

Ontwikkeling van de zandbank ter hoogte van Heist: Eindrapport

Dries Van den Eynde, Francis Kerckhof, Frederic Francken, Jan Haelters & Brigitte Lauwaert

ZAHE/1/DVDE/200710/NL/ER

Rapport in opdracht van de Minister van Wetenschapsbeleid

BMM
Gulledelle 100
B-1200 Brussel
België

1. Inleiding

Gedurende de laatste tientallen jaren is een significante verhoging van de zeebodem waar te nemen ten oosten van de oostelijke strekdam van de haven van Zeebrugge. De vorming van een nieuwe zandbank met een grootte van ongeveer 800 m op 400 m is duidelijk (zie Appendix 1, waar ter illustratie een aantal luchtfoto's van de nieuwe zandbank werden opgenomen). De bathymetrische verschilkaarten tussen 1986 en 2005 geven duidelijk een plaatselijke verondieping aan. Tussen 1986 en 1993 werd al een verondieping tot meer dan 1,5 m opgemerkt. Studie heeft bovendien uitgewezen dat tussen 1993 en 2005 nog een bijkomende verondieping van 1 m waar te nemen is. Een deel van de nieuwe zandbank komt tegenwoordig zelfs boven water tijdens laagwaterstanden bij springtij. De verandering van de sedimentatiepatronen en het verschijnen van deze zandbank is een effect van de uitbouw van de haven van Zeebrugge. Dit werd trouwens reeds verwacht in de impactstudie van de uitbreiding van de haven van Zeebrugge, uitgevoerd door de BMM in 1982 (BMM, 1982). Bovendien hebben ook de menselijke activiteiten in de nabije omgeving, zoals strandsuppleties, kustverdedigingswerken en storten van baggerspecie, waarschijnlijk een invloed op de evolutie van deze nieuwe zandbank.

In deze zone werden ook maatregelen voor natuurbescherming genomen, met de instelling van een speciale beschermingszone gevraagd door de Europese Vogelrichtlijn (K.B. van 14 oktober 2005). Bovendien is binnen deze zone ook een gericht marien reservaat gecreëerd (K.B. van 5 maart 2006) en aan land heeft het Vlaamse Gewest een kustnatuurreservaat gedefinieerd in de Baai van Heist (zie Figuur 1). Ten oosten van de zandbank bevindt zich de Paardenmarkt, een dumpsite van oorlogsmunitie van de eerste wereldoorlog, waar een vis- en ankerverbod geldt (Missiaen and Henriët, 2002). Tot slot bevindt zich ten noordoosten van de Paardenmarkt de baggerstortplaats B & W Zeebrugge Oost, waarop voornamelijk baggerspecie afkomstig van de haven van Zeebrugge wordt gestort.

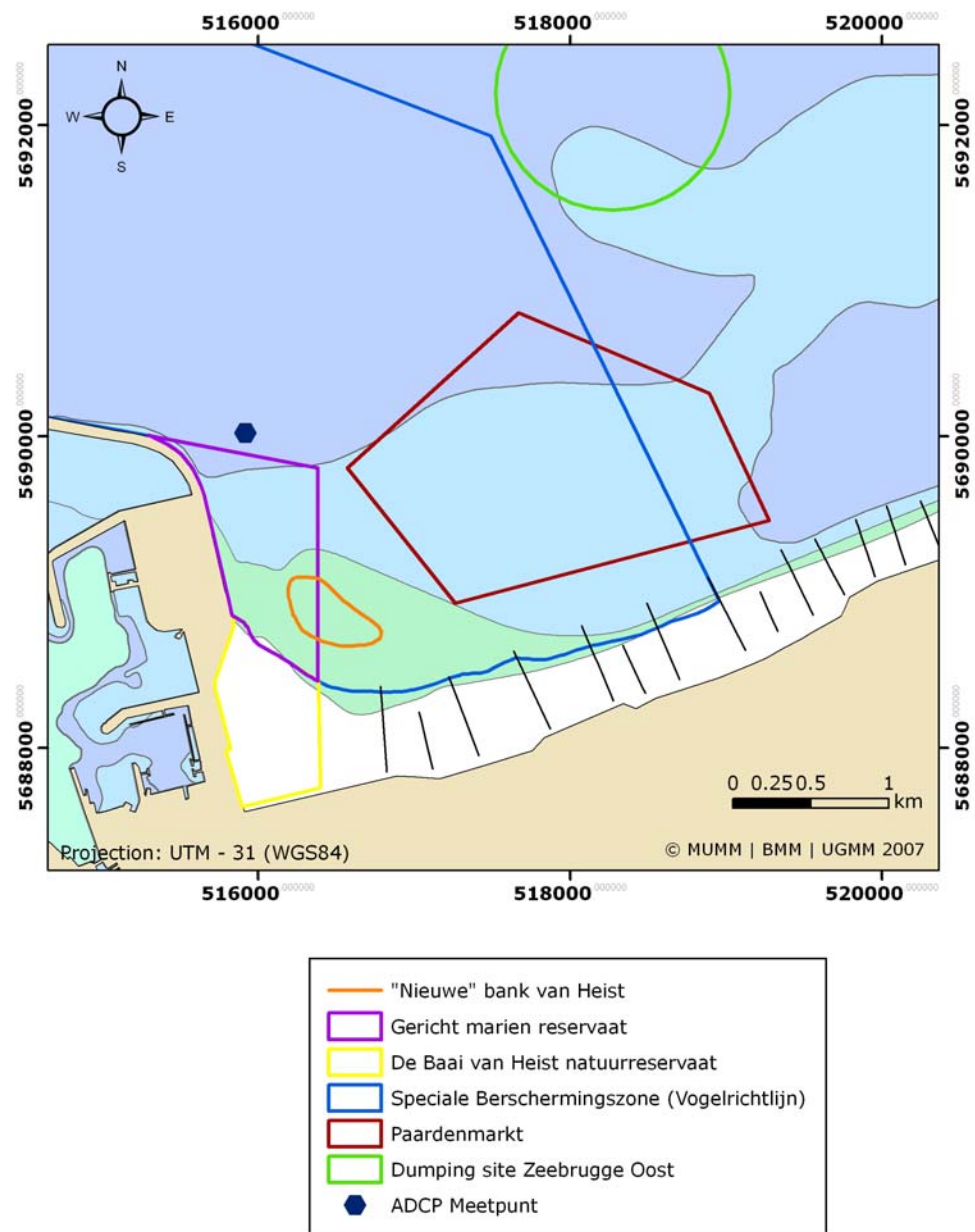
In dit onderzoeksproject wordt de vorming van deze nieuwe zandbank bestudeerd en worden kort voorstellen gedaan voor het beheer van het gebied.

In een eerste sectie wordt bondig de kennis over de historische en huidige situatie herhaald, terwijl in een tweede sectie de in-situ metingen worden beschreven, die in het kader van het huidige project werden uitgevoerd. Zowel de stromingsmetingen als de bodemstalen die werden genomen, worden kort beschreven.

In het derde en meest uitgebreide deel van het rapport wordt de modelleerstudie beschreven. Eerst worden enkele nieuwe modelontwikkelingen besproken, zoals de ontwikkeling van een nieuw modelrooster voor het gebied en de ontwikkeling van een 'wetting-drying' module voor het hydrodynamische model. Twee verschillende sedimenttransportmodellen worden vervolgens voorgesteld. Het meest geschikte model werd voor het gebied geïmplementeerd. De resultaten van dit

sedimenttransportmodel worden voorgesteld en besproken.

Vervolgens werd in het kader van het project een morfologische routine ontwikkeld, om voorspellingen op langere termijn te kunnen uitvoeren. Omwille van technische redenen konden deze morfologische berekeningen niet worden uitgevoerd voor de zandbank ten oosten van de haven van Zeebrugge. De methodologie van de ontwikkelde morfologische routines werd daarom getest voor de Vlaamse Banken.



Figuur 1: Positie van de nieuwe zandbank van Heist, ten oosten van de haven van Zeebrugge. Ook de mariene reservaten, de Paardenmarktsite en de dumpingsite Zeebrugge Oost zijn aangeven.

In de vijfde sectie wordt de bodemfauna van de zandbank besproken, zoals die werd opgemeten in drie bemonsteringen, die ter plaatse werden uitgevoerd.

Deze sectie bevat ook enkele beschouwingen over de aanwezigheid van zeezoogdieren, ter plekke.

Tenslotte wordt het algemeen besluit van de studie gegeven.

2. Huidige situatie

In een eerste bondig verslag werd de situatiebeschrijving van de zandbank ter hoogte van Heist gegeven (Fettweis *et al.*, 2006). De historische achtergrond, de hydrodynamica, de sedimentologie en het sedimenttransport werden kort beschreven.

Zoals in Van den Eynde *et al.* (2006) werd beschreven, werd bovendien recent een rapport uitgegeven door het Waterbouwkundig Laboratorium, waar uitgebreid wordt ingegaan op de morfologische evolutie van deze zandbank (Verwaest, 2006). De algemene kennis, die in deze paragraaf wordt samengevat, is vooral uit dit rapport overgenomen.

2.1. *Morfologische veranderingen van de Westerscheldemonding*

De Westerscheldemonding is een zeer dynamisch gebied met, door de eeuwen heen, belangrijke veranderingen van de grote morfologische structuren, zoals geulen en banken, in tegenstelling tot de morfologische structuren op het grootste deel van het Belgisch Continentaal Plat, die relatief stabiel zijn. Gedurende de periode 1825-1925 trad in de Westerscheldemonding (ongeveer tot de TAW -10 m dieptelijn) een globale erosie op in de grootteorde van 5 mm/jaar.

Volgens een Nederlandse studie van de morfologische veranderingen van de Westerscheldemonding over de periode 1965-1995 trad een globaal verlies van sedimenten op van ongeveer 2 miljoen m³ per jaar. Dit is voornamelijk het gevolg van anthropogene effecten, zoals de verdieping van de Westerschelde. Bovendien kan dit globale verlies het voorkomen van lokale effecten, zoals het ontstaan van de zandbank, niet verhinderen.

Verder bleek de 18,6 jarige cyclus van het getij¹ een belangrijke invloed te hebben. Door deze cyclus wordt een 100 miljoen m³ tussen de Scheldemonding en de Schelde verplaatst. Op het ogenblik zou de cyclus in een minimum sedimentvolume in de Westerscheldemonding zitten en zou er dus een verhoogde sedimentatie te verwachten zijn in de komende jaren, met de kans op een verhoging van de zandbank.

2.2. *Sedimentbalans van het studiegebied*

Het studiegebied dat in Verwaest (2006) werd bestudeerd, wordt in Figuur 2 voorgesteld.

Uit een berekening met een tweedimensionaal stromingsmodel bleek onder invloed van de getijstromingen en ten gevolge van de buitenhaven van Zeebrugge een neer op te treden ten oosten van de havendam. Vooral bij de overgang van vloed naar eb is de rechtsdraaiende neer duidelijk. De

¹ Deze periode van 18,6 jaren correspondeert met de periode waarin de hoek die de maan maakt met de equator van de aarde varieert. Daardoor variëren de amplituden van bepaalde constituenten van het getijde met dezelfde periode. In de harmonische analyse wordt hiermee rekening gehouden met behulp van de zogenaamde nodale correcties. Voor het M₂ getijde varieert deze nodale correctie tussen 0,96 en 1,04.

De monitoring van de vooroever (de zone beneden Z+1,5 m, tot 1,5 km uit de kust) in het gebied toont aan dat over de periode 1976 – 1998 een depositie van 21 miljoen m³ opgetreden is. Hiervan is 18,5 miljoen m³ direct tijdens de werken aan de uitbouw van de haven van Zeebrugge gesedimenteerd, wellicht zelfs een deel wegens het storten van gebaggerd materiaal. Na de uitbouw van de haven in 1986 wordt er gemiddeld een verondieping van de vooroevers ten oosten van de havendam en voor Heist en Duinbergen gevonden van 6 cm/jaar. Wanneer een kwadratische regressie wordt toegepast, lijkt deze depositiesnelheid jaarlijks af te nemen met 0,35 cm/jaar/jaar en bedraagt deze op het ogenblik voor Heist 4 cm/jaar.

Verder blijkt de depositie in het hele gebied niet gelijkmatig verdeeld te zijn. Ter hoogte van de zandbank zelf ligt deze 3 maal zo hoog als het gemiddelde over het gehele gebied. De kruin van de zandbank ondergaat een verondieping met ongeveer 15 cm/jaar. De geul tussen de zandbank en het strand ondergaat slechts een verondieping van ongeveer 3 cm/jaar.

In 1977-1979 werd een zandsuppletie uitgevoerd en werd verspreid over het strand van de gemeente Knokke-Heist 8,5 miljoen m³ zand toegevoerd. Sindsdien werden onderhoudssuppleties uitgevoerd. In 1986 werd ongeveer 1,8 miljoen m³, in 1999 500.000 m³ en in 2004 ten slotte 400.000 m³ aangevoerd. Ook hier blijken de erosie en de depositie niet homogeen verdeeld te zijn over de kustzone, met depositie tussen Heist en Duinbergen en erosie tussen Knokke-Zoute en de Nederlandse grens.

2.3. *Sedimentologie*

Uit metingen blijkt in de eerste plaats dat zowel zand als slib in het gebied getransporteerd worden, met een overwicht van slib. Uit sedimentstalen en kwalitatieve informatie is duidelijk dat zowel zand als slib wordt afgezet in het gebied. De verhouding hiertussen is niet duidelijk. Deze slibafzetting werd ook met numerieke modellen door Fettweis and Van den Eynde (2003) teruggevonden.

In Missiaen and Henriët (2002) wordt aangetoond dat op de naburige Paardenmarktsite zowel zand als slib wordt aangetroffen, waarbij het slib zich vooral in het oostelijke deel van de site zou bevinden. De ondiepe sedimenten worden gekarakteriseerd door een typische alternatie van zand- en sliblagen, als gevolg van storm en getijwerking. De invloed van de dumping site B & W Zeebrugge Oost (zie Figuur 1), waar vooral slib op wordt gedumpt, afkomstig uit de haven van Zeebrugge, is waarschijnlijk niet verwaarloosbaar.

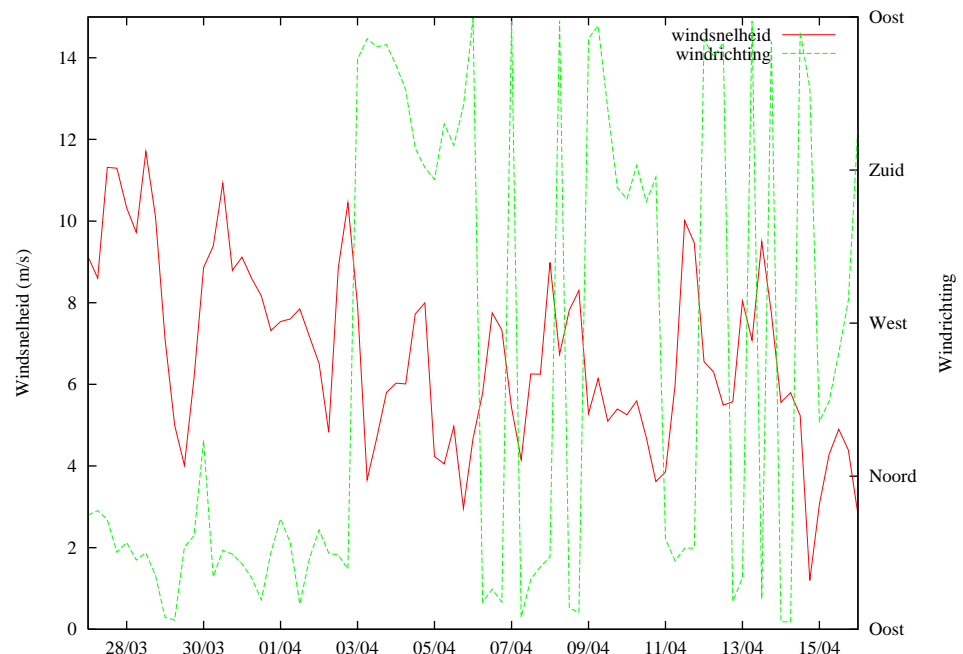
3. In situ metingen

3.1. Metingen stromingen

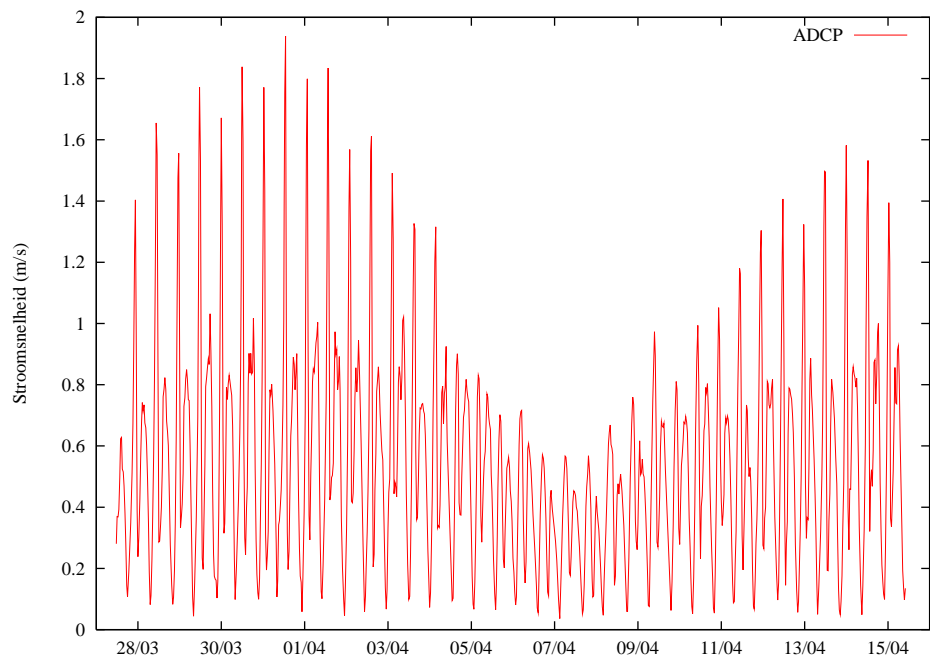
Een bottom mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), type Sentinel 1200 kHz Workhorse van RDInstruments, werd zo dicht mogelijk tegen het studiegebied verankerd. De verankering werd uitgevoerd voor een periode van vier weken, namelijk van 27 maart 2006 tot 15 april 2006, op de positie 51° 21,724' N, 3° 13,800' E (ED50), zie Figuur 1. Bij de verankering diende rekening gehouden te worden met de geringe bathymetrie en de diepgang van de R/V Belgica. Deze ADCP geeft met hoge resolutie de stromingsnelheid en de stromingsrichting over de gehele waterkolom. Deze opgemeten stromingen worden gebruikt ter vergelijking met de resultaten van het hydrodynamische model.

De meteorologische condities gedurende de periode worden voorgesteld in Figuur 3. Gedurende de eerste dagen waaide er een vrij krachtige tot krachtige noordoostenwind (5 tot 6 Beaufort). Daarna neemt de windsnelheid af en blijft deze gedurende de gehele meetcampagne beperkt tot 3 tot 5 Beaufort. De wind waait voornamelijk uit het oosten.

In Figuur 4 wordt de tijdreeks van de over de diepte gemiddelde stromingen weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de opgemeten stromingen in het gebied, dicht tegen oostelijke dam van de haven van Zeebrugge bijzonder hoog zijn, tot pieken van bijna 2 m/s.

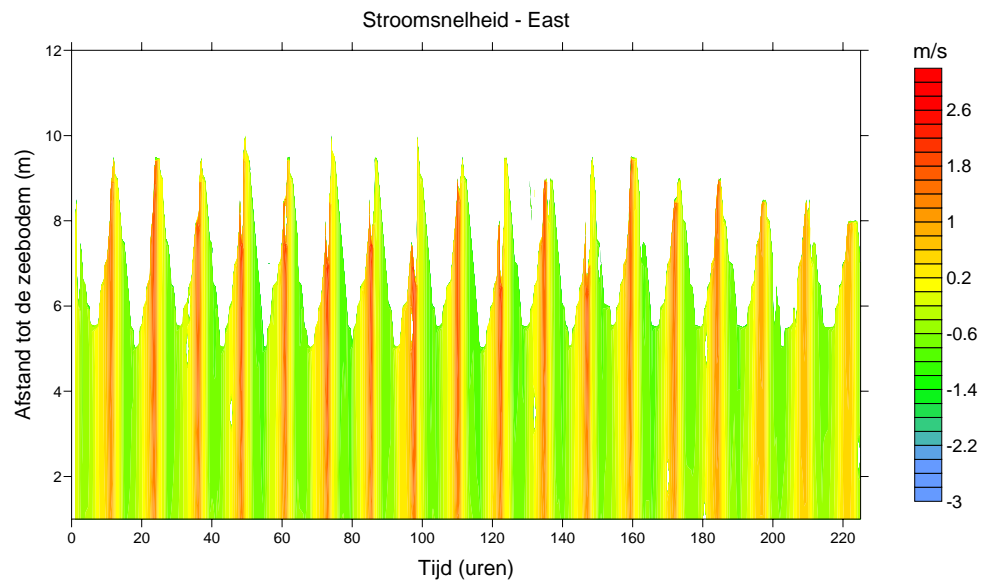


Figuur 3: Windsnelheid en -richting gedurende de meetcampagne van 27 maart 2006 tot 15 april 2006.

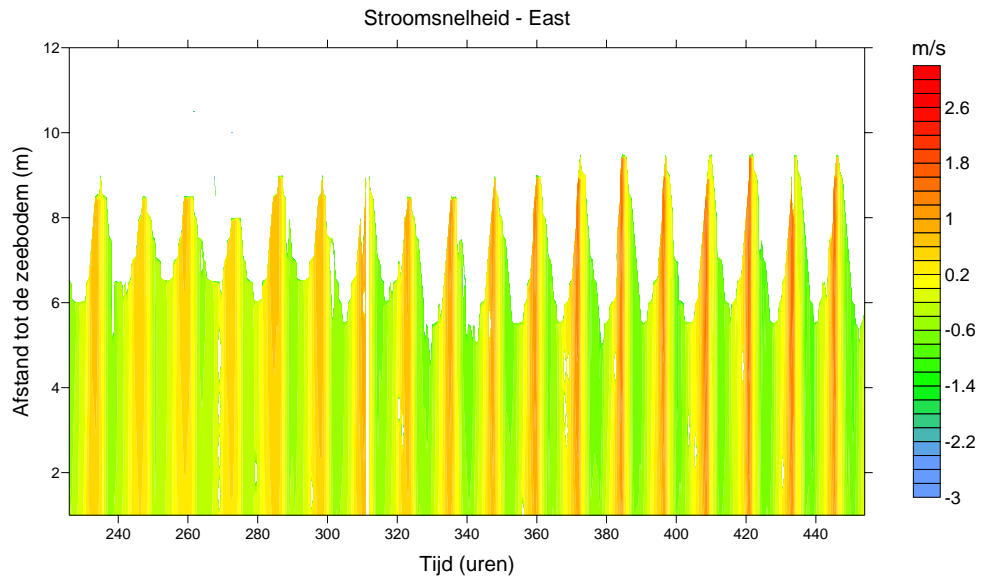


Figuur 4: Tijdsreeks van de over de diepte gemiddelde stroomsnelheid voor de gehele meetcampagne van 27 maart 2006 tot 15 april 2006.

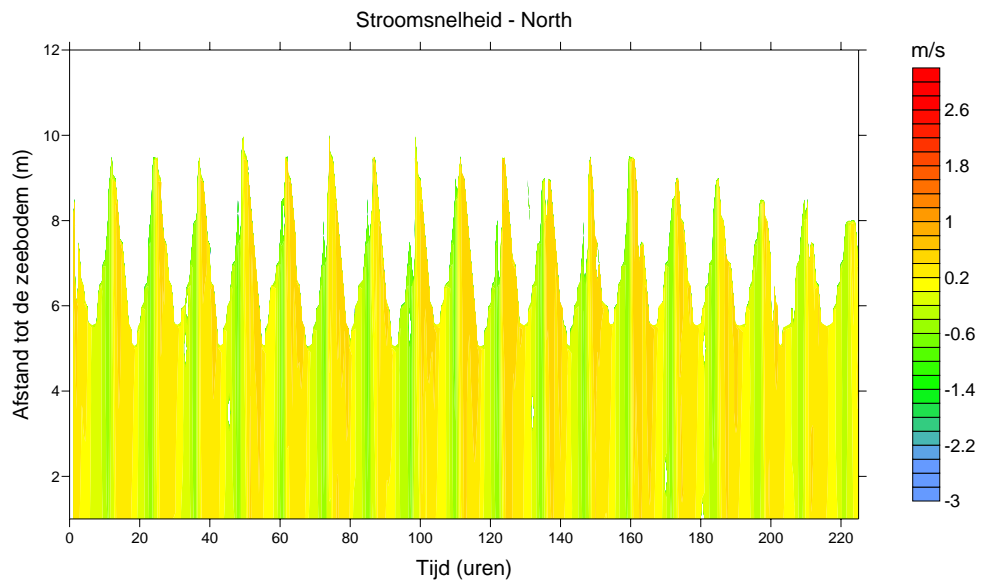
Enkele resultaten van deze verankering met de ADCP worden voorgesteld in Figuur 5 tot Figuur 8. Deze figuren tonen de evolutie van het oostelijke en noordelijke snelheidsprofiel.



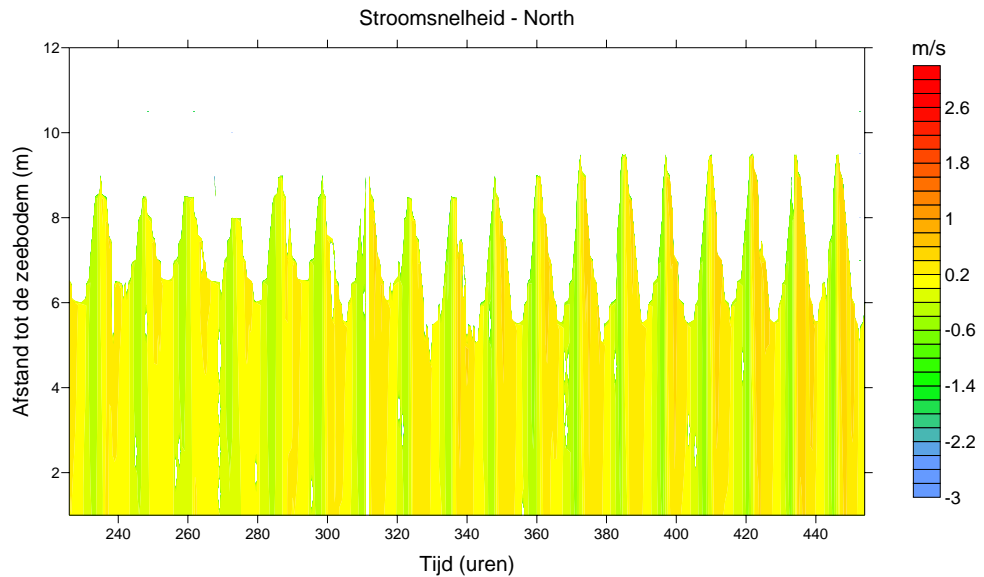
Figuur 5: Profiel van de oostelijke snelheidscomponent van 27 maart 2006 11h01 tot 5 april 20h01. Een verticaal profiel wordt weergegeven elke 30 minuten.



Figuur 6: Profiel van de oostelijke snelheidscomponent van 5 april 2006 20h01 tot 15 april 2006 9h01. Een verticaal profiel wordt weergegeven elke 30 minuten.



Figuur 7: Profiel van de noordelijke snelheidscomponent van 27 maart 2006 11h01 tot 5 april 2006 20h01. Een verticaal profiel wordt weergegeven elke 30 minuten.



Figuur 8: Profiel van de noordelijke snelheidscomponent van 5 april 2006 20h01 tot 15 april 2006 9h01. Een verticaal profiel wordt weergegeven elke 30 minuten.

3.2. Bodemstalen

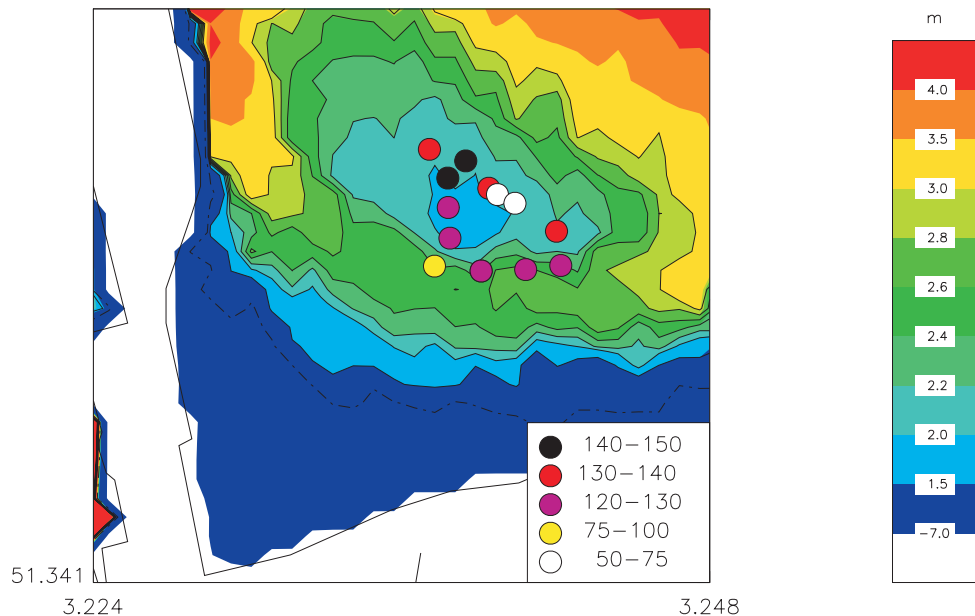
De juiste samenstelling van het sediment op de nieuwe zandbank is niet echt gekend. Er kan worden aangenomen dat het gaat om een mengeling van fijn zand en slib (cfr. 2.3). Bovendien is het mogelijk dat de samenstelling van het materiaal varieert over de tijd. Toch is het van belang om te weten uit welk materiaal de zandbank opgebouwd wordt. Dit is van belang voor de input van de numerieke modellen en voor de bepaling van de herkomst van het sediment. Tot slot is het ook van belang om de eventuele toepassingen van het bodemmateriaal aldaar te kunnen bepalen.

Daarom werd een eenvoudige meetcampagne uitgevoerd, waarbij bij laag water enkele bodemstalen werden genomen. Deze staalname gebeurde tijdens een springtij periode, zodat te voet tot op de zandbank kon worden gewandeld. De bodemstalen werden eenvoudig met een plexibuis genomen. Er werden dus geen 'boringen' in de diepte uitgevoerd, enkel oppervlaktestalen konden op deze manier worden genomen. In Tabel 1 worden de posities en de tijd van de genomen stalen vermeld. De posities zijn voorgesteld in Figuur 9. Uit de positie van de stalen ten opzichte van de zandbank, lijkt het dat de stalen vooral in het zuiden en het oosten van de bank genomen zijn, en dat in het noordelijke en westelijke deel van de bank geen stalen genomen werden. Dit komt echter niet overeen met de persoonlijke ervaring tijdens de staalname, waarbij ook zo noordelijk mogelijk stalen werden genomen. Dit zou erop kunnen wijzen dat er een kleine verschuiving naar het noorden (en westen) zou kunnen opgetreden zijn in de bathymetrie, waardoor de posities op de kaart te zuidelijk liggen.

In Appendix 2 zijn enkele foto's voorgesteld, die werden genomen tijdens deze staalname.

Tabel 1: Posities van de bodemstalen. Geografische coördinaten in ED50.

Staal	Datum	Noorderbreedte	Oosterlengte
Staal A	11/10/06 10:32:03	51° 20,923'	3° 14,237'
Staal B	11/10/06 10:37:31	51° 20,964'	3° 14,273'
Staal C	11/10/06 10:43:53	51° 21,009'	3° 14,269'
Staal D	11/10/06 10:49:07	51° 21,051'	3° 14,268'
Staal E	11/10/06 10:52:27	51° 21,094'	3° 14,225'
Staal F	11/10/06 10:56:57	51° 21,077'	3° 14,310'
Staal G	11/10/06 11:01:19	51° 21,037'	3° 14,364'
Staal H	11/10/06 11:04:49	51° 21,028'	3° 14,384'
Staal I	11/10/06 11:09:42	51° 21,015'	3° 14,425'
Staal J	11/10/06 11:20:32	51° 20,974'	3° 14,522'
Staal K	11/10/06 11:27:49	51° 20,924'	3° 14,532'
Staal L	11/10/06 11:32:11	51° 20,918'	3° 14,450'
Staal M	11/10/06 11:36:43	51° 20,916'	3° 14,346'



Figuur 9: Gemiddelde korrelgrootte (in μm) in de bodemstalen die werden genomen op 11 oktober 2006.

Alle stalen werden op korrelgrootte worden geanalyseerd door het staal voorafgaand chemisch te deflocculeren. Het sediment wordt vóór de voorbehandeling gedroogd op 105 °C en gewogen. Het organisch materiaal wordt vernietigd door toevoegen van H_2O_2 (1/3 verdund) en de carbonaten worden vernietigd met 1N HCl tot de zuurtegraad van het staal een pH-waarde van 2-3 bereikt heeft. Het staal wordt dan twee keer gespoeld met leidingwater en het spoelwater wordt verwijderd door decantatie. Na de tweede spoelbeurt wordt verder gespoeld (3-5 keer) met gedemineraliseerd water tot de fijne fractie van het staal zich volledig in suspensie bevindt. Wederom wordt het staal op 105 °C gedroogd en vervolgens gewogen. Bij elk staal wordt 5 ml peptisant (peptising agent, oplossing van 1,33 g Na-CO_3 en

8,93 g Na-oxalaat in 1 liter water die voor de dispersie van de kleipartikels zorgt) en ongeveer 50 ml gedemineraliseerd water gevoegd. Door een magnetische roerder wordt het staal terug in suspensie gebracht. De grove en de fijne fractie worden nu gescheiden door nat te zeven op een zeef van 75 μm . Na de natte zeping wordt de grove fractie ($>75 \mu\text{m}$) volledig ingedampt in een oven op 105 °C. De korrelgrootteverdeling wordt bepaald door droge zeping. De fijne fractie ($<75 \mu\text{m}$) wordt langzaam ingedampt op een warmhoudplaat tot ongeveer 100 ml. Met een pipet wordt een zekere hoeveelheid sediment verwijderd zodat er nadien nog ongeveer 3 g overblijft. Het staal wordt verder ingedampt tot het bijna droog is. Na toevoeging van een mengeling van gedemineraliseerd water - Glycerol (50 gew. %) wordt het staal gedurende minstens 24 uur in de roerder geplaatst waarna het door de SediGraph 5100 en de Mastertech geanalyseerd wordt. Indien er minder dan ongeveer 1 g fijne fractie ($<75 \mu\text{m}$) aanwezig is, dan wordt geen SediGraph analyse uitgevoerd.

De resultaten zijn aan het Belgisch Marine Data Center (BMDC) overgemaakt en worden voorgesteld in Appendix 3. De resultaten worden samengevat in Tabel 2. Ter vergelijking wordt ook de korrelgrootteanalyse op een ouder staal in de Appendix opgenomen. Dit staal werd op de Paardenmarkt, ten oosten van de nieuwe zandbank, genomen. In Figuur 9 wordt de gemiddelde korrelgrootte op kaart voorgesteld.

Tabel 2: Gemiddelde korrelgrootte D_{mean} en mediane korrelgrootte D_{50} , en percentage zand ($63 \mu\text{m} < D < 2000 \mu\text{m}$), silt ($2 \mu\text{m} < D < 63 \mu\text{m}$) en klei ($D < 2 \mu\text{m}$) in de bodemstalen die werden genomen op 11 oktober 2006.

