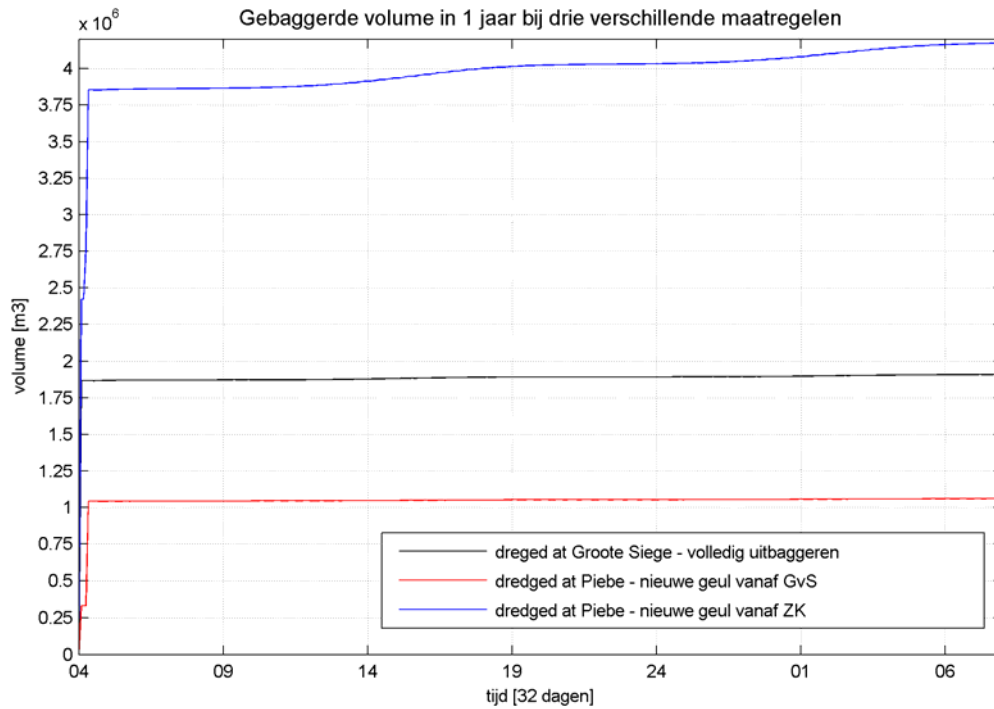


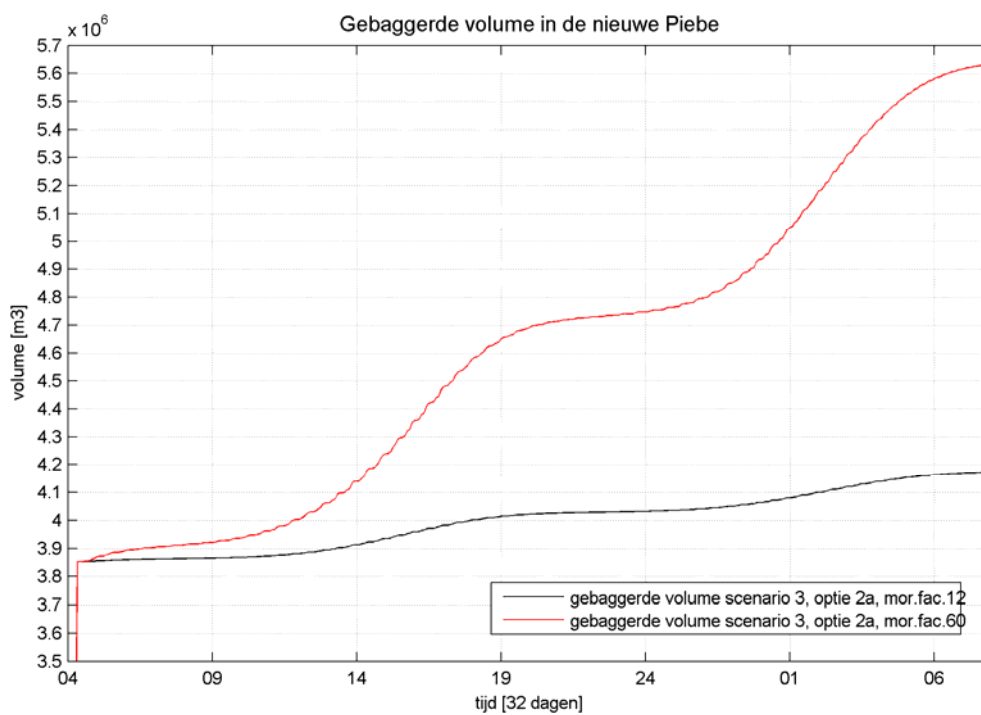
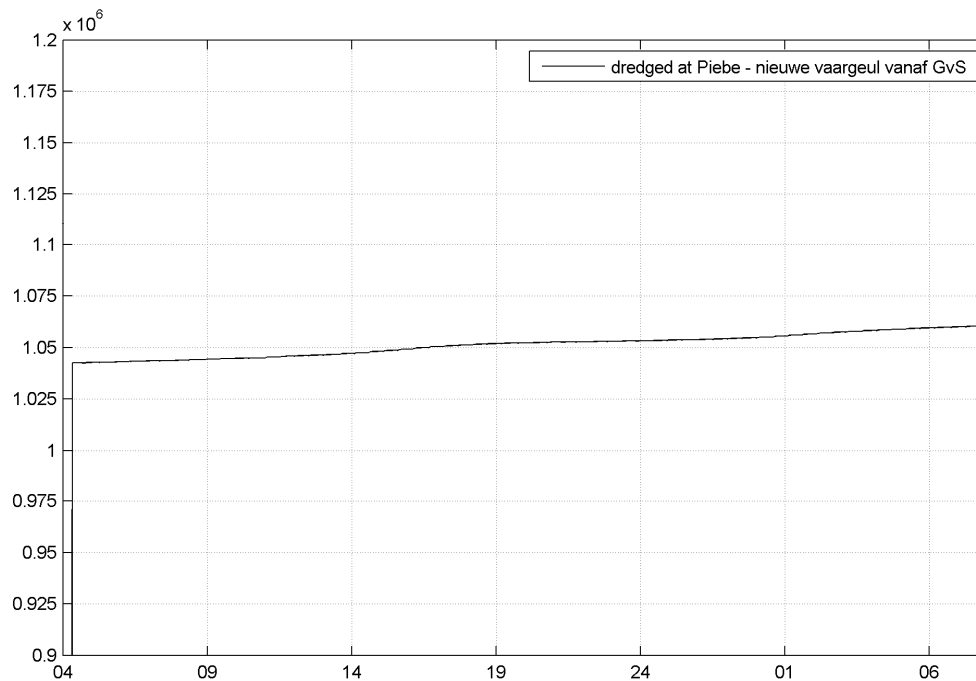






