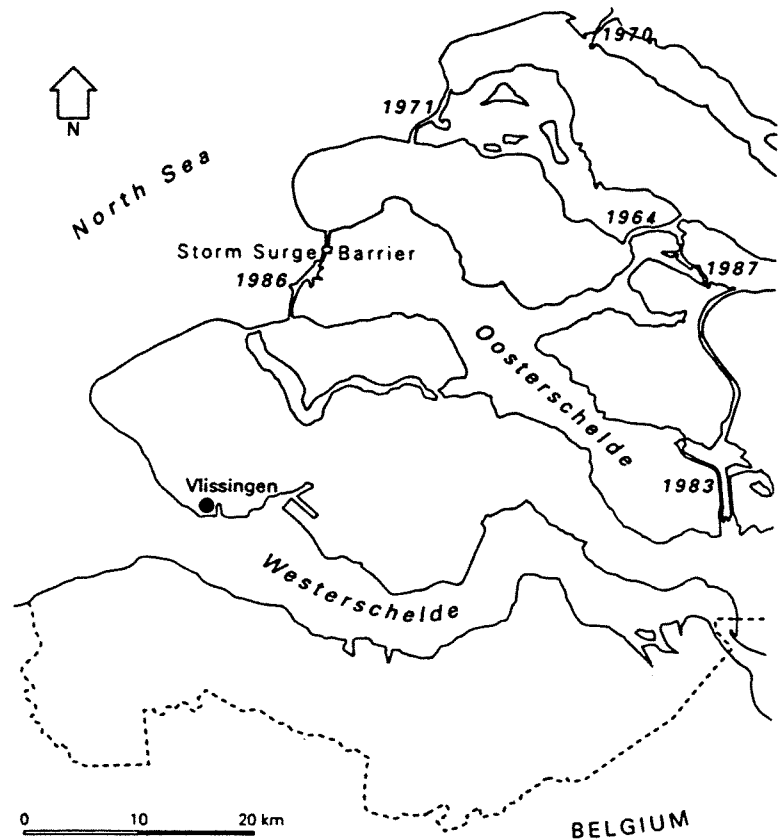


Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650

Verslag afstudeerwerk

Januari 1999

ing. A.R. Blacqui re



Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650

Verslag afstudeerwerk

ing. A.R. Blacquièrre

Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

Subfaculteit Civiele Techniek

Januari 1999

Staan aan de oever van de Westerschelde en kijken naar dat eeuwig trekkend water, naar de wijd uitlopende baan van spiegelend licht onder een lage zon, het traag verschuivend silhouet van kolossale zeeschepen en binnen hetzelfde blikveld de vlugge wending van een ranke stern, dat beroert ons in hoofd en hart.

Groot en machtig is dat water; onveranderlijk de regelmaat en kracht van het getij. Een mens op de oever kan zich daarbij klein voelen. Maar tegelijkertijd heeft de mens met al zijn willen en wroeten eeuwen achtereen de stroom een ander aanzien gegeven.

(Naar: De toekomst van de Westerschelde; beschouwingen vanaf de dijk (Rijkswaterstaat / RIKZ, 1997))

Voorwoord

Ter voltooiing van de opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft heb ik gekozen voor een afstudeerproject over rivieren en estuaria. Dit rapport bevat de resultaten van een onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650. Het onderwerp is afkomstig van de afstudeermarkt van de sectie Waterbouwkunde op 26 september 1997.

Op deze plaats wil ik de volgende personen bedanken voor hun inspanningen om dit project mede succesvol af te ronden. Allereerst de leden van de afstudeercommissie: prof.dr.ir. H.J. de Vriend (afstudeerhoogleraar), dr.ir. Z.B. Wang (dagelijkse begeleiding), dr.ir. N. Booij (correctie van tekstgedeelten over het waterbewegingsmodel Duflow en uitleg over de werking van het programma), dr. A.J.F. van der Spek (toezending van rapporten en bodemschematisaties en correctie van tekstgedeelten over onder andere de geologische geschiedenis van het Nederlandse deltagebied) en ir. A. Langerak (toezending van rapporten en informatiebron aangaande getalswaarden voor invoerparameters bij de modelberekeningen). Tevens wil ik mijn collegastudenten ing. Edwin Swart en ing. Jacob-Jan Velten bedanken voor het ter beschikking stellen van hun computers om de berekeningen met het model Asmita uit te kunnen voeren, alsmede mijn vriendin ing. Carien Ruitenbeek voor het door haar verrichte tekenwerk. Tenslotte richt ik een woord van dank aan mijn ouders, die mij al die jaren in staat hebben gesteld om te studeren aan zowel HTS als TU.

Gouda, 28 december 1998
Arjen Blacquièrè

Samenvatting

In het kader van een afstudeerproject is een studie verricht naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650 volgens ééndimensionale rekenmodellen. De validatie van dit soort modellen is namelijk een probleem. Van de Westerschelde bestaat weliswaar een groot aantal meerdimensionale modellen, maar door de grote hoeveelheid aan details gaat daarbij het globale beeld verloren. Bovendien vergen de bijbehorende rekenprocedures langere rekentijden. De bij het onderzoek gebruikte schematisatie bestaat uit een verdeling van de Westerschelde in vijf vakken, waarbij het estuarium zelf is gemodelleerd als een ééngesysteem. De ontwikkeling van de bodemligging is gesimuleerd met behulp van twee typen morfologische modellen: een dynamisch - dus procesbeschrijvend - model en een dynamisch-empirisch model. Voor beide modellen geldt dat de benodigde invoerparameters (waterstanden, stroomsnelheden, debieten) afkomstig zijn van een getijsimulatie met behulp van het ééndimensionale waterbewegingsmodel DufLOW. Deze simulatie reproduceert de getijbeweging in het Schelde-estuarium voor de jaren 1968, 1800 en 1650 en is ontwikkeld door dr. A.J.F. van der Spek (1993). De invloed van lokale golven op het sedimenttransport en transporten ten gevolge van dichtheidsstromen zijn buiten beschouwing gelaten. Dit is een verantwoorde aanname, aangezien deze mechanismen van geringe invloed blijken te zijn op het totale sedimenttransport.

De morfologische berekeningen zijn in eerste instantie toegepast op de situatie van 1800. Uit de zeventiende eeuw zijn geen nautische kaarten van de Westerschelde bekend, zodat op de resultaten van een vroegere periode moeilijk een controle valt uit te voeren. Bovendien representeert de schematisatie voor 1968 de bodem van het estuarium voorafgaand aan de verdieping van de drempels in 1970. Aangezien de bodemligging sindsdien in belangrijke mate wordt bepaald door menselijke ingrepen zoals deze, leek het niet zinvol om de situatie na 1968 als uitgangspunt te nemen.

In de eerste fase van het afstudeerproject is de toepassing van een dynamisch model onderzocht. Daarbij is gebruik gemaakt van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen. Bij de modelberekeningen is afwisselend gevarieerd met de parameters voor de bodemruwheid (k_{vloed} en k_{eb}) en de definitie van de stroomvoerende breedte (B_s) van een sectie. In eerste instantie zijn sedimenttransportberekeningen uitgevoerd met gebruikmaking van dezelfde parameters als waarmee de getijbeweging in het estuarium wordt gesimuleerd: $k_{\text{vloed}}=48$, $k_{\text{eb}}=37$ en ' $B_s=B_b$ ' (bergende breedte). Onder ' $B_s=B_b$ ' wordt verstaan: de door Van der Spek gehanteerde definitie van het begrip stroomvoerende breedte. Uit de modelresultaten volgen echter voor 1800 (run 1) ebgedomineerde sedimenttransporten voor de twee meest zeewaarts gelegen modelvakken (sectie 1 en 2). Dit is in tegenspraak met de werkelijkheid, aangezien de Westerschelde - vroeger zelfs meer dan tegenwoordig - een grote vraag naar zand heeft vertoond.

Door het verschil in grootte tussen de gehanteerde ruwheidsparameters vertonen de bij eb en vloed berekende sedimenttransporten relatief grote verschillen: het transport bij vloed is beduidend kleiner dan het transport bij eb. De bodemruwheid is door middel van de Chézy-coëfficiënt (C) verwerkt in de sedimenttransportformule: $C=k \cdot R^{1/6}$. Hierin is R de hydraulische straal. Aangezien de Westerschelde in werkelijkheid een sedimentatietendens vertoont, is ervoor gekozen om de volgende serie berekeningen uit te voeren met een

gemiddelde k -waarde: $k_{\text{vloed}} = k_{\text{eb}} = 42,5$. De aanname ' $B_s = B_b$ ' is gehandhaafd. Uit de modelresultaten volgt echter opnieuw een ebgedomineerd sedimenttransport voor sectie 1 (1803, run 3). Het rekenen met een gemiddelde k -waarde heeft dus niet geleid tot een verbetering van het uiteindelijke resultaat.

De eerste twee onderzochte situaties leidden al in een vroeg stadium tot onrealistische resultaten in de zin van ebgedomineerde sedimenttransporten. Bij het derde beschouwde geval is de aanname ' $B_s = B_b$ ' komen te vervallen. De stroomvoerende breedte is nu gedefinieerd als het quotiënt van de gemiddelde natte doorsnede van een sectie ($A_{\text{gem.}}$) en de daarbij behorende gemiddelde diepte, waarbij deze laatste gemakshalve gelijkgesteld is aan de hydraulische straal: $B_s = A_{\text{gem.}}/R_{\text{gem.}}$. Bij deze situatie zijn de ruwheidsparementen weer ingesteld op de oorspronkelijke waarden: $k_{\text{vloed}} = 48$ en $k_{\text{eb}} = 37$. Evenals bij situatie 1, treden reeds na de eerste run ebgedomineerde sedimenttransporten op voor de secties 1 en 2.

Bij het vierde beschouwde geval is gerekend met $k_{\text{vloed}} = k_{\text{eb}} = 42,5$ en $B_s = A_{\text{gem.}}/R_{\text{gem.}}$. Opnieuw treden na enige tijd ebgedomineerde sedimenttransporten op voor sectie 1 (1818, run 9). Vooral gedurende de eerste morfologische tijdstappen komen de modelresultaten (kwalitatief) goed overeen met wat men vooraf zou verwachten: vrij sterke sedimentatie in het oostelijke deel van de Westerschelde en enkele profielverruiming en elders in het estuarium. Doordat knoop 6 (ter hoogte van het Verdronken Land van Saeftinghe) echter gaat fungeren als een grote zandvang, ondergaat de Westerschelde in een relatief korte periode een morfologische gedaanteverwisseling: vloedgedomineerde sedimenttransporten in het mondingsgebied worden in een periode van slechts 18 jaar omgezet in ebgedomineerde transporten. Het dwarsprofiel van knoop 6 neemt af met een zodanig grote snelheid, dat de doordringing van de getijgolf hier duidelijk door wordt belemmerd.

Het is algemeen bekend dat getijdebekken op langere termijn neigen naar verlanding. Dit geldt ook voor de Westerschelde. Op grond hiervan kan worden geconcludeerd dat de verkregen modelresultaten geen reële weergave zijn van de werkelijkheid. Hiervoor zijn enkele oorzaken aan te wijzen.