Staal	Gemiddelde (μm)	Mediaan (μm)	% Zand	% Silt	% Klei
Staal A	77,27	139	87	7	6
Staal B	127,66	147	97	1	2
Staal C	124,51	151	96	2	2
Staal D	140,78	158	98	1	1
Staal E	138,43	155	98	1	1
Staal F	141,51	155	98	1	1
Staal G	131,13	152	97	1	2
Staal H	54,46	132	79	12	9
Staal I	67,57	131	83	11	6
Staal J	134,03	151	98	1	1
Staal K	126,26	145	98	1	1
Staal L	122,59	144	96	2	2
Staal M	125,66	145	97	1	2
Gemiddelde	116,29	147	94	3	3

Op de zandbank wordt vooral fijn zand aangetroffen, met een gemiddelde korrelgrootte van ongeveer 116 μm of een mediane korrelgrootte van ongeveer 147 μm . Merk op dat de gemiddelde korrelgrootte aanzienlijk kan verschillen van de mediane korrelgrootte, vooral voor de stalen, waar een

aanzienlijke hoeveelheid slib en klei aanwezig zijn. In 10 van de 13 genomen stalen is het percentage zand hoger dan 96 %. Enkel in de stalen A, H en I, wordt er een aanzienlijke hoeveelheid slib en klei in de mengsels aangetroffen. Zoals in Figuur 9 kan worden opgemerkt worden de slibrijke stalen vooral gevonden langs de noordoostzijde van de zandbank. Ook in het uiterste zuidwesten wordt slibrijker mengsel aangetroffen. In Foto 19 en 20 in Appendix 2, die werden genomen ter hoogte van slibstalen H en I, wordt de aanwezigheid van slib op de zandbank duidelijk getoond. Het slib kan zich vooral afzetten als een dunne laag tussen de zandribbels. De aanwezigheid van slib op de zandbank is in overeenstemming met de staalname die vroeger op de Paardenmarkt werd uitgevoerd en waar ook een aanwezigheid van 15 % aan slib werd gemeten. De aanwezigheid van slib op de zandbank is ook niet te verwonderen, gezien het turbiditeitsmaximum in de zone voor de haven van Zeebrugge (e.g., Fettweis and Van den Eynde, 2003) en de nabijheid van de B & W Zeebrugge Oost stortplaats van baggerspecie.

3.3. *Luchtfoto's*

Op vijf verschillende dagen (12 mei 2005, 26 juni 2006, 12 juli 2006, 10 augustus 2006 en 5 september 2006) werden een zestigtal luchtfoto's van het gebied voor algemene documentatie genomen. Enkele voorbeelden van deze luchtfoto's worden opgenomen in Appendix 1. Bij laag water is de zandbank duidelijk zichtbaar.

4. Modelleerstudie

4.1. Inleiding

In deze sectie wordt de modelleerstudie, die werd uitgevoerd in het kader van het huidige project, beschreven.

In een eerste deel wordt het hydrodynamische model, dat voor de huidige toepassing werd ontwikkeld, voorgesteld. Zowel het nieuwe modelrooster als de ontwikkelde wetting-drying routine worden besproken. De modelresultaten worden vergeleken met de in situ metingen.

Vervolgens worden de twee verschillende sedimenttransportmodellen beschreven. Het MU-SEDIM model berekent het lokale totale sedimenttransport onder de invloed van de lokale stromingen en is vooral geschikt voor de berekening van het zandtransport. Het MU-STM model is een advectie-diffusiemodel, dat het transport van het materiaal in suspensie, voornamelijk het fijnere slib, berekent. Het gebruik van beide modellen voor de huidige toepassing wordt geëvalueerd en resultaten worden voorgesteld.

Tenslotte werd in het kader van het project een morfologische routine ontwikkeld, om voorspellingen op langere termijn te kunnen uitvoeren. Deze morfologische berekeningen konden echter, wegens technische redenen, niet worden uitgevoerd voor de zandbank ten oosten van de haven van Zeebrugge. Om de ontwikkelde methodologie te testen werden de morfologische berekeningen uitgevoerd voor de Vlaamse Banken.

4.2. Hydrodynamisch model MU-HEIST

4.2.1. Coherens model

De basis van het hydrodynamische model dat in deze toepassing wordt gebruikt, is het driedimensionaal hydrodynamische model COHERENS (Luyten *et al.*, 1999). Dit model berekent de stromingen en de waterhoogtes onder de invloed van de getijden en de atmosferische condities. Het model werd ontwikkeld tussen 1990 en 1998 in het kader van de EU-MAST projecten PROFILE, NOMADS en COHERENS. Het model lost de momentenvergelijkingen en de continuïteitsvergelijking op, met behulp van de 'mode-splitting' techniek. Het model kan gebruik maken van verschillende turbulentieschema's, waaronder het twee-vergelijkingen $k-\varepsilon$ turbulentiemodel, dat in deze studie wordt gebruikt. De goede modellering van de turbulentie is belangrijk om het verticale stromingsprofiel nauwkeurig te kunnen berekenen.

Het model werd geïmplementeerd op twee gekoppelde rooster. Het groffe rooster MU-BCS model heeft een resolutie van 42,86" in lengtegraad (817 – 833 m) en 25" in breedtegraad (772 m) en heeft 20 verticale lagen, gelijk verdeeld over de waterdiepte. Dit model geeft de randvoorwaarden voor het fijne rooster MU-BCSF model, dat een drie maal hogere resolutie heeft, namelijk 275 m op 257 m, en dat 10 lagen over de verticale heeft. Langsheen

de open randen is het MU-BCS model gekoppeld met twee regionale modellen. Het MU-CSM model omvat de Noordwest Europese Continentale Plat en berekent de randvoorwaarden voor het Noordzeemodel (MU-NOS). Dit MU-NOS model genereert de randvoorwaarden voor het MU-BCS model. Het MU-CSM model is een tweedimensionaal model en wordt langs de randen aangedreven door vier semi-diurnale en vier diurnale harmonische constituenten ($Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2$). Het MU-NOS model loopt in drie dimensies.

Atmosferische gegevens (windvectors op 10 m boven het oppervlak en atmosferische druk) werden verkregen van het United Kingdom Meteorological Office. Deze data zijn beschikbaar in een tijdsinterval van 6 u en met een geografische resolutie van $1,25^\circ$ in lengte- en breedtegraad.

Het MU-BCS model werd uitgebreid gevalideerd met 400 uren van stromingsprofielen, die in de Belgische kustwateren werden verzameld met behulp van een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), type Sentinel 1200 kHz Workhorse van RDInstruments (Pison and Ozer, 2003; Van Lancker *et al.*, 2004). De Root Mean Square Error (RMSE) van de amplitude van de stromingen bedraagt 0,05 tot 0,15 m/s, wat een relatieve fout van 10 % tot 15 % vertegenwoordigt, die slechts licht over de diepte varieert. De fout op de stromingsrichting is in het algemeen kleiner dan 20° . Deze validatie toont aan dat de stromingsprofielen adequaat worden berekend door het driedimensionale hydrodynamische model.

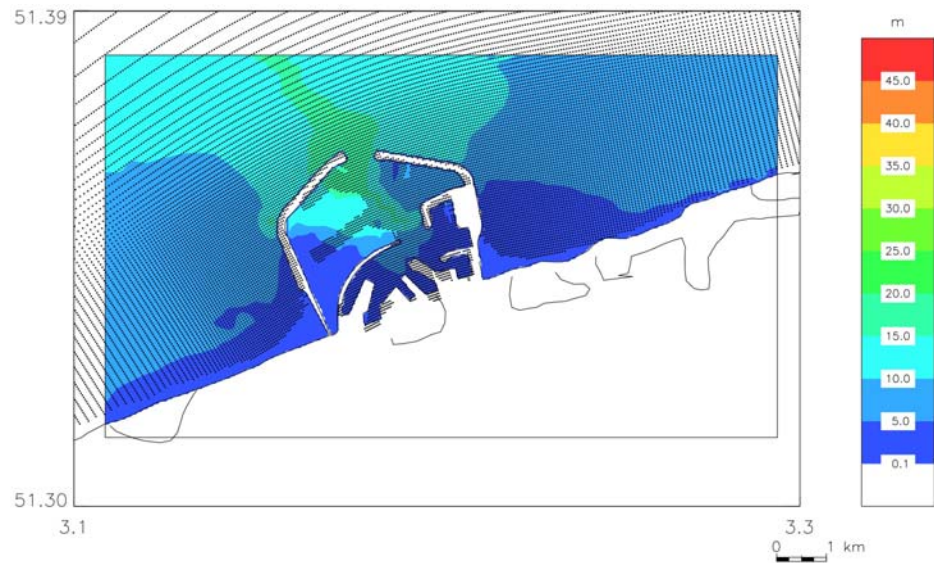
4.2.2. Ontwikkeling nieuw rooster

Voor de studie van de zandbank ten oosten van de haven van Zeebrugge was de resolutie van het BCS-F model onvoldoende. Daarom werd een nieuwe implementatie opgezet, met een hogere resolutie voor het betreffende gebied.

Voor de ontwikkeling van het nieuwe rooster werden contacten gelegd met het Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken, Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust, cel Kust, die regelmatig lodingen uitvoeren ter plaatse. De lodingen die in de loop van 2005 werden uitgevoerd, werden ondertussen gebruikt door het Waterbouwkundig Laboratorium van het Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, voor het opstellen van een rooster van de haven van Zeebrugge. De implementatie van dit 2D numerieke model voor de haven van Zeebrugge wordt uitgebreid beschreven in De Mulder (2006). Met de goedkeuring van AK werd deze bathymetrie naar ons getransfereerd. De bathymetrie heeft een resolutie van ongeveer 50 m x 50 m en is een curvilineair rooster met veranderlijke roostergroottes. In Figuur 10 worden de punten met een positieve diepte weergegeven.

Uitgaande van deze bathymetrie werd een nieuw modelrooster opgesteld voor het COHERENS model. Het nieuwe MU-HEIST model heeft een geografisch rooster en heeft een resolutie van $1,667'' \times 2,8571''$, wat ongeveer overeenkomt met een resolutie van 50 m x 50 m. Dit nieuwe model heeft dus een resolutie die 5 maal kleiner is dan de resolutie van het MU-BCSF model, waarmee het gekoppeld is. Het model heeft in het totaal 246×151 roostercellen. Het model heeft 10 verticale lagen, gelijk verdeeld over de

waterdiepte. Om de stabiliteit van het model te garanderen moet een tijdstap gebruikt worden van 1 seconde.



Figuur 10: Natte punten in de bathymetrie die werd ontvangen van het Waterbouwkundig Laboratorium.

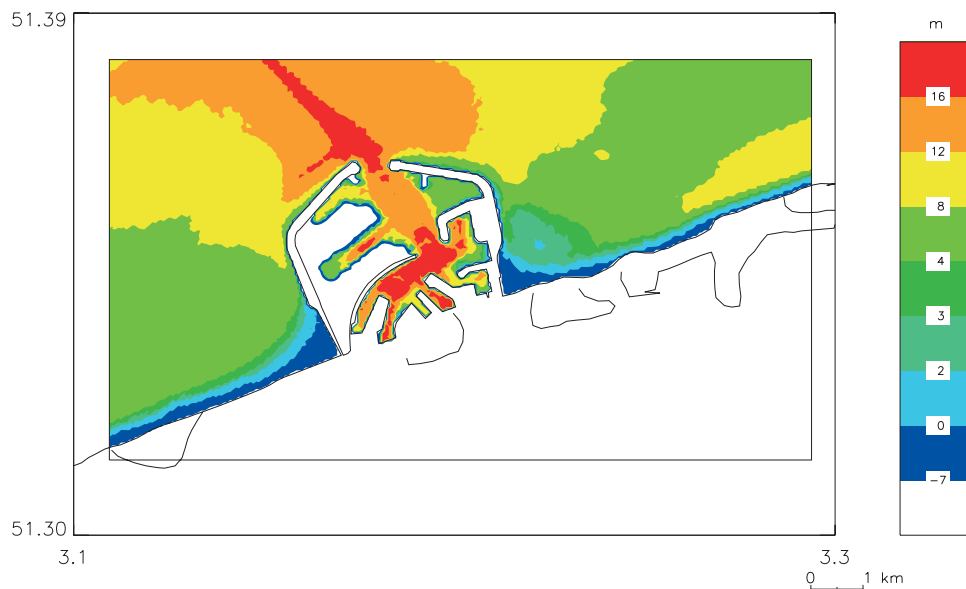
De bathymetrie van het nieuwe model wordt voorgesteld in Figuur 11. Ten oosten van de haven van Zeebrugge is de zandbank duidelijk zichtbaar. Er kan worden opgemerkt dat een deel van de bathymetrie een waterdiepte heeft van minder dan 4 m, dit is de minimumdiepte die gebruikt wordt in modellen die niet zijn uitgerust met een “wetting-drying” module—deze waarde van 4 m is gebaseerd op de grootteorde van de getijamplitude in het betreffende gebied—. Hierdoor moest het model uitgebreid worden met zulk een “wetting-drying” module.

Er moet de nadruk op worden gelegd dat de rekentijd van dit hoge resolutie driedimensionale model aanzienlijk is. Er is ongeveer 8 uur computertijd nodig om een simulatie van 1 dag uit te voeren.

4.2.3. Wetting-drying schema

Het driedimensionaal hydrodynamisch COHERENS model werd aangepast zodat de roosterpunten niet meer de status droog of nat behouden gedurende de simulatie. Dit “wetting-drying” schema laat een nauwkeurige simulatie toe van de stromingen in ondiepe gebieden en verhindert dat een minimum diepte moet worden opgelegd om numerieke redenen.

Het schema dat wordt toegepast, is gebaseerd op het werk van Uchiyama (2004). Gedurende elke 2D tijdstap, wordt de status van het roosterpunt geverifieerd. Als de totale waterdiepte kleiner is dan een opgelegde waarde, worden de naburige cellen gecontroleerd, en wordt eventueel beslist dat de roostercel “droog” valt. In dit geval wordt de waterhoogte constant gehouden op een minimale waterdiepte van enkele cm, totdat de roostercel terug onder water komt. Deze eenvoudige procedure garandeert het behoud van massa.



Figuur 11: Bathymetrie van het nieuwe 3D hydrodynamische model MU-HEIST.

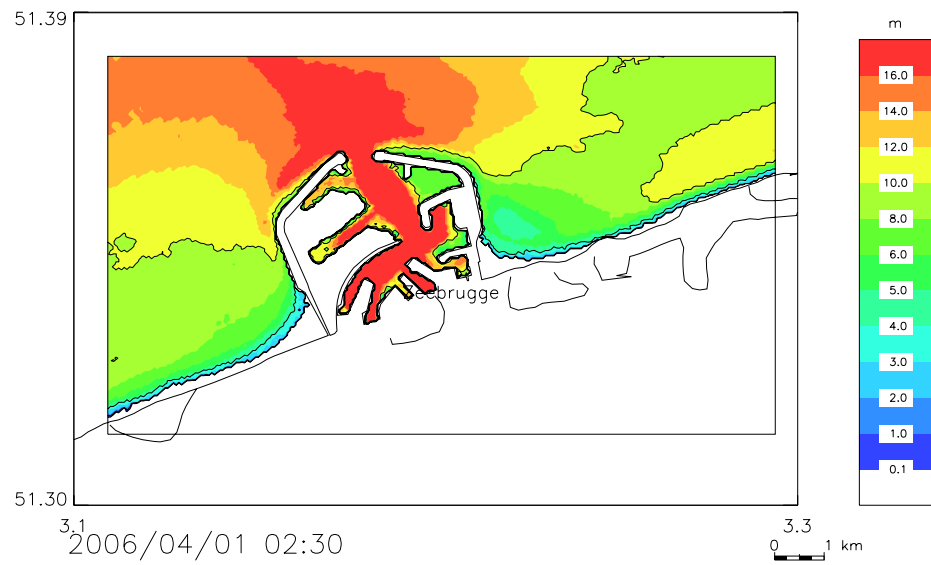
Het schema is geïmplementeerd in het COHERENS model en werd in verschillende situaties uitgetest. Zowel de 2D toepassing als de 3D toepassing werken op het ogenblik naar behoren. Het schema werd onder andere uitgetest en gecontroleerd in het Schelde-estuarium tussen Vlissingen en Antwerpen, waar zich veel “intergetijde” zones bevinden.

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn de totale waterdieptes voorgesteld tijdens hoogwater en laagwater bij een springtij. Terwijl bij hoogwater de zandbank volledig onder water ligt, kan deze bij springtijsituaties aan het oppervlak komen. De geul die zich nog steeds bevindt tussen de zandbank en het strand is duidelijk zichtbaar in de modelresultaten.

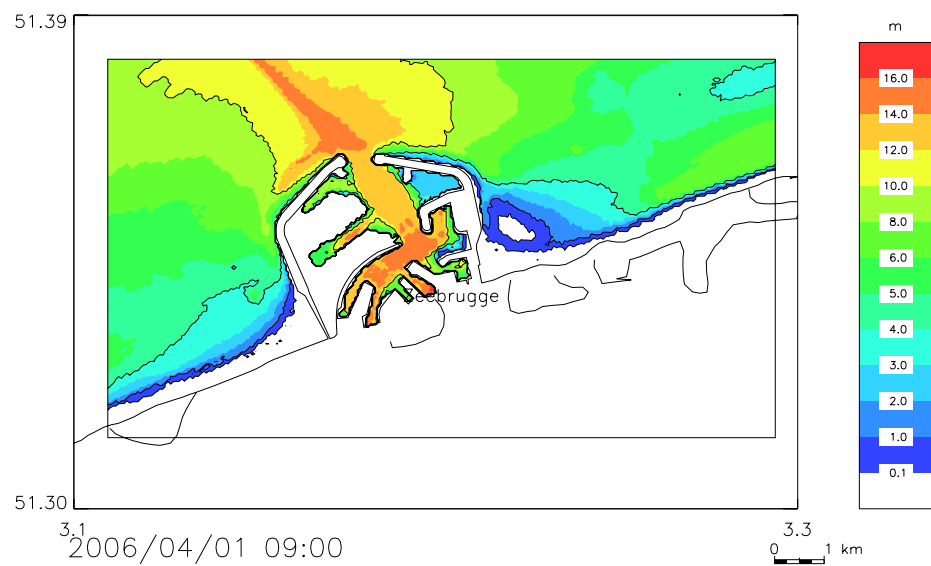
4.2.4. Resultaten

4.2.4.1. Simulatie

Ter controle van de resultaten werd een simulatie uitgevoerd voor de periode 27 maart 2006 tot 21 april 2006, dus over een periode van 25 dagen, die ook de periode omvat waarin de stromingsmetingen werden uitgevoerd met de ADCP (zie boven). Naast de stromingsvelden en de residuele stromingen en transporten, zullen ook de stromingen en de waterhoogtes in een vijftal punten worden voorgesteld. De posities van deze punten wordt weergegeven in Tabel 3, hun positie worden ook getoond in Figuur 14. Terwijl punt 1 op de positie waar de ADCP gepositioneerd was, liggen punten 2 en 3 respectievelijk op de zandbank en in de geul ten zuiden van de zandbank. Punten 4 en 5 liggen voor de havenuitgang van Zeebrugge en meer ten oosten van de zandbank.



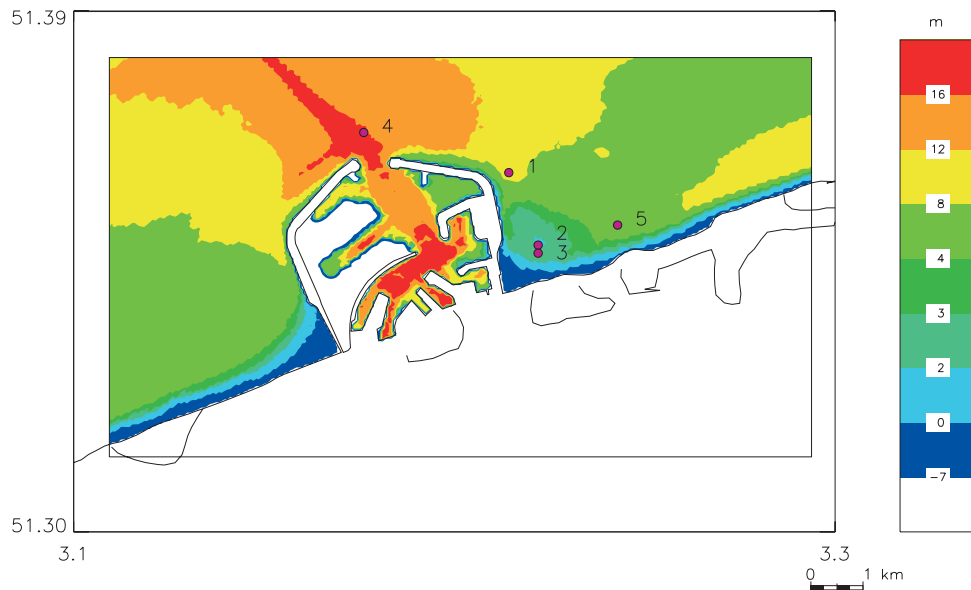
Figuur 12: Totale waterhoogte berekend door het MU-HEIST model tijdens hoog water bij springtij. De contourlijnen worden getoond bij 0,1 m, bij 4 m en bij 10 m.



Figuur 13: Totale waterhoogte berekend door het MU-HEIST model tijdens laag water bij springtij. De contourlijnen worden getoond bij 0,1 m, bij 1 m, bij 4 m en bij 10 m.

Tabel 3: Posities van de uitvoerstations (ED50).

Punt	Beschrijving	Noorderbreedte	Oosterlengte
Punt 1	Positie ADCP	51° 21,72393'	3° 13,80046'
Punt 2	Op de zandbank	51° 20,97214'	3° 14,28572'
Punt 3	In de geul	51° 20,88881'	3° 14,28572'
Punt 4	Voor de haven	51° 22,14000'	3° 11,40000'
Punt 5	Ten oosten van de zandbank	51° 21,18000'	3° 15,60000'



Figuur 14: Posities van de gebruikte uitvoerpunten van de modelresultaten.

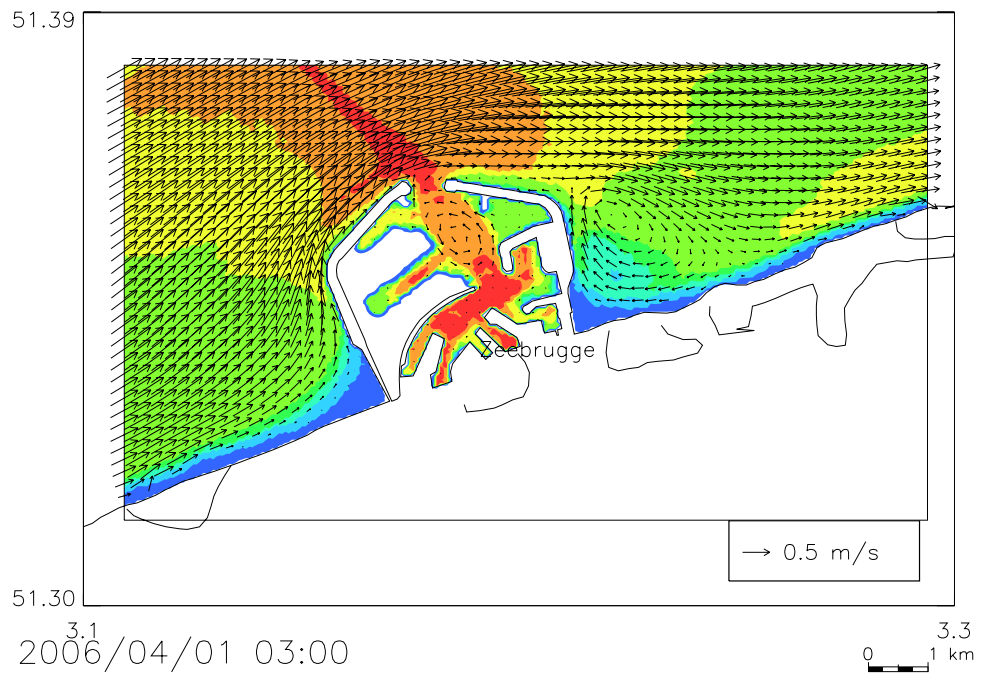
4.2.4.2. *Stromingsvelden*

De over de diepte gemiddelde stromingsvelden voor een getijde gedurende een springtij wordt voorgesteld in Appendix 4. In Figuur 15 worden de over de diepte gemiddelde stromingen voorgesteld juist na hoogwater. De neer tijdens de vloedstroming, waarvan reeds vroeger sprake (zie sectie 2.2), is duidelijk zichtbaar.

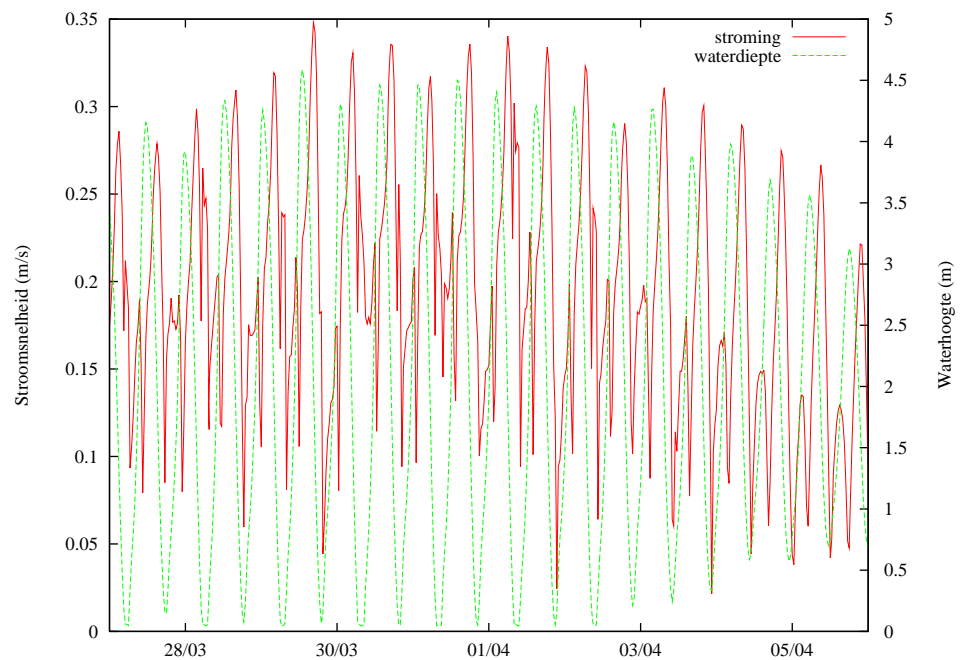
4.2.4.3. *Stromingen in enkele punten*

De totale waterhoogte en de over de diepte gemiddelde stromingssnelheid op de zandbank worden voorgesteld in Figuur 16. Er kan worden vastgesteld dat tijdens de periodes dat de zandbank droog valt, de stroming niet gelijk wordt aan nul. Dit is een gevolg van het feit dat er in deze implementatie van de "wetting-drying" techniek de waterhoogte niet echt nul wordt maar er een minimale waterhoogte van 5 cm behouden blijft. Hierdoor kan er een stroming blijven bestaan. Bovendien blijkt dit instabiliteiten mee te brengen zodat de stromingen gedurende deze zeer korte periodes niet echt betrouwbaar zijn. Er kan wel worden opgemerkt dat de stromingen op de zandbank laag blijven en beperkt blijven tot 0,35 m/s. De BMM is op het ogenblik bezig met de verbetering van deze methode en met de implementatie

van een nieuw algoritme om deze onnauwkeurigheden en instabiliteiten te vermijden.

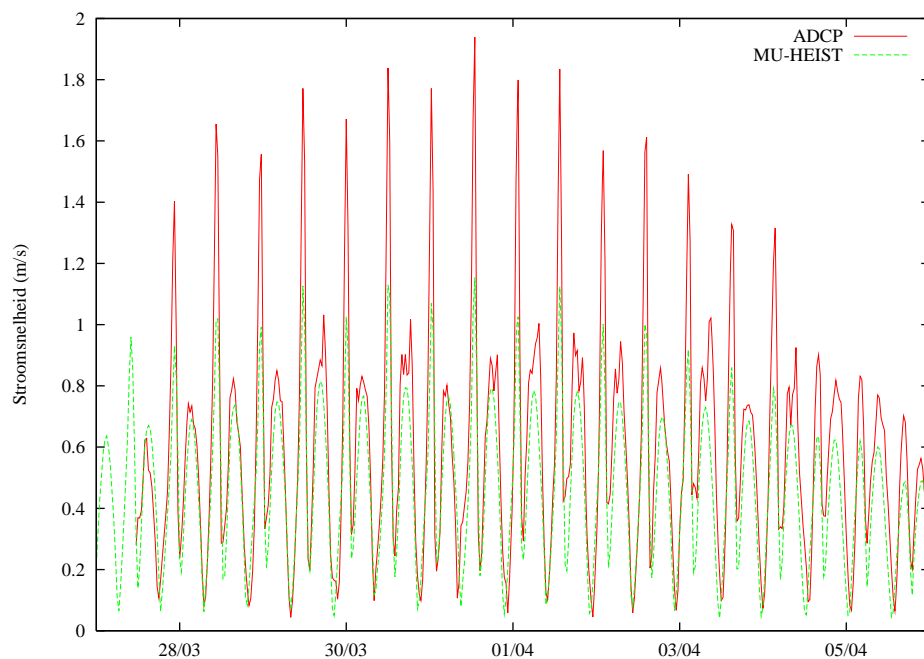


Figuur 15: Over de diepte gemiddelde stromingen op 1 april 2006 3h. Een vector per 16 vectoren wordt getoond.



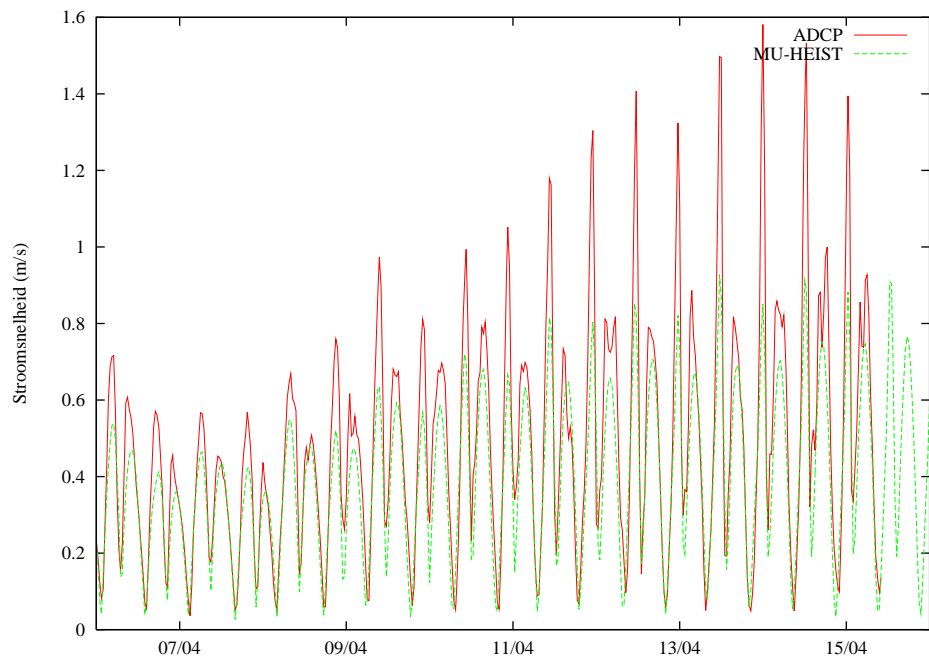
Figuur 16: Totale waterhoogte en stroomsnelheid op de zandbank voor de periode 27 maart 2006 tot 6 april 2006.

In Figuur 17 en Figuur 18 zijn de gemodelleerde over de diepte gemiddelde stromingen voorgesteld samen met de stromingen, opgemeten met de bottom-mounted ADCP (zie boven). De gemodelleerde stromingen blijken vooral tijdens de vloedstromingen duidelijk te laag. Terwijl er tijdens springtij vloedstromingen worden opgemeten tot 1,8 m/s, blijven de gemodelleerde stromingen beperkt tot slechts 1,2 m/s. De gemodelleerde stromingen ten noorden van de haven van Zeebrugge, op een afstand van ongeveer 1 km van de ADCP positie, zijn evenwel ook verbazingwekkend hoog, tot meer dan 1,7 m/s. De te lage gemodelleerde stromingen zouden een gevolg kunnen zijn van de onvoldoende nauwkeurigheid van de bathymetrie op kleine schaal, zoals reeds was opgemerkt bij de bespreking van de positie van de genomen bodemstalen (zie sectie 3.2).

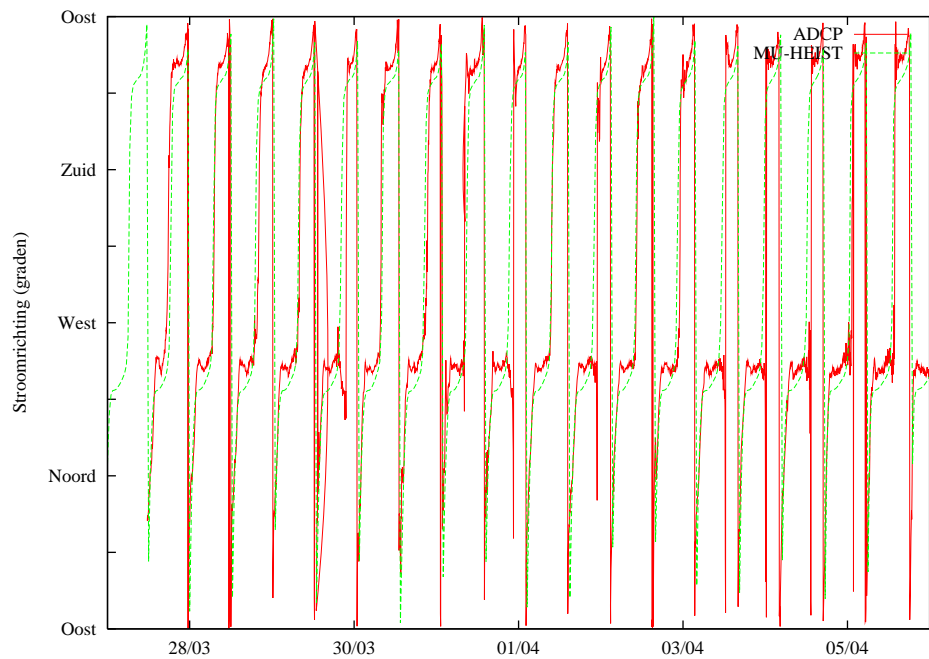


Figuur 17: Over de diepte gemiddelde stromingsnelheid in punt (51° 21,72393' N, 3° 13,80046' E) voor de periode 27 maart 2006 tot 6 april 2006: resultaten van het hydrodynamisch model MU-HEIST en metingen met een bottom-mounted ADCP.

De richtingen van de stromingen worden in het station goed gemodelleerd, zie Figuur 19. Ook hier wordt de neer duidelijk teruggevonden. De opgemeten stromingsrichting op 1 april 2006 3h00 (zie Figuur 15) is 84°, *i.e.*, bijna pal naar het noorden, terwijl de modelresultaten op dat ogenblik een richting van 70° geven, dus een noord-noord-westelijke richting.



Figuur 18: Over de diepte gemiddelde stromingsnelheid in punt (51° 21,72393' N, 3° 13,80046' E) voor de periode 6 april 2006 tot 16 april 2006: resultaten van het hydrodynamisch model MU-HEIST en metingen met een bottom-mounted ADCP.