4. Gebaggerde volumes bij drie verschillende maatregelen





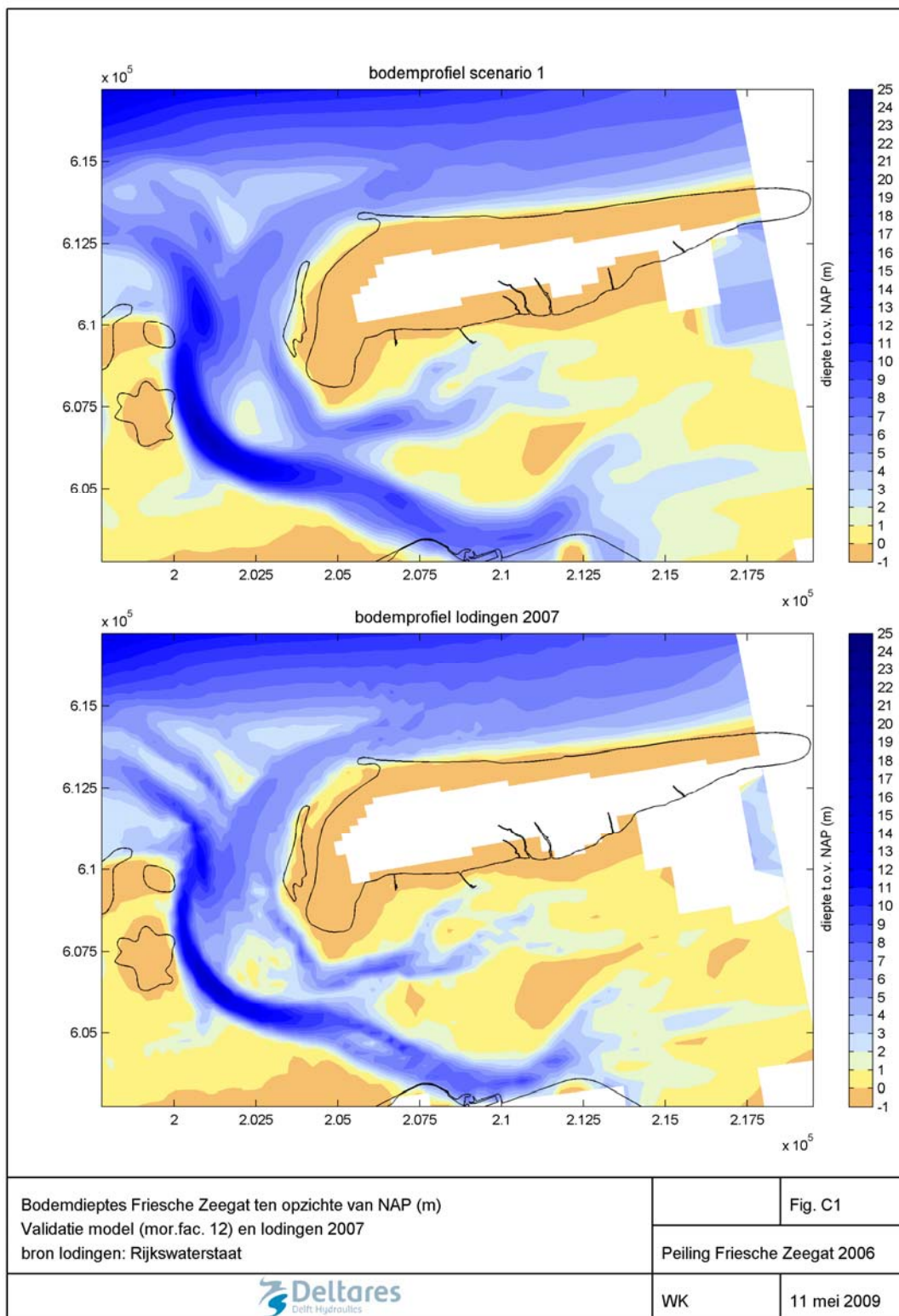
C. Figuren bij hoofdstuk 5

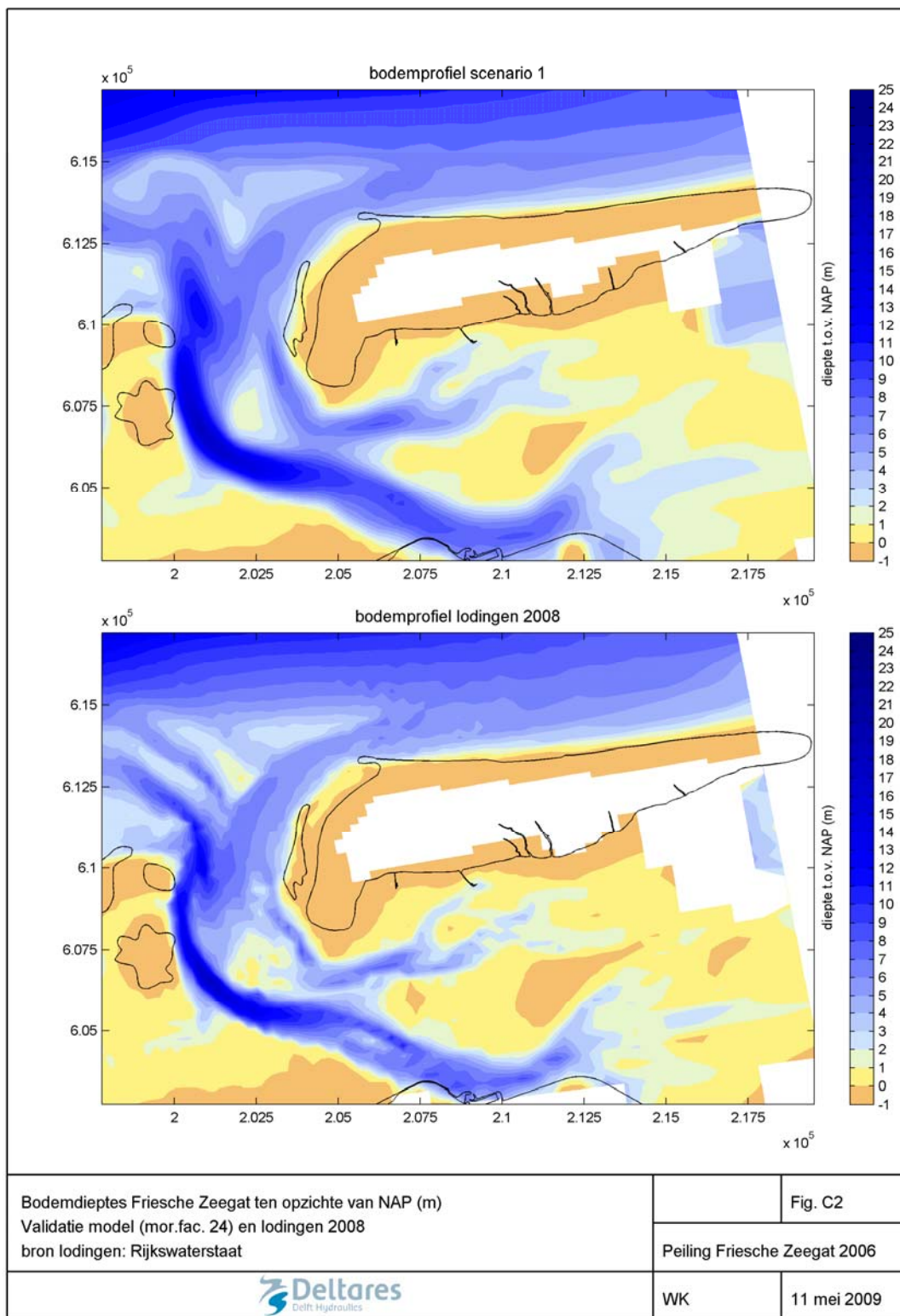