Ten eerste is mijns inziens de gebruikte bodemschematisatie te grof voor morfologische berekeningen. Per knoop wordt namelijk één dwarsdoorsnede representatief gesteld voor een vaklengte van ca. 10 km. Een in morfologisch opzicht zodanig complex systeem als de Westerschelde laat zich niet zó eenvoudig modelleren. Bovendien wordt de invloed van bochten buiten beschouwing gelaten, aangezien de modelvakken in elkaars verlengde zijn geprojecteerd. De door bochten opgewekte stromingsgradiënten zijn mede van invloed op de morfologie van de Westerschelde. Ten tweede speelt de berekeningswijze van een nieuw dwarsprofiel ten behoeve van een volgende stromingsberekening een rol. Dit is gedaan onder de aanname dat een geërodeerde of gesedimenteerde hoeveelheid bodemmateriaal evenredig wordt verdeeld naar de diepte. Ten gevolge hiervan verandert in sommige gevallen de afstand tussen het laagwaterniveau (ca. NAP-2,50 m) en de onderliggende bodem met enkele meters per run. Aangezien een sectie daardoor vrij plotseling een relatief grote hoeveelheid water meer of minder zal bevatten, heeft dit zeker invloed op de waterbeweging in het estuarium en dus ook op de bodemligging. Tenslotte is een opmerking over de invloed van getij asymmetrie op de morfologische ontwikkeling op zijn plaats. Op een indirecte wijze wordt getij asymmetrie op het sedimenttransport betrokken. De waterbeweging in het estuarium is in alle gevallen gesimuleerd met behulp van de oorspronkelijke k -waarden. De door Duflow berekende stroomsnelheden vormen vervolgens een invoerparameter voor de transportformule.

In de tweede fase van het afstudeerproject is de toepassing van het dynamisch-empirische model Asmita onderzocht. Dit model is in staat om een indicatie te geven van de ontwikkeling van de bodemligging van estuaria en lagunes op een tijdschaal van decennia. De belangrijkste veronderstelling bij dit model is dat voor elk element van het beschouwde systeem een evenwichtstoestand kan worden gedefinieerd. Deze toestand wordt bepaald door de hydrodynamische parameters. Om een morfologische evenwichtstoestand te definiëren, worden voor elk element empirische relaties opgesteld met betrekking tot het zogenaamde evenwichtsvolume (V_e). Het empirische aspect van het model is juist gelegen in deze parameter. Wanneer het getijvolume (V) wordt gedeeld door de gemiddelde natte geuldoorsnede van een modelknoop, wordt een grootte verkregen met de dimensie van een lengte (L). Voor de huidige Westerschelde geldt $L=25$ km (Allersma, 1994). Op basis van de Duflow-resultaten voor de Westerschelde anno 1800 wordt echter een waarde van $L=37$ km gevonden. Dat $L=37$ km het resultaat is van curve-fitting, betekent niet dat deze waarde automatisch de goede waarde is. Sterker nog: deze waarde is zeker niet goed, omdat de Westerschelde anno 1800 niet in een morfologische evenwichtstoestand verkeerde. Aangezien het estuarium een sedimentatietendens vertoont, lijkt het plausibel om een grotere waarde voor L te hanteren. Gekozen is voor het uitvoeren van berekeningen met $L=37$ km, $L=40$ km en $L=43$ km. Voor deze drie waarden van L zijn met behulp van het rekenprogramma Asmita berekeningen uitgevoerd van het geulvolume per sectie over de periode 1800-1900. Uit de modelresultaten blijkt dat voor zowel $L=37$ km als $L=40$ km voor alle modelvakken (met uitzondering van sectie 3) structureel stijgende geulvolumina worden gevonden, hetgeen duidt op erosie. Na een aanvankelijke afname van het geulvolume over de periode 1800-1825, vertoont ook sectie 3 dit patroon. Beide modelresultaten zijn in tegenspraak met de werkelijkheid en als zodanig verworpen. Voor $L=43$ km worden geen structureel stijgende geulvolumina gevonden. Naar aanleiding hiervan is ervoor gekozen om de simulatietijd in dit geval te verlengen tot 1968. Uit de modelresultaten blijkt dat na 1860 voor alle secties de geulvolumina nagenoeg constant blijven. Wanneer de resultaten meer in detail worden beschouwd, blijkt dat de secties 1, 2 en 3 een lichte neiging tot sedimentatie vertonen, terwijl de secties 4 en 5 eroderen. Ook dit is in tegenspraak met de werkelijkheid, aangezien praktijkmetingen wijzen op sterke sedimentatietendensen in het oostelijke deel van het estuarium.

Dezelfde oorzaken zoals genoemd bij de behandeling van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen zijn bepalend voor de hier verkregen modelresultaten. De invloed van getijasymmetrie op de morfologie is vrijwel geheel buiten beschouwing gelaten, aangezien uit de Duflow-resultaten slechts het getijvolume wordt gebruikt als invoerparameter voor het rekenprogramma Asmita ($V = \tau \int |Q| dt$).

Geconcludeerd kan derhalve worden dat de validatie van ééndimensionale rekenmodellen een probleem blijft. Om tot betere resultaten te komen verdient het aanbeveling om in ieder geval te werken met een fijnere bodemschematisatie. De bij het onderzoek gehanteerde verdeling van de Westerschelde in vijf vakken is duidelijk te grof voor het uitvoeren van morfologische berekeningen.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1 - Inleiding	8
1.1 Algemeen	8
1.2 Probleemstelling, doelstelling en aanpak van het onderzoek	8
Hoofdstuk 2 - Het Schelde-estuarium	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Geologische geschiedenis van het Nederlandse deltagebied	12
2.2.1 Algemeen	12
2.2.2 Nederland na de ijstijden	12
2.2.3 Paleogeografische ontwikkeling van Zeeland in het Holoceen	13
2.3 Het getij in de Westerschelde	16
2.3.1 Algemeen	16
2.3.2 Voortplantingssnelheid van de getijgolf en getijverschillen	16
2.3.3 Getijasymmetrie	19
2.3.4 Bergingsveranderingen	22
2.4 Morfologische beschrijving van de Westerschelde	25
2.4.1 Algemeen	25
2.4.2 Morfologische dynamiek	25
2.4.2.1 Macrodynamiek	26
2.4.2.2 Mesodynamiek	28
2.4.2.3 Microdynamiek	30
2.4.3 Sedimenttransport	30
2.4.3.1 Patronen van netto zandtransport	31
2.4.3.2 Drempels	31
2.4.4 Aanvullende opmerkingen bij menselijke ingrepen in het estuarium	32
2.4.4.1 Inpolderingen	33
2.4.4.2 Verdiepen en baggeren	34
2.4.4.3 Storten	34
2.4.4.4 Zandwinnen	35
2.5 Het Verdrongen Land van Saeftinghe	36
Hoofdstuk 3 - Morfologische ontwikkeling volgens een dynamisch model	37
3.1 Inleiding	37
3.2 Samenvatting getijsimulatie Westerschelde door dr. A.J.F. van der Spek	38
3.2.1 Waterbewegingsmodel Duflow	38
3.2.1.1 Differentiaalvergelijkingen	38
3.2.1.2 Discretisatie	39

Inhoudsopgave (vervolg)

3.2.1.3 Randvoorwaarden en beginvoorwaarden	40
3.2.1.4 Oplossing van het stelsel vergelijkingen	40
3.2.2 Vakindeling en bodemschematisatie Westerschelde	41
3.2.3 Randvoorwaarden	42
3.2.4 Uitvoer	43
3.2.5 Conclusie	45
3.3 Toepassing van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen . .	46
3.3.1 Algemeen	46
3.3.2 De sedimenttransportformule van Englund en Hansen	46
3.3.2.1 Formule en controle toepassing voor de Westerschelde	47
3.3.2.2 Toepassing bij morfologische modellering	48
3.3.3 Sedimenttransporten 1800	49
3.3.3.1 Situatie 1	49
3.3.3.2 Situatie 2	53
3.3.3.3 Situatie 3	56
3.3.3.4 Situatie 4	60
3.3.4 Interpretatie modelresultaten en conclusie	64
 Hoofdstuk 4 - Morf. ontwikkeling volgens een dynamisch-empirisch model . . .	 67
4.1 Inleiding	67
4.2 Algemene modelopzet	67
4.3 Oriënterende berekeningen	69
4.3.1 Getijvolumina en hydraulische parameters	69
4.3.2 Evenwichtsvolumina en initiële morfologische tendensen	72
4.3.3 Invoerfile rekenprogramma Asmita	74
4.4 Modelresultaten	76
4.4.1 Algemeen	76
4.4.2 Situatie 1: $L=37$ km	76
4.4.3 Situatie 2: $L=40$ km	78
4.4.4 Situatie 3: $L=43$ km	79
4.5 Interpretatie modelresultaten en conclusie	80
 Hoofdstuk 5 - Conclusies en aanbevelingen	 83
 Geraadpleegde literatuur	 84
 Bijlagen	 85

Hoofdstuk 1 - Inleiding

1.1 Algemeen

Dit rapport bevat de resultaten van een onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeerproject. De omschrijving van het onderwerp is als volgt:

Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650:

In de Westerschelde wordt momenteel fors ingegrepen door het baggeren en op diepte houden van de scheepvaartgeul naar Antwerpen. Een belangrijke vraag daarbij is, hoe het systeem hier op langere termijn op zal reageren. Daartoe is inmiddels een groot aantal studies uitgevoerd, onder andere met voorspellende modellen. De validatie van die modellen is echter een probleem. Nu zijn er in het verleden al eens eerder grote ingrepen gedaan in dit estuarium. In de Tachtigjarige Oorlog vonden bijvoorbeeld grootschalige inundaties plaats en daarna zijn grote gebieden ingepolderd.

Het afstudeeronderzoek betreft de vraag in hoeverre ééndimensionale rekenmodellen in staat zijn om de langetermijnontwikkeling van de morfologie van de Westerschelde te reproduceren. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van gegevens over waterbeweging en morfologie sinds 1650.

1.2 Probleemstelling, doelstelling en aanpak van het onderzoek

Probleemstelling:

Het is onbekend in hoeverre ééndimensionale rekenmodellen in staat zijn om de langetermijnontwikkeling van de morfologie van de Westerschelde te reproduceren of zelfs te voorspellen. Van dit estuarium bestaat weliswaar een groot aantal meerdimensionale modellen, maar door de grote hoeveelheid aan details gaat daarbij het globale beeld verloren. Bovendien vergen rekenprocedures met twee- of driedimensionale modellen langere rekentijden. Voor een bestaand ééndimensionaal rekenmodel van de Westerschelde wordt verwezen naar het rapport R 96-153 door K. de Jong en A.W. Heemink: *'A model for long-term morphodynamic behaviour of tidal basins, long estuaries and tidal rivers'* (Delft University of Technology, Faculty of Technical Mathematics and Informatics, 1996). De bij het afstudeeronderzoek gebruikte schematisatie bestaat uit een verdeling van de Westerschelde in vijf vakken, waarbij het estuarium zelf is gemodelleerd als een ééngeulstelsel.

Doelstelling:

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het nagaan in hoeverre ééndimensionale rekenmodellen in staat zijn om voorspellingen te doen omtrent de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650. Hiertoe is gebruik gemaakt van zowel een dynamisch - dus procesbeschrijvend - model als een dynamisch-empirisch model. Indien de beschouwde modellen betrouwbare uitkomsten geven over deze periode van circa 350 jaar, kunnen tevens

indicaties worden gegeven met betrekking tot ontwikkelingen van de bodemligging in de toekomst.

Aanpak van het onderzoek:

Alvorens kon worden begonnen met het modelonderzoek, diende eerst een literatuurstudie te worden verricht naar de ontstaansgeschiedenis en de waterbouwkundige karakteristieken van het Schelde-estuarium. Deze literatuurstudie is in dit verslag opgenomen als hoofdstuk 2. Het feitelijke onderzoek bestaat uit twee delen. Zoals vermeld op de vorige bladzijde, is bij de morfologische berekeningen gebruik gemaakt van zowel een procesbeschrijvend als een dynamisch-empirisch model. In eerste instantie is de toepassing van een dynamisch model onderzocht. De keuze viel hierbij op de - oorspronkelijk voor stationaire stroming afgeleide - sedimenttransportformule van Englund en Hansen. De resultaten hiervan komen aan de orde in hoofdstuk 3. In de tweede fase van het onderzoek is gebruik gemaakt van het dynamisch-empirische model Asmita. De resultaten van dit deels procesbeschrijvende en deels empirische model worden behandeld in hoofdstuk 4. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 conclusies geformuleerd naar aanleiding van de verkregen modelresultaten.