Figuur 19: Richting van de over de diepte gemiddelde stroming in punt (51° 21,72393' N, 3° 13,80046' E) voor de periode 27 maart 2006 tot 6 april 2006: resultaten van het hydrodynamische model MU-HEIST en metingen met een bottom-mounted ADCP.

4.2.4.4. Residuele stromingen en transporten, maximale stromingen

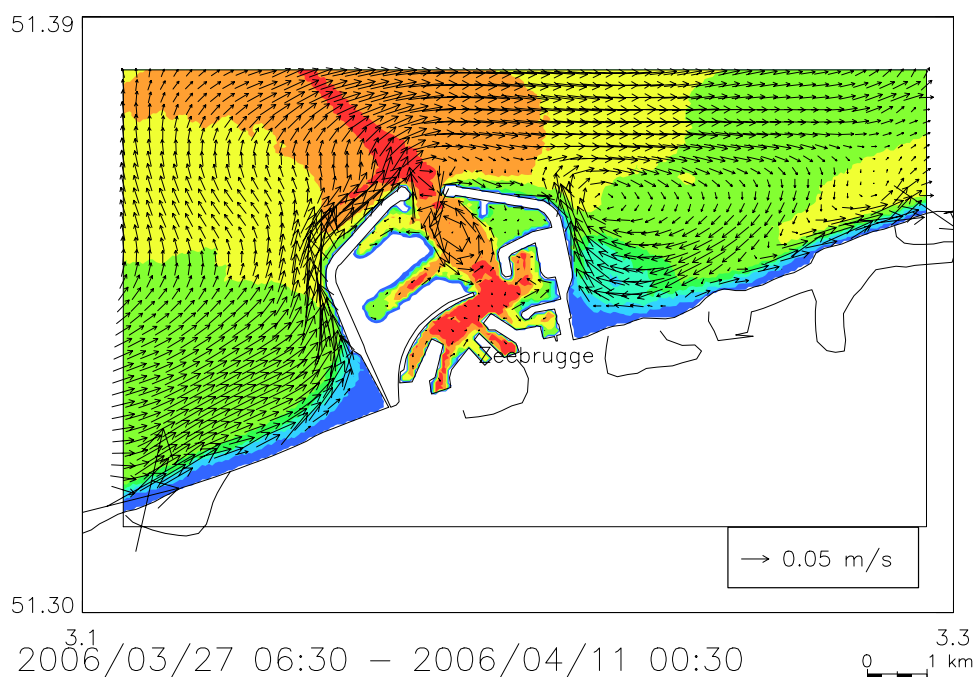
In Figuur 20 en Figuur 21 zijn de residuele stromingen en de residuele transporten voorgesteld voor het gebied over een volledige springtij-doodtij cyclus. De residuele stromingen zijn de vectorieel gemiddelde stromingen en worden gedefinieerd als:

$$\overline{u}_{res} = \frac{\sum \vec{u}}{n} \quad (1)$$

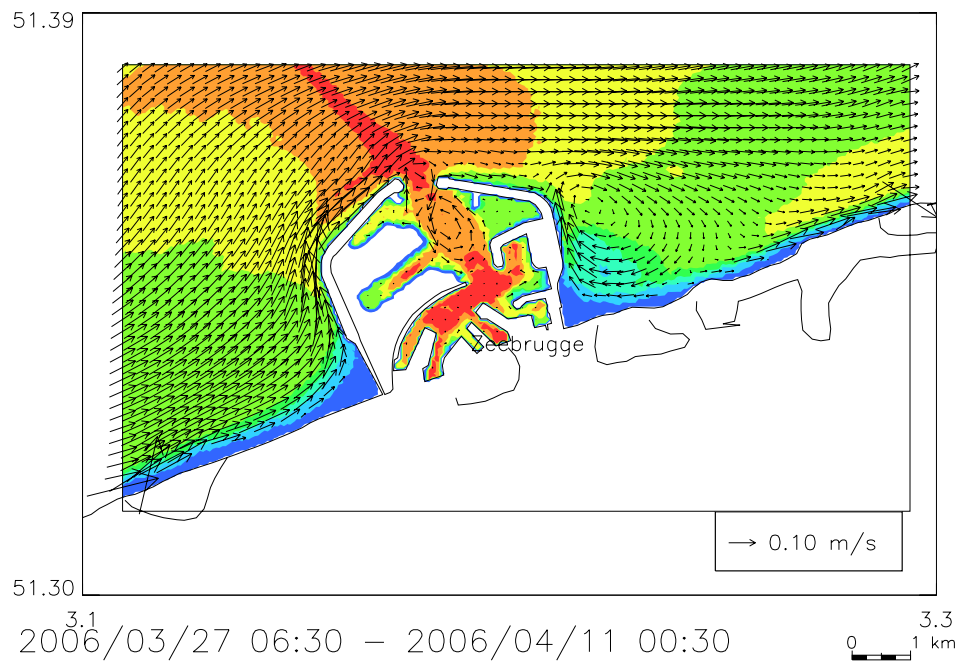
met \vec{u} de over de diepte gemiddelde stromingsvector, en n het aantal vectoren in de gekozen periode, terwijl de residuele transporten bovendien ook rekening houden met de totale waterdiepte en dus een gemiddelde watertransport beschrijven:

$$\overline{u}_{tra} = \frac{\sum \vec{u}h}{\sum h} \quad (2)$$

met h de waterdiepte. De residuele stromingen en de residuele transporten vertonen een zeer gelijkaardig patroon met stromingen naar het noordwesten tot westen ten westen en ten noorden van de haven en met de ontwikkeling van een kloksgewijsdraaiende neer ten oosten van de haven.

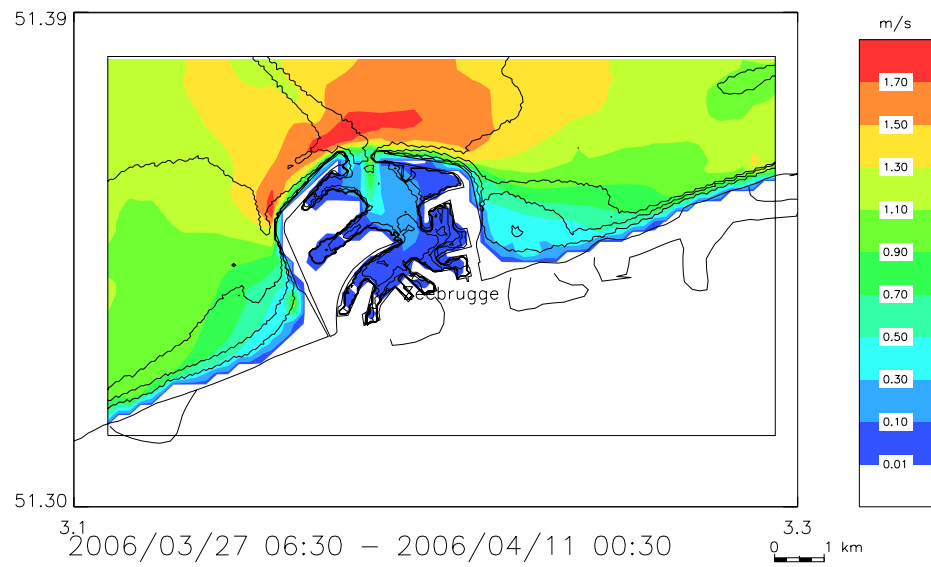


Figuur 20: Residuele stromingen gedurende een volledig springtij-doodtij cyclus. Een vector per 16 vectoren wordt getoond.

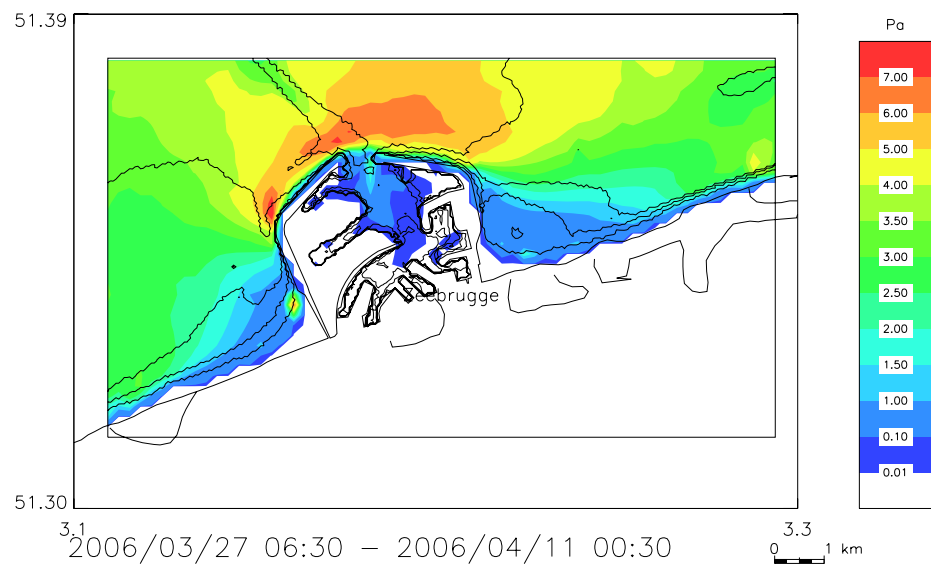


Figuur 21: Residuele transporten gedurende een volledig springtij-doodtij cyclus. Een vector per 16 vectoren wordt getoond.

In Figuur 22 worden de maximale stromingen weergegeven. Voor de haveningang zijn de maximale stromingen heel hoog, tot meer dan 1,7 m/s. Ter hoogte van de zandbank zijn de stromingen veel lager, met maximale stromingen lager dan 0,5 m/s. Ook de maximale bodemspanningen in het gebied variëren heel sterk (Figuur 23). Terwijl voor de haven bodemspanningen tot 7 Pa worden teruggevonden, is dicht tegen de kust, en ter hoogte van de zandbank de bodemspanning steeds lager dan 1 Pa. Merk op dat slib in suspensie kan komen vanaf een bodemspanning van 0,5 Pa. In de berekening van de maximale bodemspanning werd een minimum diepte van 0,2 m werd opgelegd, dit om problemen met de instabiliteiten met de stromingen, zoals die kunnen voorkomen wanneer de waterdiepte te klein wordt, te vermijden (zie sectie 4.2.4.3).



Figuur 22: Maximale over de diepte gemiddelde stromingen tijdens een volledig springtij-doodtij cyclus.



Figuur 23: Maximale bodemspanning tijdens een volledig springtij-doodtij cyclus.

4.3. Sedimenttransportmodel MU-SEDIM

4.3.1. Inleiding

In de huidige studie worden twee sedimenttransportmodellen beschouwd. Het MU-SEDIM model is een 'total load' sedimenttransportmodel, dat het totale sedimenttransport berekent aan de hand van de lokale stromingen. Het MU-STM model is een advectie-diffusie model dat wordt gebruikt voor de modellering van het transport van materiaal in suspensie. De twee modellen worden kort besproken. Vervolgens wordt de ontwikkeling van de morfologische routines besproken. Enkele resultaten van de morfologische modellering worden voorgesteld.

4.3.2. Het sedimenttransportmodel MU-SEDIM

Het sedimenttransportmodel MU-SEDIM berekent het totale sedimenttransport onder de invloed van de lokale hydrodynamische condities.

De bodemspanning, een van de belangrijkste parameters, is een functie van de over de diepte gemiddelde stroomsnelheid en van de Nikuradse bodemruwheid. Voor de berekening van deze Nikuradse bodemruwheid moet een onderscheid worden gemaakt tussen de oppervlakteruwheid en de totale ruwheid. De oppervlakteruwheid is de ruwheid die door de sedimenten aan de bodem worden waargenomen. In dit model wordt de formule van Engelund and Hansen (1967) gebruikt op de oppervlaktebodembewerking te berekenen. De totale ruwheid is de ruwheid die wordt gevoeld door de stromingen en wordt ook beïnvloed door het bodemtransport en door de bodemvormen. De invloed van deze factoren op de totale bodemruwheid wordt in het model berekend met de formules van Grant and Madsen (1982).

In de literatuur zijn veel verschillende formules beschikbaar voor de berekening van het lokale sedimenttransport uit lokale hydrodynamische omstandigheden. Er moet echter goed worden gerealiseerd dat deze formules soms resultaten kunnen geven die over verschillende grootteordes kunnen variëren!

In het MU-SEDIM model wordt de formule van Ackers and White (1973) toegepast, die in een vergelijking die werd uitgevoerd door Sleath (1984) de beste resultaten gaf. Deze vergelijking kan worden geschreven als:

$$\begin{aligned}\overline{Q_s} &= \overline{u} D_{35} \left(\frac{U}{u_*} \right)^n C_1 \left(\frac{F-A}{A} \right)^m & \text{voor } F > A \\ \overline{Q_s} &= 0 & \text{voor } F \leq A\end{aligned}\tag{3}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}\tag{4}$$

$$D_{35} = 0.8219D_{50} \quad (5)$$

met $\overline{Q_s}$ het totale transport, U de grootte van de over de diepte gemiddelde stromingsvector, D_{35} de korrelgroottediameter waarvoor 35 % van het materiaal fijner is, u_* de wrijvingsnelheid, τ de bodemspanning, ρ de dichtheid van het water, n , m , C_1 dimensieloze constanten, F het sedimentmobiliteitsgetal en A het kritische sedimentmobiliteitsgetal voor de start van het sedimenttransport. De D_{35} wordt in het model berekend door een constante verhouding te veronderstellen tussen de D_{35} en de D_{50} van 0.8219 (Cooreman *et al.*, 2000).

De mediane korrelgrootte voor het hele modelrooster kan worden berekend op basis van bodemstalen die vroeger reeds in het hele gebied werden genomen. Een afstands-gemiddelde methode kan worden toegepast om een interpolatie uit te voeren naar het modelrooster (Fettweis en Van den Eynde, 2000). De gemiddelde mediane korrelgrootte over het gehele gebied is 111 μm .

Het sedimentmobiliteitsgetal F kan worden geschreven als:

$$F = \left(\frac{u}{5.66 \log \frac{10h}{D_{35}}} \right)^{1-n} \frac{u_*^n}{((s-1)gD_{35})^{1/2}} \quad (6)$$

met s de relatieve dichtheid van het sediment en g de graviteitsversnelling.

Tenslotte wordt de evolutie van de bodem berekend, met behulp van een continuïteitsvergelijking voor de bodemsedimenten (Djenidi and Runday, 1992):

$$\rho_s(1-p)\frac{\partial \xi}{\partial t} + \nabla \overline{Q_s} = 0 \quad (7)$$

met ρ_s de sedimentdichtheid, p de porositeit van de bodem, t de tijd, ξ de positie van de bodem in vergelijking met de originele positie en $\nabla \overline{Q_s}$ de divergentie van de sedimenttransportvector.

Meer informatie over de vergelijkingen die in het MU-SEDIM model worden toegepast kunnen worden gevonden in Van den Eynde and Ozer (1993).

Het MU-SEDIM model werd reeds met succes toegepast om het zandtransport ter hoogte van de kink van de Westhinder bank (Deleu *et al.*, 2004) en het zandtransport op de Kwintebank (Van den Eynde *et al.*, 2007) te modelleren.

4.3.3. Discussie

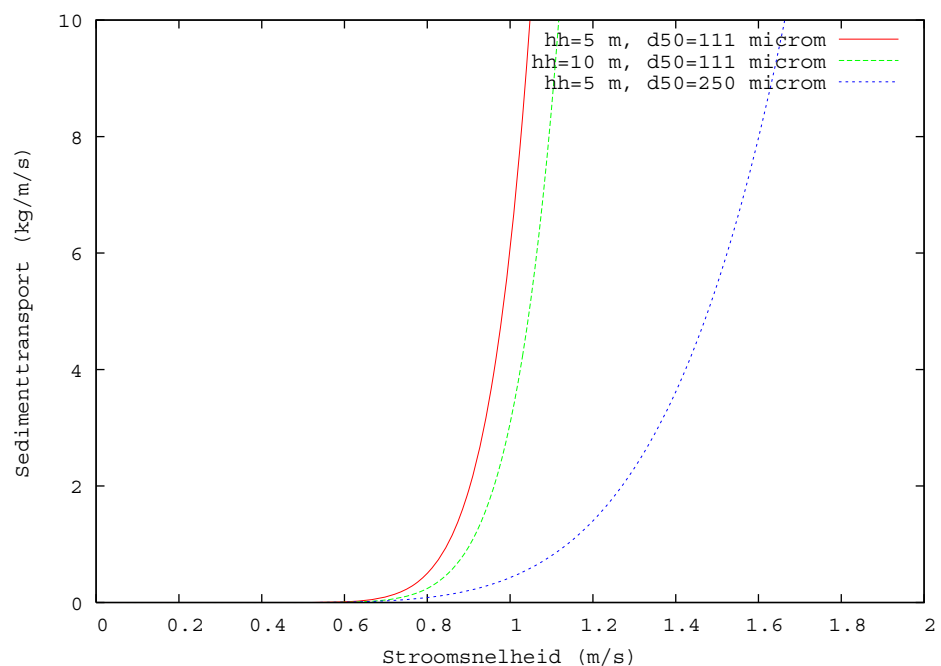
Niettegenstaande zijn successen, is het duidelijk dat het MU-SEDIM model, zoals elk model, niet in alle situaties kan worden toegepast.

Na onderzoek blijkt dat het model duidelijk niet geschikt is om te worden

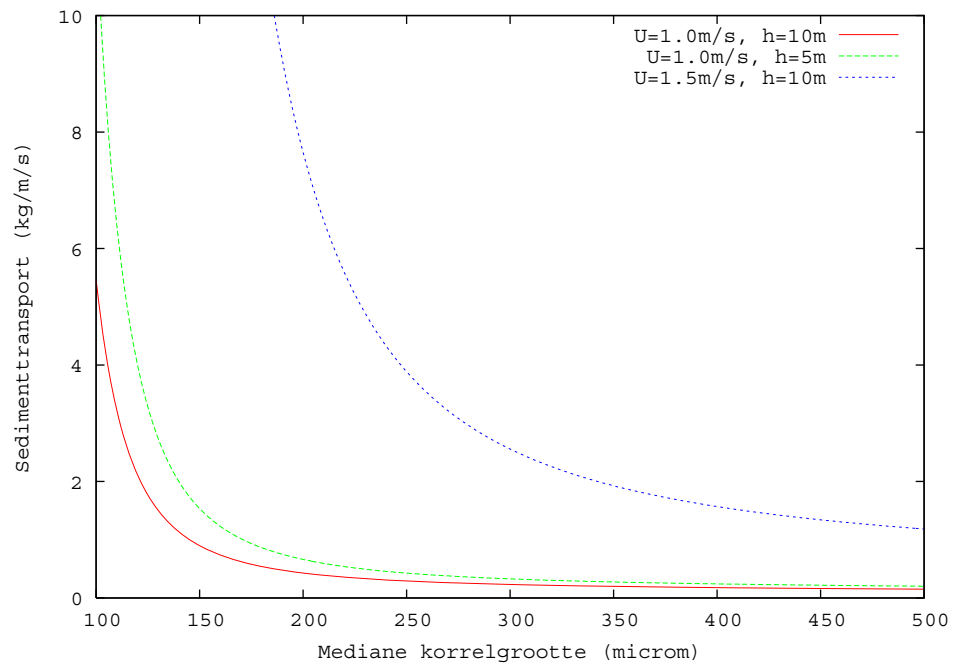
toegepast in gebieden met zeer sterke stromingen, zeker niet bij kleine korrelgroottes. Dit wordt duidelijk geïllustreerd in Figuur 24 waar het sedimenttransport wordt weergegeven als een functie van de over de diepte gemiddelde stroomsnelheid.

De sedimenttransporten, bij een mediane korrelgrootte van $111 \mu\text{m}$ —de gemiddelde mediane korrelgrootte voor het gebied, zie sectie 4.3.2—, blijken onrealistisch hoog te worden vanaf stroomsnelheden van $0,9 \text{ m/s}$. Aangezien in de modelresultaten stromingen tot $1,7 \text{ m/s}$ worden berekend, is het duidelijk dat de modelresultaten van het sedimenttransportmodel geen realistische waarden opleveren. Ook bij hogere korrelgroottes ($D_{50} = 250 \mu\text{m}$) stijgen de sedimenttransporten zeer sterk bij stromingen hoger dan 1 m/s , maar hier lijken de sedimenttransporten toch realistischer.

Verder is het model duidelijk ook niet geschikt voor zeer fijne zanden of slib. Ter illustratie wordt in Figuur 25 het sedimenttransport weergegeven voor verschillende mediane korrelgroottes. Het blijkt uit de figuur dat vanaf mediane korrelgroottes kleiner dan $150 \mu\text{m}$, het sedimenttransport terug zeer sterk begint te stijgen. In combinatie met hoge stromingen geeft dit al onrealistische resultaten vanaf een mediane korrelgrootte van $200 \mu\text{m}$. Het is duidelijk dat deze lokale sedimenttransportformules in eerste instantie zijn opgesteld voor het berekenen van zandtransport en dus niet echt geschikt zijn voor de berekening van het transport van materiaal met een mediane korrelgrootte van $150 \mu\text{m}$ of kleiner.



Figuur 24: Sedimenttransport als een functie van de over-de-diepte-gemiddelde stroomsnelheid. h is de waterdiepte; d_{50} is de mediane korrelgrootte.



Figuur 25: Sedimenttransport als een functie van de mediane korrelgrootte. U is de over-de-diepte-gemiddelde stroomsnelheid; h is de waterdiepte.

Merk ook op dat de kritische stroomsnelheid voor het begin van het zandtransport in dit model rond 0,5 m/s ligt. Dit betekent dat het model, ter hoogte van de zandbank, waar de maximale over de diepte gemiddelde stroomsnelheden minder dan 0,5 m/s bedragen (zie Figuur 22), geen transport zou voorspellen.

Het is duidelijk dat er nog meer onderzoek moet worden uitgevoerd om de juiste omstandigheden, waarin het model met succes kan worden toegepast worden, goed te definiëren. Bovendien kan er getracht worden om sedimenttransportformules te aan te passen, zodat rekening kan worden gehouden met de snelheid dichtbij de bodem in plaats van met de stroomsnelheid gemiddeld over de diepte.

Desondanks is het nu reeds evident dat het MU-SEDIM model niet geschikt is voor toepassing in het gebied rond de haven van Zeebrugge, aangezien de stromingen te hoog zijn en de korrelgrootte te klein.

4.4. *Het sedimenttransportmodel MU-STM*

Aangezien het MU-SEDIM model, het model dat het zandtransport berekent uit de lokale hydrodynamische omstandigheden, niet geschikt is voor toepassing in het gebied rond de haven van Zeebrugge, werd ook het MU-STM model beschouwd voor toepassing in dit project.

4.4.1. *Het sedimenttransportmodel MU-STM*

Het sedimenttransportmodel MU-STM is een sedimenttransportmodel voor materiaal in suspensie. Ook dit slibtransportmodel werd op het rooster van het MU-HEIST model geïmplementeerd.

Het model lost de 2D over de diepte gemiddelde advection-diffusie

vergelijking op, die het transport van het materiaal in suspensie doorheen het modelrooster beschrijft:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_1 \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_2 \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D \quad (8)$$

met C de over de diepte gemiddelde concentratie van materiaal in suspensie, het totale transport, u and v de componenten van de over de diepte gemiddelde stromingsvector \vec{u} in x en y richting, K_1 and K_2 de diffusiecoëfficiënten, E en D de erosie- en depositiesnelheden. Deze laatste worden berekend met behulp van de formules van Ariathurai-Partheniades (Ariathurai, 1974) en Krone (1962):

$$E = M \frac{(\tau - \tau_e)}{\tau_e} \quad \text{wanneer } \tau > \tau_e \quad (9)$$

$$D = wC \frac{(\tau_d - \tau)}{\tau_d} \quad \text{wanneer } \tau < \tau_d \quad (10)$$

met M de erosieconstante, τ_e de kritische bodemspanning voor erosie, w de valsnelheid van de partikels en τ_d de kritische bodemspanning voor depositie.

Het model gebruikt de semi-Lagrangiaanse Tweede Momenten methode (Egan and Mahoney, 1972; de Kok, 1994) voor de berekening van de advectie van het materiaal in suspensie. In deze methode wordt al het materiaal in een rooster cel vertegenwoordigd door één rechthoekige massa, met zijden parallel aan het modelrooster, gekarakteriseerd door zijn nulde-orde moment (de totale massa), zijn eerste-orde momenten (het massacentrum) en zijn tweede-orde momenten (de uitgebreidheid van de rechthoek). De diffusie van het materiaal is gebaseerd op het werk van Johnson *et al.* (1988) en berekent de uitbreiding van de rechthoek met behulp van een Fickiaanse diffusie. De diffusieconstanten zijn gelijk aan $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

De kritische bodemspanning voor erosie is functie van de consolidatie. Het consolidatiemodel, met verschillende bodemlagen, is gebaseerd op het werk van Le Normant (1995). Meer informatie over dit consolidatiemodel kan worden gevonden in Fettweis and Van den Eynde (2003).

Het MU-STM model werd met succes toegepast om de sedimentbalans voor het Belgisch Continentaal Plat te begroten en om inzicht te geven in de aanwezigheid van slibvelden voor de Belgische kust (Fettweis and Van den Eynde, 2003).

4.4.2. Simulaties

Om de resultaten van het model te evalueren werden verschillende simulaties uitgevoerd met het MU-STM model. De simulaties werden uitgevoerd over een periode van 23 dagen, van 27 maart 2006 tot 19 april 2006. Voor de simulaties werden verder een erosieconstante M van $0.00012 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ en een kritische bodemspanning voor depositie van $0,5 \text{ Pa}$ gebruikt. De kritische

bodemspanning voor erosie was afhankelijk van het consolidatiemodel en varieert tussen de 0,5 Pa voor vers materiaal tot 0,8 Pa voor geconsolideerd materiaal. In Tabel 4 worden verschillende parameters, die in de simulaties kunnen variëren, samengevat.

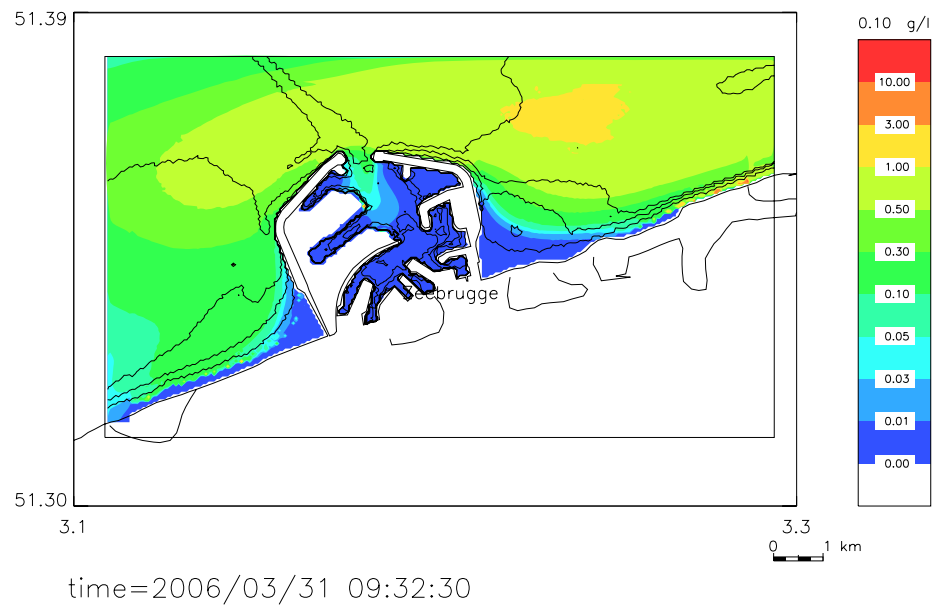
Tabel 4: Modelparameters bij de verschillende simulaties. *Hmin*: minimale waterdiepte; *w* de valsnelheid van de partikels; *Bed*: geeft de aanwezigheid van materiaal op de bodem aan bij de initiële condities; *conc_rand*: concentratie van materiaal aan de open randvoorwaarden.

Simulatie	<i>Hmin</i>	<i>w</i>	Bed	<i>conc_rand</i>
A2	0,4 m	0,01 m	Ja	0,01 g/l
A3	0,1 m	0,01 m	Ja	0,01 g/l
A4	0,4 m	0,0001 m	Ja	0,01 g/l
A5	0,4 m	0,01 m	Neen	0,01 g/l
A8	0,4 m	0,01 m	Ja	0,10 g/l

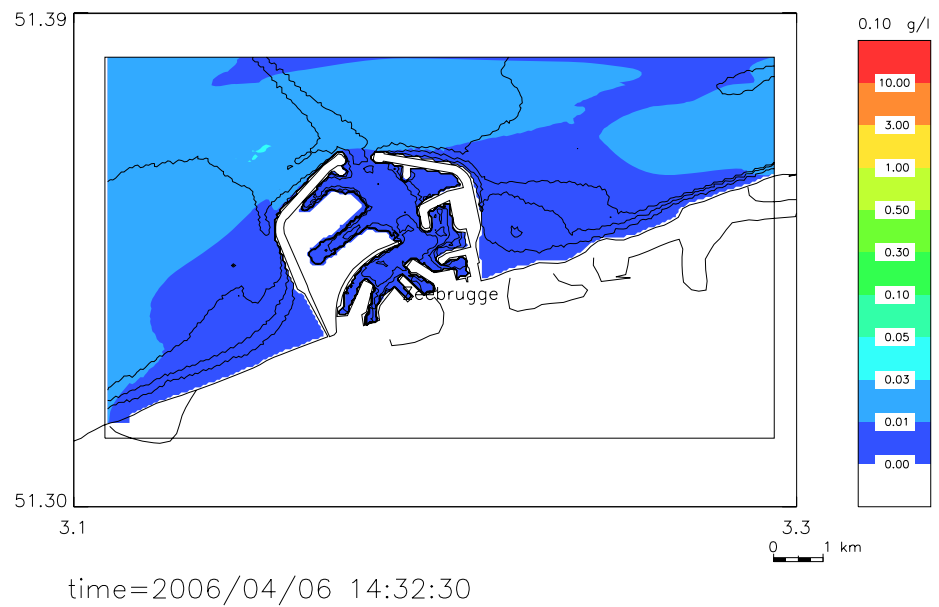
Net zoals bij het MU-SEDIM model wordt een minimale waterdiepte *Hmin* toegepast om instabiliteiten te vermijden. Wanneer de waterdiepte kleiner wordt dan *Hmin* wordt verondersteld dat de rooster cel droog valt. Het suspensiemateriaal dat zich op dat ogenblik in de rooster cel bevindt, wordt afgezet op de bodem. Een minimale waterdiepte *Hmin* van 0,4 m wordt in de simulaties toegepast. In simulatie A3 wordt de invloed van een kleinere *Hmin* nagegaan. Het blijkt dat de invloed op de resultaten verwaarloosbaar is. In alle simulaties, behalve voor simulatie A5 wordt aangenomen dat er zich initieel in elke rooster cel een hoeveelheid van 10^6 kg materiaal op de bodem bevindt. Zo kan worden nagegaan waar er zich erosie en waar er zich depositie zal voordoen. De valsnelheid van de partikels is vastgelegd op 0,01 m/s, behalve in simulatie A4, waar een veel kleinere valsnelheid van 0,0001 m/s wordt toegepast. Tot slot varieert de concentratie langsheen de open randen van 0,0 g/l (simulatie A6), over 0,01 g/l voor simulaties A2, A3, A4 en A5 tot 0,1 g/l voor simulatie A8. De intentie bestaat bij de BMM om in de toekomst de randvoorwaarden voor het model te laten leveren door de resultaten van een model voor een groter gebied, om dus ook “nesting”-technieken toe te passen voor het MU-STM model.

4.4.3. Resultaten

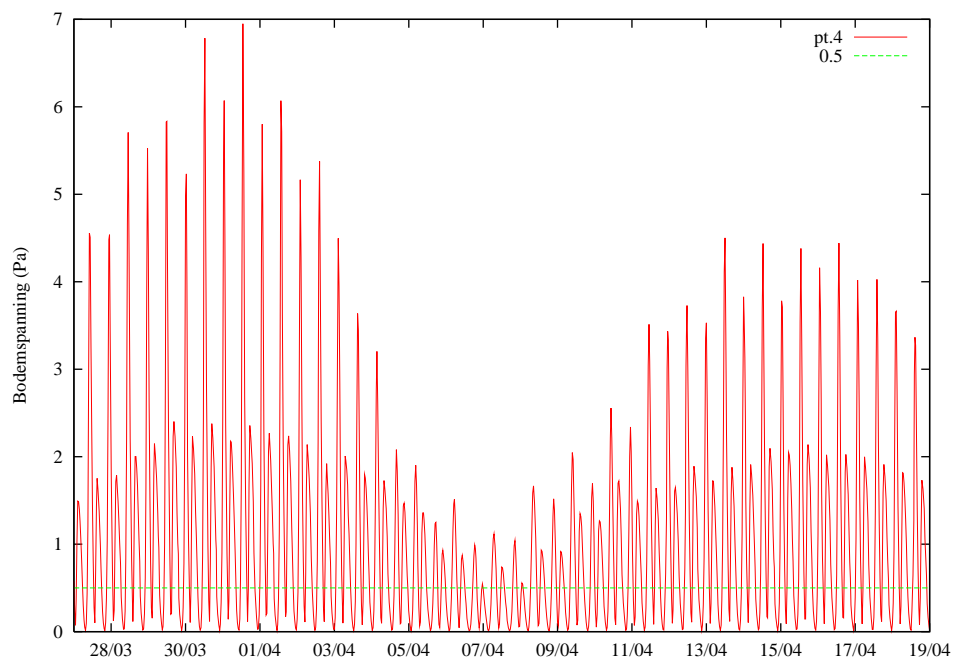
In Figuur 26 en Figuur 27 worden de over het getij gemiddelde concentraties van het materiaal in suspensie voorgesteld voor de standaard simulatie A2 tijdens springtij en doodtij. De springtij-doodtij cyclus is duidelijk zichtbaar. Tijdens springtij kan de concentratie oplopen tot meer dan 0,3 g/l, dus veel hoger dan de randvoorwaarden van 0,01 g/l. Dit is voornamelijk het gevolg van resuspensie van materiaal dat zich op de bodem bevindt. Tijdens doodtij daalt de concentratie aanzienlijk tot minder dan 0,003 g/l. De bodemspanningen blijven tijdens doodtij immers, zelfs in het gebied voor de haven van Zeebrugge (zie punt 4, Figuur 14), waar de stromingen het hoogste zijn, grotendeels onder de kritische bodemspanning voor depositie van 0,5 Pa. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 28.



Figuur 26: Getijgemiddelde concentratie van materie in suspensie voor simulatie A2 voor het getijde gecentreerd rond 31/3/2006 9:32:30 (springtij).



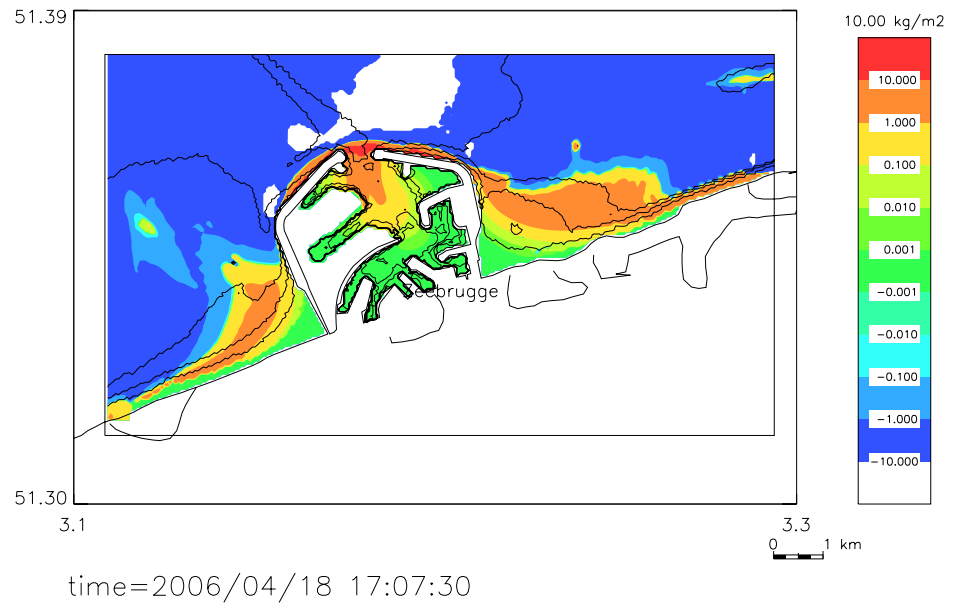
Figuur 27: Getijgemiddelde concentratie van materie in suspensie voor simulatie A2 voor het getijde gecentreerd rond 6/4/2006 14:32:30 (doodtij).