C1 - validatie bodemprofiel scenario I en lodingen RWS 2007

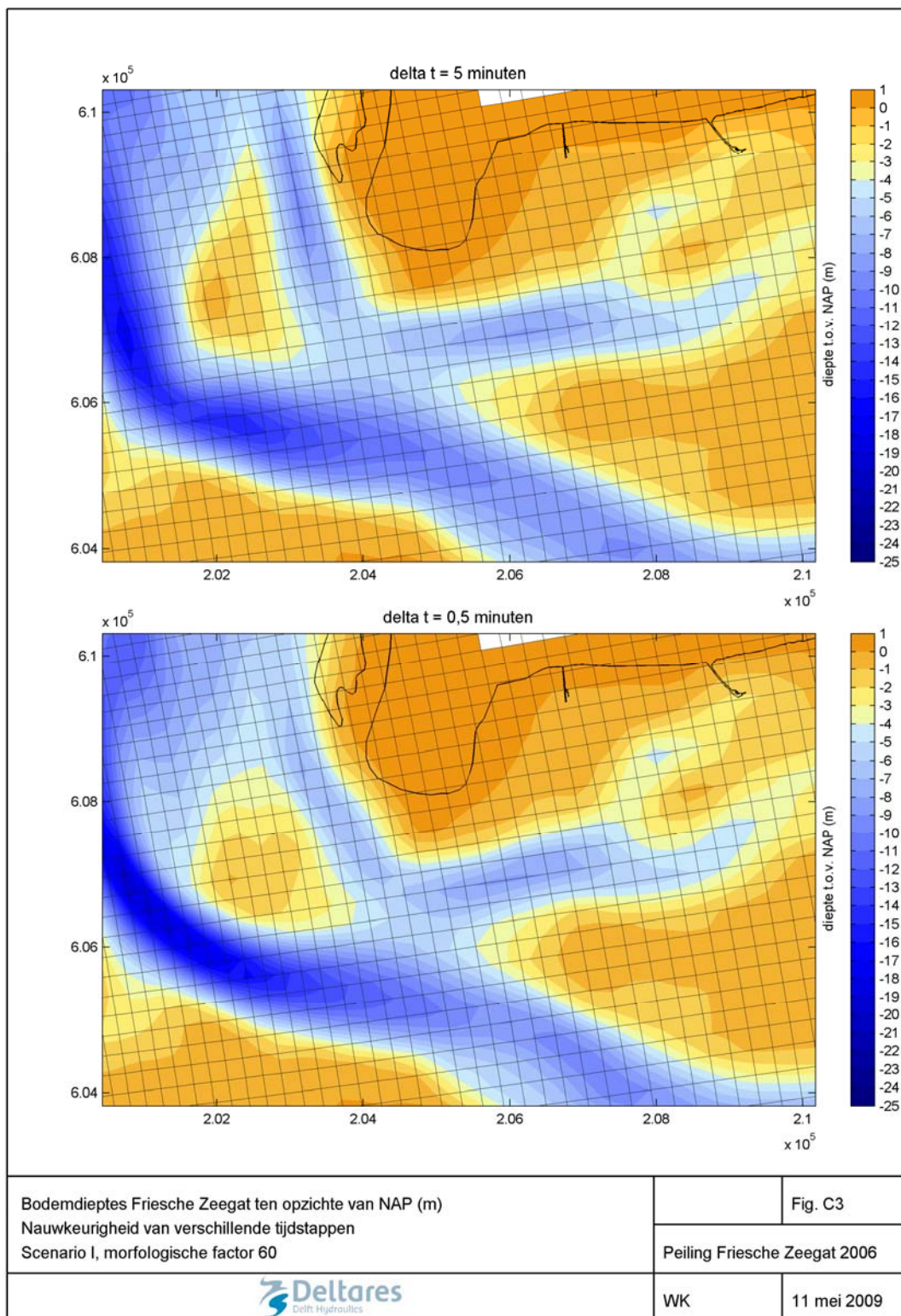
C2 - validatie bodemprofiel scenario I en lodingen RWS 2008