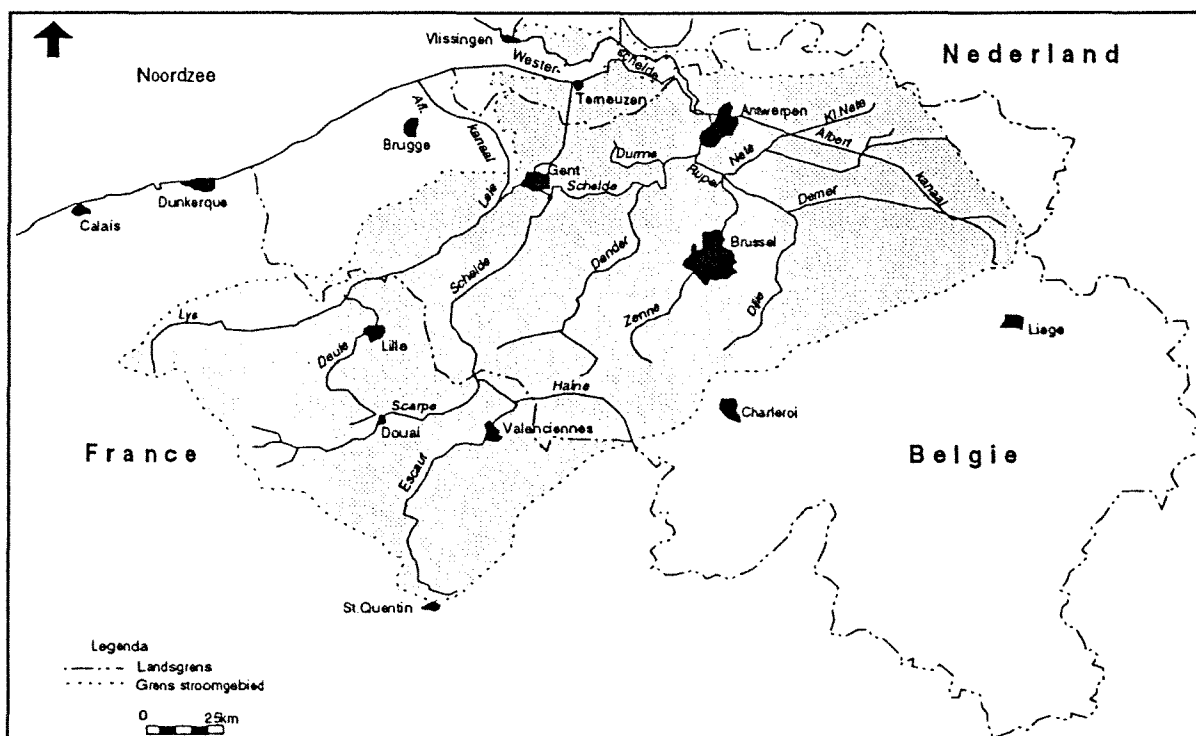
Bij de morfologische berekeningen is alleen de verandering van de bodemligging ten gevolge van getijgedreven stroming onderzocht. De invloed van lokale golven op het sedimenttransport en transporten ten gevolge van dichtheidsstromen zijn dus buiten beschouwing gelaten. Deze aanname wordt nader verklaard in paragraaf 2.4.3. Tevens is bij alle modelberekeningen de afvoer van de Schelde-rivier gelijk aan nul gesteld, aangezien het rivierdebiet geen significante bijdrage levert aan de waterbeweging in de Westerschelde.

Voor beide modellen geldt dat de benodigde invoergegevens (waterstanden, stroomsnelheden, debieten) afkomstig zijn van een getijsimulatie met behulp van het ééndimensionale waterbewegingsmodel Duflow. Deze simulatie is uitgevoerd door dr. A.J.F. van der Spek (1993) en reproduceert de getijbeweging in het Schelde-estuarium voor de jaren 1968, 1800 en 1650. Gezien het grote belang van deze getijsimulatie voor dit afstudeerproject, wordt in paragraaf 3.2 een samenvatting hiervan gegeven. In deze paragraaf wordt tevens ingegaan op de theoretische achtergronden van het waterbewegingsmodel Duflow.

Hoofdstuk 2 - Het Schelde-estuarium

2.1 Inleiding

De Westerschelde is het langste nog overgebleven rivierdelta-estuarium van West-Europa. De Schelde-rivier ontspringt nabij het Noord-Franse Saint-Quentin en mondt 350 km verder bij Vlissingen uit in de Noordzee. Het stroomgebied van de rivier heeft een oppervlakte van ongeveer 21.000 km² (zie figuur 2.1). Met een gemiddeld debiet van ca. 100 m³/s is de Schelde een kleintje onder de grote rivieren. Ter vergelijking: de afvoer van de Rijn bedraagt ca. 2200 m³/s, terwijl de Amazone gemiddeld 100.000 m³/s afvoert. Het gedeelte van het estuarium tussen Gent en de Belgisch/Nederlandse grens heet Zeeschelde, het gedeelte tussen de grens en Vlissingen is de Westerschelde. Bovenstrooms van Antwerpen is het water volledig zoet, tussen Antwerpen en Hansweert is het water brak en verder benedenstrooms is het water zout. Door de grote verschillen in zoutgehalte en door de afwisselende bodemligging kent het estuarium een grote variatie in leefgebieden van planten en dieren. De Westerschelde biedt een grote verscheidenheid aan intergetijdegebieden (slikken, schorren), platen, geulen en ondiepten. Het Verdrongen Land van Saeftinghe is de grootste brakwaterschor van West-Europa. In ecologisch opzicht is de Westerschelde een voor Nederland uniek overgangsgebied van rivier naar zee. Tevens is het estuarium van groot belang voor de ecologische processen in de Noordzee.



Figuur 2.1: stroomgebied van de Schelde

In tegenstelling tot de andere grote wateren in het zuidwesten van Nederland zoals

Haringvliet, Volkerak, Grevelingen, Veerse Meer en Oosterschelde, zijn in de Westerschelde het getij en de vrije afvoer van zoet water nog intact. De getijbeweging in het Schelde-estuarium dringt door tot in de (zoete) rivier. De zoet/zoutgradiënt is nog volledig aanwezig, waardoor de natuurlijke menging in principe ongehinderd kan plaatsvinden. Het belang hiervan is aanmerkelijk, want het gedrag van slib wordt in sterke mate aangestuurd door de saliniteitsgradiënt. De invloed van het getij is merkbaar tot bij Gent. Het verschil tussen hoog- en laagwater bedraagt daar nog 2 m. Het estuarium wordt twee keer per dag gevuld en geleegd door het getij. Ter hoogte van de lijn Vlissingen-Breskens stroomt iedere getijcyclus ca. 1 miljard m³ water de Westerschelde in en uit. Dit water wordt geborgen in zowel intergetijdegebieden als geulen. De looptijd van de getijgolf door het estuarium van Vlissingen naar Antwerpen is in de afgelopen eeuw afgenomen van 2 uur en 24 minuten in 1895 tot 1 uur en 44 minuten in 1985. In 1985 was het in Antwerpen dus 1 uur en 44 minuten later hoogwater dan in Vlissingen.

In economisch opzicht behoort het gebied rond de Schelde-rivier en de Westerschelde tot de top tien van de wereld. De menselijke activiteiten concentreren zich vooral op industrie, veeteelt, landbouw en recreatie. Van groot belang zijn de haven- en industriegebieden van Gent, Antwerpen, Terneuzen en Vlissingen. Het estuarium wordt door de mens dientengevolge vooral gebruikt als scheepvaartweg en als afvoerweg van water en daarin geloosde afvalstoffen. Om de haven van Antwerpen toegankelijk te houden voor de steeds groter wordende zeeschepen, is het op diepte brengen en houden van de geulen door middel van permanent onderhoudsbaggerwerk noodzakelijk. De diepte van de geulen neemt af door natuurlijke processen en door menselijke ingrepen in het estuarium. Voorbeelden van menselijke ingrepen zijn bedijkingen, inpolderingen, bagger- en stortwerkzaamheden en vooral de aanleg van reguleringswerken. Reguleringswerken (sluizen, stuwen) dienen meestal plaatselijke of regionale belangen. Vaak wordt geen rekening gehouden met het feit dat lokale veranderingen in een riviersysteem kunnen leiden tot problemen op andere locaties, waardoor weer nieuwe ingrepen noodzakelijk zijn.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt ingegaan op respectievelijk de geologische geschiedenis van het Nederlandse deltagebied (paragraaf 2.2), de invloed van het getij op de estuariene processen in de Westerschelde (paragraaf 2.3) en het recente morfologische gedrag van het estuarium en de daarop van invloed zijnde factoren (paragraaf 2.4). Daarbij wordt tevens aandacht besteed aan de invloed van menselijke ingrepen op de morfologie. Tenslotte wordt in paragraaf 2.5 een beknopte beschrijving gegeven van de geschiedenis van het Verdrongen Land van Saefthinghe. De tekst in paragraaf 2.2 is ontleend aan door de Rijks Geologische Dienst uitgegeven Paleogeografische kaarten van Zeeland in het Holoceen (Vos e.a., 1996). De paragrafen 2.3, 2.4 en 2.5 zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op het eindrapport van het project 'Oostwest' (Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, 1997). Dit rapport bevat de resultaten van een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in de Westerschelde.

2.2 Geologische geschiedenis van het Nederlandse deltagebied

2.2.1 Algemeen

Het Nederlandse deltagebied is geologisch gezien zeer jong. De ontwikkeling van de huidige Westerschelde begon ca. 1000 jaar geleden. In de volgende paragraaf wordt een beknopte beschrijving gegeven van de ontwikkeling van Nederland na de ijstijden, waarna in paragraaf 2.2.3 de geologische geschiedenis van Zeeland meer in detail aan de orde komt. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de op de vorige bladzijde genoemde Paleogeografische kaarten van Zeeland in het Holoceen (Vos e.a., 1996).

2.2.2 Nederland na de ijstijden

Het Kwartair, de periode bestaande uit het Pleistoceen, het ijstijdperk en het Holoceen, begon omstreeks twee miljoen jaar geleden. Het Holoceen duurt nog voort tot op de dag van vandaag. Met de laatste ijstijd, het Weichselien, eindigde ongeveer tienduizend jaar geleden het Pleistoceen. Deze periode werd gekenmerkt door sterke fluctuaties in het klimaat. Deze varieerden van barre ijstijden (glacialen) tot milde of zelfs bijna tropische perioden (interglacialen). De Nederlandse ondergrond werd gevormd door een samenspel van factoren tijdens zowel koude als warmere perioden. Tijdens de glacialen lag de Noordzeebodem vrijwel geheel droog en bereikte het landijs soms zelfs delen van Noord-Nederland. Na het smelten van de ijskappen liep het Noordzeebekken weer vol en gingen mariene processen de boventoon voeren. De periode na het ijstijdperk, het Holoceen, wordt gekenmerkt door een continue, zij het in de tijd in snelheid afnemende, relatieve stijging van de zeespiegel. Er wordt hier gesproken van een relatieve zeespiegelrijzing, omdat niet alleen het zeeniveau steeg door het smelten van de ijskappen, maar tegelijkertijd het land daalde. Door de stijging van het zeeniveau breidde de Noordzee zich uit, waarbij de zee als eerste de lage delen van het toenmalige landschap binnendrong. De uitbreiding van de Noordzee had een stagnatie van de afvoer van het oppervlaktewater in het achterland tot gevolg, waardoor veenvorming optrad. Doordat het zeeniveau tot 6000 à 5000 jaar geleden zeer snel steeg, drong de zee in korte tijd door tot de oostelijke gebieden van de lage delen. Daardoor ontstonden diverse lagunes met aan de zeewaartse zijde ervan een landschap dat vergelijkbaar moet zijn geweest met het huidige Waddengebied. Een echte kustlijn met duinen ontbrak waarschijnlijk. Door de stijging van het zeeniveau verschoof het hele systeem van getijdebekkens naar het oosten. Na de eerder genoemde afname van de snelheid waarmee de zeespiegel steeg, stopte dit proces en trad in grote delen van Nederland verlanding van de getijdebekkens op. Hierdoor sloten de zeegaten zich en ontstond - tussen 4000 en 3000 jaar geleden - een vrijwel gesloten kustlijn van Zeeuws-Vlaanderen tot de westelijke Waddenzee. De kustlijn werd op slechts enkele plaatsen onderbroken door een aantal riviermondingen.