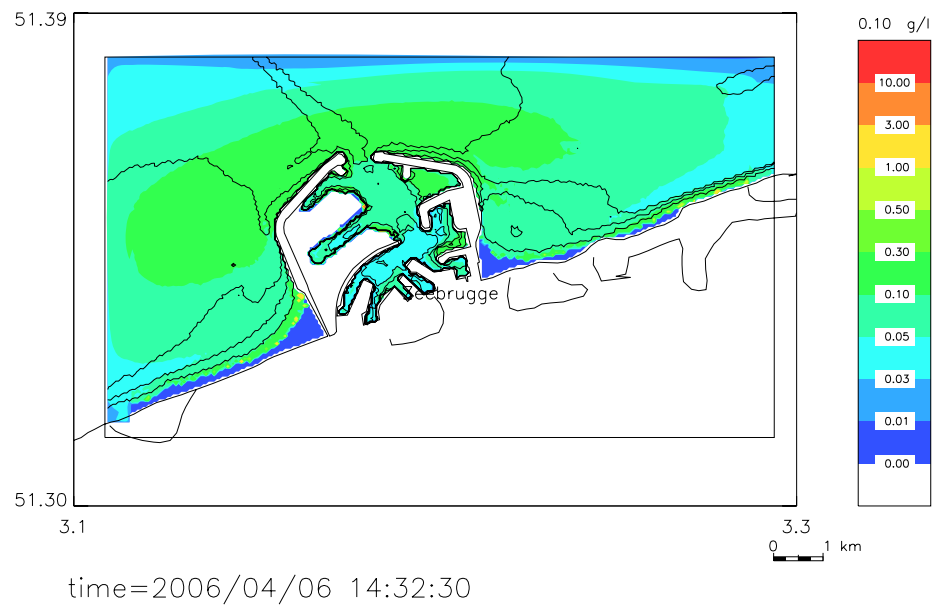
Figuur 28: Tijdreeks van de bodemspanning in punt 4 (zie Figuur 14).

De erosie/depositie kaart op het einde van de periode wordt voorgesteld in Figuur 29. Het is duidelijk dat in heel het gebied erosie van materiaal dat op de bodem lag is opgetreden, behalve in de gebieden ten oosten en ten westen van de haven en in de haven zelf. Daar treedt duidelijk een sedimentatie van materiaal op. Ter hoogte van de zandbank ten oosten van Zeebrugge wordt een beperkte depositie teruggevonden van ongeveer $1,5 \text{ kg/m}^2$. Wanneer er wordt rekening gehouden met een dichtheid van slib van ongeveer 1300 kg/m^3 komt dit overeen met een depositie van ongeveer 1 mm over een periode van 22,5 dagen. Dit komt overeen met een verondieping van ongeveer 2 cm/jaar . Ook in de geul ten zuiden van de zandbank (zie punt 3, Figuur 14) treedt depositie op, maar deze is veel beperkter, namelijk een verondieping van ongeveer 3 mm/jaar .

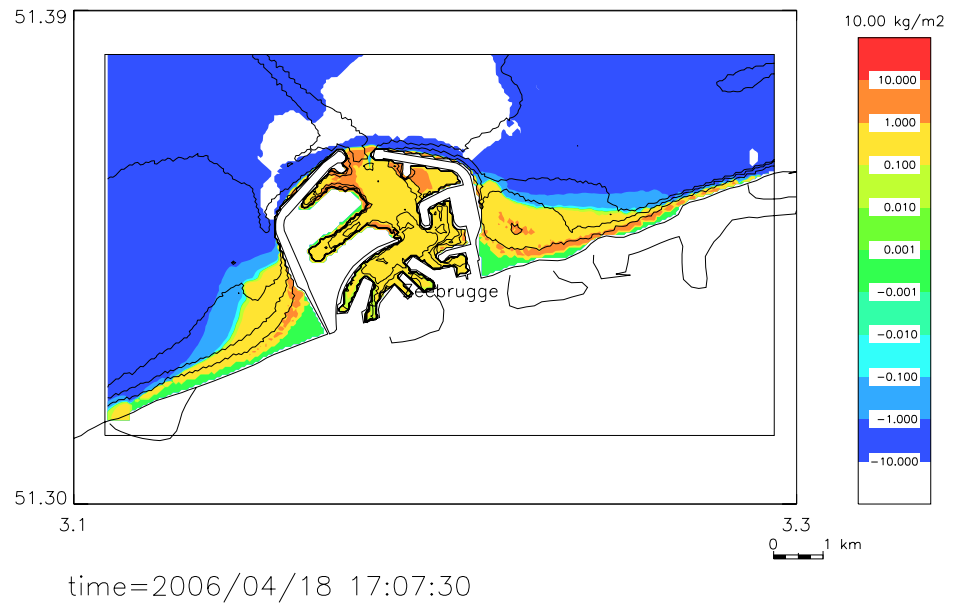
In simulatie A4 werd een veel lagere valsnelheid voor de partikels toegepast van $0,0001 \text{ m/s}$. Dit heeft in de eerste plaats natuurlijk invloed op de concentratie van het materie in suspensie. Ook tijdens doortij blijft er een belangrijke hoeveelheid materiaal in de waterkolom, zie Figuur 30. Ook de sedimentatie wordt natuurlijk beïnvloed. De zone waar sedimentatie optreedt, is in dit geval veel kleiner, maar ter hoogte van de zandbank is de sedimentatie groter (Figuur 31). Dit is ter verklaren dat ter hoogte van de zandbank de bodemspanning bijna altijd kleiner is dan de kritische bodemspanning voor depositie (Figuur 32). Aangezien er nu veel meer materiaal in suspensie is, door de lagere valsnelheid van de partikels, is er veel meer materiaal beschikbaar voor depositie, ter hoogte van de zandbank. Deze depositie gebeurt weliswaar trager, door de tragere valsnelheid, maar de grotere beschikbaarheid van materiaal in suspensie maakt toch dat ter hoogte van de zandbank meer materiaal afgezet wordt.



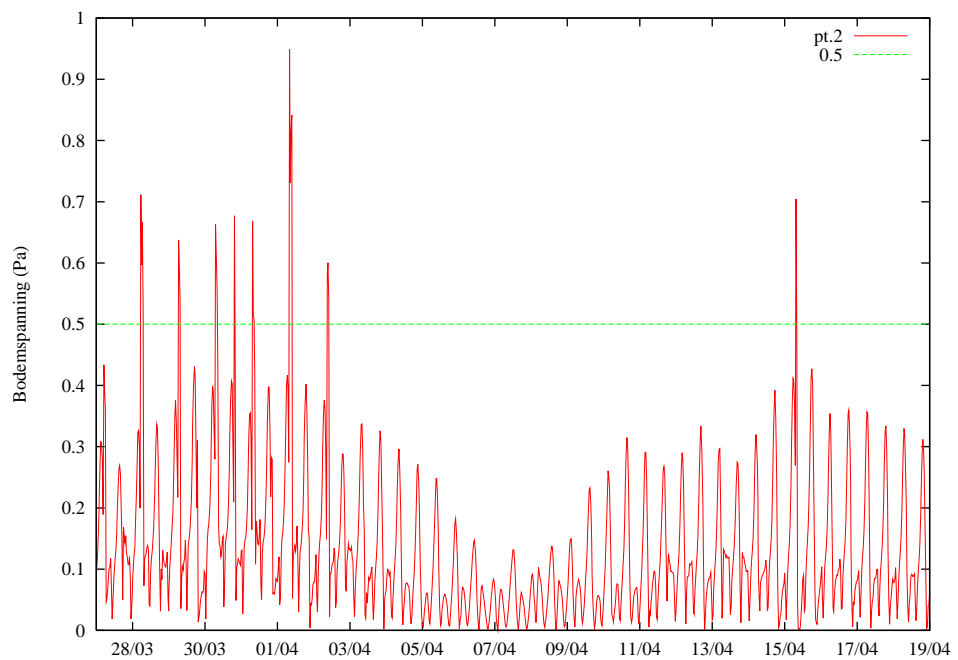
Figuur 29: Getijgemiddelde erosie en depositie voor simulatie A2 voor het getijde gecentreerd rond 18/4/2006 12:07:30.



Figuur 30: Getijgemiddelde concentratie van materie in suspensie voor simulatie A4 ($w=0,0001$ m/s) voor het getijde gecentreerd rond 6/4/2006 14:32:30 (doodtij).



Figuur 31: Getijgemiddelde erosie en depositie voor simulatie A4 ($w=0,0001$ m/s) voor het getijde gecentreerd rond 18/4/2006 12:07:30.



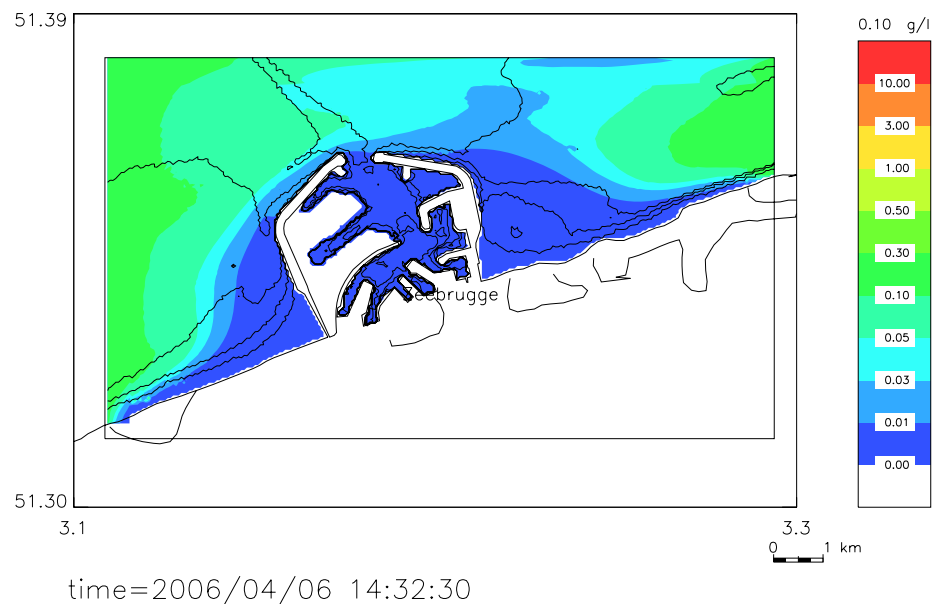
Figuur 32: Tijdreeks van de bodemspanning in punt 2, op de top van de zandbank (zie Figuur 14).

Bij deze simulatie wordt er een 13 cm/jaar op de top van de zandbank afgezet hetgeen gelijkaardig is aan de waarnemingen (15 cm/jaar) vermeld in sectie 2.2. Het maximum van de depositie is bij deze simulatie net op de positie van de nieuwe zandbank (Figuur 31). Bovendien is de depositie beperkt tot de

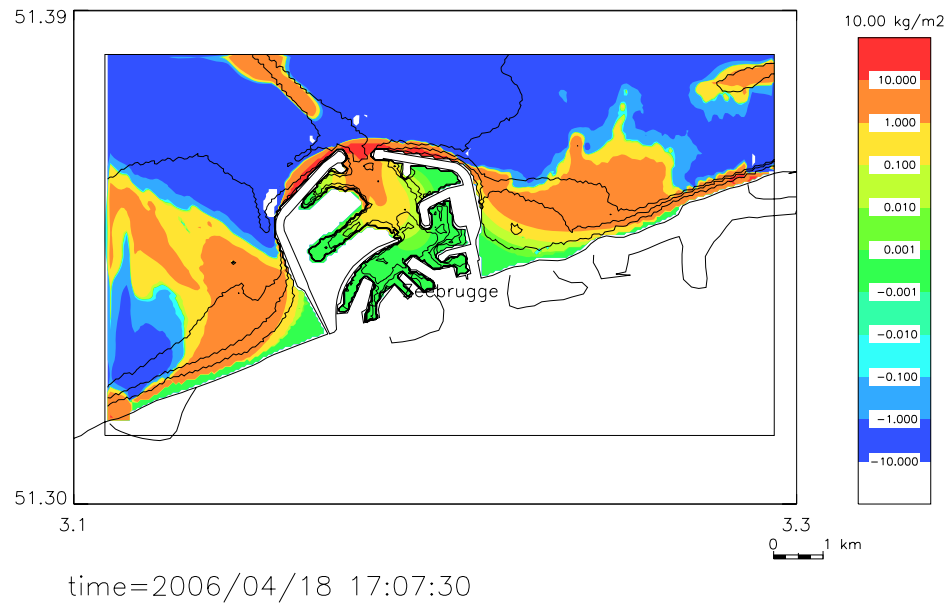
zone voor Heist en Duinbergen, terwijl er meer oostelijk, naar Knokke toe, geen depositie meer optreedt. Ook dit komt goed overeen met de reële situatie (zie sectie 2.2). Deze set van parameters lijken dan ook de goede resultaten te geven en simuleren goed de reële situatie van de depositie ter hoogte van de zandbank. Merk op dat de lage valsnelheid van de partikels compatibel is met metingen die recent werden uitgevoerd ter hoogte van meetpaal MOW 1, iets ten noorden van de haven van Zeebrugge (Fettweis *et al.*, 2007).

Bij de simulatie waar er zich initieel geen materiaal op de bodem bevindt (simulatie A5), is de concentratie in de waterkolom en de depositie ter hoogte van de zandbank veel kleiner.

Wanneer de randvoorwaarden verhoogd worden tot 0,1 g/l in plaats van 0,01 g/l, langsheen de randen, wordt de concentratie in het gebied ook merkkelijk hoger. Vooral tijdens doottijd is de invloed duidelijk zichtbaar (Figuur 33). Door de hogere concentraties wordt het gebied waar materiaal wordt afgezet ook groter (zie Figuur 34). De hoeveelheid materiaal die op de zandbank zelf wordt afgezet wordt echter niet in grote mate beïnvloed. In deze simulatie is de depositie in de vaargeul naar de haven van Zeebrugge is echter wel duidelijk.



Figuur 33: Getijgemiddelde concentratie van materie in suspensie voor simulatie A8 ($conc_rand=0,1$ g/l) voor het getijde gecentreerd rond 6/4/2006 14:32:30 (doottijd).



Figuur 34: Getijgemiddelde erosie en depositie voor simulatie A8 ($conc_rand=0,1$ g/l) voor het getijde gecentreerd rond 18/4/2006 12:07:30.

4.5. *Morfologische berekeningen*

4.5.1. *Ontwikkeling van de morfologische routines*

Om voorspellingen te doen van de evolutie van de bodem op langere termijn moet rekening worden gehouden met de invloed van de verandering van de bodem op de hydrodynamische omstandigheden. De stromingen, die het sedimenttransport en de evolutie van de bodem bepalen, worden inderdaad ook aangepast, wanneer de bodem verandert. Er werden verschillende methoden ontwikkeld, namelijk het “verlengen” van het getij of een extrapolatie van de resultaten verkregen over een getijde (Brière *et al.*, 2007).

Het verlengen van het getijde bestaat uit het voorstellen van N getijden door één enkel getijde. De stromingen worden dan in het model berekend voor de tijdstap van het sedimenttransportmodel. Met deze stromingen wordt dan het sedimenttransport en de bijhorende morfologische veranderingen aan de bodem berekend. Deze morfologische veranderingen worden vervolgens met een factor N vermenigvuldigd en de bodem wordt aangepast. Vervolgens worden de stromingen voor de volgende tijdstap van het sedimenttransportmodel berekend. Het getijde wordt dus als het ware in stukjes gekapt, om ineens N getijden voor te stellen. Bij deze methode verandert de bodem dus tijdens elke tijdstap van het sedimenttransportmodel en ook de stromingskarakteristieken veranderen direct. Deze methode heeft het voordeel dat de verandering van de bodem steeds in evenwicht is met de veranderende stromingen en dat er dus geen instabiliteiten optreden. Bovendien treedt er minder numerieke diffusie op. Het nadeel is dat de

chronologie van de verschillende episodes van de stromingen niet meer wordt behouden en vooral dat het hydrodynamische model en het sedimenttransportmodel moeten gekoppeld zijn, wat een belangrijke aanpassing aan de modellen inhoudt.

Daarom werd in het huidige project gekozen om de meer eenvoudige extrapolatie toe te passen van de resultaten over één getijde. In dit geval wordt verondersteld dat de stromingen ongewijzigd blijven zolang de veranderingen over de bodem geen bepaalde kritische waarde M_{krit} overschreden hebben. Het resultaat van de bodemveranderingen tijdens één getijde wordt dan geëxtrapoleerd over N getijden, zodat de maximale verandering gelijk is aan deze kritische waarde. De bodem wordt vervolgens aangepast en met de nieuwe bathymetrie worden de nieuwe stromingen berekend. Deze methode is veel eenvoudiger toe te passen, maar kan in gebieden met grote gradiënten, instabiliteiten genereren. Het is dus van belang om een goed evenwicht te vinden tussen de noodzaak om een hoge kritische waarde op te leggen, om de rekentijd te beperken en een kleine kritische waarde op te leggen om instabiliteiten tegen te gaan.

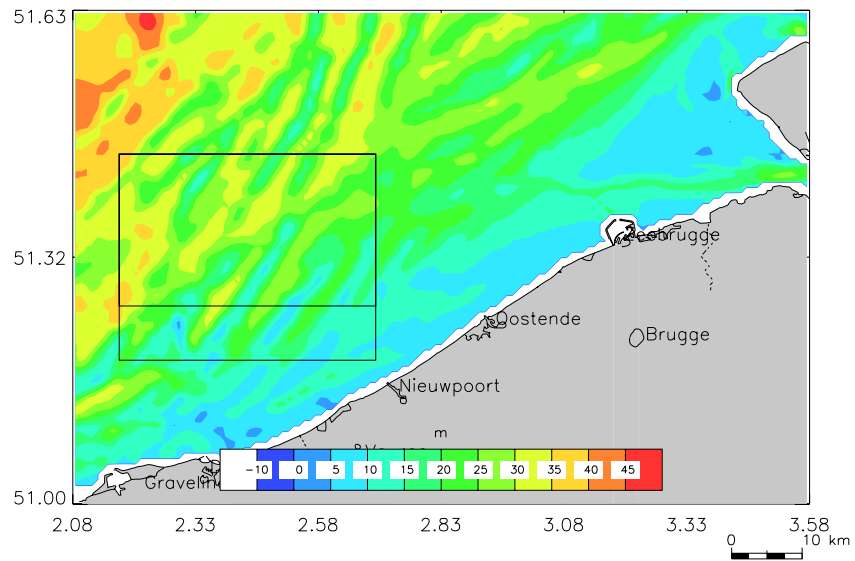
4.5.2. Resultaten

4.5.2.1. *Inleiding*

Oorspronkelijk was het de bedoeling om de morfologische berekeningen uit te voeren voor de zandbank ten oosten van de haven van Zeebrugge. Door verschillende technische redenen was het echter niet mogelijk om, in het kader van het huidige project, deze berekeningen uit te voeren voor dit gebied. Om de ontwikkelde methodologie niettemin te testen werden de morfologische berekeningen uitgevoerd met het tweedimensionale model van de Vlaamse Banken.

4.5.2.2. *Morfologische studie voor de Vlaamse Banken*

Om de morfologische routines te testen werden de morfologische routines toegepast met behulp van het MU-BCZ model. Dit MU-BCZ model is een tweedimensionaal hydrodynamisch model, dat een resolutie heeft van 750 m x 750 m en dat is geïmplementeerd is voor het gehele BCP. In Figuur 35 wordt de originele bathymetrie van het gehele MU-BCZ rooster voorgesteld samen met het gebied waar de morfologische berekeningen worden uitgevoerd.

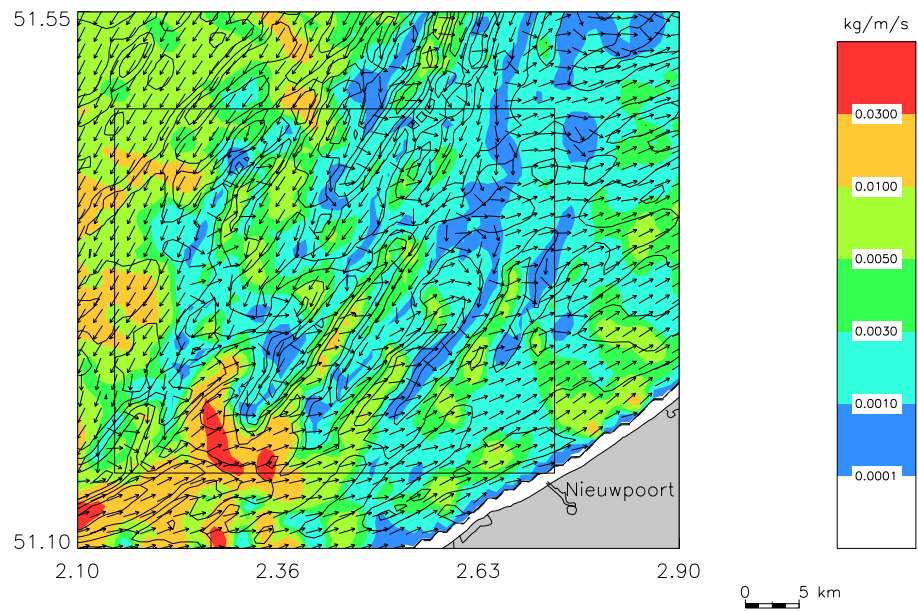


Figuur 35: Bathymetrie van het MU-BCZ model. De rechthoeken geven het gebied aan van de Vlaamse Banken waar de morfologische berekeningen worden uitgevoerd. Het is onderverdeeld in twee delen waar de erosie respectievelijk belangrijk (zuiden) en minder belangrijk (noorden) is.

In de eerste simulatie worden de stromingen en het sedimenttransport berekend voor de periode 2 maart 2004 6u30 tot 17 maart 2004 0u00, dus voor een volledige doortij-springtij cyclus of over een periode van 14 dagen 17h30. In deze eerste simulatie wordt een kritische verandering van de bathymetrie M_{krit} gebruikt van 0,5 m.

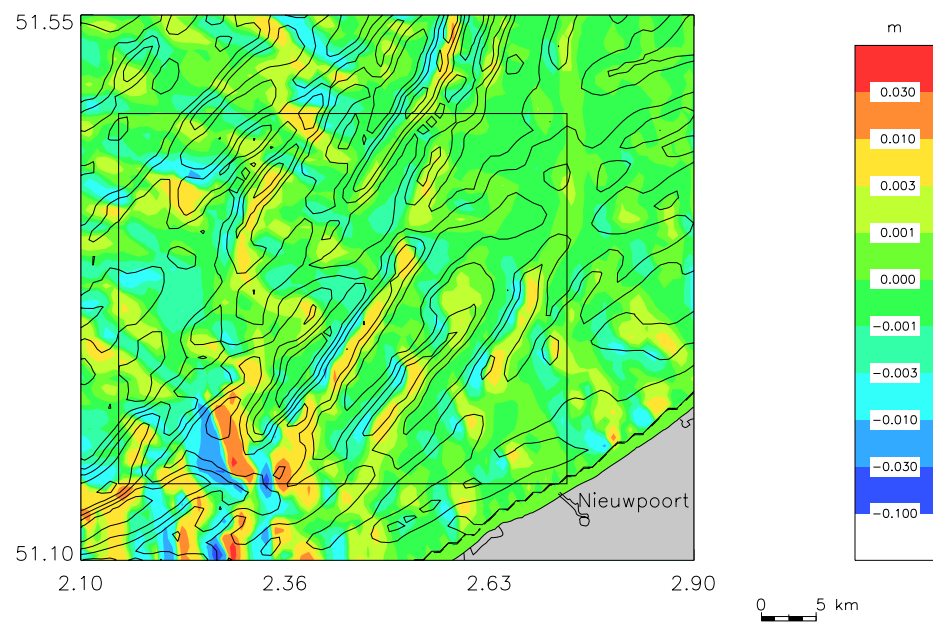
Het sedimenttransport, berekend met het MU-SEDIM model wordt voorgesteld in Figuur 36. Het transport vertoont een noordoostwaarts transport dicht bij de kust en een zuidwestwaarts transport verder uit de kust. Op de Vlaamse Banken zelf is het sedimenttransport zeer onregelmatig. Het sterkste sedimenttransport wordt waargenomen in het zuiden van het gebied, waarvoor de morfologische berekeningen worden uitgevoerd.

Het bijhorende erosie- en sedimentatiepatroon wordt voorgesteld in Figuur 37. Ook hier is het duidelijk dat de belangrijkste erosie- en sedimentatiepatronen optreden in het zuiden van het gebied. De maximale erosie of sedimentatie gedurende deze periode is 2,5 cm. Aangezien de kritische waarde voor de verandering van de bathymetrie was vastgelegd op 0,5 m, wordt in dit geval de periode van simulatie geëxtrapoleerd met een factor $0,5/0,025 = 20$. Dus na een periode van $20 * (14 \text{ dagen } 17\text{h}30)$ wordt de bathymetrie aangepast, en wordt een nieuwe hydrodynamische berekening van de stromingen gemaakt. De stromingen kunnen door de nieuwe bathymetrie aangepast worden, wat op zijn beurt een veranderend sedimenttransport kan veroorzaken.



run1/sta.grid.200403020630

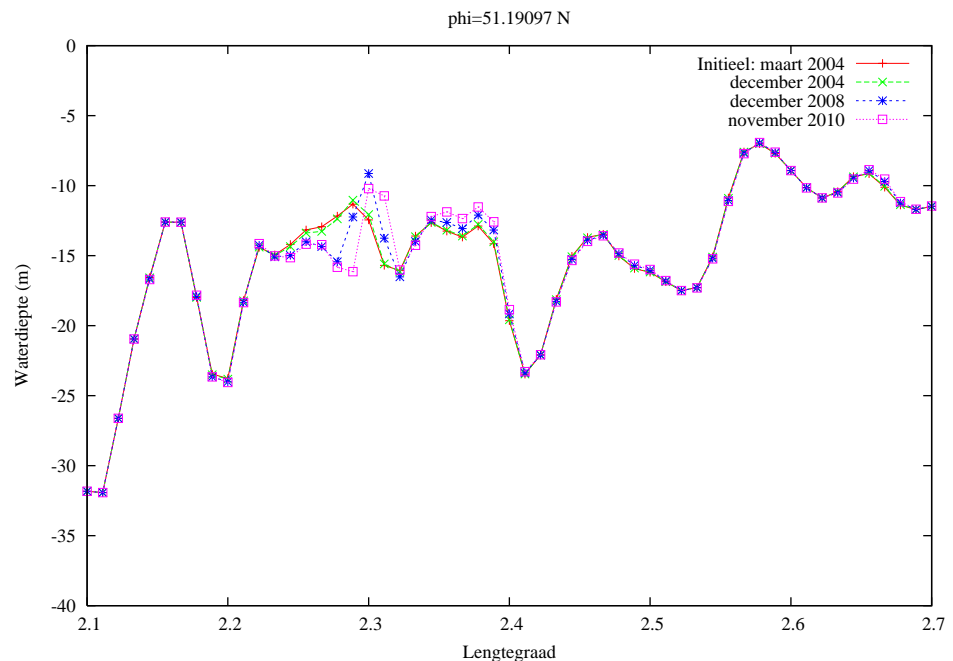
Figuur 36: Sedimenttransport in het gebied van de Vlaamse Banken, voor de periode 2 maart 2004 6u30 tot 17 maart 2004 0u00. De kleuren geven de sterkte van het sedimenttransport aan (in kg/m/s), terwijl de vectoren de richting van het sedimenttransport aangeven. Eén op de vier vectoren in het model wordt voorgesteld.



run1/sta.grid.200403020630

Figuur 37: Erosie- en sedimentatiepatroon (in m) in het gebied van de Vlaamse Banken, voor de periode 2 maart 2004 6u30 tot 17 maart 2004 0u00.

In Figuur 38 en Figuur 39 worden de veranderingen van de bathymetrie op twee verschillende breedtegraden in het zuiden van het gebied voorgesteld. Voor elk van de breedtegraden worden vier profielen weergegeven: het initiële profiel van maart 2004, het eerste nieuw berekende profiel van december 2004, een profiel van december 2008 (profiel 11) en een profiel van november 2010 (profiel 21). Bij breedtegraad 51,19097 °N blijkt een zandbank langs de westkant onderhevig te zijn aan erosie, en ten oosten aan depositie, met als gevolg dat de zandbank stilaan naar het oosten opschuift en daarenboven ondieper wordt. Bij breedtegraad 51,22568 °N wordt een zandbank enkel ondieper. Andere zandbanken zijn niet echt onderhevig aan belangrijke veranderingen.

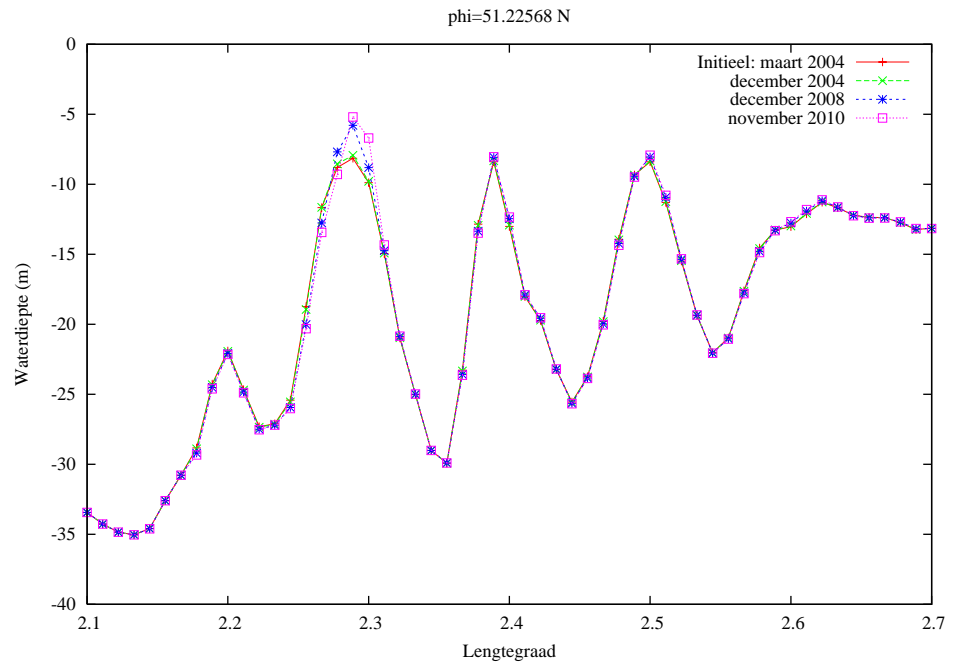


Figuur 38: Verandering van de bathymetrie over de periode van de morfologische berekening voor breedtegraad 51,19097 °N. De profielen worden gegeven voor maart 2004, het initiële profiel, december 2004, het eerste nieuw berekende profiel, december 2008 (profiel 11) en november 2010 (profiel 21).

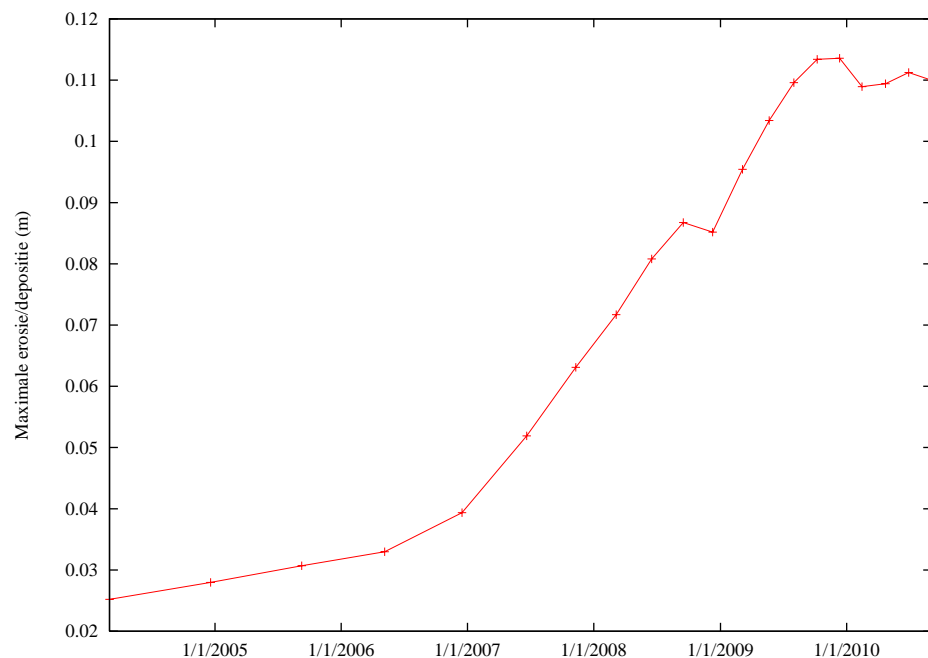
Zoals uit Figuur 38 duidelijk blijkt, kan het voorkomen dat een punt dat initieel aan depositie onderhevig is, later aan erosie onderhevig is of andersom.

Er moet worden opgemerkt dat de tijd nodig om de kritische waarde voor de verandering van de bathymetrie te bereiken gedurende deze simulatie steeds kleiner wordt. Dit wordt voorgesteld in Figuur 40 waar de evolutie maximale erosie of sedimentatie wordt voorgesteld voor een simulatie van een volledige springtij-doodtij cyclus. Terwijl bij de eerste simulatie een maximale depositie wordt berekend van ongeveer 2,5 cm, stijgt deze maximale depositie in de latere simulaties tot ongeveer 11 cm. Dit betekent ook dat de periode waarover de morfologische berekeningen worden uitgevoerd steeds kleiner worden, aangezien in een kortere periode de kritische waarde wordt bereikt. Terwijl in het begin van de simulatie een

extrapolatie over 292 dagen kan worden gedaan, kan tegen het einde van de simulatie slechts een extrapolatie over 66 dagen worden uitgevoerd. Er kan wel worden opgemerkt dat de maximale depositie zich blijkbaar stabiliseert rond 11 cm.