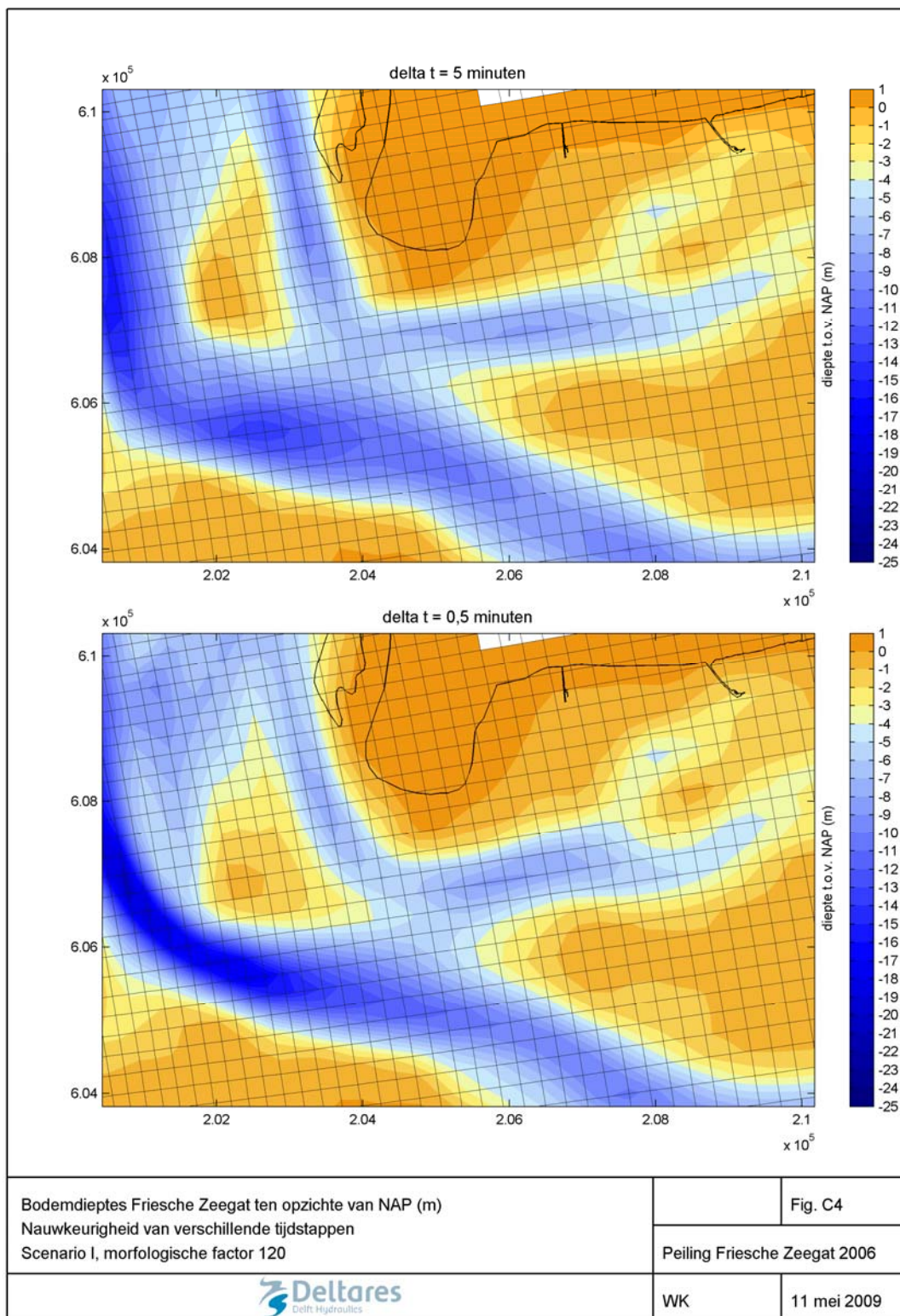
C3 - nauwkeurigheid bij verschillende tijdstappen bij morfologische factor 60