Na deze periode bleef de zeespiegel stijgen, zij het langzaam. Vanaf dat moment traden sterke regionale verschillen op in de kustontwikkeling van het Zeeuwse deltagebied, Holland en het Waddengebied. In Holland was de sedimentaanvoer dermate groot, dat de kust zich hier bijna 10 km in zeewaartse richting kon uitbreiden. De ontwikkeling van het Waddengebied valt

uiteen in twee delen. Het oostelijke deel van de Waddenzee is nooit helemaal verland, waardoor hier altijd getijdebekken aanwezig bleven. Het westelijke deel van het Waddengebied bestond grotendeels uit droog land, maar raakte vanaf het begin van de jaartelling overstromd. Hierdoor kon zich op deze locatie een groot en nieuw getijdebekken vormen. De geologische ontwikkeling van het Nederlandse deltagebied (Zeeland) wordt nader toegelicht in de volgende paragraaf.

2.2.3 Paleogeografische ontwikkeling van Zeeland in het Holocene

De dominerende factor in de landschapontwikkeling van het Zeeuwse kustgebied is de Holocene zeespiegelrijzing geweest. Tevens hebben de factoren morfologie vóór de mariene verdrinking, de sedimentbalans van het getijdebekken en menselijke ingrepen een belangrijke rol gespeeld. In deze paragraaf worden de Holocene landschapontwikkelingen kort besproken. De beschrijving is ingedeeld naar de vijf belangrijkste afzettingsfasen die in Zeeland worden onderscheiden. De tijdsperioden worden uitgedrukt in jaren BP: ¹⁴C jaren Before Present (voor heden). Het nulpunt 'heden' is hierbij volgens internationale afspraak gesteld op 1950.

Fase 1 (terrestrische periode; 10000-8000 BP):

Aan het begin van de huidige interglaciale periode, het Holocene (10000 BP), bevond de zeespiegel zich op een niveau van ongeveer NAP-45 m. Zeeland en grote delen van de Noordzee waren in het vroege Holocene bosrijke gebieden. Kenmerkend voor deze periode waren een nauw dalsysteem van de Schelde-rivier, gelegen tussen de rug in oostelijk Zuid-Beveland en een in noordelijke richting naar de Rijn/Maasdelta lopende steilrand in Brabant. Tevens bevond zich een brede, amfitheatervormige depressie in centraal-Zeeland.

Fase 2 (overstroming van het Zeeuwse gebied; 8000-4500 BP):

Rond 8000 BP bereikte de zeespiegel een niveau van NAP-20 m. Het huidige Noordzeegebied was overstromd en ook in Zeeland begon de invloed van de zee merkbaar te worden. In het laagste deel van de amfitheatervormige depressie, het noordwestelijke deel van Schouwen-Duiveland, ontwikkelde zich het in de vorige paragraaf genoemde lagunaire milieu.

Ten gevolge van de continu stijgende zeespiegel schoven gedurende het Atlanticum het kustveenmoeras, de lagunes en het getijdegebied op in landwaartse richting en werd een groot deel van Zeeland overstromd. Vanaf 6500 BP verdween het lagunaire milieu tussen het getijdegebied en het kustveenmoeras. Dit was grotendeels het gevolg van de afnemende stijging van de zeespiegel. Vanaf die tijd kon aan de landwaartse zijde van het getijdebekken de sedimentatiesnelheid gelijke tred houden met de stijging van de zeespiegel, waardoor grote delen van dit gebied niet meer permanent onder water stonden. Het getijdegebied begon te verlanden en plaatselijk vormde zich zelfs tijdelijk veen op de getijafzettingen (de tweede laag 'Hollandveen').

Fase 3 (regressieve kustontwikkeling; 4500-2500 BP):

Vanaf 4500 BP zette de regressieve kustontwikkeling definitief door. De strandwallen hadden hun maximale landinwaarts gelegen positie bereikt. In het achterland begon het kustveenmoeras

ras zich sterk uit te breiden, hetgeen ten koste ging van het getijdegebied. De veenontwikkeling was het resultaat van het dichtslibben van diverse getijgeulen. Ten gevolge hiervan nam het getijvolume af. Hierdoor nam ook de getijstroming af, waardoor vele geulen verlandden. Rond 4500 BP was de regressieve kustontwikkeling zover voortgeschreden, dat Zeeland bijna geheel was veranderd in één groot veenlandschap. De Schelde stroomde door het veenmoeras, grotendeels binnen het gebied van de huidige Oosterschelde. Langs de kust had zich een vrijwel gesloten rij strandwallen gevormd. Tot ongeveer 2500 BP veranderde er weinig in de landschapsontwikkeling. Alleen de strandwallen breidden zich uit in zeewaartse richting, terwijl het kustveenmoeras verder opschoof in landwaartse richting. Een opvallend element uit deze periode is de bochtafsnijding van de meanderende Schelde op Tholen.

Fase 4 (verdrinking van het veenlandschap; 2500-950 BP):

In de loop van het vroeg-Subatlanticum nam, voor het eerst sinds de langdurige regressieve periode, de invloed van de zee weer toe. Eerst op lokale schaal (600-300 v.Chr.), later ook op regionale schaal (na 300 n.Chr.). In het noordwestelijke deel van Walcheren braken rond 600 v.Chr. de strandwallen door. Later gebeurde dit ook elders. In gebieden waar de strandwallen waren doorgebroken verbeterde de afwatering van het achterliggende veengebied. Hierdoor werden deze gebieden beter toegankelijk voor de mens. De menselijke activiteiten concentreerden zich vooral in de veengebieden van Zeeuws-Vlaanderen, Walcheren, Zuid-Beveland en Schouwen. De mens verbeterde plaatselijk het natuurlijke afwateringssysteem door de aanleg van sloten. Aangezien veen voor het grootste deel bestaat uit water, leidde de natuurlijke en kunstmatige afwatering ertoe dat het veengebied ging dalen. Dit had tot gevolg dat de invloed van de zee weer kon toenemen. Op het moment dat de getijprocessen greep kregen op de substantiële delen van het veenlandschap, rond 300 n.Chr., begon een zichzelf versterkend verdrinkingsproces: insnijding van getijgeulen, erosie van veen, verdere verbetering van het natuurlijke drainagesysteem en een hieraan gekoppelde combinatie van verlaging van het veengebied en vergroting van de komberging. Hierdoor kon een verdere insnijding van de getijgeulen plaatsvinden en herhaalde zich bovenstaande gang van zaken. Reeds rond 350 n.Chr. was het grootste deel van het Zeeuwse veengebied verdrongen. Dit proces zette zich voort in de daaropvolgende eeuwen. Vanaf 500 n.Chr. begonnen de oudste getijgeulen zich op te vullen met zandige afzettingen. Deze geulopvullingen waren gedurende de volgende eeuwen minder gevoelig voor bodemcompactie dan het ernaast gelegen klei/veen gebied. Het verschil in daling was er de oorzaak van dat de zandige geulopvullingen veranderden in lage ruggen. In de negende en tiende eeuw waren grote delen van het schorgebied opgeslibd, waardoor zij niet meer regelmatig werden overstroomd.

Fase 5 (periode van menselijke ingrepen; 950 BP - heden):

In de loop van de elfde eeuw nam de overstromingsfrequentie van het schorgebied tijdens stormen toe. De mens verliet het gebied echter niet. Integendeel: vanaf de twaalfde eeuw begon men zich tegen overstromingen te beschermen door middel van dijken. Reeds in 1250 waren grote delen van het schorgebied bedijkt. Ook begon de mens het veengebied te ontginnen voor industriële toepassingen zoals de productie van zout en brandstof. De menselijke ingrepen in het kustgebied van Zeeland beïnvloedden de processen in het getijdegebied. Ten gevolge van de bedijkingen kon het water zich tijdens zware stormen niet meer uitspreiden over uitgestrekte schorgebieden, maar werd het opgestuwd tegen de dijken.

Dit resulteerde in hogere stormvloedniveaus. Achter de dijken was het maaiveld verlaagd door kunstmatige afwatering en veenontginningen. Wanneer een dijk doorbrak, stroomde het hoog opgestuwde water met grote kracht in de laaggelegen polders. Geulen met een diepte van 30 meter of meer sneden zich hierbij in. Dergelijke gaten waren destijds zeer moeilijk te dichten. Grote landverliezen deden zich voor na de desastreuze stormvloeden van 1375/1376 en 1404 in het centrale deel van Zeeuws-Vlaanderen en tijdens de stormvloed van 1530 in het oostelijke deel van Zuid-Beveland. Het verlies aan land werd echter ruimschoots gecompenseerd door bedijking van nieuw gevormde schorgebieden.

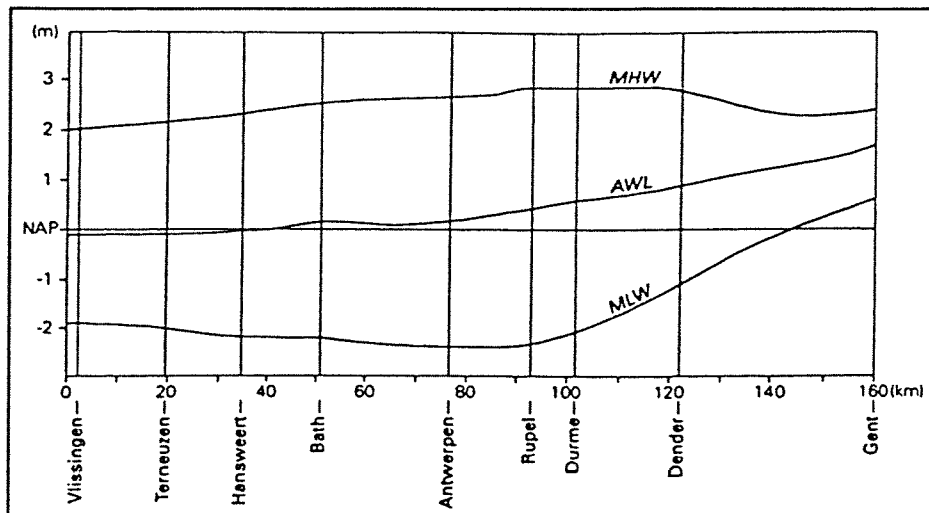
De uitvoering van het Deltaplan is voorlopig de laatste episode in het gevecht van de mens tegen de zee. Het plan is uitgevoerd na de catastrofale overstromingsramp van 1953, toen grote delen van Zeeland en Zuid-Holland onder water kwamen te staan en honderden mensen verdronken. Het plan hield de sluiting in van de Zuid-Hollandse zeearm Haringvliet (1970) en de Zeeuwse zeearmen Grevelingen (1971) en Oosterschelde (1986), respectievelijk door een gesloten dam met spuisluizen, een gesloten dam en een open stormvloedkering. Tevens werden dammen aangebracht in onder andere het Veerse Gat, Zandkreek en Volkerak. Omwille van de belangrijke economische functie van de Westerschelde (scheepvaartweg naar de havens van Vlissingen, Terneuzen en Antwerpen) is deze zeearm nooit afgesloten, waardoor natuurlijke processen in dit estuarium nog ruimschoots aanwezig zijn.