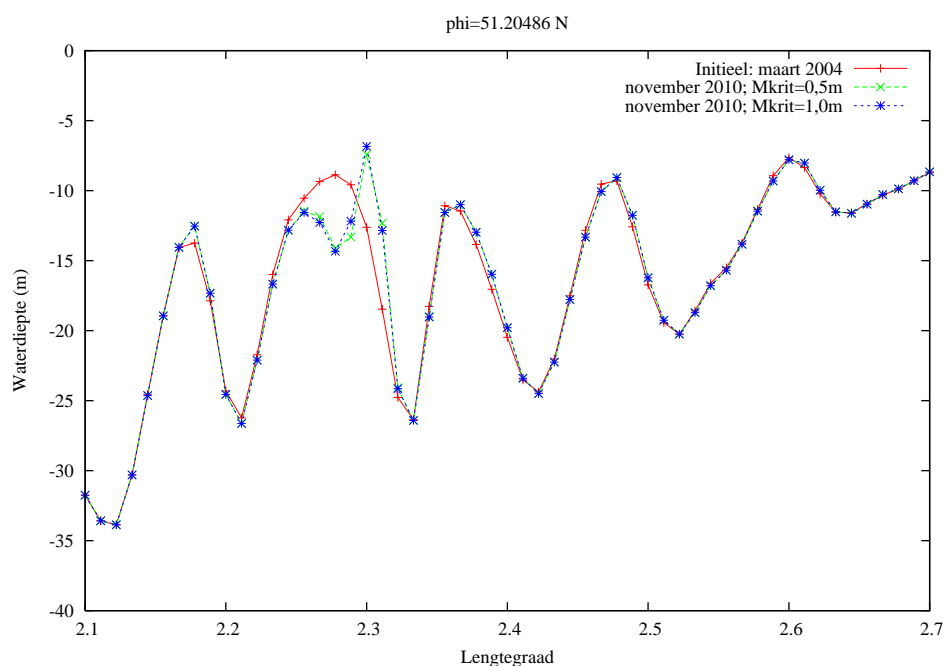


Figuur 39: Verandering van de bathymetrie over de periode van de morfologische berekening voor breedtegraad 51,22568 °N. De profielen worden gegeven voor maart 2004, het initiële profiel, december 2004, het eerste nieuw berekende profiel, december 2008 (profiel 11) en november 2010 (profiel 21).



Figuur 40: Evolutie van de maximale erosie/sedimentatie over een periode van 14 dagen 17h30.

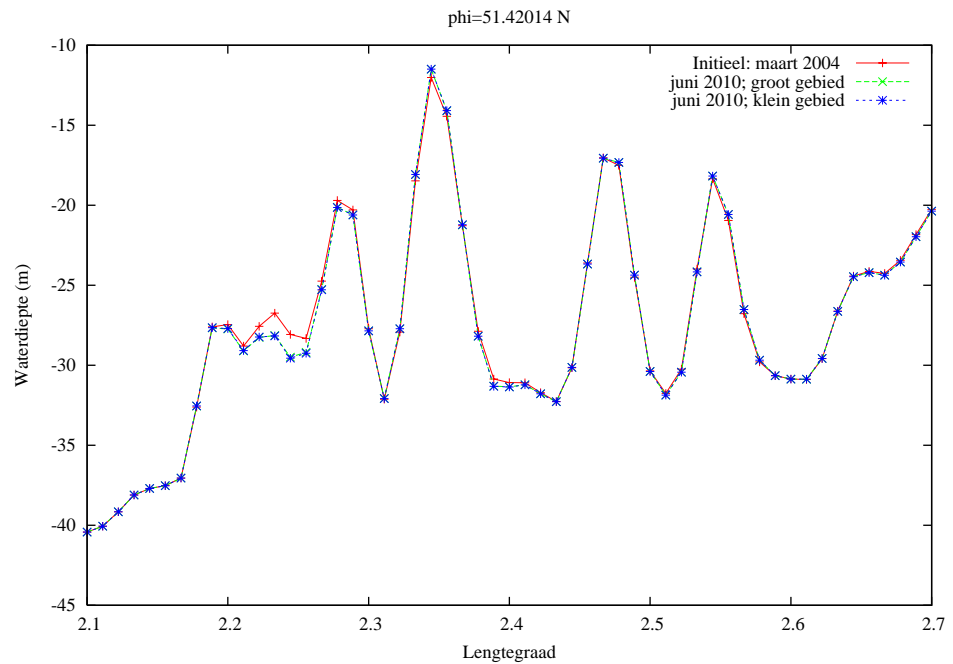
Een tweede simulatie werd uitgevoerd om de invloed van de kritische parameter voor verandering van de bathymetrie na te gaan. De kritische waarde voor de verandering van de bathymetrie M_{krit} werd verhoogd van 0,5 m tot 1,0 m. Dit betekent dat de morfologische verandering, zoals berekend voor één springtij-doodtij cyclus over een grotere periode wordt geëxtrapoleerd, alvorens de stromingen aan te passen. Uit de simulaties blijkt dat de morfologische evolutie door deze verandering niet significant wordt aangepast. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 41. De veranderingen in de berekende bathymetrie na zes jaar zijn verwaarloosbaar. Het is anderzijds duidelijk dat deze parameter niet ongelimiteerd kan verhoogd worden.



Figuur 41: Verandering van de bathymetrie over de periode van de morfologische berekening voor breedtegraad 51,20486 °N. De legende bij de curven geeft de datum aan van de berekende bathymetrie.

Verder wordt de tijdschaal van de morfologische simulaties bepaald door de maximale morfologische verandering in het gebied waar de berekeningen worden gedaan. In deze simulatie trad de maximale erosie of sedimentatie van 2,5 cm op in het zuiden van het gebied. Een derde simulatie wordt daarom uitgevoerd om na te gaan wat de invloed van deze maximale erosie of sedimentatie is. Het gebied waar de morfologische veranderingen worden doorgevoerd, wordt daarom verkleind, zodat het zuidelijke gedeelte van het gebied niet meer in rekening wordt gebracht (zie Figuur 35). De maximale erosie of sedimentatie is in dit geval slechts 1 cm, zodat de extrapolatie van de getijden nu over een factor 50 wordt uitgevoerd (bij dezelfde M_{krit} van 0,5 m). Ook deze verandering heeft relatief weinig invloed op de gemodelleerde veranderingen van de bathymetrie, zoals wordt geïllustreerd in Figuur 42. Ook hier blijft het natuurlijk duidelijk dat de extrapolatiefactor N beperkt

moet blijven.



Figuur 42: Verandering van de bathymetrie over de periode van de morfologische berekening voor breedtegraad 51,42014 °N. De legende bij de curven geeft de datum aan van de berekende bathymetrie.

Tot slot moet het duidelijk zijn dat deze berekeningen zich beperken tot de invloed van het astronomische getijde. De methodologie moet nog aangepast worden om rekening te houden met de meteorologische effecten, het effect van golven en de menselijke activiteiten zoals baggeren en mariene zandontginning.

4.6. *Besluit*

Deze sectie betreft de modellerstudie, die werd uitgevoerd. In het eerste deel werd het hydrodynamische model voorgesteld en geïmplementeerd op een nieuw modelrooster met hoge resolutie voor het studiegebied. Bovendien werd het hydrodynamische model uitgebreid met een wetting-drying routine, zodat er geen minimum diepte meer moet worden opgelegd. In de modelresultaten blijkt de neer, die ten oosten van de dam van de haven van Zeebrugge, goed gemodelleerd. Bovendien wordt ook het droogvallen van de zandbank bij springtij, goed voorgesteld. De modelresultaten werden verder vergeleken met de in situ metingen, die ten noorden van de zandbank werden uitgevoerd. De modelresultaten ter hoogte van de metingen worden onderschat door het model. Terwijl er stromingen worden opgemeten tot 1,8 m/s, blijven de stromingen in de modelresultaten beperkt tot 1,2 m/s. Ten noorden van de haven van Zeebrugge worden wel zeer hoge stromingen, tot 1,7 m/s gemodelleerd. Ter hoogte van de zandbank blijven de gemodelleerde stromingen en de bijhorende bodemspanningen beperkt. De stromingen blijven steeds lager dan 0,5 m/s.

Voor de modellering van het sedimenttransport werden twee modellen beschouwd. Het MU-SEDIM model is een 'total load' transportmodel, dat het sedimenttransport in een punt berekent uit de stroming en sedimentkarakteristieken in dat punt. Dit model is echter niet geschikt is voor modellering van het gebied rond de haven van Zeebrugge. De sedimenttransportformule geeft immers onrealistische resultaten voor de hoge stromingen (tot 1,7 m/s) of het zeer fijne materiaal (111 μm) in het betreffende gebied. Er kan wel worden geconcludeerd dat het bij de huidige stromingen ter hoogte van de zandbank grovere zand weinig zal worden getransporteerd.

Het MU-STM model, dat het transport van het materiaal in suspensie modelleert, werd voor het gebied geïmplementeerd. Uit de modelresultaten blijkt ter hoogte van de zandbank sedimentatie op te treden van fijn materiaal, terwijl in de rest van het gebied eerder erosie zal optreden. De resultaten van het model hangen af van de gekozen parameters, die het sediment karakteriseren. Bij een valsnelheid van het materiaal van 0,01 m/s wordt een sedimentatie ter hoogte van de zandbank gevonden van 2 cm/jaar, terwijl in de geul ten zuiden van de zandbank een kleinere sedimentatie van 3 mm/jaar wordt teruggevonden. Bij een lagere valsnelheid van 0,0001 m/s verhoogt het materiaal in suspensie en de sedimentatie ter hoogte van de zandbank en wordt een jaarlijkse sedimentatie van 13 cm/jaar teruggevonden. Ook andere parameters en de randvoorwaarden van het model hebben invloed op de waarde van de sedimentatie.

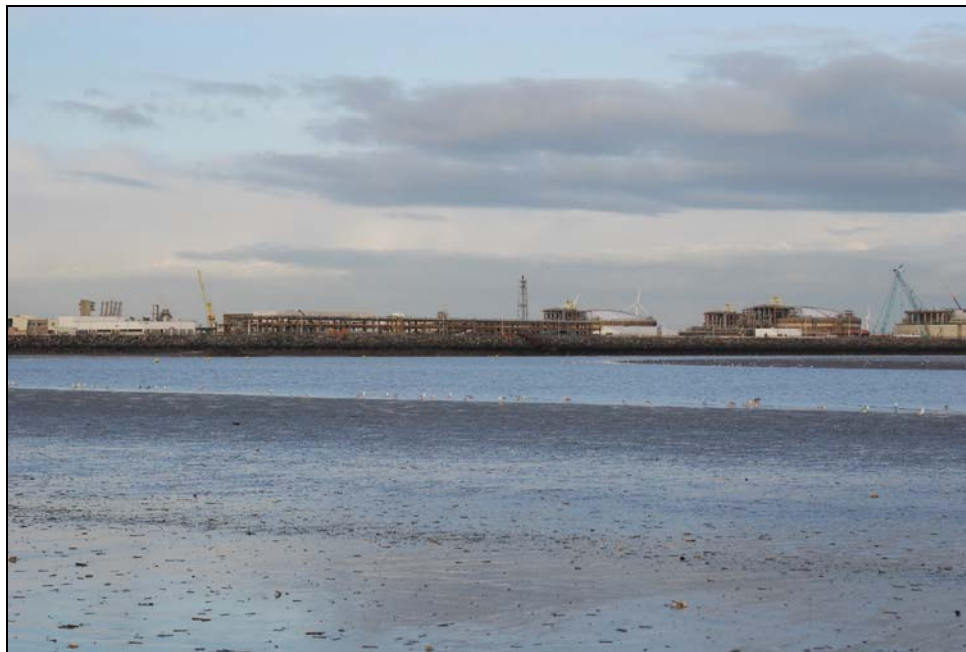
Men kan concluderen dat het gebied ten oosten van de haven van Zeebrugge onderhevig zal zijn aan sedimentatie van vooral fijn materiaal in de grootteorde van enkele cm per jaar.

Ten slotte werd ook een morfologische module ontwikkeld. Om technische redenen kon de morfologische module niet worden toegepast op het gebied rond de haven van Zeebrugge. Om de ontwikkelde methodologie te toetsen werd de module daarom toegepast op de Vlaamse Banken. Uit de modelresultaten blijkt de module goed te werken. Sommige gebieden kunnen eerst onderhevig zijn aan erosie terwijl er later sedimentatie optreedt. Er moet toch vermeld worden dat de lokale sedimenttransportformules onderhevig blijven aan aanzienlijke onnauwkeurigheden. Bovendien zijn de waarden van een aantal parameters niet goed gekend, zoals de bodemruwheid, en wordt geen rekening gehouden met onder andere golven. De resultaten moeten dus met de nodige voorzichtigheid worden behandeld.

5. De fauna van de zandbank

5.1. *Algemeen kader*

Het onderzoeksgebied omvat het laag intertidaal (nat) strand tussen de oostelijke strekdam van de haven van Zeebrugge, het eerste strandhoofd en de zandbank (Figuur 1; Figuur 43). Zoals in sectie 3.2 beschreven, bestaat het uit mobiele zachte sedimenten, fijn zand met slib.



Figuur 43: Foto 23/01/2007: Overzicht van het strand, de geul en de zandbank (Foto KBIN-BMM).

Het nat strand (Figuur 44) vertoont een rug- en zwinmorfologie. Tussen de bank en het strand ligt een ondiepte (zwin) die alleen bij springtij quasi droogvalt. Ze is gekenmerkt door strandribbels. Tussen de ribbels zet zich fijn mobiel slib af (effect wantij), dat soms korrelig is. De sliblaag kan soms dik en papperig zijn en is niet altijd even nadrukkelijk aanwezig.

Mariene bodemdieren of benthos spelen een belangrijke rol in het voedselweb en vormen een belangrijke bijdrage tot de biodiversiteit van de zee. In het benthos worden een aantal groepen onderscheiden op basis van de grootte van de organismen en/of hun levenswijze ten opzichte van het substraat (in, boven of in de onderste laag van de waterkolom). Macrobenthische organismen zijn die organismen die groter zijn dan een millimeter. De macrobenthische infauna leeft ingegraven in het substraat en bestaat hoofdzakelijk uit schelpdieren (Mollusca), borstelwormen (Polychaeta) en stekelhuidigen (Echinodermata). Het epibenthos leeft op het substraat en bestaat hoofdzakelijk uit schaaldieren (Crustacea) en stekelhuidigen (Echinodermata).



Figuur 44: Foto 11/10/2006: Overzicht van het laag strand, met de strandribbels (Foto KBIN-BMM).

Het gebied werd driemaal bezocht voor een snelle inventarisatie: op 11 oktober 2006, op 23 januari 2007 en op 19 april 2007, telkens tijdens periodes van springtij. Dan is het waterpeil zeer laag en komen grote delen van de het strand en van de bank droog. Om praktische redenen werd tijdens het veldonderzoek voornamelijk de grotere —groter dan 1 cm— macrobenthische epi- en infauna geïnventariseerd. Daarnaast leverden vangsten van verschillende kieuwnetvissers en andere kruiers actief op de bank, bijkomende informatie over de epifauna en vissen.

5.2. *Macrobenthische bodemfauna*

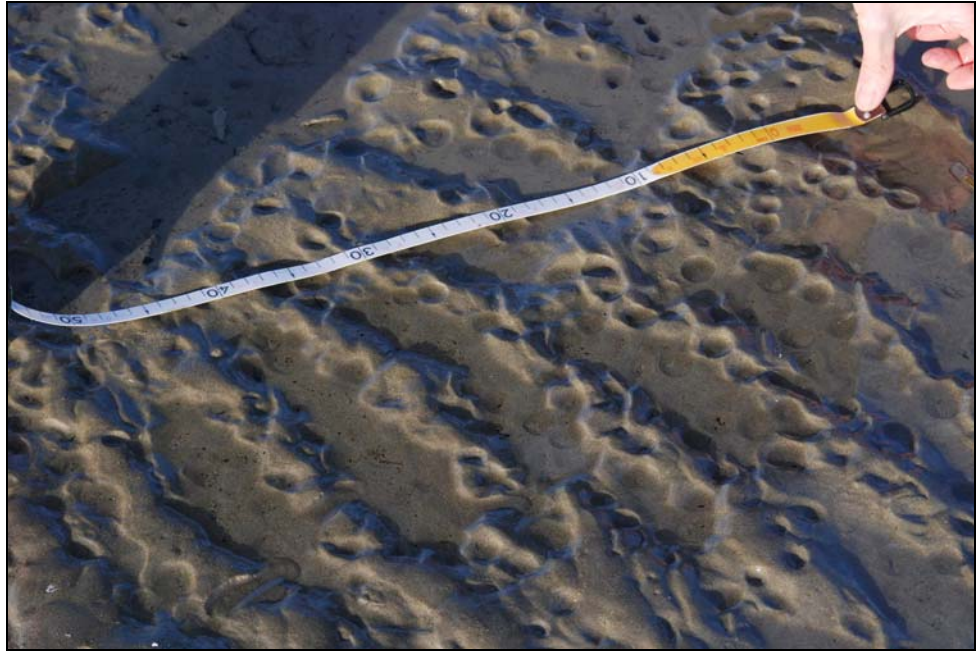
5.2.1. Tweekleppigen – Bivalvia

Het meest opvallend is momenteel het massale voorkomen van de Amerikaanse zwaardschede *Ensis directus* (Figuur 45). Dit is een niet-inheemse tweekleppige die via ballastwater Europa bereikte. Ze werd voor het eerst waargenomen in de Duitse Bocht in 1979 (Von Cosel *et al.* 1982). De eerste Belgische waarneming dateert van 1987 (Kerckhof en Dumoulin, 1987). Ze heeft nu een dominante plaats ingenomen in de ecosystemen dicht onder de kust.



Figuur 45: Foto 11/10/2006: Uitgegraven Amerikaanse zwaardscheden *Ensis directus* (foto KBIN-BMM).

Op het strand verraden de opvallende boorgaten de aanwezigheid van talrijke Amerikaanse zwaardscheden. Ze wijzen op een zeer grote dichtheid van deze soort (zie Figuur 46). De dieren komen bij het keren van het tij deels uit het sediment. Ze worden tijdens het droogvallen vooral gepredateerd door zilvermeeuwen *Larus argentatus* en scholeksters *Haematopus ostralegus*. De populatie bestond in de onderzoeksperiode bijna uitsluitend uit tweejarige dieren, die zich dus gevestigd hadden in de zomer van 2005. Op 11 oktober was de gemiddelde lengte 78 mm ($n = 29$, range 68—90 mm). Dit illustreert een snelle groei van deze soort. Occasioneel werden ook oudere exemplaren aangetroffen.



Figuur 46: Foto 23/1/2007: *Ensis* boorgaten (Foto KBIN-BMM).



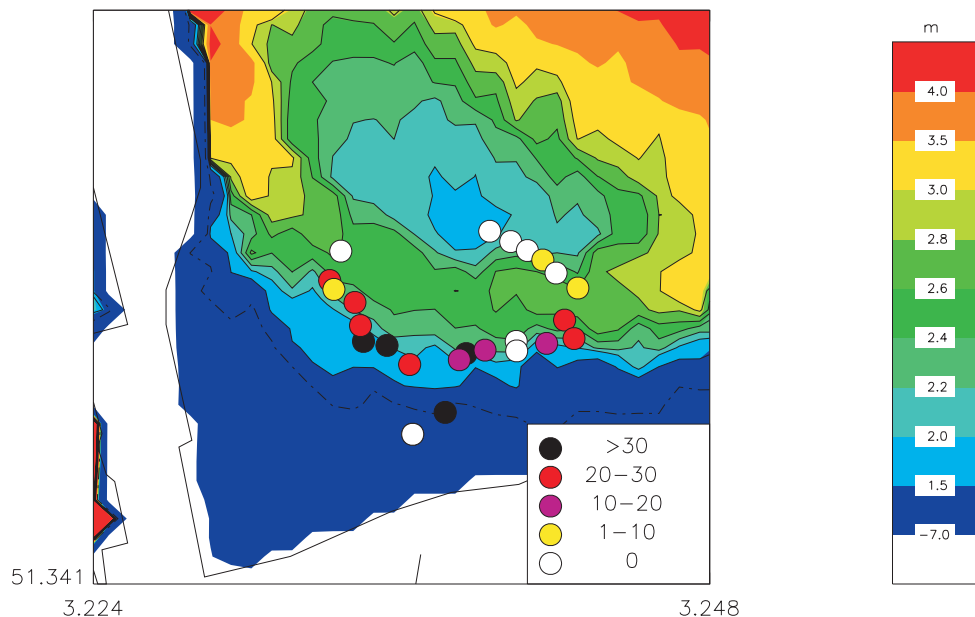
Figuur 47: Foto 19/4/2007: Afgestorven Amerikaanse zwaardscheden *Ensis directus*, die gedeeltelijk uit het sediment steken (Foto KBIN-BMM).

In januari 2007 werd de dichtheid van Amerikaanse zwaardscheden aan de hand van de boorgaten op sommige plaatsen —de geulzone— geschat op gemiddeld 500 individuen per m^2 (ind/ m^2). Dit is een eerder conservatieve schatting, in bepaalde zones was de dichtheid duidelijk hoger. Dichtheden van

meer dan 500 ind/m² zijn niet ongevoen in de Nederlandse Voordelta en plaatselijk komen zelfs dichtheden tot meer dan 2000 ind/m² voor (Wijsman *et al.*, 2006).

In april 2007 was de populatie behoorlijk uitgedund maar er bleken toch nog redelijke aantallen gezonde dieren over te blijven (geschatte dichtheden tot 70 ind/m²). Het is bekend dat in de zuidelijke Noordzee *Ensis* populaties op geregelde tijdstippen worden uitgedund als gevolg van stormen. Dit was ook hier het geval. Het bleek dat het stormachtige weer rond 21 maart 2007 een sterk effect op de populatie heeft gehad. Talrijke dieren en lege schelpen lagen samengespoeld in de vloedlijn op het strand en een deel van de overblijvende populatie was duidelijk verzwakt. Heel wat exemplaren, deels met vleesresten en/of stervende dieren, staken gedeeltelijk uit de bodem (Figuur 47). Dergelijke dieren werden nog meer dan anders gepredateerd door vogels. Bovendien dient het uit de schelpen losgekomen vlees als voedsel voor onder meer jonge kabeljauw. De figuren 49 en 50 tonen dat de macrobenthische activiteit een belangrijke bioturbatie van de sedimenten genereert. Met dit effect dient rekening gehouden te worden in de morfologische modellen (zie sectie 4.5) van zodra deze verder ontwikkeld zullen zijn.

In Figuur 48 worden de op 19 april 2007 opgemeten dichtheid *Ensis directus* op een kaart weergegeven.



Figuur 48: Opgemeten aantal individuen *Ensis directus* tijdens de opmeting van 19 april 2007. De kleuren geven de diepte aan in m.

De grootste dichtheden blijken voor te komen in de geulzone tussen het strand en de bank naar het eerste strandhoofd toe. Op de bank zelf en naar de zeezijde toe werden veel minder of geen exemplaren aangetroffen. De populatieschattingen van *Ensis* moeten met voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Er werd gegraven tot op 25 cm diepte en het is mogelijk dat niet alle exemplaren bemonsterd werden omdat ze dieper ingegraven leefden.

Zes andere bivalven werden nog levend aangetroffen: het nonnetje *Macoma balthica* (Figuur 49); het zaagje *Donax vittatus*, de witte dunschaal *Abra alba*, de grote strandschelp *Mactra corallina* (juvenile exemplaren), de kokkel *Cerastoderma edule*, de halfgeknotte strandschelp *Spisula subtruncata* en de rechtsgestreepte platschelp *Tellina fabula*. Al deze soorten komen in veel lagere dichtheden voor. Tijdens de staalname op 19 april werden slechts drie soorten in situ aangetroffen namelijk *M. balthica* (2 exemplaren op één punt) en *D. vittatus* (op een drietal punten telkens 1 exemplaar). De kokkel komt als solitaire individuen verspreid voor en in iets grotere dichtheden in het slibbige sediment van de geul, naar het strandhoofd toe. De aanwezigheid van de overige soorten werd vastgesteld in het aanspoelsel of in de netten van kruiers.



Figuur 49: Foto 11/10/2006: Nonnetjes *Macoma balthica* (Foto KBIN-BMM).

Al de hierboven vernoemde bivalven zijn snelgroeïende en kortlevende soorten, typisch voor een kustgebonden habitat van fijn zand met een variabel slijbgehalte. Ze vormen een belangrijk stapelvoedsel voor vogels. Ze waren al eerder in het gebied bekend al kunnen de abundanties belangrijke jaarlijkse verschillen vertonen. Zo was *Spisula subtruncata* in de jaren negentig van de vorige eeuw veel talrijker dan nu. Het precieze voorkomen van de verschillende soorten (behalve *Ensis directus* die geen specifieke

voorkeur heeft) is onder meer afhankelijk van het slibgehalte, zo leeft *Macoma balthica* eerder in plaatsen met veel slib terwijl *Macra corallina* meer in zandige substraten aangetroffen wordt.

Er zijn dus convergenties mogelijk tussen de sedimentatiemodellen indien ze voldoende nauwkeurig zijn om de aard van het sediment te schatten en de benthische fauna waarvan de dynamiek gedeeltelijk zou kunnen verklaard worden door hydro-meteorologische en sedimentologische fenomenen.

5.2.2. Slakken - Gastropoda

Tijdens de onderzoeksperiode werden geen levende gastropoden aangetroffen. In de jaren negentig van de vorige eeuw werd nochtans de fuikhoorn *Nassarius reticulatus* regelmatig in het gebied waargenomen (pers. obs.; Neyts, 1994; Van Rillaer, 1994). Deze aaseter is sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw over heel de kust sterk in aantal toegenomen en kan terug verwacht worden.

5.2.3. Borstelwormen - Polychaeta

Zeepiëren komen talrijk en over het hele gebied verspreid voor. Er werden twee soorten aangetroffen, de gewone zeepië *Arenicola marina* en de zwarte zeepië *A. defodiens*. Beide soorten leven diep ingegraven in het sediment. Ze worden door pierenstekers verzameld als aas. De schelpkokerworm *Lanice conchilega* is een kokervormende soort die voornamelijk aangetroffen werd in de ondiepe zone tussen het strand en de bank (Figuur 50). Ze komt in het gebied algemeen voor als solitaire exemplaren. Het voorkomen van *L. conchilega* varieert van jaar tot jaar en is plaatselijk en tijdelijk van aard. Er werden in de onderzoeksperiode geen riffen van deze soort waargenomen.



Figuur 50: Foto 23/1/2007: Schelpkokerworm *Lanice conchilega* (Foto KBIN-BMM).

Als opvallende vrijlevende soorten werden in het sediment de zandzagers *Nephtys hombergii* en *N. assimilis* aangetroffen.

5.2.4. Macrobenthische gemeenschap

De verspreiding van de verschillende macrobenthische gemeenschappen wordt sterk bepaald door de fysische omgeving. De korrelgrootteverdeling van het sediment —meer bepaald de mediane korrelgrootte en het slibgehalte— blijkt hierbij sterk structurerend te zijn. De in het onderzoeksgebied aangetroffen benthische gemeenschap komt overeen met de *Macoma balthica* gemeenschap (Degraer *et al*, 2003) waarvan *M. balthica* een karakteristieke component is, die echter niet noodzakelijk altijd in grote aantallen hoeft voor te komen. Deze gemeenschap is karakteristiek voor fijn zand met een hoge concentratie slib en ze komt vooral aan de Oostkust voor. De gemeenschap is nauw verwant aan de *Abra alba* – *Mysella bidentata* gemeenschap en een aantal van de dominante soorten komen in beide gemeenschappen voor. De dichtheid en de soortendiversiteit zijn in de *Macoma balthica* gemeenschap echter merkbaar lager. Ze is dan ook ecologisch minder belangrijk dan de rijkere *Abra alba* gemeenschap.

5.3. Mobiele epi – en visfauna

5.3.1. Kreeftachtigen

In oktober 2006 scharrelden tegen de laagwaterlijn talrijke gewone heremietkreeften *Eupagurus bernhardus*. De kleine heremietkreeft *Diogenes pugilator* en het breedpootkrabbetje *Portumnus latipes*, die algemeen voorkomen in dit type van habitats, werden tijdens de onderzoeksperiode niet waargenomen. Andere soorten die regelmatig aangetroffen worden in de netten van kruiers zijn zwemkrabben, zowel de gewone zwemkrab *Liocarcinus holsatus* als de grijze zwemkrab *L. vernalis* (een zuidelijke soort), de strandkrab *Carcinus maenas* en grijze garnaal *Crangon crangon*. Van de Noordzeekrab *Cancer pagurus* worden ook regelmatig exemplaren tot 15 cm aangetroffen in de netten van kieuwnetvissers. Occasioneel en meer naar de strandhoofden toe kunnen ook exemplaren gevangen worden van de gezaagde steurgarnaal *Palaemon serratus* en de fluwelen zwemkrab *Necora puber*.

5.3.2. Vissen

In de netten van kruiers werd in oktober pladijs *Pleuronectes platessa* (Figuur 51) vastgesteld maar ook wat tarbot *Scophthalmus maximus*, griet *S. rhombus*, dikkopjes *Pomatoschistus minutus*, sprat *Sprattus sprattus* en wijting *Merlangius merlangus*. Andere soorten die voorkomen zijn kleine Pieterman *Echiichthys vipera* en in het najaar wordt occasioneel juveniele schar *Limanda limanda* gevangen. In de lente werden jonge kabeljauw *Gadus morhua* (gullen) aangetroffen in de netten van kieuwnetvissers op de bank.



Figuur 51: Foto 11/10/2006: Pladijs *Pleuronectes platessa* uit de vangst van een kruier (Foto KBIN-BMM).

Het zijn vooral jonge individuen die het gebied gebruiken om er te foerageren. De maaginhoud van enkele van de jonge kabeljauwen die in april in kieuwnetten gevangen waren, bleek dieren van *Ensis* te bevatten naast resten van garnaal en zwemkrabben.

De mobiele epi –en visfauna verschillen niet van wat in andere gebieden dicht onder de kust voorkomt.

5.4. Zeezoogdieren

5.4.1. Inleiding

Aan de Belgische kust kunnen twee soorten zeehonden als inheems beschouwd worden: de gewone zeehond *Phoca vitulina* en de grijze zeehond *Halichoerus grypus*. Van deze soorten vinden we aan onze kust geen kolonies, *residente populaties* of rustplaatsen (meer). Zeehonden zijn zwervende dieren die vaak grote afstanden afleggen. De dieren die bij ons waargenomen worden, zijn afkomstig van de kolonies in Zeeland, de Waddenzee, de zuidoostelijke kust van Engeland of de Baai van de Somme. Op deze plaatsen kunnen zeehonden aan land komen op geschikte plaatsen: in de vermelde gebieden zijn dat onverstoorde zandplaten of stranden. Er zijn geen aanwijzingen dat zich in een recent verleden zeehondenkolonies aan onze kust bevonden.

Het overgrote percentage grijze zeehonden in de Noordzee komt voor aan de Britse kusten. Hoewel dit dier, dat veel groter is dan de gewone zeehond, vaak beschouwd wordt als een bewoner van rotskusten, heeft historisch

onderzoek aangetoond dat het dier in het verleden eveneens voorkwam rond zandige kusten – wat bevestigd lijkt te worden door het stijgende aantal grijze zeehonden in de Baai van de Somme en Zeeland.

5.4.2. Zeehonden in de zuidelijke Noordzee in heden en verleden

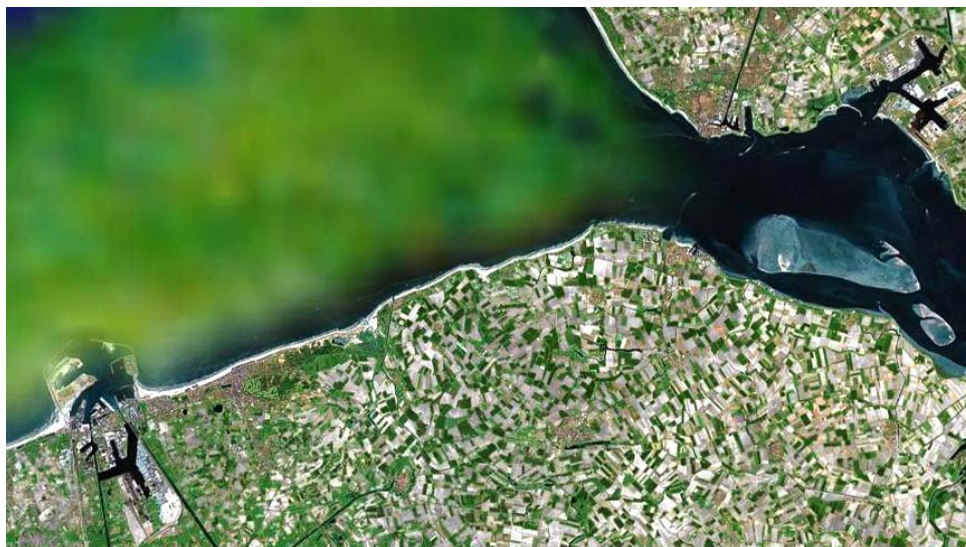
De zeehondenkolonies in de zuidelijke Noordzee doen het goed de laatste jaren. In het algemeen is er een stijgende trend in het aantal dieren in de zuidelijke Noordzee, nadat de zeehond er vrijwel uitgestorven was, zeker in de kolonies het dichtst bij Belgische wateren. De stijgende trend is te danken aan een betere waterkwaliteit, een betere wettelijke bescherming, maatregelen voor bepaalde types visserij, het beschermen van rustgebieden, immigratie van zeehonden uit andere delen van de Noordzee en het opvangen en vrijlaten van zeehonden in nood, onder meer in het Blankenbergse SeaLife Center.

5.4.2.1. Zeeland

In het Zeeuwse deltagebied waren er rond 1900 mogelijk nog meer dan tienduizend zeehonden (Reijnders, 1994). Elk jaar werden er honderden geschoten (de jacht werd in Nederland verboden in 1961-1962; premies voor gedode zeehonden werden uitgereikt tot 1949). In het verleden kon men zeehonden niet enkel aantreffen op geïsoleerde zandplaten, maar ook op het strand en tegen dijken. In België werden frequent zeehonden gezien op onze stranden, waaronder dat van Heist, en tot de jaren 1950 ook op de andere stranden langs onze kust, aan de IJzermonding, en op de zandbank Den Oever voor Koksijde. In deze periode waren zeehonden niet ongewoon nabij Doel op de Schelde, en werden ze regelmatig opgemerkt rond Antwerpen (De Smet, 1978). In 1933 werd het aantal zeehonden in Zeeland geschat op nog (slechts) 1300 (Havinga, 1933), en dat aantal verminderde stelselmatig tot de jaren 1970, toen de zeehond er als vrijwel uitgestorven beschouwd werd. Door een verbeterde wetgeving, een betere waterkwaliteit en reïntroductieprogramma's, is de populatie vanaf de jaren 1990 opnieuw aan het groeien, en bevinden zich nu in de Delta enkele honderden gewone en grijze zeehonden (waaronder 50 tot 100 gewone zeehonden in de Westerschelde; Figuur 52 en Figuur 53).



Figuur 52: De kolonie zeehonden het dichtst bij Belgische wateren bevindt zich in de Westerschelde. Op de foto 21 zeehonden (waaronder minstens 1 grijze zeehond) op de Hooge Platen (Westerschelde) op 24 augustus 2007 (foto KBIN/BMM).



Figuur 53: Situering van de Hooge Platen: de meest westelijke zandbank in de monding van de Westerschelde (Google Earth image).

5.4.2.2. *Noorden van Frankrijk*

Voor de zeehonden in het noorden van Frankrijk heeft men dezelfde trend vastgesteld als in de Zeeuwse Delta. In 1903 vaardigde de *Conseil général du Pas-de-Calais* nog een wens uit dat de Franse Marine de zeehonden op de banken van Wissant en Gris-Nez, en ook op de Vlaamse Banken, zou uitroeien. Deze *amfibieën* (sic) *vormden een bedreiging voor de visserij in het gebied*. Gezien ze zeer moeilijk te benaderen waren, vroeg men assistentie van een torpilleur (Anonymus, 1903). Tegenwoordig bevindt de meest nabije kolonie zeehonden in Frankrijk zich in de Baai van de Somme. In de jaren 1980 was deze kolonie vrijwel verdwenen, maar tegenwoordig verblijven er meer dan 100 gewone zeehonden, en een kleiner aantal grijze.