C4 - nauwkeurigheid bij verschillende tijdstappen bij morfologische factor 120



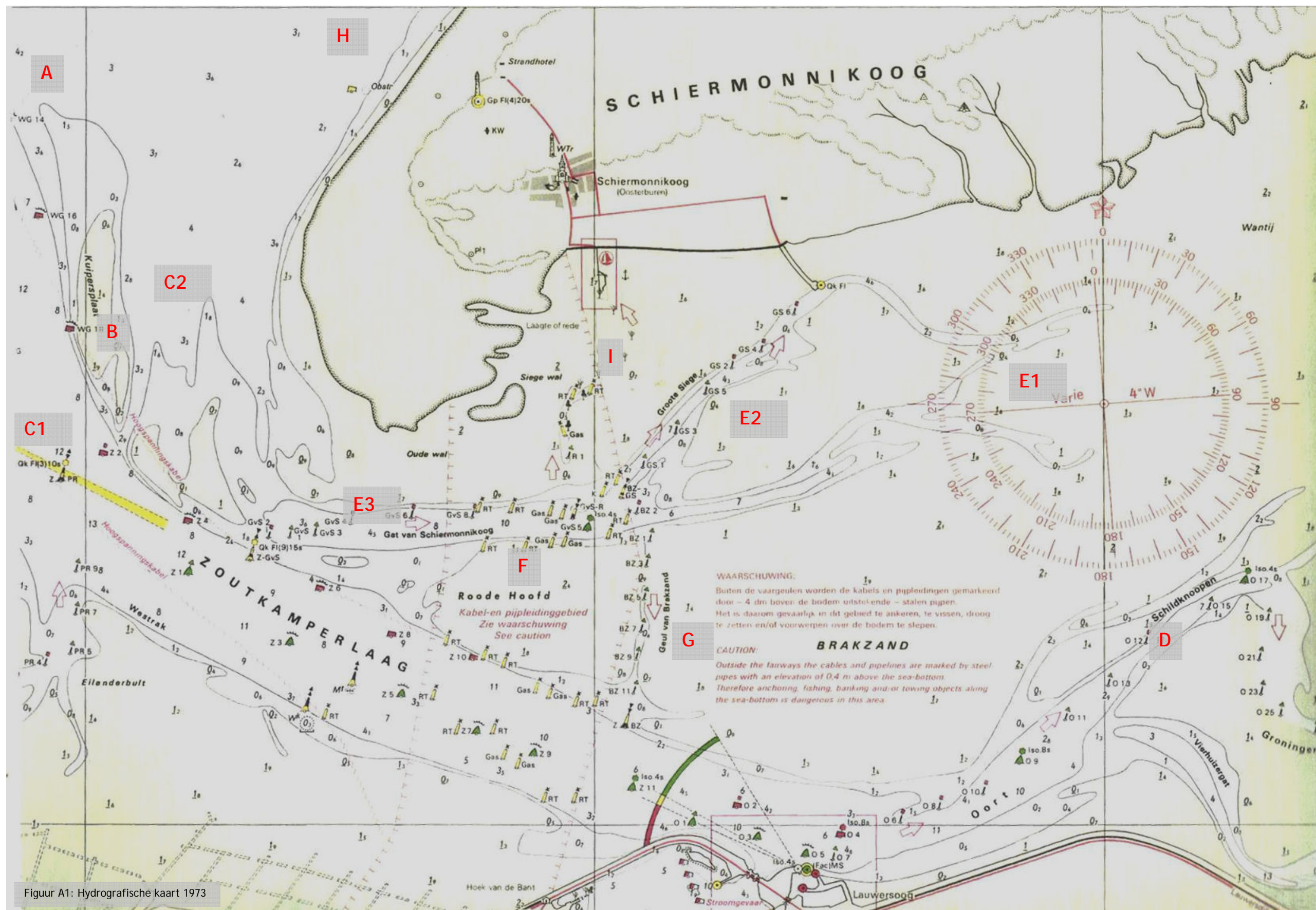




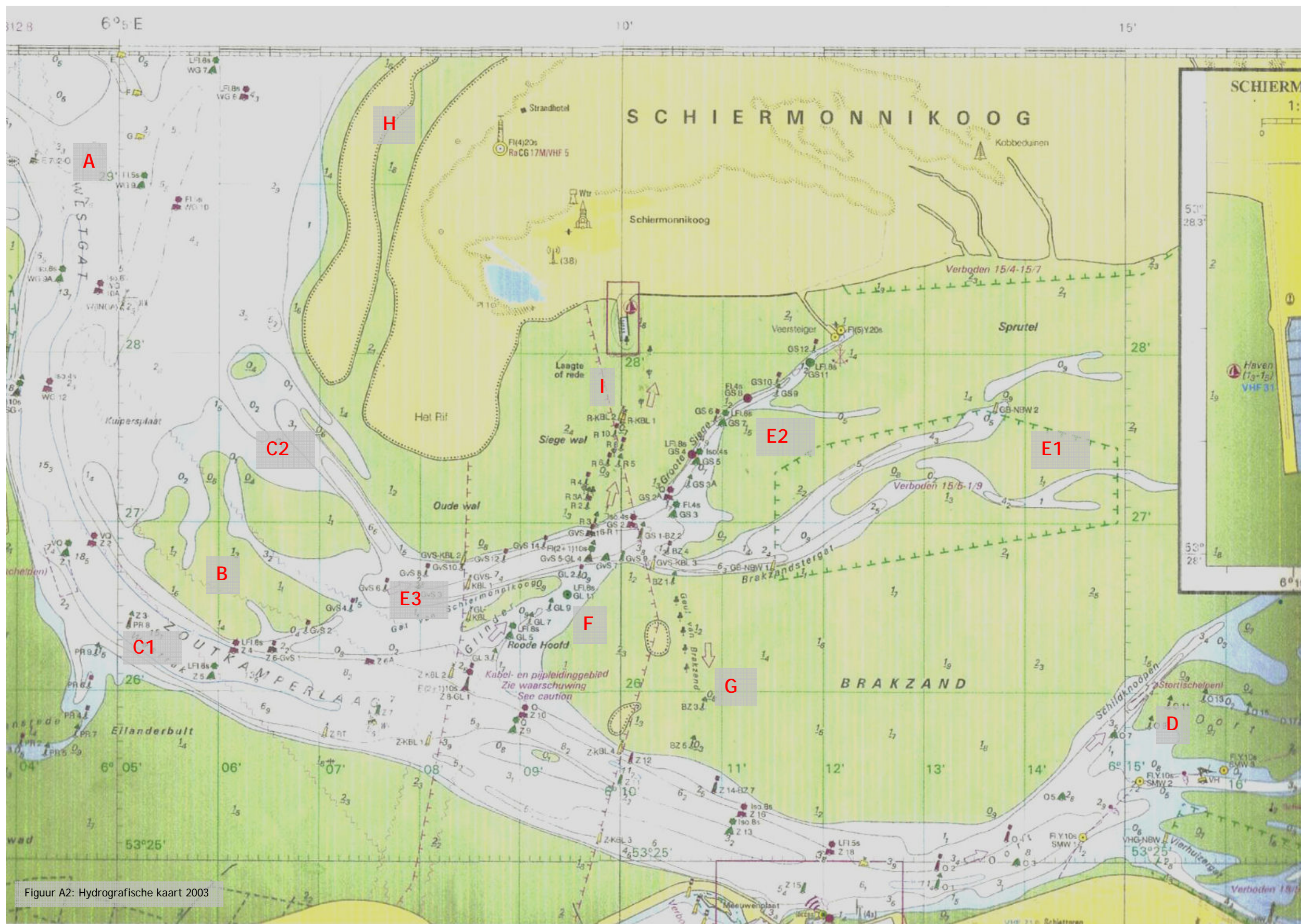


D. Zeekaarten en Surveykaarten

Deze appendix bevat de zeekaarten van de Zoutkamperlaag vloeddelta van 1973, 2003 en 2007. Daarnaast zijn er van de Groote Siege nog twee surveykaarten opgenomen die in februari 2008 gemaakt zijn.