2.3 Het getij in de Westerschelde

2.3.1 Algemeen

Het getij is de belangrijkste aandrijvende kracht achter de estuariene processen in de Westerschelde. Twee keer per dag wordt het estuarium gevuld en geledigd door het getij. Het vloedvolume per getijcyclus bedraagt ter hoogte van Vlissingen ca. $1100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, nabij Antwerpen is dit afgenomen tot ongeveer $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De afvoer van de Schelde-rivier is verwaarloosbaar klein ten opzichte van het getijvolume: 50 à 60 m^3/s in de periode april-oktober en 160 à 180 m^3/s gedurende de rest van het jaar. In het algemeen wordt vaak gesteld dat de Schelde-afvoer gemiddeld 100 m^3/s bedraagt.

Het gemiddelde getijverschil varieert vandaag de dag van 3,80 m te Vlissingen tot 5,20 m te Antwerpen (zie figuur 2.2). Het getijverschil is op sommige plaatsen in het estuarium in het verleden sterk toegenomen. Dit feit wordt toegelicht in paragraaf 2.3.2. Tevens wordt in deze paragraaf aandacht besteed aan de hiermee samenhangende ontwikkeling van de voortplantingssnelheid van de getijgolf in het estuarium. Tenslotte komen in de paragrafen 2.3.3 en 2.3.4 respectievelijk getijasymmetrie en kombergingsveranderingen aan de orde.



Figuur 2.2: verloop van gemiddeld hoogwater (MHW), gemiddelde waterstand (AWL) en gemiddeld laagwater (MLW) in het Schelde-estuarium

2.3.2 Voortplantingssnelheid van de getijgolf en getijverschillen

Het gedrag van het getij in het Schelde-estuarium is in de loop van de tijd veranderd. Zowel de voortplantingssnelheid als het getijverschil zijn toegenomen. Deze veranderingen zijn deels het gevolg van natuurlijke processen en deels van menselijke ingrepen in het estuarium. De looptijd van de getijgolf door het estuarium is afgenomen van 2 uur en 24 minuten in 1895 tot 1 uur en 44 minuten in 1985. Dit betekent dat de Westerschelde tegenwoordig beter wordt gevuld dan vroeger. Op het moment van hoogwater te Antwerpen is de waterstand te

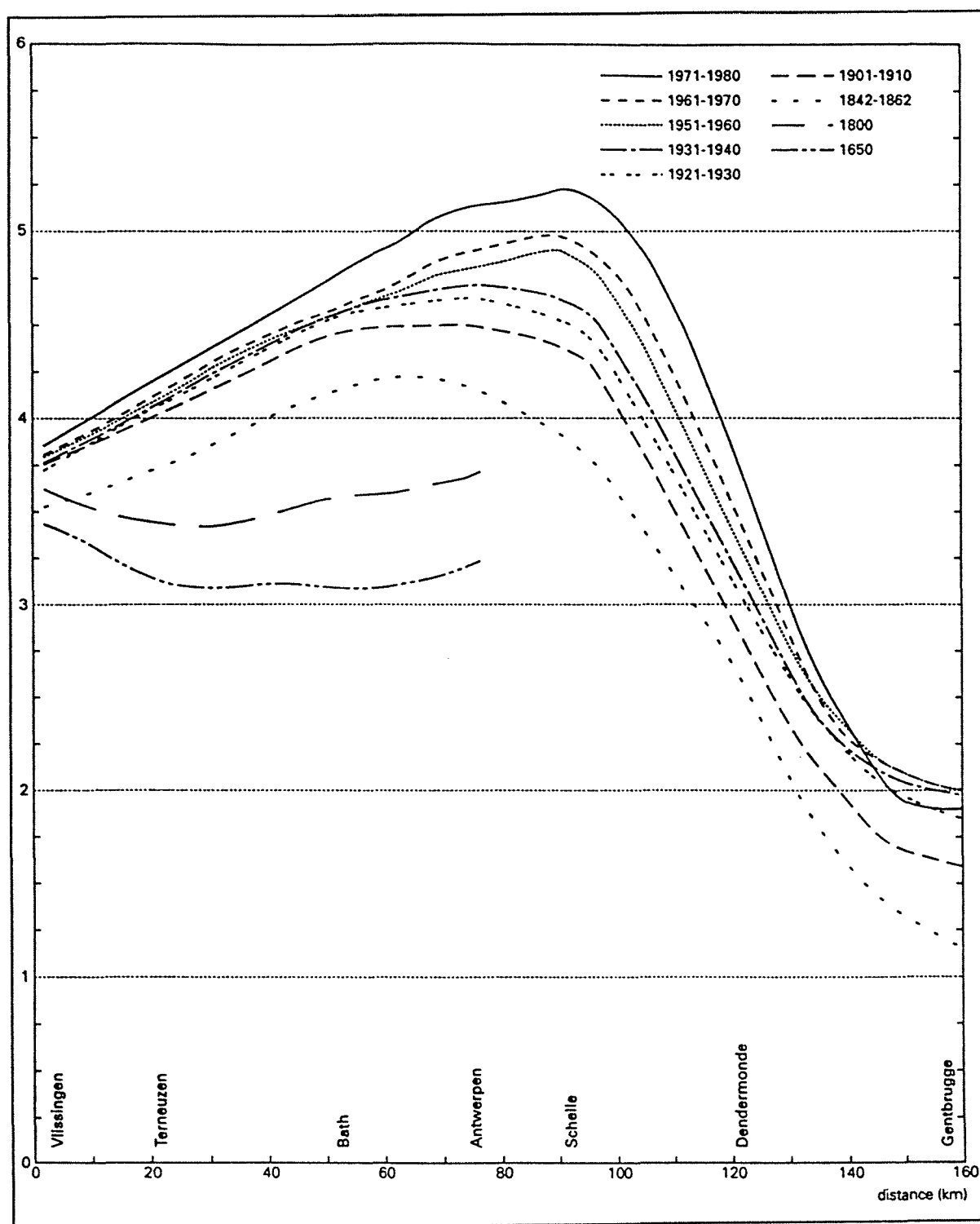
Vlissingen tegenwoordig hoger dan in het verleden. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verandering in looptijdminuten voor het hoogwater te Hansweert en Antwerpen ten opzichte van Vlissingen (meetperiode 1895-1985).

Jaar	Vlissingen	Hansweert	Antwerpen
1895	0	71	144
1905	0	71	140
1915	0	70	138
1925	0	70	133
1935	0	65	124
1945	0	65	124
1955	0	63	120
1965	0	59	113
1975	0	65	112
1985	0	56	104

Tabel 2.1: verandering in looptijdminuten voor het hoogwater te Hansweert en Antwerpen ten opzichte van Vlissingen (Claessens en Meijvis, 1994)

Figuur 2.3 op de volgende bladzijde toont de ontwikkeling van het getijverschil voor de periode 1650-1980. Het blijkt dat in de loop van de tijd vooral stroomopwaarts in het estuarium het getijverschil is toegenomen. Hiervoor zijn twee redenen aan te wijzen. Enerzijds is dit veroorzaakt door het verdwijnen van diverse zijarmen van de Westerschelde. Deze geulen verdwenen door zowel natuurlijke opslibbing als door afdamming door de mens. Anderzijds speelt een verlies aan intergetijdegebied een rol. Dit is vooral veroorzaakt door inpolderingen. In de periode 1800-1980 is in totaal 15.238 ha land ingepolderd (Technische Scheldec commissie, 1984). Door de afname van het intergetijdegebied is de gemiddelde waterdiepte toegenomen, waardoor het estuarium steeds meer trechtervormig werd. De toename van de gemiddelde waterdiepte leidde vervolgens tot een duidelijk merkbare vergroting van de voortplantingssnelheid van de getijgolf. De grootte van het getijverschil en de voortplantingssnelheid zijn dus zaken die nauw met elkaar samenhangen.

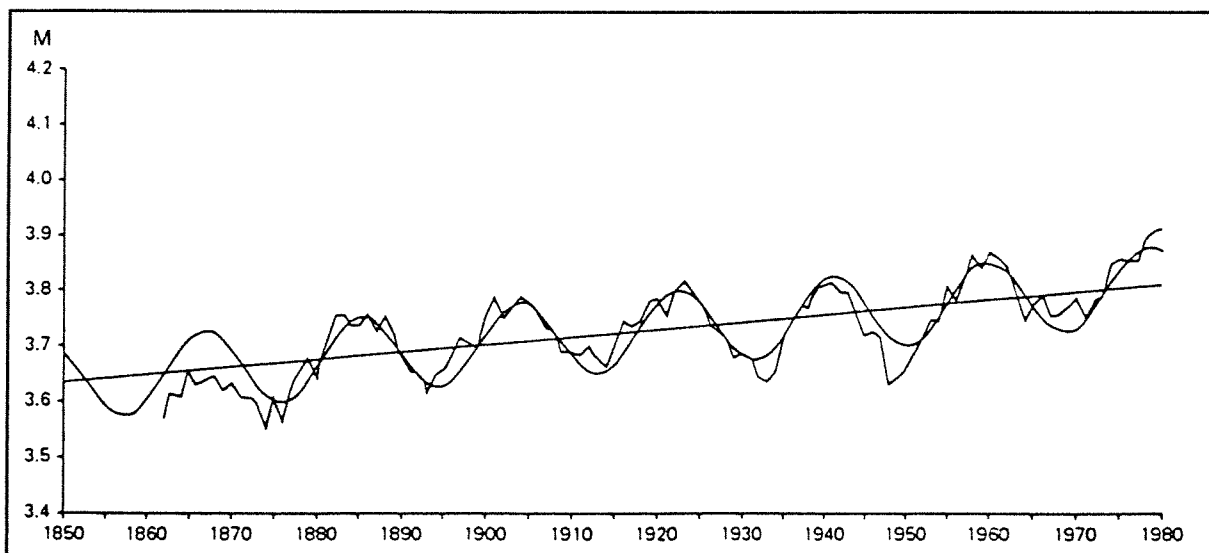
Uit een analyse van tussen 1878 en 1952 vervaardigde hydrografische kaarten gebleken dat zich in het estuarium een jaarlijkse sedimentimport van $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ heeft voorgedaan. Deze import veroorzaakte het opslibben van diverse zijarmen van de Westerschelde en leidde tot een toename van het aantal schorgebieden. De hoofdgeulen van de Westerschelde lieten echter geen netto erosie of sedimentatie zien (De Looft, 1983). Op het eerste gezicht lijkt dit merkwaardig, want het ligt voor de hand om te veronderstellen dat een verlies aan intergetijdegebied op den duur zal leiden tot een afname van het getijvolume in de hoofdgeulen. Ten gevolge hiervan zullen de geulprofielen in grootte willen afnemen, waardoor een aanzienlijke import van sediment optreedt. Dit is in de Westerschelde niet het geval geweest. Blijkbaar is de reductie van het intergetijdegebied gecompenseerd door een gelijktijdige toename van zowel de voortplantingssnelheid als de grootte van het getijverschil, waardoor de geulafmetingen min of meer ongewijzigd bleven. Het estuarium wordt tegenwoordig dus beter gevuld dan vroeger.