5.4.2.3. *Estuarium van de Wash*

Net zoals op andere plaatsen in Europa werd de gewone zeehond intensief bejaagd in het Estuarium van de Wash, en in het bijzonder tussen 1915 en de jaren 1970. Het gebied heeft één van de grootste kolonies van gewone zeehonden van Europa. De grootte van de kolonie werd, net zoals die van de andere in de Noordzee, beïnvloed door massale sterftes in 1988 en 2002 veroorzaakt door het zeehondenvirus (PDV). In 2005 bedroeg het aantal gewone zeehonden in het gebied ongeveer 2500 dieren (Thompson et al., 2005).

5.4.3. *De opvang van gestrande zeehonden*

Aan onze kust spoelen geregeld zeehonden in nood aan. Soms betreft het volwassen dieren die ziek of gekwetst zijn, maar meestal betreft het huilers. Dat zijn zeer jonge zeehondenpups die van de moeder gescheiden zijn, en die niet zelfstandig zouden overleven. Gewone zeehondenpups spoelen aan van juli tot september, grijze zeehondenpups van november tot februari. De

politiek in Nederland, België en Frankrijk in dergelijke gevallen is, om deze diertjes op te vangen in gespecialiseerde centra, om ze daarna opnieuw vrij te laten in een geschikte locatie. Rond 1970 werd gestart met de opvang van zeehonden te Pieterburen. In België startte SeaLife Blankenberge met de opvang en revalidatie van zeehondenpups in 1998. Intussen werden door SeaLife reeds ongeveer 60 grijze zeehonden vrijgelaten te Heist, en ongeveer 70 gewone zeehonden te Heist. Deze aantallen zijn niet te verwaarlozen tegenover de populatie in de Westerschelde.

5.4.4. Een zeehondenkolonie op de bank van Heist?

Door het groeien van de bank van Heist wordt vaak de idee geopperd dat dit wel eens een geschikte locatie zou zijn voor een zeehondenkolonie, door het beschikbaar worden van een plaats waar zeehonden op het droge kunnen rusten. Zeehonden brengen inderdaad een belangrijk deel van hun leven door rustend aan land, en ook pups worden aan land geboren en daar een tijdje gezoogd.

Een geschikte locatie voor een zeehondenkolonie dient aan een aantal voorwaarden te voldoen:

- Voedselvoorziening;
- milieukwaliteit, vermijden van risico's voor verdrinking (fuiken/kieuwnetten);
- geschikt biotoop;
- vermijden van verstoring.

5.4.4.1. Voedselvoorziening

Een gewone zeehond eet dagelijks 3 tot 5 kg vis. Gezien de groei van de aantallen zeehonden in de Westerschelde, lijkt het vinden van voedsel in de nabijheid van de bank van Heist geen probleem te mogen vormen. Mogelijk is dit zelfs een uitstekend voedselgebied door de aanwezigheid van de havenmuren van Zeebrugge, die een specifieke visfauna aantrekken.

5.4.4.2. Milieukwaliteit

De waterkwaliteit rond de bank van Heist is waarschijnlijk beter dan die in de Westerschelde, en kan geen probleem vormen. Voor het vermijden van het risico op verdrinking is het noodzakelijk dat voldoende maatregelen genomen worden. In Nederland moeten fuikvisserij gebruik maken van een keerwant om bijvangst te vermijden; fuiken zoals in Nederland worden in België niet gebruikt. Daarentegen worden langs bijna de volledige kust, en ook in Heist, kieuwnetten ingezet bij recreatieve visserij. Professionele kieuwnetvisserij blijven meestal een eind uit de kust. Recent werd visserij met passief vistuig verboden in een gebied binnen de 200 meter van de havenmuren van Zeebrugge (Ministerieel Besluit van 21 december 2006 houdende tijdelijke aanvullende maatregelen tot het behoud van de visbestanden op zee). Waarschijnlijk zijn zeehonden minder kwetsbaar voor verdrinking in kieuwnetten dan bruinvissen.

5.4.4.3. *Geslacht biotoop*

Een geschikte rustplaats voor zeehonden heeft, naast een goede voedselvoorziening in de omgeving, een voldoende oppervlakte, een sediment dat niet te zacht is (weinig slib), een tamelijk steile glooiing naar het water toe, en een diepte die tot gevolg heeft dat de plaats dagelijks lang genoeg droog valt. Enkel voor wat betreft het sediment lijkt de bank van Heist te voldoen: de bodem is er voldoende stevig, met op de meeste plaatsen weinig slib. De ontstane zandplaat heeft echter een zeer beperkte glooiing. Dat betekent dat een zeehond die op de bank komt uitrusten, bij afgaan tijd reeds snel een tamelijk grote afstand van het water verwijderd is. Zeehonden zijn schuwe dieren, die bij gevaar het water induiken. Tevens ligt de zandplaat slechts korte tijd droog, rond het punt van laag tij, en dit slechts in periodes met springtij. Dit is niet voldoende als rustgebied dat op regelmatige basis gebruikt wordt door zeehonden.

Gewone zeehonden worden geboren op zandplaten (in juni-juli); jonge zeehonden kunnen vrij snel na de geboorte zwemmen, maar een gebied dat bij elke laagwater periode zes tot zeven uren droogvalt is noodzakelijk voor het zogen van de jongen (Reijnders, 1990). Dit is dus een voorwaarde voor het vormen van een echte kolonie. Indien op een plaats geen jongen geboren worden, maar wel zeehonden op het droge komen rusten, spreekt men niet van een kolonie maar van een rustplaats (*haul-out site*).



Figuur 54: Zeehonden prefereren relatief steile zandbanken, zodat ze snel in het water kunnen vluchten (Zimmermanplaat, Westerschelde). (foto: Stef Kouijzer, augustus 2007).

5.4.4.4. *Verstoring*

De keuze van de rustplaatsen van zeehonden is van die aard dat verstoring er minimaal is, en dat ze bij verstoring snel het water in kunnen vluchten. Normaal gezien vluchten zeehonden het water in bij verstoring op een

afstand van enkele honderden meter. Mogelijk treedt gewenning op, maar indien het gewenst zou zijn dat zich een rustplaats voor zeehonden zou vormen op de bank van Heist, dan dienen een aantal maatregelen genomen te worden om verstoring zoveel mogelijk te vermijden.

Vooraf in de voortplantingsperiode is een voldoende rust absoluut noodzakelijk. Indien teveel verstoring optreedt in zeehondenkolonies, zeker tijdens de eerste 2 weken na de geboorte, is er een verminderd overlevingsvermogen onder de jongen (Reijnders, 1990).

5.4.5. Besluit

Men kan de vraag stellen of het nuttig zou zijn dat zich opnieuw zeehonden zouden vestigen aan onze kust. Daarop kan enkel positief geantwoord worden. Dit zijn toppredatoren die een essentieel deel uitmaken van de fauna van de kustwateren van de Noordzee. Hun aanwezigheid of afwezigheid geeft een indicatie van de gezondheidstoestand van het ecosysteem.

Men kan zich wel de vraag stellen of de bank van Heist momenteel voor een zeehondenkolonie geschikt is. Hoewel zich in de Westerschelde groeiende kolonies zeehonden bevinden, en de aantallen zeehonden die bij ons waargenomen worden stijgen, is het antwoord (voorlopig) negatief. Deze zandbank kan in periodes van extreme getijden eventueel een rustplaats vormen voor enkele zeehonden, maar dit slechts voor een korte periode. Enkel indien de zandbank tenminste op één plaats een grotere helling zou krijgen, en nog een stuk hoger zou worden, kan die geschikt worden voor zeehonden als meer permanente en stabiele rustplaats. Enkele uren droogligging per laagtij zijn noodzakelijk. Het ontstaan van een kolonie lijkt nog onwaarschijnlijker in de nabije toekomst: daarvoor is een plaats nodig die minstens een halve dag per etmaal droog ligt.

Het vermijden van verstoring is een factor die absoluut noodzakelijk is voor een rustplaats of kolonie van zeehonden. Daarvoor zouden —indien dit gewenst wordt— bijkomende maatregelen noodzakelijk zijn, en goede afspraken met recreanten, zowel met wandelaars, recreatieve vissers als watersporters op zee.

Meer geschikte gebieden voor het zich vormen van een rustplaats van zeehonden aan onze kust lijken het sternenschiereiland te Zeebrugge, de rechteroever van de IJzermonding, of stranden die niet of minder toegankelijk gemaakt worden.

5.5. *Besluit*

Het intertidaal strand is geen gastvrij milieu. De organismen die er leven moeten bestand zijn tegen sterke schommelingen van de abiotische omgevingsfactoren, zoals periodiek droogvallen, temperatuurwisselingen en een veranderend substraat. Slechts weinig soorten zijn aangepast aan een dergelijk extreem milieu. Dat is in de Baai van Heist niet anders. De soortensamenstelling van de macro –en epibenthische gemeenschap en van de visfauna op en rond de recent gevormde zandbank van Heist vertonen dan ook een sterke gelijkenis met die van andere Noordzeestranden.

Uit het veldonderzoek blijkt dat vooral het lage strand en de geul tussen de bank en het strand het rijkste zijn, in de bank zelf leven relatief minder organismen, wat ook het geval is voor andere kustbanken.

De benthische soorten die zich konden aanpassen aan zo'n milieu komen dikwijls in hoge dichtheden voor. In het onderzoeksgebied was dit bijvoorbeeld vroeger het geval voor de halfgeknotte strandschelp *Spisula subtruncata* (pers. obs.; Van Rillaer, 1994) en tegenwoordig domineert de Amerikaanse zwaardschede *Ensis directus*. Deze soort komt ook algemeen voor op andere kustbanken. De schelpkokerworm *Lanice conchilega* komt algemeen in het gebied voor, maar er werden op het moment van onderzoek geen biogene riffen van deze soort waargenomen.

Veel van de in de Baai van Heist levende soorten vertonen sterke jaarlijkse schommelingen, als gevolg van wisselende rekruteringsuccessen en mogelijke interacties met andere reeds aanwezige soorten. Daarnaast valt de invloed van de nieuwkomer Amerikaanse zwaardschede *Ensis directus* niet te onderschatten want het voorkomen van een uitgebreide *Ensis* populatie kan belangrijk ecologische gevolgen hebben. De soort treedt in competitie voor plaats en voedsel met andere in het sediment levende tweekleppigen (filtreerders). Op plaatsen waar hoge densiteiten voorkomen, kan *Ensis* de structuur van de benthische gemeenschap veranderen en ook de aard van het sediment en bijgevolg de habitat voor andere soorten wijzigen. Het tegenwoordig minder voorkomen van soorten als *Spisula subtruncata* en *Cerastoderma edule* en mogelijk ook *Macoma balthica* kan daaraan te wijten zijn. De reële invloed van *Ensis* in kustecosystemen vereist bijkomend onderzoek.

Enkele karakteristieke epibenthische soorten zoals de grijze garnaal *Crangon crangon* en vissen zoals juveniele pladijs *Pleuronectes platessa* zijn permanent aanwezig en domineren de mobiele fauna. Veel andere soorten komen slechts in soortspecifieke periodes voor, gerelateerd aan de trek of voortplanting. Zo kunnen in het voorjaar inktvissen zoals de zee kat *Sepia officinalis* of pijlinktvissen *Loligo* sp. aangetroffen worden.

De benthische organismen in de ondiepe geulzone vormen bij laagtij een belangrijke voedselbron voor meeuwen, vooral de zilvermeeuw *Larus argentatus* en steltlopers, zoals de scholekster *Haematopus ostralegus*. Er kon niet vastgesteld worden dat de bank een belangrijke rol speelt voor vogelsoorten van Annex I van de Europese Vogelrichtlijn, en dit zolang die niet permanent droog blijft na verdere aangroei (want dan zou de bank als broedplaats kunnen worden gekozen door stern).

Bij hoogtij foerageren vissen en kreeftachtigen in het gebied. Een aantal soorten (Noordzeekrab, steurgarnaal) gebruiken de kunstmatige rotskusten van de oostelijke havendam en de nabij gelegen strandhoofden als uitvalsbasis. Niets laat echter toe om te denken dat het gebied minder productief zou zijn bij afwezigheid van de zandaangroei. De samenstelling, distributie en dichtheid van de soorten zou er maar anders uitzien.

De fauna staat ook onder druk van kieuwnetvissers en pierenstekers en ook kruiactiviteiten, wat een correcte eerbiediging van de reglementering

terzake vereist.

Bovendien wordt de idee geopperd dat de bank van Heist geschikt zou kunnen zijn als biotoop voor zeehonden. Hoewel de gewone en grijze zeehond inheemse soorten zijn, komen ze niet algemeen voor in onze wateren, en vinden we hier geen kolonies (meer). De nieuw ontstane zandbank ten oosten van de haven van Zeebrugge blijkt voorlopig geen biotoop dat in aanmerking komt voor het zich opnieuw vestigen van een kolonie zeehonden. Daarvoor zijn de karakteristieken van de zandbank (diepte, helling) niet geschikt. Indien de karakteristieken van de zandbank als biotoop voor de zeehond gunstig zouden evolueren, dient voldoende rust gegarandeerd te worden als absolute voorwaarde.

6. Besluit

Een nieuwe zandbank heeft zich gevormd ten oosten van de havendam van de haven van Zeebrugge. Ze komt boven water bij laagwater gedurende springtij. Dit fenomeen is gekend door foto's en duidelijk weergegeven op de hydrografische kaarten. Het is waarschijnlijk een gevolg van de werken voor de uitbreiding van de haven van Zeebrugge zoals de BMM het reeds aangevoeld had in zijn impactstudie van 1982 (BMM, 1982).

Deze bank bevindt zich in een zeer dynamisch gebied onderworpen aan verschillende sedimentatie- en erosieprocessen die kunnen wijzigen in de ruimte en tijd.

De verschijning van deze zandbank wordt correct weergegeven door mathematische simulaties geleverd door een sedimenttransportmodel voor materiaal in suspensie (MU-STM), gekoppeld aan een lokaal hydrodynamisch model (MU-HEIST). Deze twee modellen werken op een zeer korte ruimtelijke schaal waarbij het hydrodynamisch model gekoppeld is aan een cascade van modellen die het hele Noord-Europese continentaal plat dekken. Deze zandbankvorming wordt verklaard door een abundantie aanwezigheid van fijne deeltjes (met lage valsnelheid) en, op de bank zelf, door een zwakke bodemspanning.

Er werd overwogen om deze bank te baggeren en het aldus geëxtraheerde zand te gebruiken voor de voeding van de nabije stranden die onderworpen waren aan erosie. De effecten van een menselijke activiteit (de uitbouw van een haven) tegenwerken door een andere menselijke activiteit (regelmatig baggeren) was niet ondenkbaar. Temeer omdat de benthische gemeenschappen ter plaatse interessant zijn maar niet uitzonderlijk en dat (een deel van) een speciale beschermingszone en (een deel van) een gericht marien reservaat restaureren in hun originele staat, had dit verantwoord kunnen worden. De sedimenten die zich daar ophopen, bestaan echter uit te kleine deeltjes voor strandvoeding (grootte-orde van $100\ \mu\text{m}$ in plaats van de vereiste $250\ \mu\text{m}$) evenals voor het gebruik in de bouw. Deze optie werd dus niet gevolgd.

Nu blijft dus te onderzoeken hoe deze zone met verstoorde hydro-sedimentologische karakteristieken gaat evolueren. Zal ze naar een evenwichtssituatie neigen? Welke en wanneer? Zal de geul zich opvullen en zal de basislijn zich verder naar zee verplaatsen, tot waar en in welke configuratie? Het antwoord op deze vragen is verre van evident temeer omdat rekening zal moeten gehouden worden met de meteorologische effecten (stormen) en de astronomische cyclus van 18,6 jaar, die zou kunnen leiden tot een versterking van de sedimentatie in de komende jaren. Dynamische morfologische modellen, waarvan de methodologie werd getest in het kader van deze studie, zouden, ten koste van aanzienlijke rekentijden, elementen van antwoord kunnen geven die nog moeten gevalideerd worden door de geschikte waarnemingen.

Voor de nabije toekomst moet deze nieuwe zandbank geen gelegenheid

worden voor het uitvoeren van niet reglementaire praktijken van sportvissers. Acties terzake werden genomen en zullen blijven genomen worden. Anderzijds dient het opgemerkt te worden dat de stromingen in de geul sterk kunnen zijn en risico's kunnen vormen voor de personen die wensen te wandelen op de zandbank of ervan terugkomen. Het publiek zou expliciet van dit gevaar moeten op de hoogte gebracht worden.

Dankbetuigingen

De auteurs danken het Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken, Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust, cel Kust, en het Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium, voor het ter beschikking stellen van de bathymetrische gegevens op het curvilineaire rooster, die werden gebruikt bij het opstellen van het modelrooster voor het MU-HEIST model. Zij danken verder Peter Dewolf (Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust, cel Kust) en Toon Verwaest (Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium) van het Vlaamse Gewest, en Georges Pichot, José Ozer en Michael Fettweis (BMM) voor hun constructieve opmerkingen bij het verbeteren van het document. Tenslotte danken de auteurs het BELMEC team van de BMM voor het leveren van de luchtfoto's.

Referenties

- Ackers, P. and White, W.R., 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Proceedings of the ASCE Journal of Hydraulics Division*, 99 (HY11), 2041-2060.
- Anonymus, 1903. Note: La destruction des phoques. *Chasse et Pêche*, 21 (15), 254.
- Ariathurai, C.R., 1974. A finite element model for sediment transport in estuaries. Ph.D. Thesis, University of California, Davis.
- BMM, 1982. Studie van de ekologische effecten van de voorhaven van Zeebrugge. Rapport voor Ministerie van Openbare Werken, Bestuur der Waterwegen, Ref. M.O.W. 23.01.79, Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee en het Schelde-Estuarium, 170 pp.
- Brière, C., P.C. Roos, E. Garel and S.J.M.H. Hulscher, 2007. Modelling the morphodynamic effects of sand extraction from the Kwinte Bank, North Sea. *Journal of Coastal Research* (in press).
- Cooreman, K., H. Hillewaert, M. Guns en P. Van Hoeyweghen, 2000. Biologische monitoring van de lossingen van gebaggerd materiaal voor de Belgische kust (1997-1999). Ministerie van Middenstand en Landbouw, Departement Zeevisserij, Oostende, Report 97060/BAG/5.
- Degraer S. , V. Van Lancker, G. Moerkerke, G. Van Hoey K. Vanstaen, M. Vincx and J.P. Henriët, 2003. Evaluation of the ecological value of the foreshore habitat-model and macrobenthic side-scan sonar interpretation: extension along the Belgian coastal zone: final report. Ministry of the Flemish Community, Environment and Infrastructure Department. Waterways and Marine Affairs Administration, Coastal Waterways: Belgium, 63 pp.
- Deleu, S., V. Van Lancker, D. Van den Eynde and G. Moerkerke, 2004. Morphodynamic evolution of the kink of an offshore tidal sandbank: the Westhinder Bank (Southern North Sea). *Continental Shelf Research*, 24, 1587-1610.
- de Kok, J.M., 1994. Numerical modelling of transport processes in coastal waters. Ph.D. Thesis, University of Utrecht, The Netherlands.
- De Mulder, T., 2006. Numeriek model voor de haven van Zeebrugge, Deelrapport 1: Opmaak en eerste afregeling van een tweedimensionaal model zonder zout. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, Model 643/7, 32 + 14 pp.
- De Smet, W., 1978. Zeehonden langs de Belgische kust en in de binnenwateren. *De Wielewaal*, 44, 138-154.
- Djenidi, S. and F. Ronday, 1992. Dynamique sédimentaire en mer à marée. Etude du plateau continental nord-ouest Européen: Structure et mouvement verticaux. Institut de recherches marines et d'interactions air-mer. Université de Liège, 53-61.
- Egan, B.A. and J.R. Mahonney, 1972. Numerical modeling of advection and diffusion of urban area source pollutants. *Journal of Applied Meteorology*,

- 11, 312-322.
- Engelund, F.A. and E. Hansen, 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknikal Forlag, Copenhagen.
- Fettweis, M. and Van den Eynde, D., 2000. Bepaling van de sediment balans voor de Belgisch kust: berekening met sediment transport modellen. Beheerseenheid Mathematisch Model Noordzee, Brussel, Technisch Rapport SEBAB/1/MF/200006/NL/AR/2, 45 pp.
- Fettweis, M. and D. Van den Eynde, 2003. The mud deposits and the high turbidity in the Belgian-Dutch coastal zone, Southern bight of the North Sea. *Continental Shelf Research*, 23, 669-691.
- Fettweis, M., F. Francken en D. Van den Eynde, 2006. Studie Knokkebank – situatiebeschrijving: beknopte samenvatting, BMM Rapport, 1 pp.
- Fettweis, M., F. Francken en D. Van den Eynde, 2007. Monitoring en Moderllering van het cohesieve sedimenttransport en evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperatie (MOMO), Activiteitsrapport 2, 1 oktober 2006 – 31 maart 2007. Rapport MOMO/3/MF/200707/NL/AR/2, voorbereid voor Afdeling Maritieme Toegang, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 62 pp. + 7 app.
- Giardino, A., D. Van den Eynde and J. Monbaliu, 2007. Wave effects on the morphodynamic evolution of an offshore sand bank. Submitted to *Journal of Coastal Research*, Special Volume on the Eumarsand Project.
- Grant, W.D. and O.S. Madsen, 1982. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research*, 87, 469-481.
- Havinga, B., 1933. Der Seehund (*Phoca vitulina* L.) in der Holländische Gewässern. *Tijdschr. Ned. Dierk. Ver. (Leiden)* (3) 3, 79-111
- Heathershaw, A.D., 1981. Comparison of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. *Marine Geology*, 42, 75-104.
- Johnson, B., M.J. Trawle and S. Adamec, 1988. Dredged material disposal modelling in Pudget Sound. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 114, 700-713.
- Kerckhof, F. en E. Dumoulin, 1987. Eerste vondsten van de Amerikaanse zwaardschede *Ensis directus* (Conrad, 1843) langs de Belgische kust. *De Strandvlo*, 7(2), 51-52.
- Krone, R.B., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Hydraulic and Sanitary Engineering Research Laboratory. University of California, Berkeley, USA.
- Le Normant, C., 1995. Modélisation numérique tridimensionnelle de processus de transport de sédiments cohésifs en environnement estuarien. Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique Toulouse, France.
- Luyten, P.J., J.E. Jones, R. Proctor, A. Tabor, P. Tett and K. Wild-Allen, 1999. COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914 pp.
- Missiaen, T. and J.P. Henriët, 2002. Paardenmarkt site evaluation. Report made for the Belgian Science Policy Office, PODO I, 184 pp.

- Neyts, F., 1993. *Nassarius reticulatus* (L., 1758) ook gevonden op de Belgische Oostkust. *De Strandvlo* 13(2-3): 91.
- Pison, V. and J. Ozer, 2003. Operational products and services for Belgian coastal waters. In: H. Dahlin, N.C. Flemming, K. Nittis K and S.E. Peterson (eds.), Building the European Capacity in Operational Oceanography. Proceedings of the Third International Conference on EuroGOOS. Elsevier Oceanography Series, 69, 503-509.
- Reijnders, P.J.H., 1990. Zeehonden in de Zeeuwse wateren: bedreigingen en beheer in breder perspectief. In: Benschop, H. en Vette, T., 1990. Verslag studiedag. Provincie Zeeland, Middelburg, 11-15.
- Reijnders, P.J.H., 1994. Historical population size of the harbour seal, *Phoca vitulina*, in the Delta area, SW Netherlands. *Hydrobiologia*, 282/283, 557-560.
- Sleath, J.F.A., 1984. *Sea Bed Mechanics*, Wiley-Interscience, New York, 335 pp.
- Thompson, D., M. Lonergan and C. Duck, 2005. Population dynamics of harbour seals *Phoca vitulina* in England: monitoring growth and catastrophic declines. *Journal of Applied Ecology*, 42, 638-648.
- Uchiyama, Y., 2004. Wetting and drying scheme for POM and its application to San Francisco Bay. Proceedings 6th International Conference on Hydrodynamics, Perth, WA, Australia.
- Van Lancker, V., S. Deleu, V. Bellec, S. Le Bot, E. Verfaillie, F. Fettweis, D. Van den Eynde, F. Francken, V. Pison, S. Wartel, J. Monbaliu, J. Portilla, J. Lanckneus, G. Moerkerke and S. Degraer, 2004. Management, research and budgeting of aggregates in shelf seas related to end-users (Marebasse). Scientific Report, Year 2. Federal Office of Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC), 144 pp.
- Van Rillaer, L., 1994. 24.04.1994 Dag van de Aarde: strandexcursie oostelijke strekdam te Heist.. *De Strandvlo* 14(4): 130-134.
- Van den Eynde, D. and J. Ozer, 1993. Sediment Trend Analyse: berekening van het sediment transport met een numeriek model. Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee, Brussel, Technisch Rapport BMM/STA/TR01, 49 pp.
- Van den Eynde, D., M. Fettweis, F. Francken, B. Lauwaert, J. Ozer en V. Pison, 2006. Onderzoeksproject "Ontwikkeling van de zandbank ter hoogte van Heist", Tussentijds rapport 15 mei 2006, 3 pp.
- Van den Eynde, D., A. Giardino, J. Portilla, M. Fettweis, F. Francken and J. Monbaliu, 2007. Modelling the effects of sand extraction on the sediment transport due to tides on the Kwinte Bank, Submitted to Journal of Coastal Research, Special Volume on the Eumarsand Project.
- Verwaest, T., 2006. Oostkust – baai van Heist, Langjarige sedimentatie. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, Model 765/14, 23 pp., 41 figs.
- Von Cosel R., J. Dörjes und U. Mühlenhardt-Siegel, 1982. Die amerikanische Schwertmuschel *Ensis directus* (Conrad) in der Deutschen Bucht 1. Zoogeographie und Taxonomie im Vergleich mit dem einheimischen

- Schwertmuschel-Arten. *Senckenbergiana marit*, 14, 147-173.
- Wijsman, J.W.M., J.J. Kesteloo en J.A. Craeymeersch, 2006. Ecologie, visserij en monitoring van mesheften in de Voordelta. Wageningen IMARES Report, C009/06, Wageningen IMARES, Ijmuiden, 41 pp.
- Yu, CS., 1993. Modelling shelf sea dynamics and estuarine circulations. PhD, Catholic University Leuven, 206 pp.

Appendix I: Luchtfoto's



Foto 1: Foto 12 mei 2005: Brekende golven op de zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 2: Foto 26 juni 2006: Brekende golven op de zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 3: Foto 26 juni 2006: Strand Heist (Foto BMM-KBIN)



Foto 4: Foto 26 juni 2006: Brekende golven (Foto BMM-KBIN)



Foto 5: Foto 12 juli 2006: Zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 6: Foto 12 juli 2006: Zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 7: Foto 12 juli 2006: Zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 8: Foto 10 augustus 2006: Zandbank (Foto BMM-KBIN)



Foto 9: Foto 10 augustus 2006: Zandbank (Foto BMM-KBIN)

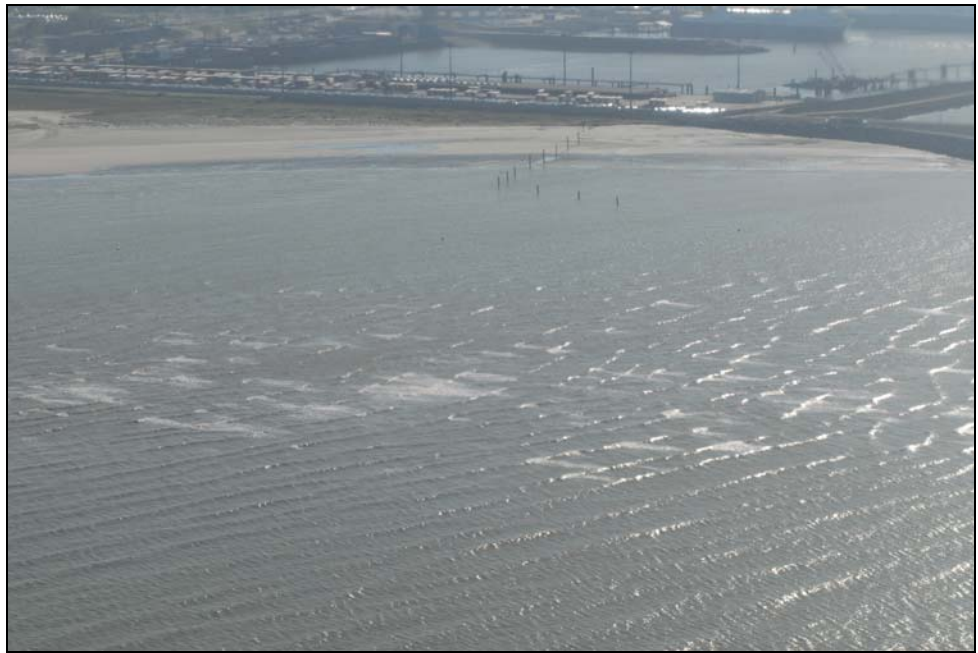


Foto 10: Foto 5 september 2006: Brekende golven op de zandbank (Foto BMM-KBIN)

Appendix 2: Foto's bij het nemen van de bodemstalen op 10 oktober 2006



Foto 11: Staalname op de zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 12: Ribbels op de zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 13: Ribbels op de zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 14: Staalname met GPS en schepje (Foto BMM-KBIN).



Foto 15: Zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 16: Zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 17: Staalname op de zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 18: Staalname op de zandbank (Foto BMM-KBIN).

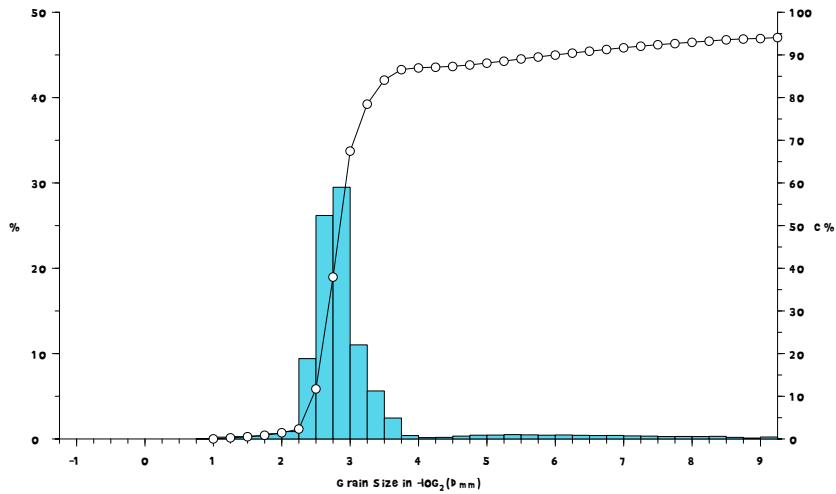
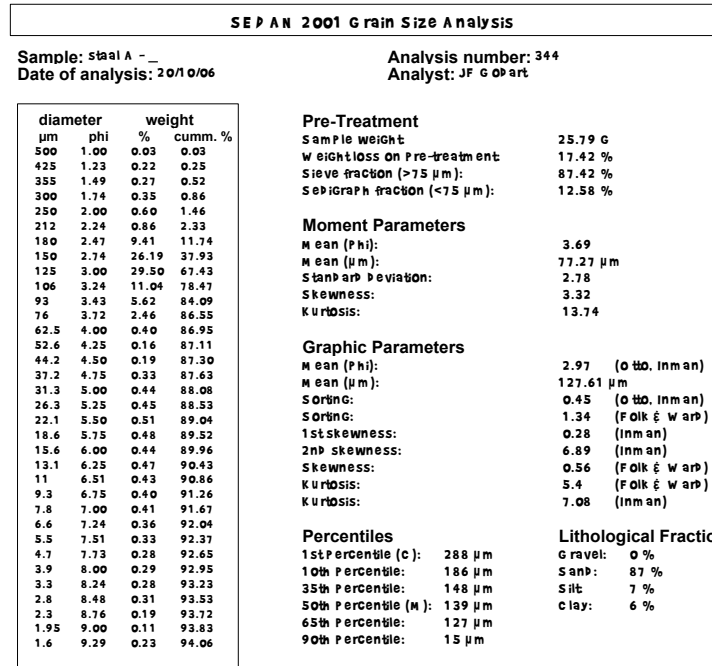


Foto 19: Slib op de zandbank (Foto BMM-KBIN).



Foto 20: Slib op de zandbank (Foto BMM-KBIN).