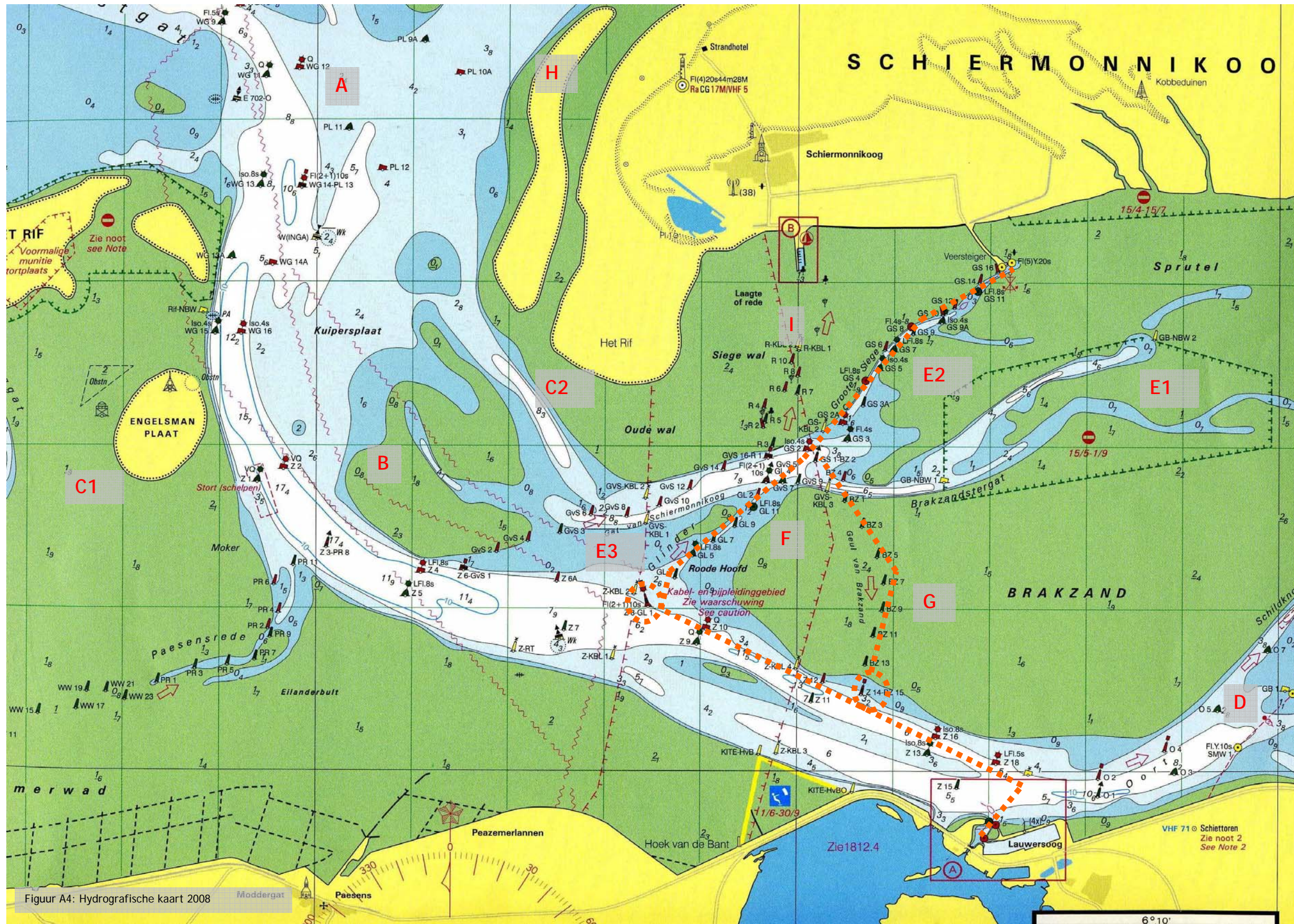
Figuur A1: Hydrografische kaart 1973

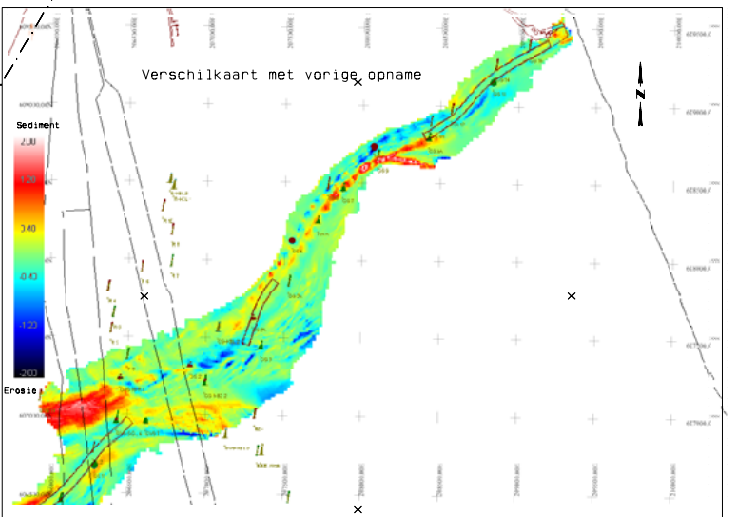
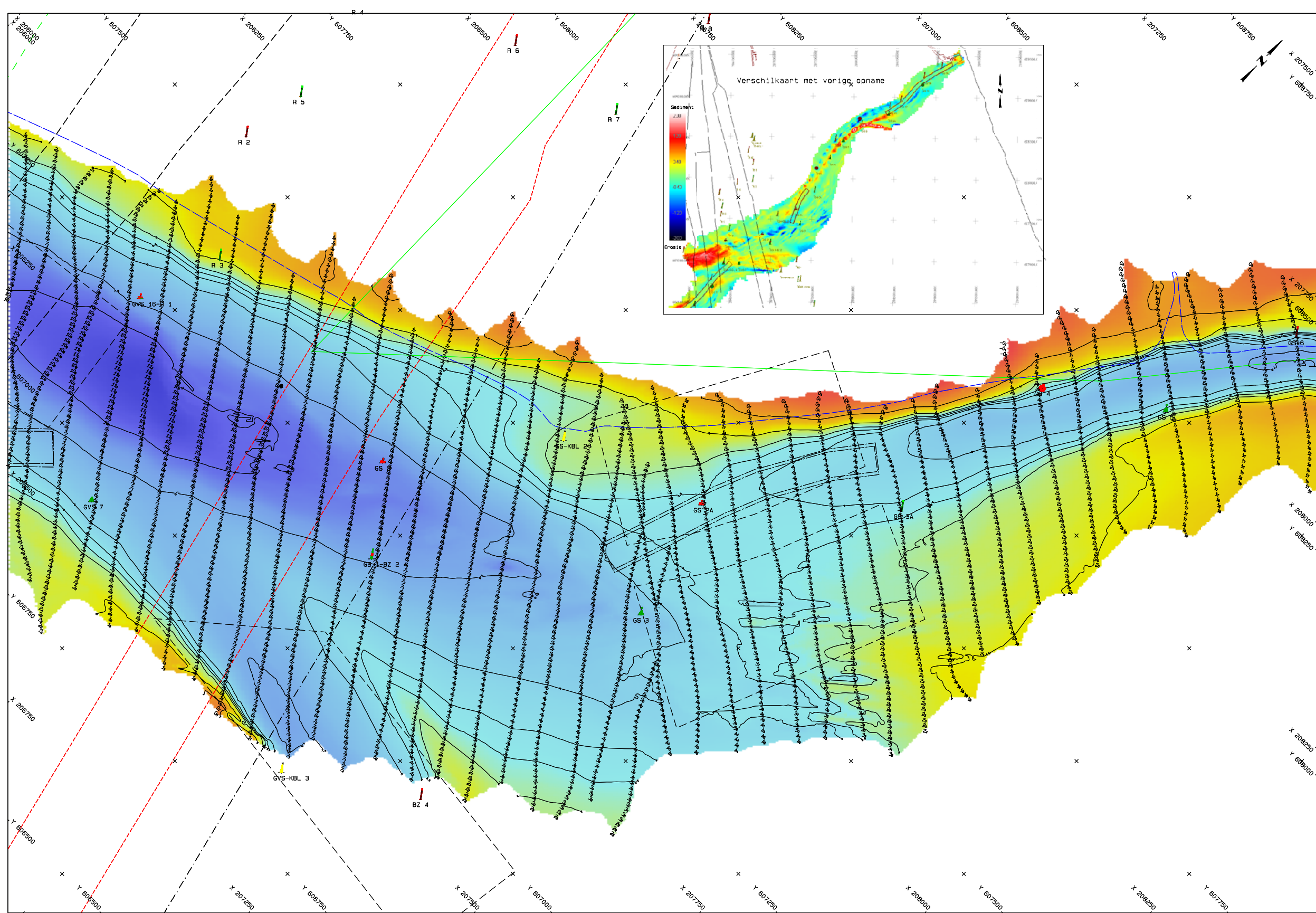


Figuur A2: Hydrografische kaart 2003



Figuur A3: Hydrografische kaart 2007





LEGENDA

- Leidingstraat
- Baggervak
- Dieptelijnen
- Stortvak
- ⊘ Dieptecijfer
- Telecoleiding
- Gasleiding
- Electroleiding
- Dieptelijns NAP -3.5m
- Nationaal Park

De ladinggegevens zijn bestemd voor het beheer-, onderzoek- en advieswerk van RWS
 Deze kaart is niet bestemd voor nautisch gebruik

Opmerkingen:
 Coördinaten in meters
 Diepten in meters t.o.v. NAP
 NAP reductie middels LK noogten
 Griecelgrootte 5 m.

Gebruikte apparatuur:
 POSITIE : Aquarius LK
 DIEPTE : Simrad EA400 (710 kHz)
 SLEUTELSNELHEID : Navitronic svp 15
 KGORP : Anamuz
 SCHEEFSTANDEN : Sealex HRU
 DRANEVAARTUIG : ms. Regulus
 INWINNINGS SOFTWARE : QPS QINSY

Geodetische parameters:
 Projectie : RD Grid
 Datum/Spheroids : Bessel 1841
 Centrale Meridiaan : 05°23' -15.900" E
 Latitude of Origin : 52°23' -22.176" N
 False Easting : 155000
 False Northing : 463000
 Spheroids : Bessel 1841
 Halve Lengte as (a) : 6377397.15500
 Aflatting 1/f : 299.1526128
 Schaalfactor : 0.9996179
 WGS 84 naar RD Grid parameters
 Data Z : -260.000
 Data Y : -260.000
 Data X : -260.000
 Schaal factor PPR : -4.0772