Figuur 2.3: ontwikkeling van de grootte van het getijverschil [m] in het Schelde-estuarium sinds 1650 (de voor 1650 en 1800 gegeven curven zijn gebaseerd op simulaties met behulp van het ééndimensionale waterbewegingsmodel DufLOW)

Naast bovengenoemde oorzaken van de opgetreden vergroting van het getijverschil, zijn ook de volgende factoren hierop van invloed:

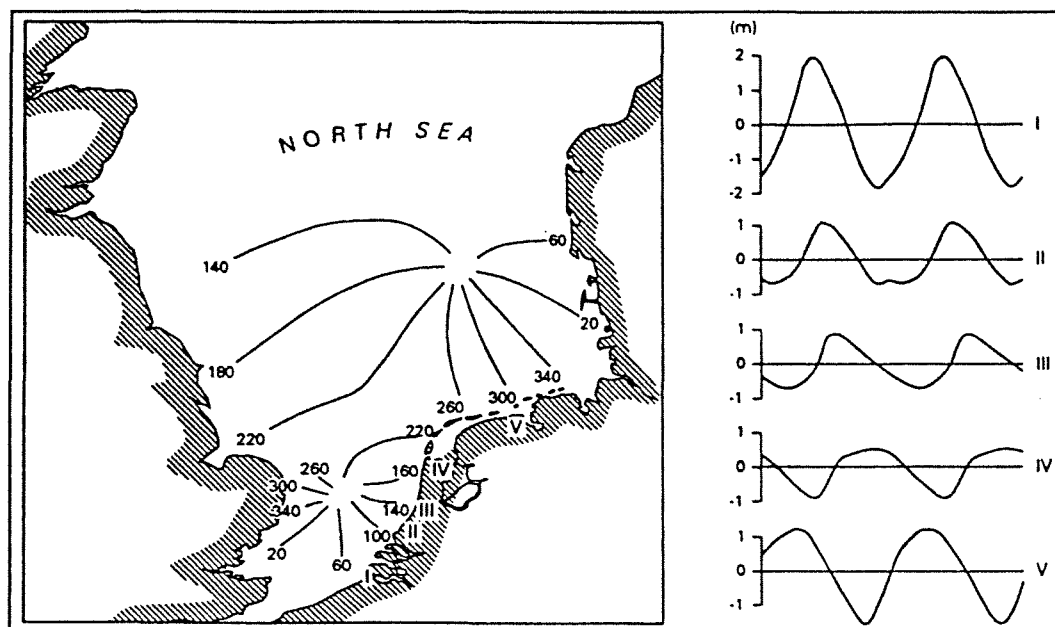
- door de toename van de voortplantingssnelheid van de getijgolf is de eigenfrequentie van de Westerschelde steeds dichterbij de frequentie van het getij komen te liggen (zie blz. 165 van 'Estuarine Shores: Evolution, Environments and Human Alterations' door Nordstrom en Roman, 1996);
- vooral na 1970 hebben baggerwerkzaamheden een grote invloed gehad op de grootte van het getijverschil: de kunstmatige verdieping van een aantal drempels in het oostelijke deel van de Westerschelde heeft een reductie van de hydraulische weerstand tot gevolg gehad;
- door nog onbekende oorzaak heeft zich de afgelopen 150 jaar een versterking voorgedaan van de getijgolf in de Noordzee (zie figuur 2.4): de invloed daarvan is ook merkbaar in de Westerschelde (De Ronde, 1983; Misdorp e.a., 1990).



Figuur 2.4: ontwikkeling van de grootte van het getijverschil te Vlissingen sinds 1862 (naar Technische Scheldec commissie, 1984)

2.3.3 Getijasymmetrie

In het algemeen vindt men getijdebekkens aan relatief ondiepe zeeën. Dit geldt ook voor het Schelde-estuarium. Door het ondieper worden, begint de getijgolf bij het naderen van de kust invloed te ondervinden van de bodem. Hierdoor wordt de voortplantingssnelheid van de kam van de getijgolf groter dan die van de eigenlijke golf. Ten gevolge hiervan wordt het opgaande deel van de golf steiler en het neergaande deel afgevlakter. Een dergelijke vervorming van de getijgolf is een vorm van getijasymmetrie. Figuur 2.5 toont het verloop van de getijkromme op diverse plaatsen langs de Nederlandse kust. De asymmetrie in punt IV kan overigens nog niet volledig worden verklaard, omdat de getijgolf dit gebied nadert vanaf het relatief diepe gedeelte van de Noordzee. Getijasymmetrie heeft invloed op het netto transport van sediment. Een verandering van getijasymmetrie kan betekenen dat er meer of minder sediment het estuarium wordt in- of uitgevoerd.



Figuur 2.5: vervorming van de getijgolf langs de Nederlandse kust (naar Dronkers, 1986)

Een manier om getijasymmetrie zichtbaar te maken is het delen van de duur van de vloed door die van de eb. Indien deze verhouding kleiner is dan 1, is er sprake van vloedgedomineerde getijasymmetrie. Voor ebgedomineerde getijasymmetrie geldt het tegenovergestelde. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verhouding tussen vloed- en ebduur voor de plaatsen Vlissingen, Hansweert, Bath en Antwerpen (meetperiode 1895-1985). Het blijkt dat in het gehele estuarium de vloed korter duurt dan de eb. Stroomopwaarts is dit verschil het grootst. Indien van een bepaald jaar geen meetgegevens bekend zijn, is dit in de tabel aangegeven met een liggend streepje.

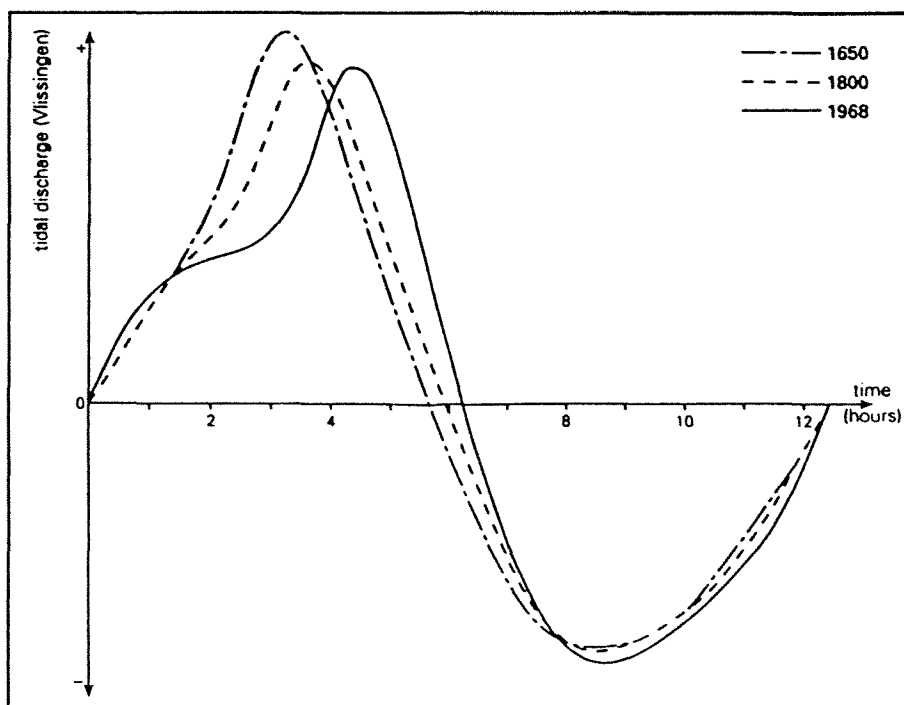
Jaar	Vlissingen	Hansweert	Bath	Antwerpen
1895	0,91	0,96	0,97	0,95
1905	-	-	-	0,89
1915	0,92	0,96	-	0,91
1925	0,92	0,96	0,89	0,89
1935	0,92	0,95	-	0,87
1945	0,91	0,94	0,88	0,86
1955	0,92	0,94	0,86	0,86
1965	0,92	0,95	0,87	0,85
1975	0,91	0,98	0,86	0,87
1985	0,92	0,94	0,87	0,89

Tabel 2.2: duur van de vloed gedeeld door duur van de eb (Claessens en Meijvis, 1994)

Het is een algemeen voorkomend patroon dat estuaria op een tijdschaal van eeuwen neigen

naar verlanding. De komberging wordt geleidelijk kleiner ten gevolge van afzettingen met fluviatiele en/of mariene sedimenten op de hoger gelegen delen. De hiermee samenhangende afname van het getijvolume leidt tot een verkleining van de geulprofielen en dus tot een vermindering van de inhoud van de geulen. Bij getijdebekkens zonder bij laagwater droogvallende platen, leidt getijasymmetrie tot een netto zandimport. In het andere geval - estuaria met bij eb droogvallende platen - treedt echter een belangrijk neutraliserend effect op met betrekking tot sedimentimport. Indien grote gedeelten van een dergelijk bekken bestaan uit ondiepten, zal het maximale vloedvolume verschuiven naar een later stadium van de vloedperiode. Hierdoor nemen de stroomsnelheden bij vloed af en dus ook de sediment-transportcapaciteit van het systeem. De maximale ebstroom wordt door de aanwezigheid van ondiepten vergroot (Speer en Aubrey, 1985). Het genoemde neutraliserend effect is juist dáárin gelegen, want door de grotere stroomsnelheden bij eb wordt sediment dat aanvankelijk door getijasymmetrie het estuarium is ingevoerd weer naar buiten geleid. De daling van de waterstand boven de platen verloopt langzamer dan in de geulen (Dronkers, 1986). Het maximale ebvolume verschuift daardoor naar een later stadium van de getijcyclus.

Het (schijnbare) evenwicht tussen zandimport door getijasymmetrie en de eliminatie ervan door morfologische effecten, is een functie van het oppervlak aan zandplaten dat gelijktijdig onderloopt bij vloed of droogvalt bij eb. Het is dus géén functie van het totale beschikbare plaatareaal. Bij lange getijdebekkens zoals de Westerschelde, verstrijkt een aanzienlijke tijd tussen het onderlopen van de platen nabij de ingang van het estuarium en die aan het landwaartse einde ervan. In dergelijke bekkens zal in het algemeen een toename van het plaatareaal leiden tot een afname van de gemiddelde waterdiepte en dus tot een kleinere voortplantingssnelheid van de getijgolf. Een toename van het aantal platen en ondiepten hoeft dus niet altijd een toename van het aantal bij hoogwater onderlopende platen te betekenen. In de Westerschelde lijkt de afgelopen eeuwen zelfs het tegenovergestelde het geval te zijn geweest. Volgens Van der Spek (1993) is het totale plaatoppervlak (platen tussen NAP-2,00 m en NAP+2,00 m) afgenomen van $340 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ in 1650 tot $200 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ in 1800 en $90 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ in 1968. De bijbehorende modelsimulaties laten zien dat het effect van het onderlopen van platen op het verloop van het vloedvolume het grootst is voor de situatie van 1968 (zie figuur 2.6). Het areaal aan platen nam in de loop van de tijd af, maar het oppervlak aan platen dat gelijktijdig onderloopt nam toe. Dit kan worden verklaard door de in paragraaf 2.3.2 genoemde vergroting van de voortplantingssnelheid van de getijgolf. Het lijkt erop dat de stroomsnelheden in de vloed- en ebgeulen vroeger groter waren dan tegenwoordig. De verhouding tussen de maximale vloed- en ebstroom is namelijk afgenomen van 1,30 naar 1,21. Dit duidt erop dat de Westerschelde vroeger meer zand importeerde dan tegenwoordig.



Figuur 2.6: debietverloop volgens DufLOW-simulaties voor een gemiddelde getijcyclus te Vlissingen (Van der Spek, 1993)

2.3.4 Bergingsveranderingen

De geometrie van het Schelde-estuarium is in de loop van de tijd sterk veranderd. Door inpolderingen zijn intergetijdegebieden langs de oevers van de Westerschelde verdwenen, waardoor de breedte waarover het water kan worden geborgen is afgenomen. Een menselijke ingreep zoals deze is slechts één van de factoren die van invloed zijn op de totale berging in het estuarium. Een globale indruk van de netto bergingsverandering kan worden verkregen door een nadere beschouwing van de verschillende oorzaken waardoor deze wordt verkleind dan wel vergroot.

Factoren waardoor de berging afneemt:

- sedimentatie in het intergetijdegebied;
- inpolderingen.

Factoren waardoor de berging toeneemt:

- sterkere binnendringing van het getij;
- vergroting van het getijverschil;
- zeespiegelrijzing.