Appendix 3: Bodemstalen



M U M M



SEPA N 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal B -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 345
Analyst: JF G Opart

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.01	0.01
425	1.23	0.08	0.09
355	1.49	0.13	0.22
300	1.74	0.20	0.42
250	2.00	0.59	1.01
212	2.24	1.05	2.06
180	2.47	11.80	13.86
150	2.74	32.48	46.34
125	3.00	33.65	79.99
106	3.24	10.54	90.53
93	3.43	4.76	95.28
76	3.72	1.89	97.18
62.5	4.00	0.06	97.24
52.6	4.25	0.06	97.31
44.2	4.50	0.06	97.37
37.2	4.75	0.06	97.43
31.3	5.00	0.06	97.49
26.3	5.25	0.06	97.56
22.1	5.50	0.06	97.62
18.6	5.75	0.06	97.68
15.6	6.00	0.06	97.74
13.1	6.25	0.06	97.81
11	6.51	0.06	97.87
9.3	6.75	0.06	97.93
7.8	7.00	0.06	98.00
6.6	7.24	0.06	98.06
5.5	7.51	0.06	98.12
4.7	7.73	0.06	98.18
3.9	8.00	0.06	98.25
3.3	8.24	0.06	98.31
2.8	8.48	0.06	98.37
2.3	8.76	0.06	98.44
1.95	9.00	0.06	98.50
1.6	9.29	0.06	98.56

Pre-Treatment

Sample weight: 31.7 G
Weight loss on Pre-treatment: 17.58 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.66 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.34 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.97
Mean (µm): 127.66 µm
Standard deviation: 1.44
Skewness: 7.13
Kurtosis: 59.25

Graphic Parameters

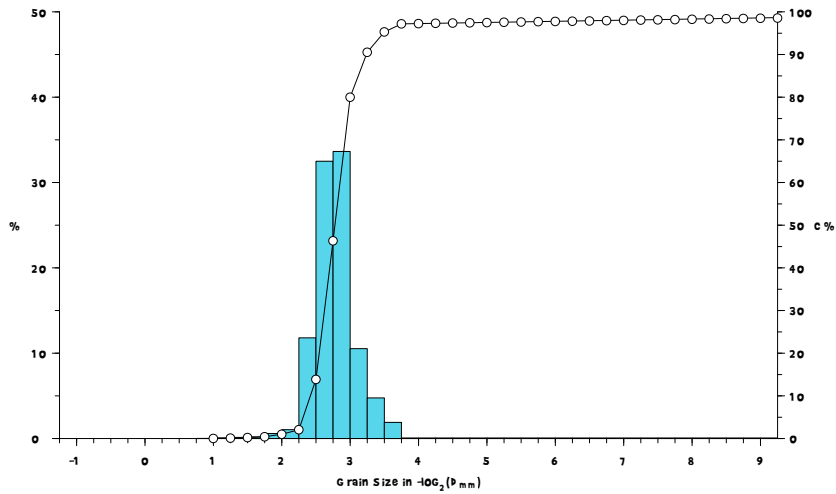
Mean (phi): 2.79 (0.00 Inman)
Mean (µm): 144.5 µm
Sorting: 0.3 (0.00 Inman)
Sorting: 0.32 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.08 (Inman)
2nd skewness: 0.3 (Inman)
Skewness: 0.12 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.16 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.87 (Inman)

Percentiles

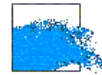
1st Percentile (C): 251 µm
10th Percentile: 190 µm
35th Percentile: 155 µm
50th Percentile (M): 147 µm
65th Percentile: 136 µm
90th Percentile: 107 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 97 %
Silt: 1 %
Clay: 2 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal c -
Date of analysis: 20/10/06

Analysis number: 346
Analyst: JF G Oort

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.03	0.03
425	1.23	0.15	0.18
355	1.49	0.22	0.40
300	1.74	0.27	0.66
250	2.00	0.56	1.22
212	2.24	1.02	2.23
180	2.47	13.08	15.31
150	2.74	36.14	51.45
125	3.00	31.93	83.38
106	3.24	8.30	91.68
93	3.43	3.30	94.98
76	3.72	1.20	96.18
62.5	4.00	0.09	96.26
52.6	4.25	0.09	96.35
44.2	4.50	0.09	96.43
37.2	4.75	0.09	96.52
31.3	5.00	0.09	96.60
26.3	5.25	0.09	96.69
22.1	5.50	0.09	96.77
18.6	5.75	0.09	96.86
15.6	6.00	0.09	96.94
13.1	6.25	0.09	97.03
11	6.51	0.09	97.11
9.3	6.75	0.09	97.20
7.8	7.00	0.09	97.28
6.6	7.24	0.09	97.37
5.5	7.51	0.09	97.46
4.7	7.73	0.09	97.54
3.9	8.00	0.09	97.63
3.3	8.24	0.09	97.71
2.8	8.48	0.09	97.80
2.3	8.76	0.09	97.88
1.95	9.00	0.09	97.97
1.6	9.29	0.09	98.05

Pre-Treatment

Sample weight: 32.2 G
Weight loss on Pre-treatment: 12.29 %
Sieve fraction (>75 µm): 96.64 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 3.36 %

Moment Parameters

Mean (phi): 3.01
Mean (µm): 124.51 µm
Standard deviation: 1.66
Skewness: 6.19
Kurtosis: 44.44

Graphic Parameters

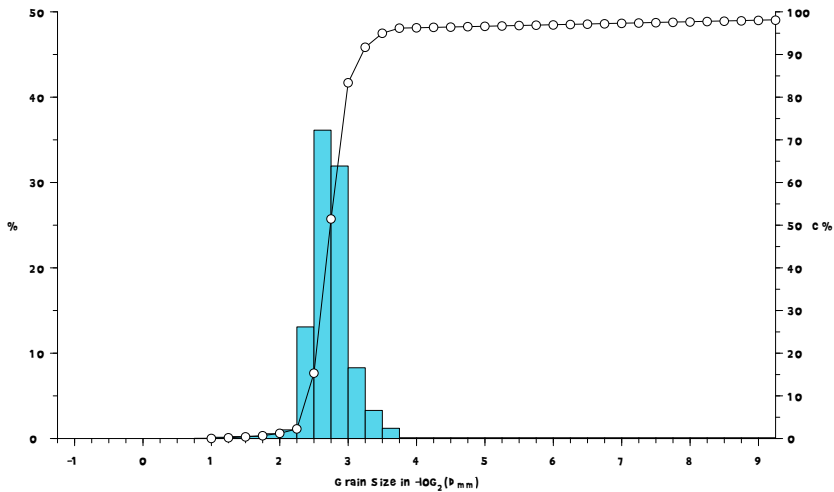
Mean (phi): 2.75 (0.00 Inman)
Mean (µm): 148.83 µm
Sorting: 0.27 (0.00 Inman)
Sorting: 0.31 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.08 (Inman)
2nd skewness: 0.49 (Inman)
Skewness: 0.16 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.21 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.12 (Inman)

Percentiles

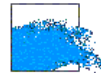
1st Percentile (C): 269 µm
10th Percentile: 192 µm
35th Percentile: 159 µm
50th Percentile (M): 151 µm
65th Percentile: 139 µm
90th Percentile: 110 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 96 %
Silt: 2 %
Clay: 2 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal p -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 347
Analyst: JF G Oort

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.02	0.02
425	1.23	0.23	0.25
355	1.49	0.30	0.54
300	1.74	0.40	0.94
250	2.00	0.87	1.81
212	2.24	1.54	3.35
180	2.47	17.34	20.70
150	2.74	40.45	61.14
125	3.00	27.51	88.65
106	3.24	6.03	94.68
93	3.43	2.34	97.01
76	3.72	0.77	97.79
62.5	4.00	0.05	97.84
52.6	4.25	0.05	97.89
44.2	4.50	0.05	97.94
37.2	4.75	0.05	97.99
31.3	5.00	0.05	98.04
26.3	5.25	0.05	98.09
22.1	5.50	0.05	98.14
18.6	5.75	0.05	98.19
15.6	6.00	0.05	98.25
13.1	6.25	0.05	98.30
11	6.51	0.05	98.35
9.3	6.75	0.05	98.40
7.8	7.00	0.05	98.45
6.6	7.24	0.05	98.50
5.5	7.51	0.05	98.55
4.7	7.73	0.05	98.60
3.9	8.00	0.05	98.66
3.3	8.24	0.05	98.71
2.8	8.48	0.05	98.76
2.3	8.76	0.05	98.81
1.95	9.00	0.05	98.86
1.6	9.29	0.05	98.91

Pre-Treatment

Sample weight: 31 G
Weight loss on Pre-treatment: 8.83 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.95 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.05 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.83
Mean (µm): 140.78 µm
Standard deviation: 1.28
Skewness: 8.02
Kurtosis: 75.48

Graphic Parameters

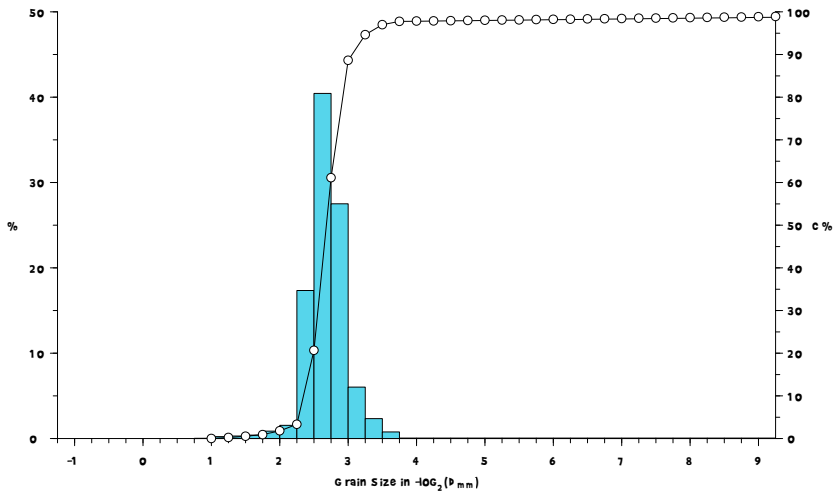
Mean (phi): 2.68 (0.00 Inman)
Mean (µm): 155.74 µm
Sorting: 0.27 (0.00 Inman)
Sorting: 0.29 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.07 (Inman)
2nd skewness: 0.36 (Inman)
Skewness: 0.13 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.12 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.84 (Inman)

Percentiles

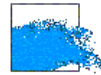
1st Percentile (C): 296 µm
10th Percentile: 199 µm
35th Percentile: 165 µm
50th Percentile (M): 158 µm
65th Percentile: 146 µm
90th Percentile: 120 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 98 %
Silt: 1 %
Clay: 1 %



M U M M



SEPIAN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal E -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 348
Analyst: JF Gopart

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.01	0.01
425	1.23	0.08	0.10
355	1.49	0.14	0.24
300	1.74	0.25	0.49
250	2.00	0.64	1.12
212	2.24	1.27	2.40
180	2.47	16.62	19.02
150	2.74	37.58	56.60
125	3.00	31.71	88.32
106	3.24	6.41	94.73
93	3.43	2.37	97.10
76	3.72	0.76	97.87
62.5	4.00	0.05	97.91
52.6	4.25	0.05	97.96
44.2	4.50	0.05	98.00
37.2	4.75	0.05	98.05
31.3	5.00	0.05	98.09
26.3	5.25	0.05	98.14
22.1	5.50	0.05	98.18
18.6	5.75	0.05	98.23
15.6	6.00	0.05	98.27
13.1	6.25	0.05	98.32
11	6.51	0.05	98.36
9.3	6.75	0.05	98.41
7.8	7.00	0.05	98.45
6.6	7.24	0.05	98.50
5.5	7.51	0.05	98.54
4.7	7.73	0.05	98.59
3.9	8.00	0.05	98.63
3.3	8.24	0.05	98.68
2.8	8.48	0.05	98.72
2.3	8.76	0.05	98.77
1.95	9.00	0.05	98.81
1.6	9.29	0.05	98.86

Pre-Treatment

Sample weight: 31.4 G
Weight loss on Pre-treatment: 9.38 %
Sieve fraction (>75 µm): 98.23 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 1.77 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.85
Mean (µm): 138.43 µm
Standard Deviation: 1.29
Skewness: 8.09
Kurtosis: 75.74

Graphic Parameters

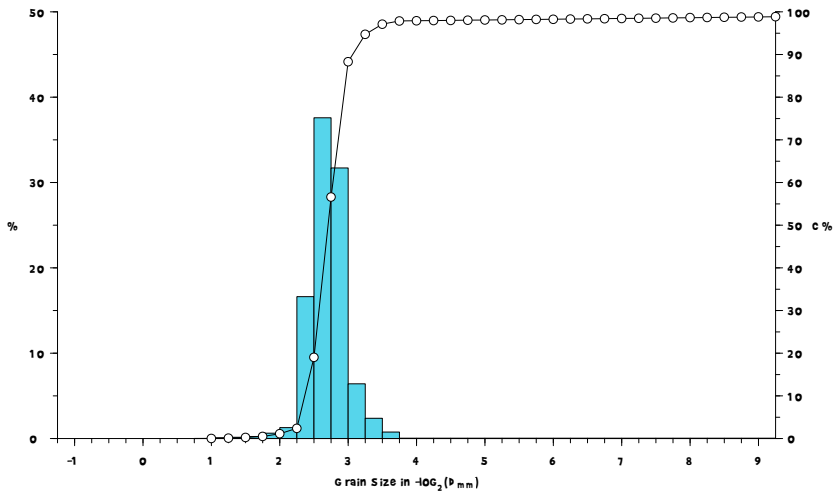
Mean (phi): 2.7 (0.00, Inman)
Mean (µm): 154.15 µm
Sorting: 0.27 (0.00, Inman)
Sorting: 0.28 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.03 (Inman)
2nd skewness: 0.29 (Inman)
Skewness: 0.09 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.08 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.85 (Inman)

Percentiles

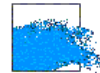
1st Percentile (C): 259 µm
10th Percentile: 197 µm
35th Percentile: 163 µm
50th Percentile (M): 155 µm
65th Percentile: 143 µm
90th Percentile: 120 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 98 %
Silt: 0.9 %
Clay: 1 %



M U M M



SEPIAN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal F -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 349
Analyst: JF Gopart

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.03	0.03
425	1.23	0.18	0.21
355	1.49	0.23	0.44
300	1.74	0.33	0.77
250	2.00	0.71	1.48
212	2.24	1.32	2.81
180	2.47	14.02	16.83
150	2.74	40.32	57.15
125	3.00	32.01	89.16
106	3.24	6.21	95.37
93	3.43	2.15	97.52
76	3.72	0.70	98.22
62.5	4.00	0.04	98.26
52.6	4.25	0.04	98.30
44.2	4.50	0.04	98.34
37.2	4.75	0.04	98.38
31.3	5.00	0.04	98.42
26.3	5.25	0.04	98.46
22.1	5.50	0.04	98.50
18.6	5.75	0.04	98.54
15.6	6.00	0.04	98.58
13.1	6.25	0.04	98.62
11	6.51	0.04	98.66
9.3	6.75	0.04	98.70
7.8	7.00	0.04	98.74
6.6	7.24	0.04	98.78
5.5	7.51	0.04	98.82
4.7	7.73	0.04	98.86
3.9	8.00	0.04	98.90
3.3	8.24	0.04	98.94
2.8	8.48	0.04	98.98
2.3	8.76	0.04	99.02
1.95	9.00	0.04	99.06
1.6	9.29	0.04	99.11

Pre-Treatment

Sample weight: 31.4 G
Weight loss on Pre-treatment: 9.06 %
Sieve fraction (>75 µm): 98.47 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 1.53 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.82
Mean (µm): 141.51 µm
Standard deviation: 1.16
Skewness: 8.83
Kurtosis: 91.85

Graphic Parameters

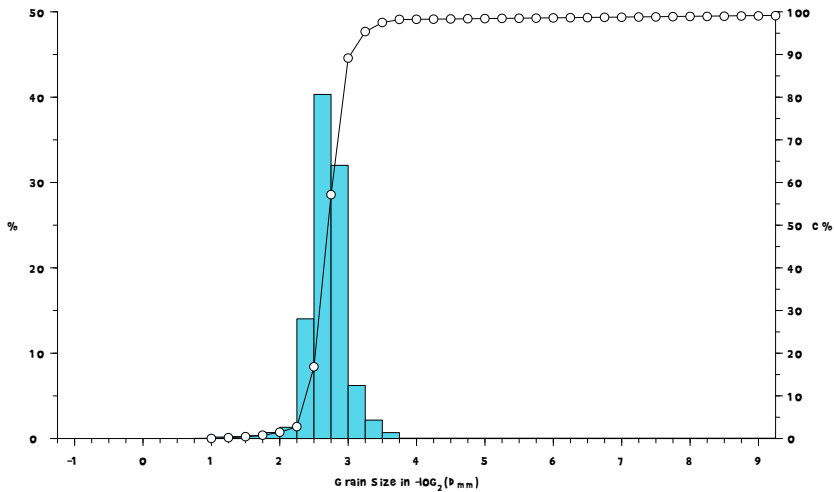
Mean (phi): 2.71 (0.00 Inman)
Mean (µm): 152.96 µm
Sorting: 0.25 (0.00 Inman)
Sorting: 0.27 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.07 (Inman)
2nd skewness: 0.24 (Inman)
Skewness: 0.1 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.09 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.91 (Inman)

Percentiles

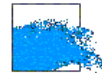
1st Percentile (C): 283 µm
10th Percentile: 195 µm
35th Percentile: 162 µm
50th Percentile (M): 155 µm
65th Percentile: 143 µm
90th Percentile: 122 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 98 %
Silt: 0.81 %
Clay: 0.94 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal G -
Date of analysis: 20/10/06

Analysis number: 350
Analyst: JF G Oort

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.01	0.01
425	1.23	0.15	0.16
355	1.49	0.21	0.37
300	1.74	0.28	0.65
250	2.00	0.58	1.22
212	2.24	0.98	2.21
180	2.47	11.75	13.96
150	2.74	38.70	52.66
125	3.00	32.94	85.61
106	3.24	7.44	93.04
93	3.43	3.06	96.10
76	3.72	1.04	97.14
62.5	4.00	0.06	97.21
52.6	4.25	0.06	97.27
44.2	4.50	0.06	97.33
37.2	4.75	0.06	97.40
31.3	5.00	0.06	97.46
26.3	5.25	0.06	97.53
22.1	5.50	0.06	97.59
18.6	5.75	0.06	97.66
15.6	6.00	0.06	97.72
13.1	6.25	0.06	97.78
11	6.51	0.06	97.85
9.3	6.75	0.06	97.91
7.8	7.00	0.06	97.98
6.6	7.24	0.06	98.04
5.5	7.51	0.06	98.11
4.7	7.73	0.06	98.17
3.9	8.00	0.06	98.23
3.3	8.24	0.06	98.30
2.8	8.48	0.06	98.36
2.3	8.76	0.06	98.43
1.95	9.00	0.06	98.49
1.6	9.29	0.06	98.55

Pre-Treatment

Sample weight: 33.4 G
Weight loss on Pre-treatment: 9.8 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.53 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.47 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.93
Mean (µm): 131.13 µm
Standard deviation: 1.45
Skewness: 7.15
Kurtosis: 59.27

Graphic Parameters

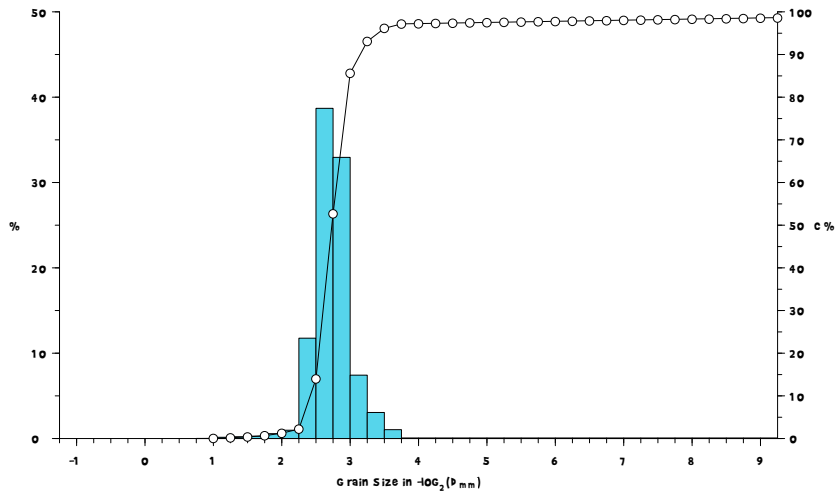
Mean (phi): 2.74 (0.00 Inman)
Mean (µm): 149.95 µm
Sorting: 0.25 (0.00 Inman)
Sorting: 0.29 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.07 (Inman)
2nd skewness: 0.43 (Inman)
Skewness: 0.14 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.19 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.13 (Inman)

Percentiles

1st Percentile (C): 268 µm
10th Percentile: 190 µm
35th Percentile: 159 µm
50th Percentile (M): 152 µm
65th Percentile: 140 µm
90th Percentile: 113 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 97 %
Silt: 1 %
Clay: 2 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal H -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 351
Analyst: JF Gopart

diameter		weight	
μm	phi	%	cumm. %
500	1.00	0.03	0.03
425	1.23	0.13	0.16
355	1.49	0.18	0.33
300	1.74	0.21	0.55
250	2.00	0.34	0.89
212	2.24	0.48	1.38
180	2.47	0.73	2.11
150	2.74	22.31	29.42
125	3.00	29.35	58.77
106	3.24	9.44	68.21
93	3.43	5.71	73.92
76	3.72	3.37	77.29
62.5	4.00	1.34	78.63
52.6	4.25	0.54	79.17
44.2	4.50	0.54	79.72
37.2	4.75	0.79	80.51
31.3	5.00	1.07	81.58
26.3	5.25	1.11	82.69
22.1	5.50	1.09	83.78
18.6	5.75	0.91	84.68
15.6	6.00	0.91	85.59
13.1	6.25	0.84	86.43
11	6.51	0.59	87.02
9.3	6.75	0.50	87.52
7.8	7.00	0.54	88.07
6.6	7.24	0.54	88.61
5.5	7.51	0.48	89.09
4.7	7.73	0.23	89.31
3.9	8.00	0.36	89.68
3.3	8.24	0.39	90.06
2.8	8.48	0.39	90.45
2.3	8.76	0.39	90.83
1.95	9.00	0.20	91.04
1.6	9.29	0.27	91.31

Pre-Treatment

Sample weight: 33.1 G
Weight loss on Pre-treatment: 21.13 %
Sieve fraction (>75 μm): 78.49 %
Sedigraph fraction (<75 μm): 21.51 %

Moment Parameters

Mean (phi): 4.2
Mean (μm): 54.46 μm
Standard deviation: 3.24
Skewness: 2.6
Kurtosis: 9.07

Graphic Parameters

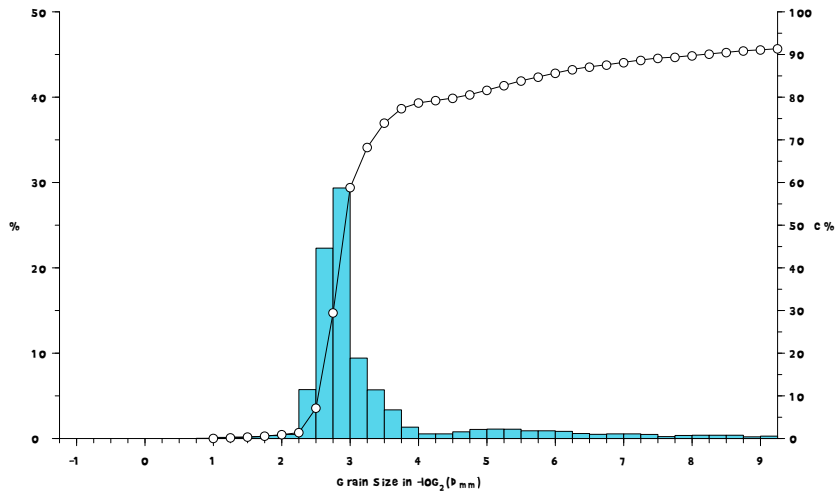
Mean (phi): 4.07 (0th, Inman)
Mean (μm): 59.55 μm
Sorting: 1.49 (0th, Inman)
Sorting: 2 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.77 (Inman)
2nd skewness: 2.43 (Inman)
Skewness: 0.82 (Folk & Ward)
Kurtosis: 4.08 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.79 (Inman)

Percentiles

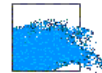
1st Percentile (C): 241 μm
10th Percentile: 176 μm
35th Percentile: 140 μm
50th Percentile (M): 132 μm
65th Percentile: 112 μm
90th Percentile: 3 μm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 79 %
Silt: 12 %
Clay: 9 %



M U M M



SEPAN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal 1 -
Date of analysis: 20/10/06

Analysis number: 352
Analyst: JF Gopart

diameter		weight	
μm	phi	%	cumm. %
500	1.00	0.03	0.03
425	1.23	0.14	0.17
355	1.49	0.21	0.38
300	1.74	0.22	0.60
250	2.00	0.36	0.96
212	2.24	0.44	1.39
180	2.47	4.12	5.51
150	2.74	19.89	25.40
125	3.00	32.82	58.22
106	3.24	11.21	69.43
93	3.43	7.45	76.88
76	3.72	4.17	81.04
62.5	4.00	1.83	82.87
52.6	4.25	0.72	83.59
44.2	4.50	0.81	84.40
37.2	4.75	0.89	85.29
31.3	5.00	0.94	86.23
26.3	5.25	1.00	87.23
22.1	5.50	0.96	88.20
18.6	5.75	0.83	89.03
15.6	6.00	0.68	89.71
13.1	6.25	0.51	90.21
11	6.51	0.47	90.69
9.3	6.75	0.47	91.16
7.8	7.00	0.45	91.61
6.6	7.24	0.26	91.88
5.5	7.51	0.25	92.12
4.7	7.73	0.28	92.40
3.9	8.00	0.23	92.63
3.3	8.24	0.17	92.80
2.8	8.48	0.26	93.06
2.3	8.76	0.26	93.33
1.95	9.00	0.21	93.54
1.6	9.29	0.25	93.78

Pre-Treatment

Sample weight: 33.2 G
Weight loss on Pre-treatment: 19.68 %
Sieve fraction (>75 μm): 82.49 %
Sedigraph fraction (<75 μm): 17.51 %

Moment Parameters

Mean (phi): 3.89
Mean (μm): 67.57 μm
Standard deviation: 2.81
Skewness: 3.19
Kurtosis: 12.96

Graphic Parameters

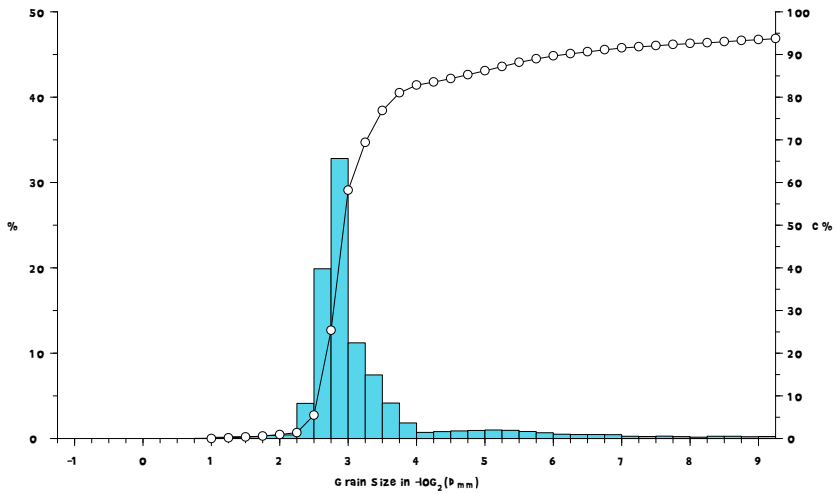
Mean (phi): 3.49 (0.00 Inman)
Mean (μm): 88.76 μm
Sorting: 0.88 (0.00 Inman)
Sorting: 1.55 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.64 (Inman)
2nd skewness: 3.61 (Inman)
Skewness: 0.75 (Folk & Ward)
Kurtosis: 4.65 (Folk & Ward)
Kurtosis: 3.16 (Inman)

Percentiles

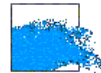
1st Percentile (C): 246 μm
10th Percentile: 173 μm
35th Percentile: 138 μm
50th Percentile (M): 131 μm
65th Percentile: 113 μm
90th Percentile: 14 μm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 83 %
Silt: 11 %
Clay: 6 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal J -
Date of analysis: 20/10/06

Analysis number: 354
Analyst: JF G Oort

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.02	0.02
425	1.23	0.14	0.16
355	1.49	0.20	0.36
300	1.74	0.27	0.63
250	2.00	0.58	1.21
212	2.24	0.99	2.21
180	2.47	11.60	13.81
150	2.74	37.25	51.06
125	3.00	34.44	85.50
106	3.24	8.40	93.90
93	3.43	2.94	96.83
76	3.72	0.82	97.65
62.5	4.00	0.05	97.70
52.6	4.25	0.05	97.76
44.2	4.50	0.05	97.81
37.2	4.75	0.05	97.86
31.3	5.00	0.05	97.91
26.3	5.25	0.05	97.97
22.1	5.50	0.05	98.02
18.6	5.75	0.05	98.07
15.6	6.00	0.05	98.12
13.1	6.25	0.05	98.18
11	6.51	0.05	98.23
9.3	6.75	0.05	98.28
7.8	7.00	0.05	98.33
6.6	7.24	0.05	98.39
5.5	7.51	0.05	98.44
4.7	7.73	0.05	98.49
3.9	8.00	0.05	98.54
3.3	8.24	0.05	98.60
2.8	8.48	0.05	98.65
2.3	8.76	0.05	98.70
1.95	9.00	0.05	98.75
1.6	9.29	0.05	98.81

Pre-Treatment

Sample weight: 35.6 G
Weight loss on Pre-treatment: 11 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.88 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.12 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.9
Mean (µm): 134.03 µm
Standard deviation: 1.32
Skewness: 7.82
Kurtosis: 71.12

Graphic Parameters

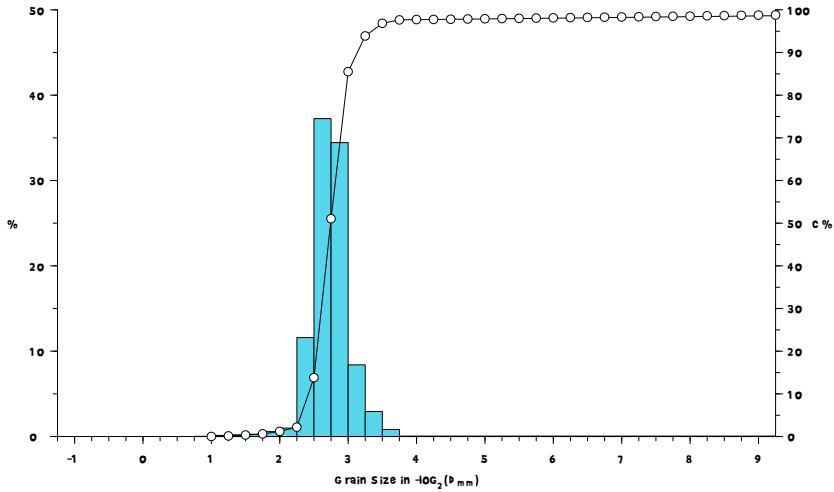
Mean (phi): 2.74 (0.00 Inman)
Mean (µm): 149.79 µm
Sorting: 0.25 (0.00 Inman)
Sorting: 0.28 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.04 (Inman)
2nd skewness: 0.29 (Inman)
Skewness: 0.09 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.13 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.03 (Inman)

Percentiles

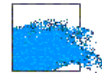
1st Percentile (C): 267 µm
10th Percentile: 190 µm
35th Percentile: 158 µm
50th Percentile (M): 151 µm
65th Percentile: 139 µm
90th Percentile: 114 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 98 %
Silt: 1 %
Clay: 1 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal K -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 355
Analyst: JF G Opart

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.01	0.01
425	1.23	0.10	0.10
355	1.49	0.16	0.26
300	1.74	0.22	0.48
250	2.00	0.33	1.01
212	2.24	0.93	1.94
180	2.47	10.43	12.37
150	2.74	30.52	42.89
125	3.00	36.49	79.38
106	3.24	11.22	90.60
93	3.43	4.76	95.36
76	3.72	1.75	97.11
62.5	4.00	0.07	97.18
52.6	4.25	0.07	97.24
44.2	4.50	0.07	97.31
37.2	4.75	0.07	97.38
31.3	5.00	0.07	97.44
26.3	5.25	0.07	97.51
22.1	5.50	0.07	97.57
18.6	5.75	0.07	97.64
15.6	6.00	0.07	97.71
13.1	6.25	0.07	97.77
11	6.51	0.07	97.84
9.3	6.75	0.07	97.91
7.8	7.00	0.07	97.97
6.6	7.24	0.07	98.04
5.5	7.51	0.07	98.10
4.7	7.73	0.07	98.17
3.9	8.00	0.07	98.24
3.3	8.24	0.07	98.30
2.8	8.48	0.07	98.37
2.3	8.76	0.07	98.44
1.95	9.00	0.07	98.50
1.6	9.29	0.07	98.57

Pre-Treatment

Sample weight: 40 G
Weight loss on Pre-treatment: 11.31 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.44 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.56 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.99
Mean (µm): 126.29 µm
Standard deviation: 1.44
Skewness: 7.12
Kurtosis: 59.04

Graphic Parameters

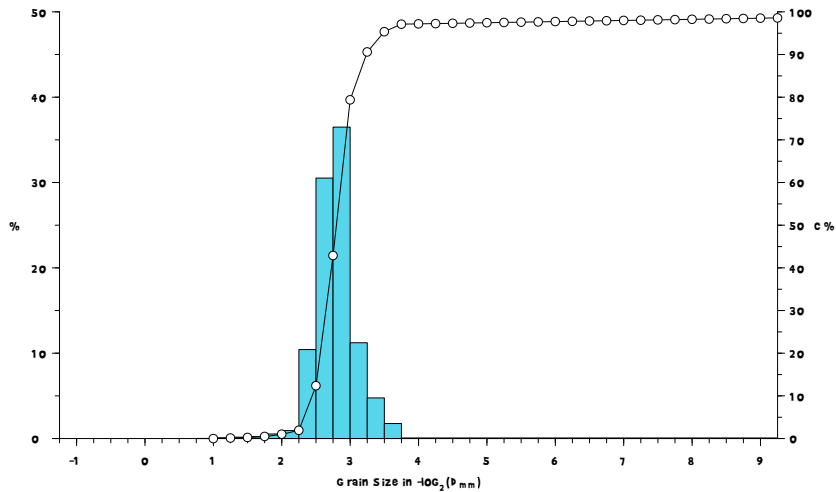
Mean (phi): 2.8 (0.00 Inman)
Mean (µm): 143.43 µm
Sorting: 0.3 (0.00 Inman)
Sorting: 0.32 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.05 (Inman)
2nd skewness: 0.24 (Inman)
Skewness: 0.09 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.17 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.86 (Inman)

Percentiles

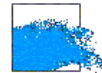
1st Percentile (C): 251 µm
10th Percentile: 187 µm
35th Percentile: 153 µm
50th Percentile (M): 145 µm
65th Percentile: 134 µm
90th Percentile: 107 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 97 %
Silt: 1 %
Clay: 1 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal L - _
Date of analysis: 20/10/06

Analysis number: 356
Analyst: JF G Oort

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.01	0.01
425	1.23	0.10	0.11
355	1.49	0.15	0.26
300	1.74	0.21	0.47
250	2.00	0.44	0.93
212	2.24	0.76	1.69
180	2.47	9.81	11.51
150	2.74	30.02	41.52
125	3.00	35.62	77.15
106	3.24	12.08	89.23
93	3.43	5.32	94.55
76	3.72	2.15	96.71
62.5	4.00	0.08	96.78
52.6	4.25	0.08	96.86
44.2	4.50	0.08	96.93
37.2	4.75	0.08	97.01
31.3	5.00	0.08	97.08
26.3	5.25	0.08	97.16
22.1	5.50	0.08	97.24
18.6	5.75	0.08	97.31
15.6	6.00	0.08	97.39
13.1	6.25	0.08	97.46
11	6.51	0.08	97.54
9.3	6.75	0.08	97.61
7.8	7.00	0.08	97.69
6.6	7.24	0.08	97.76
5.5	7.51	0.08	97.84
4.7	7.73	0.08	97.92
3.9	8.00	0.08	97.99
3.3	8.24	0.08	98.07
2.8	8.48	0.08	98.14
2.3	8.76	0.08	98.22
1.95	9.00	0.08	98.29
1.6	9.29	0.08	98.37

Pre-Treatment

Sample weight: 35.2 G
Weight loss on Pre-treatment: 11.79 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.18 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.82 %

Moment Parameters

Mean (phi): 3.03
Mean (µm): 122.59 µm
Standard deviation: 1.53
Skewness: 6.69
Kurtosis: 52.12

Graphic Parameters

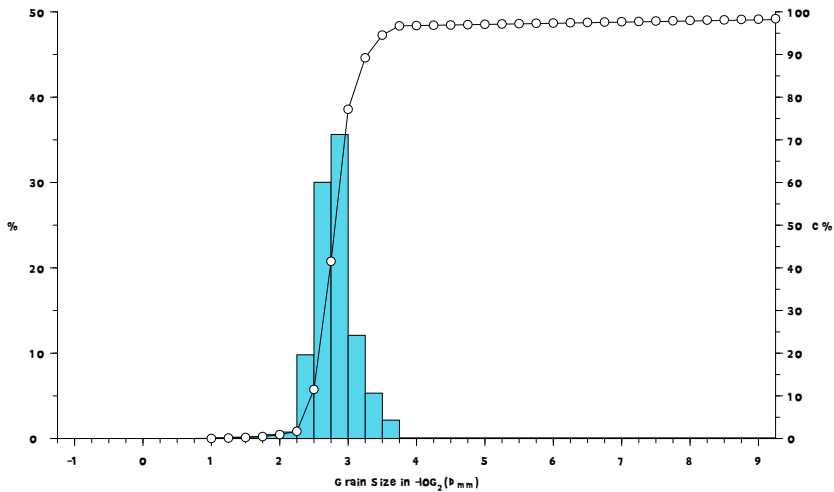
Mean (phi): 2.82 (0.00 Inman)
Mean (µm): 141.21 µm
Sorting: 0.31 (0.00 Inman)
Sorting: 0.33 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.08 (Inman)
2nd skewness: 0.33 (Inman)
Skewness: 0.13 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.22 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.88 (Inman)

Percentiles

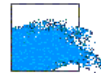
1st Percentile (C): 246 µm
10th Percentile: 185 µm
35th Percentile: 151 µm
50th Percentile (M): 144 µm
65th Percentile: 133 µm
90th Percentile: 104 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 97 %
Silt: 2 %
Clay: 2 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: staal M -
Date of analysis: 2010/06