VERWERKING/PRESENTATIE: QPS QINSY en TerraModel



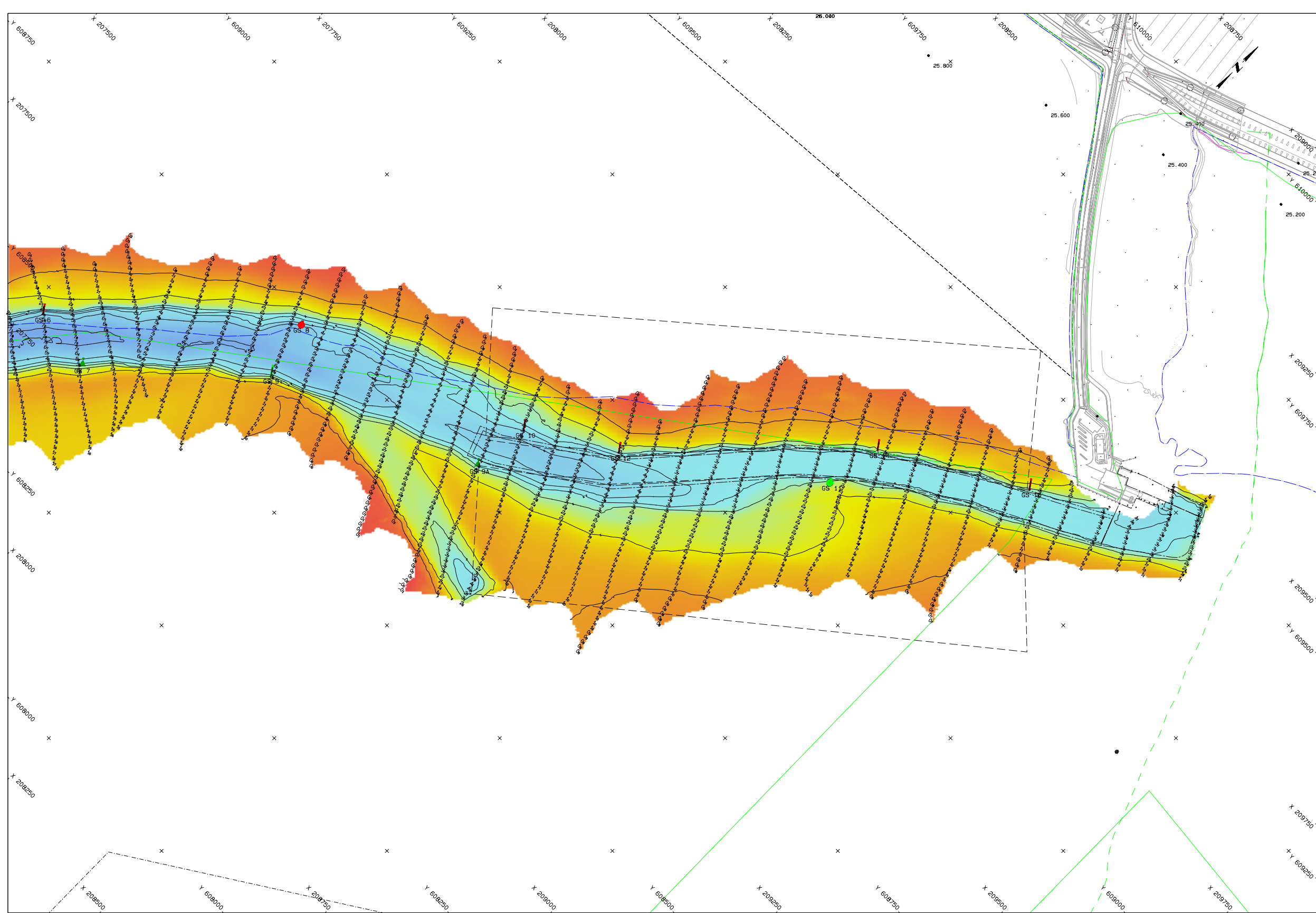
OPDRACHTGEVER
 Rijkswaterstaat Noord-Nederland
 Waterdienst Waddenzee
 Varen en Meeren

OPDRACHTGEVER
 Rijkswaterstaat Noord-Nederland
 Waterdienst Waddenzee
 Schepvaartbegeleiding en Bediening

Waddenzee - Friesche Zeegat
 Vaargeul Grote Siege (Ton GVS16-R1 t/m GS8)
 Detaillading

Schaal 1: 2500

kaartnummer	NNDW 2008 75121	opname dd	06 februari 2008
bladen	Blad 01: in 2 Bladen	voorgaande opname	09 en 12 januari 2007
QMSnummer	08WZM227 VAGROSI B	getekend	RS
formaat	A2x2.5	gecontroleerd	BH/MS
Vaargeulnummer	I-4-108	akkoord	HPB
betonning	11 februari 2008	status	voorlopig



LEGENDA

- Handkakeel
- Bagervak
- Dieptelijnen
- Stortvak
- ⊘ Dieptecijfer
- Strandpaal
- Artikel 20 gebied
- Topografie
- Wrak
- Telecom
- Dieptelijns NAP -3.5m
- Nationaal Park

De lodinggegevens zijn bestemd voor het beheer-, onderzoek- en advieswerk van RWS
 Deze kaart is niet bestemd voor nautisch gebruik

Opmerkingen:
 Coördinaten in meters
 Diepten in meters t.o.v. NAP
 NAP reductie middels LK hoogten
 Gridcelgrootte 5 m.

Gebruikte apparatuur:
 POSITIE : Aquarius LK
 DIEPTIE : Simrad EA400 (750 kHz)
 SELUITSNELHEID : Navitronic svp 15
 VOORS : Anamuz
 SCHEEFSTANDEN : Bealax MRU
 DRANEVAARTUIG : ms. Regulus
 INWINNINGS SOFTWARE : QPS QINSY
 VERWERKING/PRESENTATIE : QPS QINSY en TerraModel

Geodetische parameters:
 Projectie : RD Grid
 Datum/Spheroids : Beesli 1941
 Centrale Meridiaan : 052-23-15.500° E
 Latitude of Origin : 052-23-22.176° N
 False Easting : 155000
 False Northing : 463000

Spheroids:
 Spheroids : Beesli 1941
 Halfve Lengte (a): 6377397.15500
 Aflatting (f): 299.1528128
 Schaalfactor : 0.9999719

WGS 84 naar RD Grid parameters:
 Delta X : -263.516
 Delta Y : -263.516
 Delta Z : 1.670
 Schaal factor PPR : -4.0772

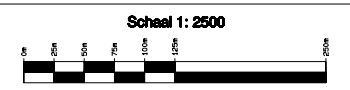


OPDRACHTGEVER
 Rijkswaterstaat Noord-Nederland
 Waterdienst Waddenzee
 Varen en Meeren

OPDRACHTGEVER
 Rijkswaterstaat Noord-Nederland
 Waterdienst Waddenzee
 Scheepvaartregulering en Bediening

Waddenzee - Friesche Zeegat

Vaargeul Grote Siege (Ton GS6 t/m GS14)
 Detaillading



kaartnummer	NNDW 2008 75122	opname dd	06 en 13 februari 2008
Bladen	Blad 02: in 2 Bladen	voorgaande opname	09 en 12 januari 2007
QINSnummer	08N26227 VAGROSI B	getekend	RS 20 Feb 2008
formaat	A2x2.5	gecontroleerd	BR/MS 20 Feb 2008
Vaargeulnummer	I-4-108	akkoord	HPB 20 Feb 2008
betoning	11 februari 2008	status	voorlopig

© Delft, 2009

Deze uitgave is mede mogelijk gemaakt door de gemeente Schiermonnikoog.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband, elektronisch of op welke andere wijze dan ook en evenmin in een retrieval systeem worden opgeslagen zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.