Tabel 2.3 toont de verandering van komberging voor de perioden 1930-1960 en 1960-1990. Een minteken in de tabel betekent een afname van de komberging, een plusteken staat voor een toename. De gegevens zijn verkregen uit een in 1997 voltooide, door het Rijksinstituut

voor Kust en Zee verrichte studie. Dit onderzoek, genaamd 'Oostwest', concentreerde zich vooral op de relatie tussen veranderingen in de toestand van de Westerschelde en menselijke ingrepen in het estuarium (zie paragraaf 2.1 van dit verslag).

Periode	Sedimentatie in intergetijdegebied	Inpolderingen	Getijverschil	Zeespiegelrijzing
1930-1960	- $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	- $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	+ $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	+ $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
1960-1990	- $33 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	- $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	+ $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	+ $16 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Tabel 2.3: verandering van komberging (Huijs en Storm, 1997)

Zowel de zee als de rivier voeren continu sediment aan. Ten gevolge hiervan zal het estuarium op den duur verlanden. Zoals vermeld in paragraaf 2.3.3, is dit een bekend verschijnsel bij estuaria. Het aangevoerde sediment wordt afgezet in het intergetijdegebied. Hierdoor neemt de komberging af, evenals het getijvolume. Dit laatste heeft tot gevolg dat de geulen in afmetingen afnemen. De sedimentatie in het intergetijdegebied wordt in het oostelijke deel van de Westerschelde gestimuleerd door bagger- en stortwerkzaamheden, want het gebaggerde materiaal wordt gestort in de hogere delen van het estuarium. Anderzijds leidt de vaarwegverdieping tot een grotere doorsnede van de geulen waardoorheen het Westerscheldewater stroomt. Ten gevolge hiervan verandert de verhouding tussen de bergende breedte (B_b) en het stroomvoerende oppervlak (A_s). Deze verhouding is een maat voor de grootte van de voortplantingssnelheid (c) van de getijgolf in het estuarium:

$$c = \sqrt{\frac{gA_s}{B_b}}.$$

Het is bekend dat de horizontale snelheid van het getij in de loop van de tijd is toegenomen. Hierdoor wordt de binnendringing van het getij versterkt, hetgeen leidt tot een vergroting van de komberging. Een vermindering van komberging en getijvolume door sedimentatie wordt dus gecompenseerd door een sterker binnendringen van het getij.

Door inpolderingen is het areaal aan overstromingsgebieden afgenomen, waardoor ook de komberging is afgenomen. Uit tabel 2.3 blijkt dat de komberging inderdaad afneemt door sedimentatie en dat inpolderingen dit proces hebben bevorderd. In het kader van het project 'Oostwest' zijn geen waarnemingen van vóór 1930 geanalyseerd, maar gezien de invloed van de inpolderingen lijkt er in de periode 1930-1960 sprake te zijn geweest van een versnelde vermindering van komberging.

Het bepalen van het effect van een ingreep op de totale berging is geen eenvoudige rekensom. Menselijke activiteiten kunnen leiden tot een toename van de getijslag, waardoor een verlies aan komberging wordt tenietgedaan. De geometrie van het Schelde-estuarium is in de afgelopen eeuwen zodanig aangepast, dat het getijvolume is toegenomen in verhouding tot het oppervlak van het estuarium. Ten gevolge van menselijke ingrepen wordt het verlandingsproces versneld. Door de genoemde versterking van het binnendringende getij is er echter géén sprake van verlanding in de zin van een vermindering van komberging en evenmin van een daling van het getijvolume. Het is nog niet duidelijk hoe deze situatie zich in de toekomst zal

ontwikkelen. De zeespiegelrijzing vormt namelijk een extra complicerende factor. Het stijgen van het gemiddeld zeeniveau, sinds 1600 ongeveer 0,70 m, heeft een positief effect op de berging. Momenteel speelt de zeespiegelrijzing een ondergeschikte rol, maar dat zal veranderen wanneer de zeespiegel versneld gaat stijgen.

2.4 Morfologische beschrijving van de Westerschelde

2.4.1 Algemeen

De Westerschelde vormt het mariene en brakke deel van het Schelde-estuarium, met vele typisch estuariene verschijningsvormen. De ruggengraat van het watersysteem wordt gevormd door de grote geulen, want ligging en grootte ervan bepalen de structuur van de tussen de geulen ingeklemde platen. Sinds zijn ontstaan is het estuarium sterk in oppervlak toegenomen tot omstreeks 1700. Na die tijd is het stroombed steeds verder ingeperkt door menselijke ingrepen. Hierdoor is de structuur van het estuarium geleidelijk veranderd. De geulen zijn op veel plaatsen uitgebocht, vaak tot aan de zeewering. Uitgestrekte slikken en schorren zijn verdwenen, met uitzondering van Saeftinghe. Door het uitbochten van de geulen ontstond ruimte in de as van het estuarium, waardoor de platen in omvang konden toenemen.

De morfologische dynamiek van de Westerschelde komt aan de orde in paragraaf 2.4.2. In deze paragraaf wordt tevens een beschrijving gegeven van de huidige morfologie, onderverdeeld naar de positionering van de geulen in het estuarium. Vervolgens wordt in paragraaf 2.4.3 nader ingegaan op de sedimenttransportprocessen in de Westerschelde (transporterend vermogen, wijze van sedimenttransport). Omdat de bodemligging van het estuarium tegenwoordig in belangrijke mate wordt bepaald door menselijke activiteiten, wordt in paragraaf 2.4.4 een recapitulatie hiervan gegeven, waarbij met name aandacht wordt besteed aan de invloed ervan (voor zover nog niet eerder aan de orde geweest) op de morfologische en estuariene processen in de Westerschelde.

2.4.2 Morfologische dynamiek

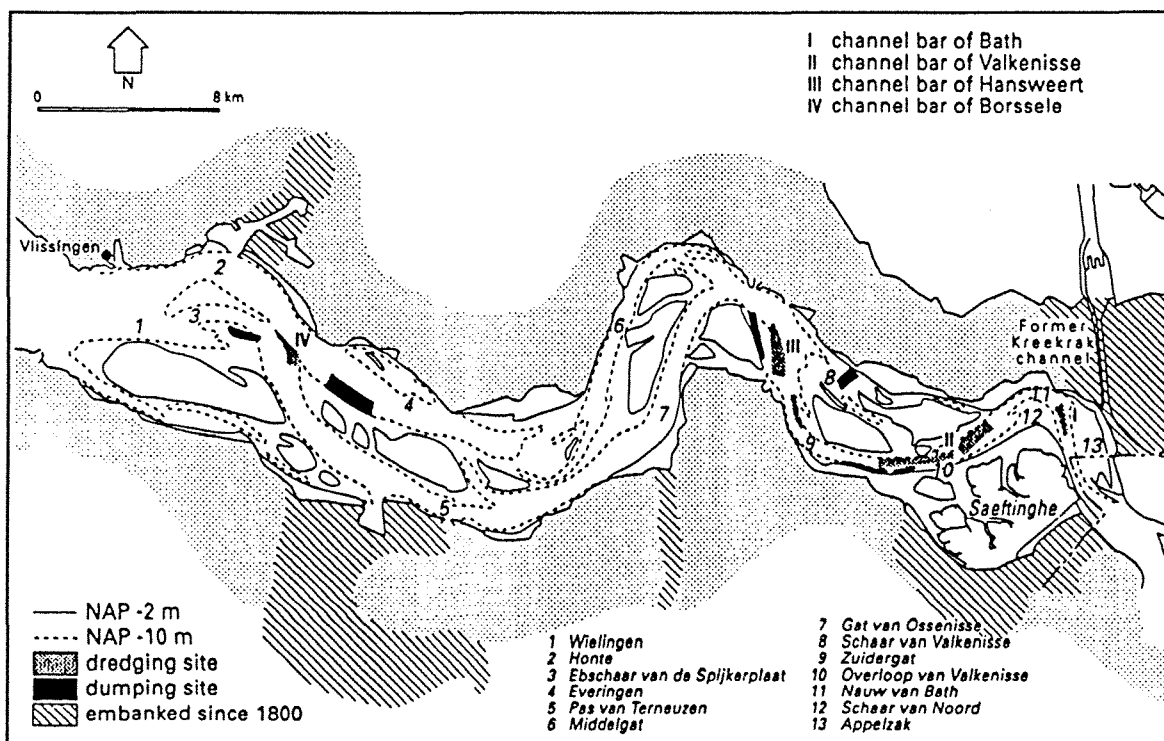
In het algemeen kan worden gesteld dat de morfologie van de huidige Westerschelde bestaat uit een stelsel van elkaar onderling ontwijkende eb- en vloedgeulen. Deze zijn gescheiden door al dan niet bij laagwater droogvallende platen. De eb- en vloedgeulen vertonen een groot verschil in morfologie. De ebgeulen volgen een meanderend patroon, met relatief diepe drempels. De vloedgeulen zijn relatief recht en volgen min of meer de vorm van het estuarium. De drempels aan het einde van een vloedgeul zijn gemiddeld iets hoger gelegen dan die aan het einde van een ebgeul. Deze morfologische verschillen worden mogelijk veroorzaakt door een asymmetrie in eb- en vloedvolume (respectievelijk de hoeveelheid water die per getijcyclus de Westerschelde in- en uitstroomt). Het maximale ebvolume wordt bereikt bij een waterstand die ongeveer overeenkomt met het gemiddelde zeeniveau (NAP-niveau). Het maximale vloedvolume treedt op wanneer de platen zijn ondergelopen. De ebstroom is dientengevolge minder divergerend dan de vloedstroom, waardoor de ebgeulen relatief diep kunnen worden uitgesneden.

De Westerschelde is een estuarium dat is opgebouwd uit vele geulen, platen, slikken en schorren. Elk van deze elementen kan op zich weer worden onderverdeeld in delen met specifieke eigenschappen: hoge en lage platen, slibrijke en slibarme slikken etc. Het continu veranderen van het uiterlijk van deze morfologische eenheden, de zogenaamde morfologische dynamiek, is een karakteristieke eigenschap van estuaria. Zoals vermeld in paragraaf 2.3.1,

is het getij de aandrijvende kracht achter de estuariene processen - en dus ook achter de morfologische dynamiek - in de Westerschelde. Lokaal kan ook de invloed van golven van belang zijn. Op grond van ruimte- en tijdschalen kan de morfologische veranderlijkheid worden onderverdeeld in respectievelijk macro-, meso- en microdynamiek.

2.4.2.1 Macrodynamiek

Onder macrodynamiek wordt verstaan de migraties van hoofd- en nevengeulen. De macrodynamiek wordt beperkt door vaste oevers (dijken, kribben, geulwandverdedigingen, resistente sedimenten). Onderzoek (Peters en Sterling, 1976) heeft uitgewezen dat de dijkconfiguratie als het ware richting geeft aan de geulen. Een buitenbocht ligt stabiel tegen een oever en verplaatst zich niet gemakkelijk. Verdere stabilisatie van de geul wordt verzekerd door permanent onderhoudsbaggerwerk in binnenbochten en op drempels. Een nadere beschouwing van de topografie van de huidige Westerschelde (zie figuur 2.7) laat zien dat het systeem van getijdegeulen en platen kan worden onderverdeeld in vijf 'bochtgroepen'. Elke bochtgroep bestaat uit een meanderende ebgeul en een min of meer rechte vloedgeul. Deze hoofdgeulen zijn gescheiden door (inter)getijdegebieden en onderling verbonden door één of meer kortsluitgeulen. Elke bochtgroep wordt gekenmerkt door specifieke morfologische veranderingen.