Analysis number: 357
Analyst: JF Gøpørt

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
500	1.00	0.02	0.02
425	1.23	0.08	0.10
355	1.49	0.13	0.23
300	1.74	0.19	0.42
250	2.00	0.32	0.94
212	2.24	0.94	1.88
180	2.47	10.17	12.05
150	2.74	31.86	43.91
125	3.00	34.72	78.63
106	3.24	11.35	89.97
93	3.43	5.11	95.08
76	3.72	1.97	97.06
62.5	4.00	0.07	97.12
52.6	4.25	0.07	97.19
44.2	4.50	0.07	97.26
37.2	4.75	0.07	97.32
31.3	5.00	0.07	97.39
26.3	5.25	0.07	97.46
22.1	5.50	0.07	97.52
18.6	5.75	0.07	97.59
15.6	6.00	0.07	97.66
13.1	6.25	0.07	97.72
11	6.51	0.07	97.79
9.3	6.75	0.07	97.86
7.8	7.00	0.07	97.92
6.6	7.24	0.07	97.99
5.5	7.51	0.07	98.06
4.7	7.73	0.07	98.12
3.9	8.00	0.07	98.19
3.3	8.24	0.07	98.26
2.8	8.48	0.07	98.32
2.3	8.76	0.07	98.39
1.95	9.00	0.07	98.46
1.6	9.29	0.07	98.52

Pre-Treatment

Sample weight: 32.5 G
Weight loss on Pre-treatment: 11.02 %
Sieve fraction (>75 µm): 97.51 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 2.49 %

Moment Parameters

Mean (phi): 2.99
Mean (µm): 125.66 µm
Standard deviation: 1.46
Skewness: 7.03
Kurtosis: 57.55

Graphic Parameters

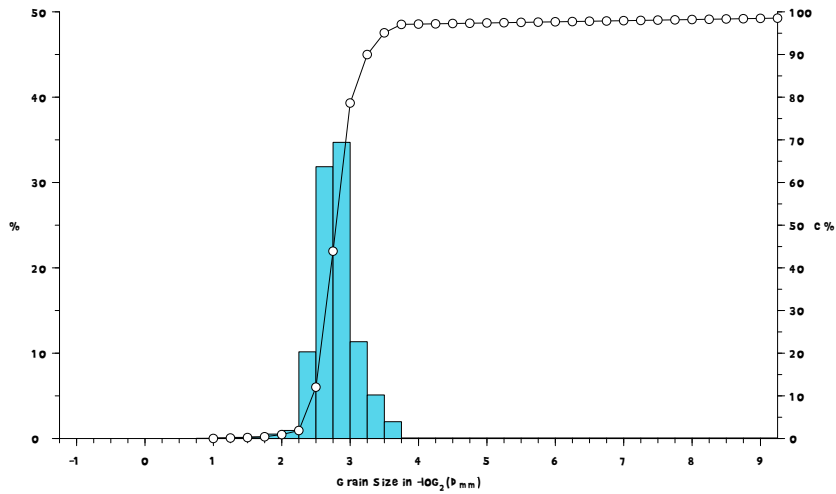
Mean (phi): 2.81 (0.00 Inman)
Mean (µm): 142.63 µm
Sorting: 0.3 (0.00 Inman)
Sorting: 0.32 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.09 (Inman)
2nd skewness: 0.28 (Inman)
Skewness: 0.12 (Folk & Ward)
Kurtosis: 1.16 (Folk & Ward)
Kurtosis: 0.84 (Inman)

Percentiles

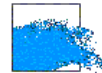
1st Percentile (C): 247 µm
10th Percentile: 186 µm
35th Percentile: 153 µm
50th Percentile (M): 145 µm
65th Percentile: 134 µm
90th Percentile: 106 µm

Lithological Fractions

Gravel: 0 %
Sand: 97 %
Silt: 1 %
Clay: 2 %



M U M M



SEP AN 2001 Grain Size Analysis

Sample: K 57 - 5.2

Analysis number: 158
Analyst: Pumont F

diameter µm	phi	weight %	cumm. %
355	1.49	0.17	0.17
300	1.74	0.21	0.38
250	2.00	0.25	0.63
212	2.24	0.42	1.05
180	2.47	6.36	7.41
150	2.74	31.29	38.70
125	3.00	26.84	65.54
106	3.24	14.16	79.70
93	3.43	3.56	83.26
76	3.72	1.53	84.79
62.5	4.00	0.28	85.07
52.6	4.25	0.15	85.22
44.2	4.50	0.22	85.44
37.2	4.75	0.37	85.81
31.3	5.00	0.59	86.40
26.3	5.25	0.69	87.09
22.1	5.50	0.72	87.81
18.6	5.75	0.88	88.70
15.6	6.00	0.88	89.58
13.1	6.25	0.77	90.35
11	6.51	0.74	91.08
9.3	6.75	0.53	91.62
7.8	7.00	0.58	92.19
6.6	7.24	0.62	92.81
5.5	7.51	1.03	93.84
4.7	7.73	2.08	95.92
3.9	8.00	1.49	97.41
3.3	8.24	1.05	98.46
2.8	8.48	0.62	99.08
2.3	8.76	0.37	99.44
1.95	9.00	0.29	99.74
1.6	9.29	0.22	99.96

Pre-Treatment

Sample weight: 18.2 G
Weight loss on Pre-treatment: 17.71 %
Sieve fraction (>75 µm): 85.87 %
Sedigraph fraction (<75 µm): 14.13 %

Moment Parameters

Mean (phi): 3.4
Mean (µm): 94.72 µm
Standard Deviation: 1.56
Skewness: 2.23
Kurtosis: 7.29

Graphic Parameters

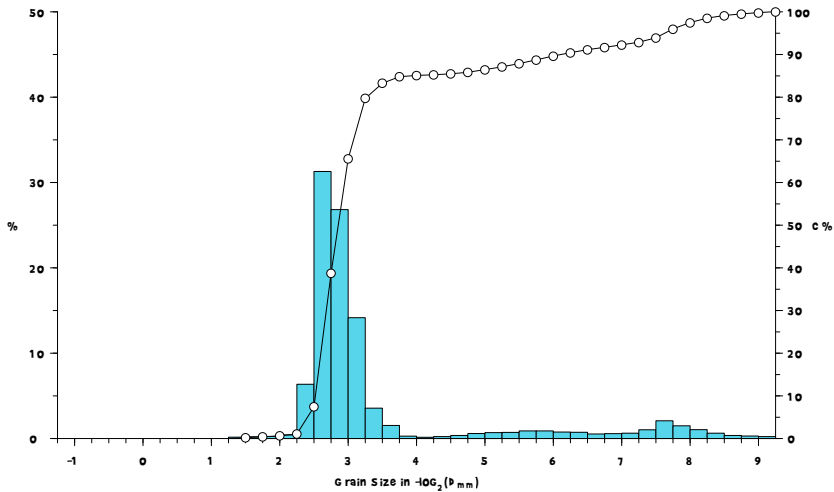
Mean (phi): 3.06 (0.00 Inman)
Mean (µm): 120.17 µm
Sorting: 0.51 (0.00 Inman)
Sorting: 1.05 (Folk & Ward)
1st skewness: 0.41 (Inman)
2nd skewness: 4.23 (Inman)
Skewness: 0.62 (Folk & Ward)
Kurtosis: 4 (Folk & Ward)
Kurtosis: 4.14 (Inman)

Percentiles

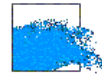
1st Percentile (C): 216 µm
10th Percentile: 177 µm
35th Percentile: 149 µm
50th Percentile (M): 139 µm
65th Percentile: 125 µm
90th Percentile: 14 µm

Lithological Fractions

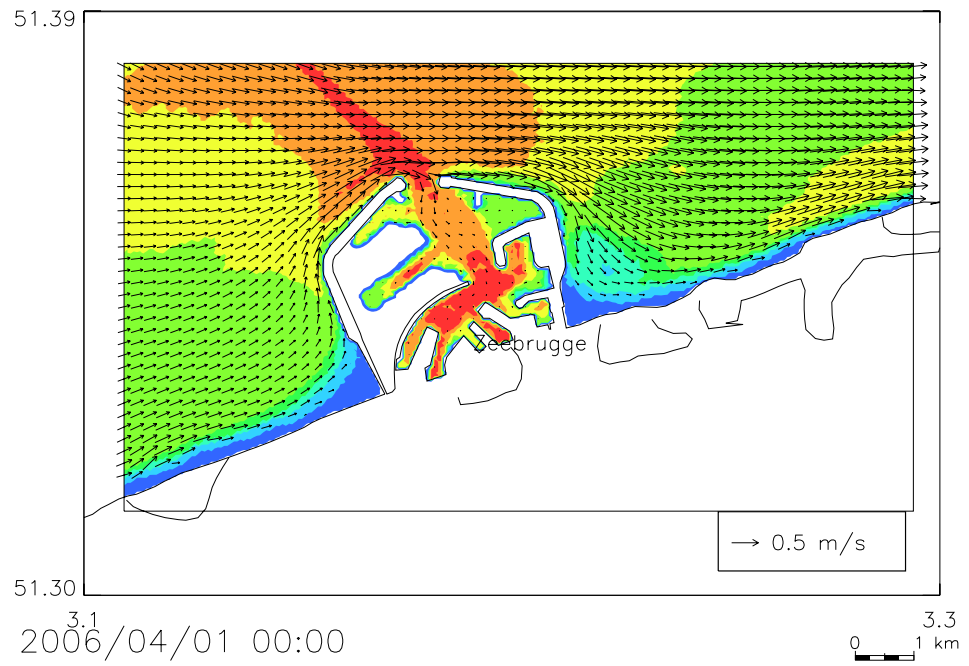
Gravel: 0 %
Sand: 85 %
Silt: 15 %
Clay: 0.26 %



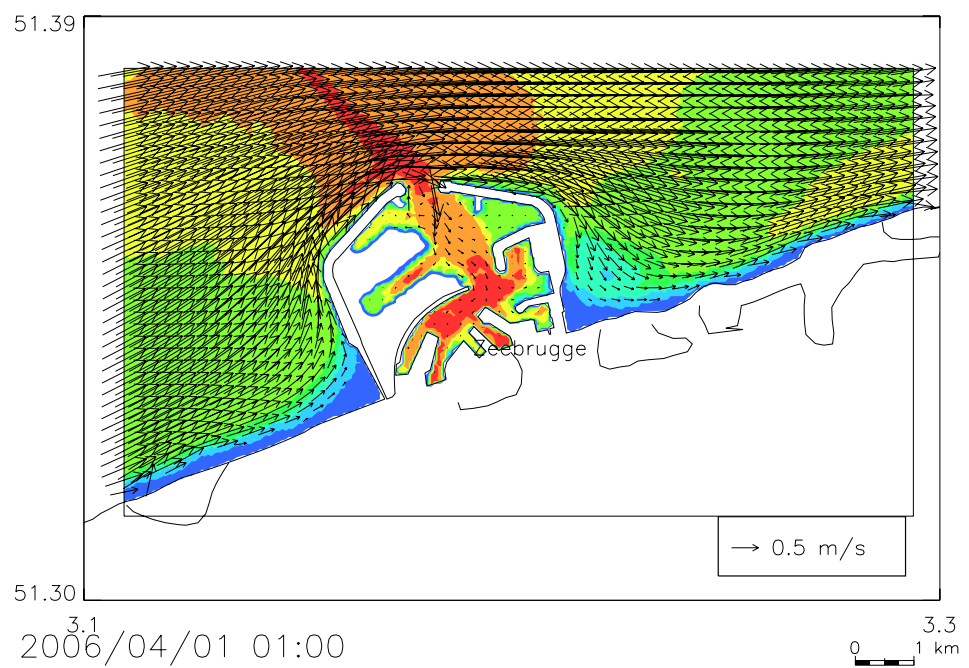
M U M M



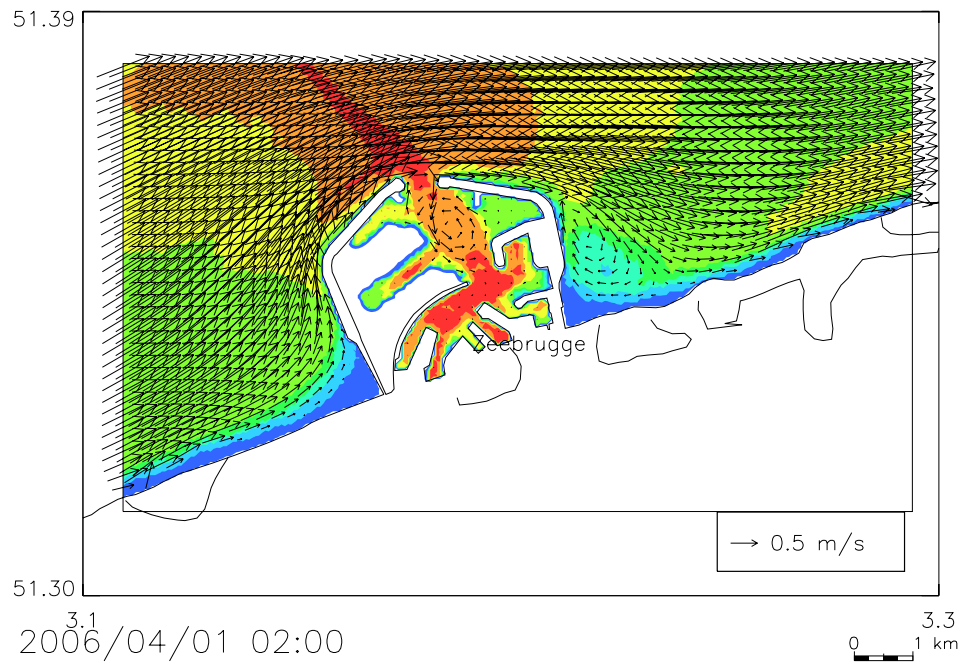
Appendix 4: Stromingsvelden gedurende een getijde



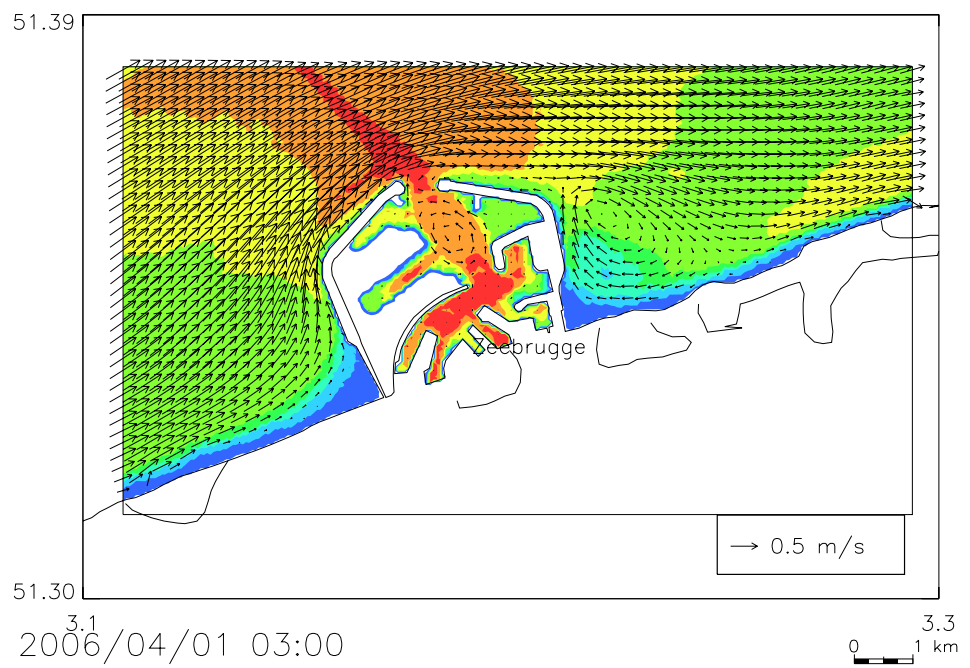
Figuur 55: Stromingsvelden op 1 april 2006 0h.



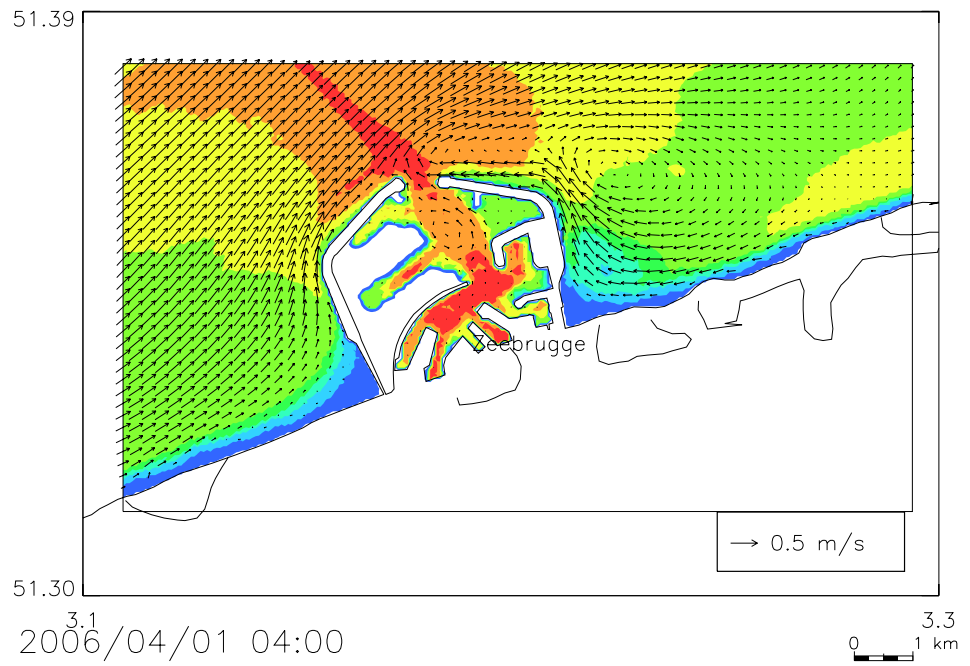
Figuur 56: Stromingsvelden op 1 april 2006 1h.



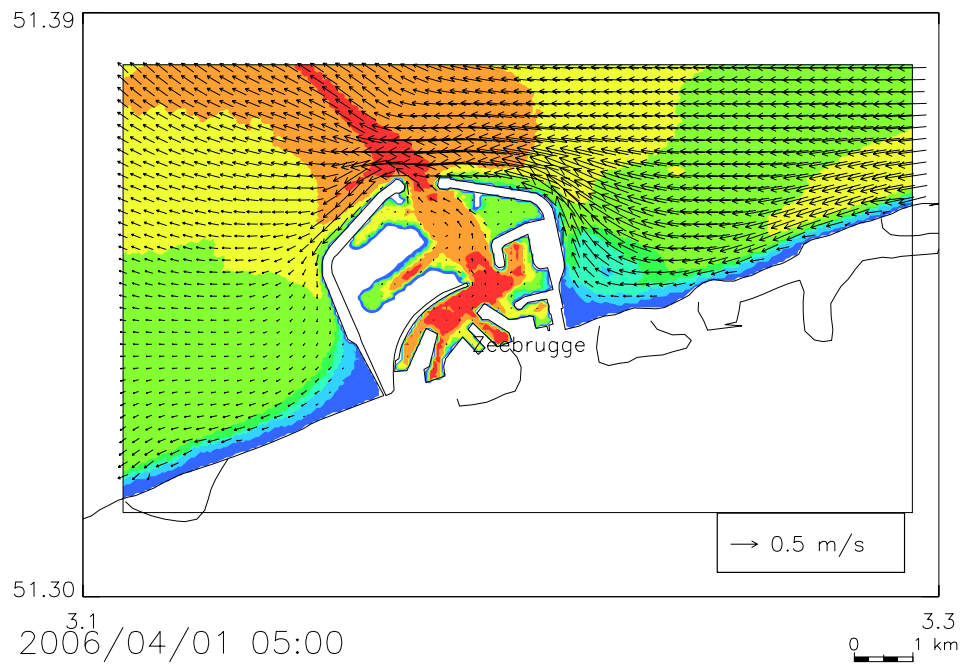
Figuur 57: Stromingsvelden op 1 april 2006 2h.



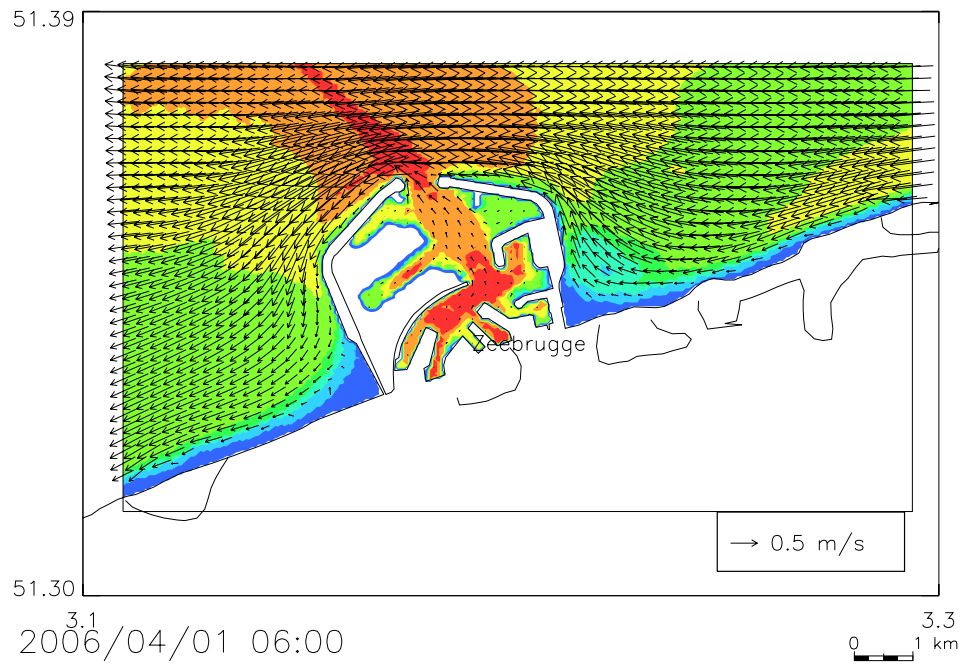
Figuur 58: Stromingsvelden op 1 april 2006 3h.



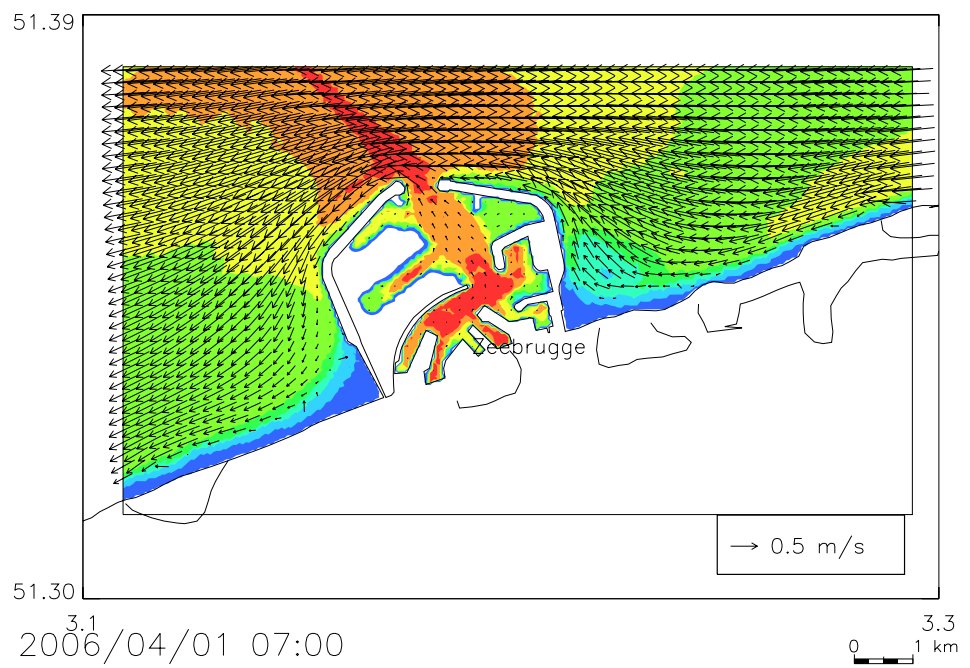
Figuur 59: Stromingsvelden op 1 april 2006 4h.



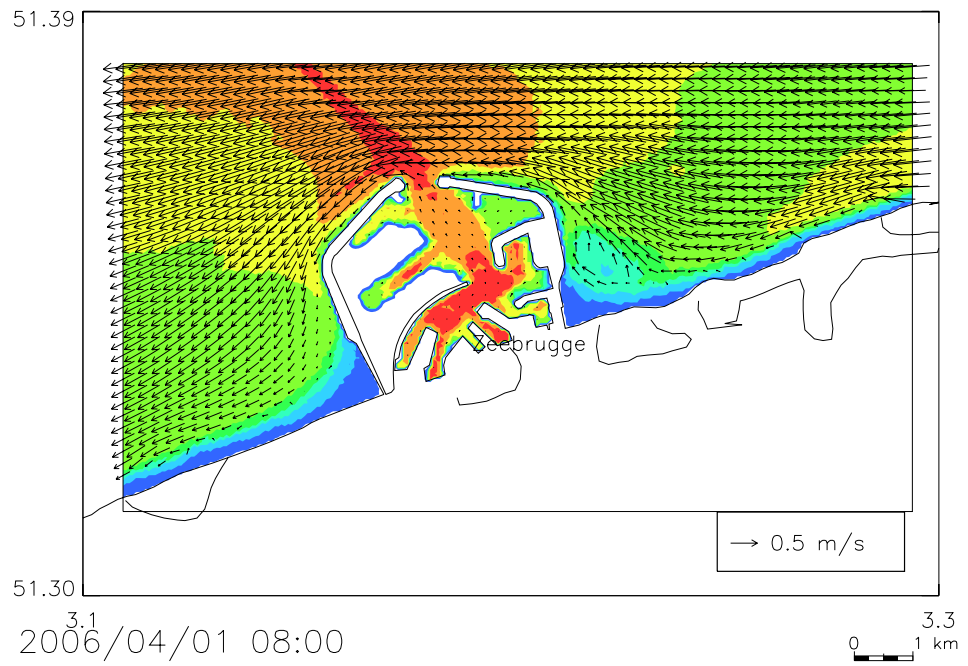
Figuur 60: Stromingsvelden op 1 april 2006 5h.



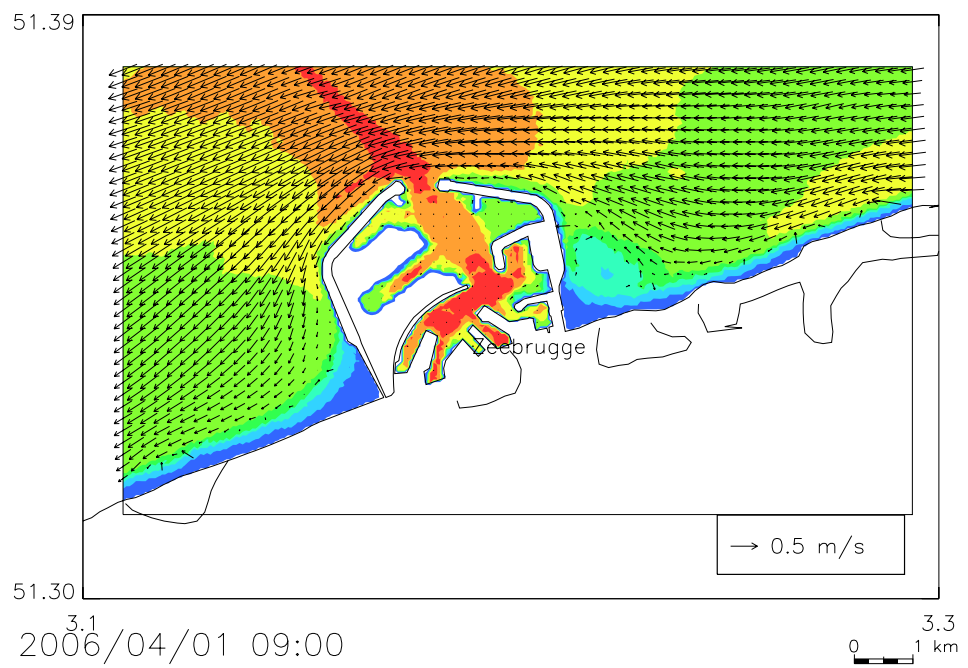
Figuur 61: Stromingsvelden op 1 april 2006 6h.



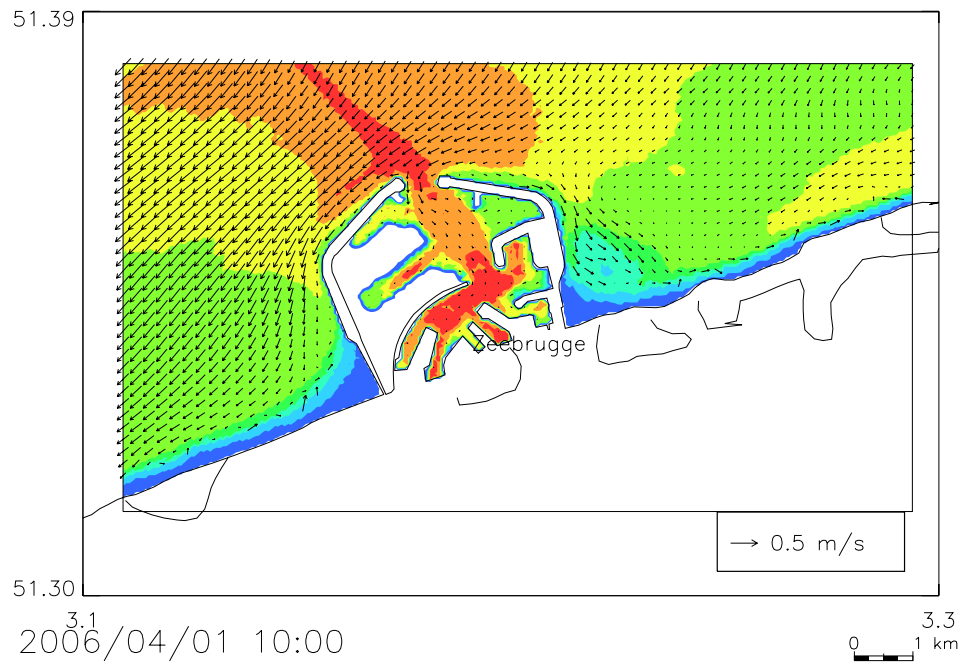
Figuur 62: Stromingsvelden op 1 april 2006 7h.



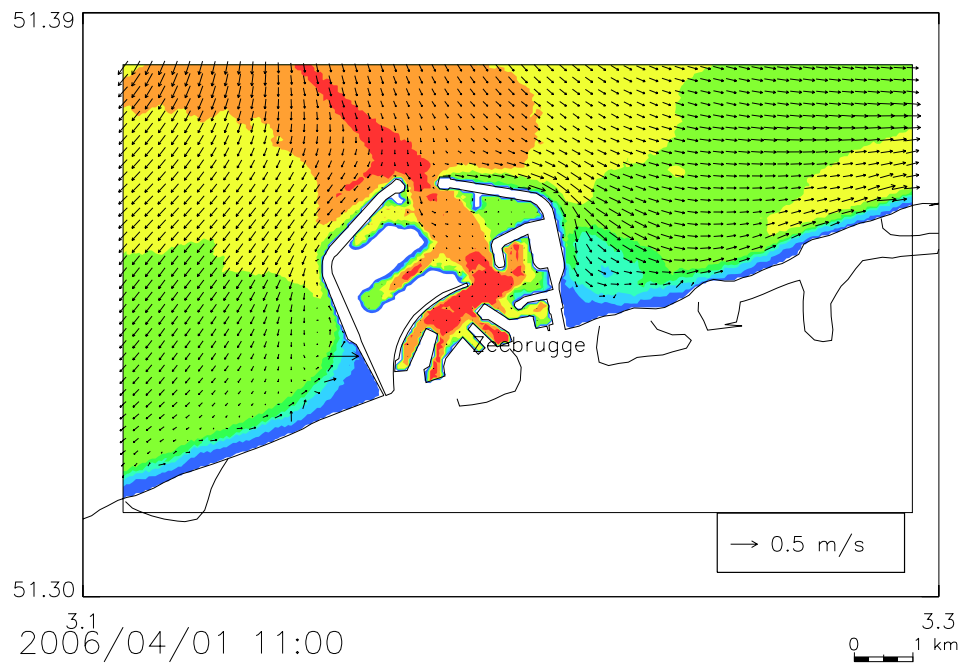
Figuur 63: Stromingsvelden op 1 april 2006 8h.



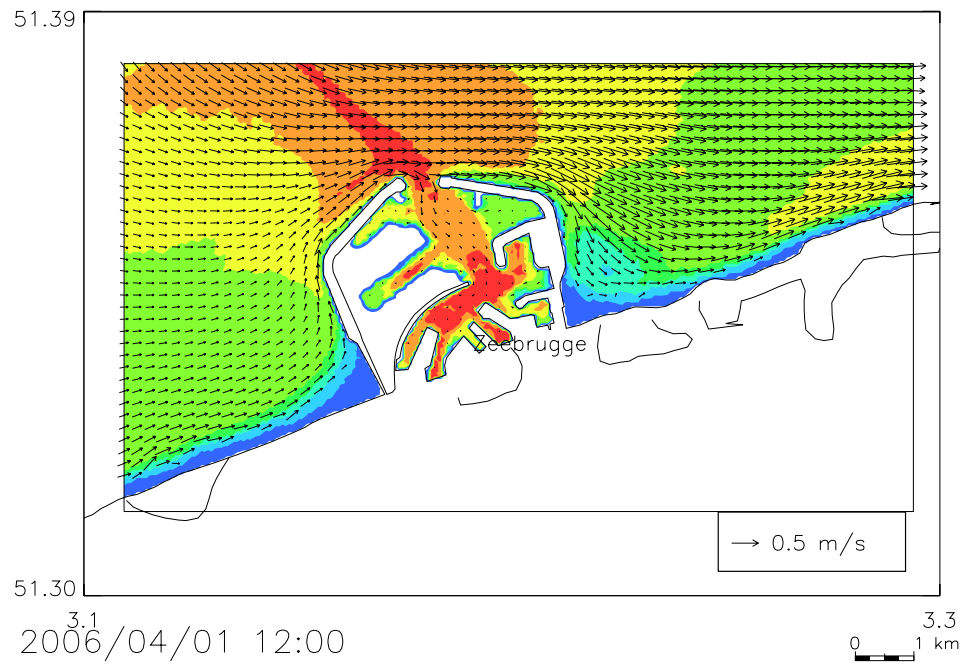
Figuur 64: Stromingsvelden op 1 april 2006 9h.



Figuur 65: Stromingsvelden op 1 april 2006 10h.



Figuur 66: Stromingsvelden op 1 april 2006 11h.



Figuur 67: Stromingsvelden op 1 april 2006 12h.

Colophon

Dit rapport werd door BMM voorbereid in oktober 2007.

De referentiecode is ZAHE/1/DVDE/200710/NL/ER.

Status draft
 finale versie
 herziene versie
 vertrouwelijk

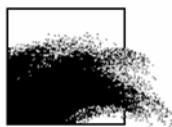
Beschikbaar in Engels
 Nederlands
 Frans

Als u verdere vragen hebt of bijkomende copies van het document wenst te ontvangen, gelieve een e-mail te zenden naar D.VandenEynde@mumm.ac.be, met vermelding van de referentiecode of te schrijven naar:

BMM
Gulledelle 100
B-1200 Brussel
België
Telefoon: +32 2 773 2111
Fax: +32 2 770 6972
<http://www.mumm.ac.be/>

BEHEERSEENHEID VAN HET
MATHEMATISCH MODEL VAN DE NOORDZEE

GROEP MODELLEN



Het lettertype dat in dit document wordt gebruikt zijn Gudrun Zapf-von Hesse's *Carmina Medium* 10/14 voor tekst, en Frederic Goudy's *Goudy Sans Medium* voor titels en bijschriften.