Figuur 2.7: topografie van de Westerschelde (1992)

Bochtgroep 1:

De meest oostelijk gelegen bochtgroep wordt gevormd door de ebgeul Nauw van Bath en de vloedgeulen Schaar van Noord en Appenzak. De eerste baggerwerkzaamheden in dit gebied

vonden plaats omstreeks 1930. Hierdoor werd de vorming van grote migrerende kortsluitgeulen verhinderd en verdwenen diverse, reeds bestaande, verbindingen. Tot 1960 bevonden zich bijvoorbeeld enkele kortsluitgeulen tussen het Nauw van Bath en de Appelzak. Een in het begin van de jaren zeventig aangelegde constructie ten behoeve van het in een bepaalde richting leiden van de ebstroom, deed tenslotte ook de laatste overgebleven kortsluitgeulen verdwijnen. Dit ging gepaard met een geringe sedimentatie in de vloedgeul Appelzak. Ten gevolge van een verdere kunstmatige verdieping van de drempels in de hoofdgeul, is tussen 1960 en 1980 het geulvolume (gebied onder NAP-2,00 m) met meer dan 25% toegenomen.

Bochtgroep 2:

De tweede bochtgroep bestaat uit de ebgeulen Overloop van Valkenisse en Zuidergat en de vloedgeul Schaar van Valkenisse. De afgelopen decennia is in dit gebied naar schatting ca. $5 \cdot 10^6$ m³ zand per jaar gebaggerd. Het grootste deel van het gebaggerde materiaal is gestort in de eroderende buitenbochten van de Overloop van Valkenisse en het Zuidergat. Ondanks deze stortingen bedraagt de erosie daar ongeveer 5 m per jaar. Het grootste deel van het gestorte sediment wordt meegevoerd door de getijstroom (Jeuken, 1994). Door tevens grote hoeveelheden gebaggerd materiaal te storten nabij de ingang van de vloedgeul, is tussen 1975 en 1985 het zandvolume in het aangrenzende getijdegebied (gebied boven NAP-2,00 m) met meer dan 30% toegenomen. Tevens is de Schaar van Valkenisse sinds 1955 geleidelijk geroteerd in zuidwestelijke richting. Vanaf 1985 zijn in het drempelgebied van deze vloedgeul migrerende kortsluitgeulen waargenomen. De levensduur van deze geulen blijkt ongeveer zeven jaar te bedragen.

Bochtgroep 3:

De morfologische processen in de derde bochtgroep, bestaande uit de ebgeul Middelgat en de vloedgeul Gat van Ossenis, worden gedomineerd door 'bochtafsnijdingsprocessen'. De meandering en verruiming van het Middelgat zijn al sinds 1800 bekend. Een in 1951 ontstane kleine kortsluitgeul is tot 1970 zodanig verruimd dat een nieuwe hoofdgeul is ontstaan. Het getijvolume in deze nieuwe geul is toegenomen ten koste van het ebvolume door het Middelgat. Hierdoor konden grote hoeveelheden zand in het Middelgat worden afgezet. Het geulvolume van het Middelgat is tussen 1965 en 1990 dan ook afgenomen met ca. $35 \cdot 10^6$ m³, hetgeen overeenkomt met een reductie van 20%. Het zandvolume in het getijdegebied tussen de hoofdgeulen is toegenomen met ca. 40%. De as van de nieuwe geul roteert enigszins, maar door de beperkte bewegingsvrijheid ten gevolge van inpolderingen langs de rand van het estuarium is de migratietendens klein.

Bochtgroep 4:

De vierde bochtgroep bestaat uit de ebgeul Pas van Terneuzen en de vloedgeul Everingen. Vanuit morfologisch oogpunt bekeken, is dit waarschijnlijk het meest stabiele geulensysteem. De verandering van getijvolume door de beide hoofdgeulen bedroeg in de periode 1965-1985 minder dan 6% (Jeuken, 1993). Het zandvolume in het getijdegebied nam in die periode toe met ca. 15%. Hoewel de netto veranderingen in geulvolumina klein zijn, is de omwerking van sediment waarschijnlijk groot. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van diverse kortsluitgeulen. Drie van deze geulen vormen een directe dwarsverbinding tussen de beide hoofdgeulen. Zij danken hun bestaan aan waterstandsverschillen dwars over de ondiepte.

Evenals de kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul, vertonen zij een grote dynamische activiteit.

Bochtgroep 5:

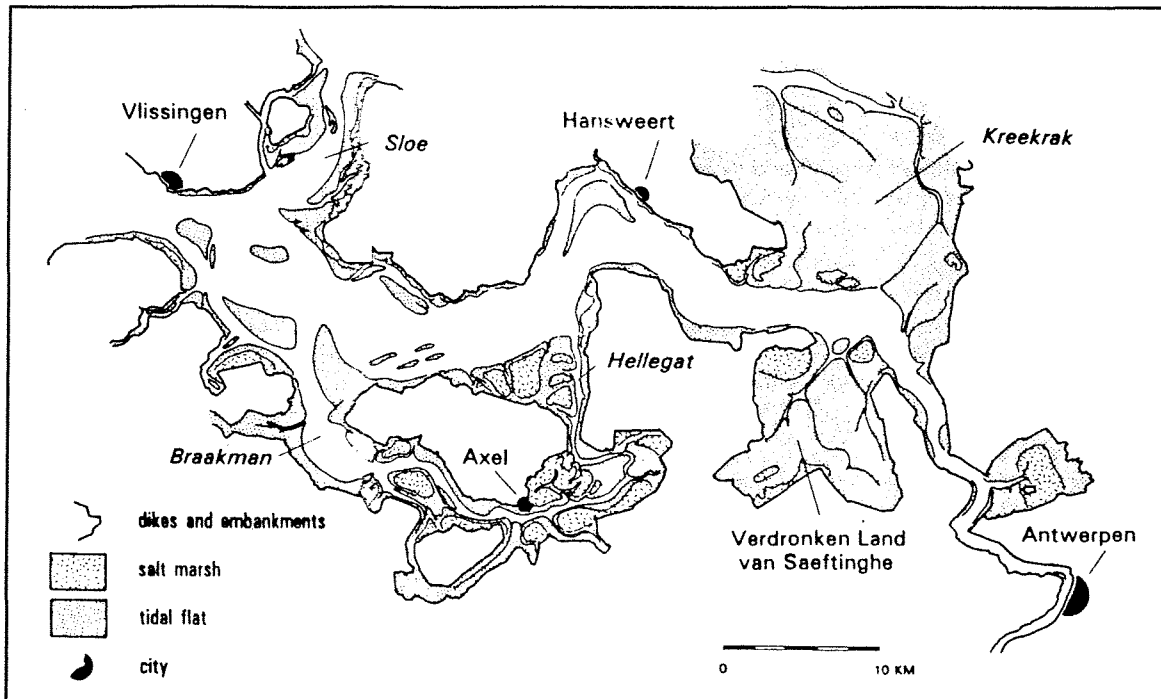
De vijfde bochtgroep bevindt zich in het mondingsgebied van de Westerschelde en bestaat uit de ebgeul Honte en de vloedgeul Wielingen. Een geleidelijke en gelijktijdige verplaatsing van de geulen Honte en Pas van Terneuzen leidde tot een toename van de helling van de waterspiegel ter hoogte van de drempels van de vloedgeul. Dit veroorzaakte de vorming van enkele kortsluitgeulen omstreeks 1960. De morfologische ontwikkeling van deze bochtgroep wordt voornamelijk bepaald door de vorming en migratie van kortsluitgeulen. Enkele geulen raakten vanaf 1988 in verval. Sinds 1990 hebben zich enkele kleine kortsluitgeulen gevormd in het drempelgebied van de vloedgeul.

Als de situatie van omstreeks 1800 wordt vergeleken met de huidige situatie, valt een aantal aspecten op. Allereerst is de hoofdgeul steeds meer gefixeerd geraakt op een vaste plaats in het estuarium. Dit is vooral het gevolg van bedijkingen en inpolderingen, waardoor de geulen onvoldoende ruimte hebben om zich vrij in de breedte te kunnen bewegen. Een vergelijking van de diepte van de geulen in 1800 met die in 1990 laat zien dat de hoofdgeul tegenwoordig over een grotere lengte tegen de zeewering aanligt en daar tevens dieper is. Voorts valt op dat de huidige Westerschelde een meer gestroomlijnd uiterlijk heeft, waarbij het estuarium een trechtersvorm benadert. Door het uitbochten van de hoofdgeul tot aan de beschermde oever is het areaal aan intergetijdegebied (slikken en schorren) langs de randen sterk geslonken. In de as van de Westerschelde hebben de platen zich echter - zoals vermeld - aanzienlijk kunnen uitbreiden. De twee kaarten op de volgende bladzijde tonen de topografie van de Westerschelde voor de jaren 1650 (figuur 2.8) en 1800 (figuur 2.9).

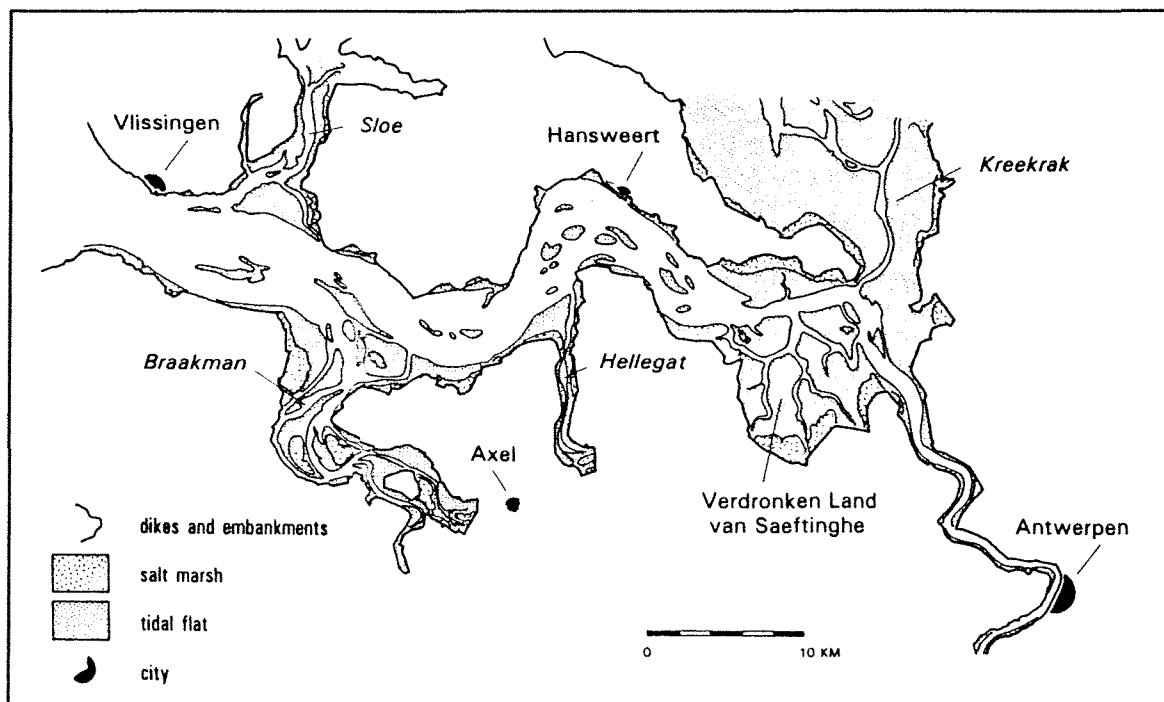
2.4.2.2 Mesodynamiek

De mesodynamiek komt tot stand door migraties van (kortsluit)geulen door de platen. De activiteit van dit soort geulen lijkt de afgelopen tientallen jaren aanmerkelijk te zijn afgenomen op de plaatcomplexen Middelpaalt, Baarland en Valkenisse (respectievelijk bochtgroep 4, 3 en 2). De aandrijvende kracht achter het ontstaan en bewegen van kortsluitgeulen is het verval over een plaat, ofwel het waterstandsverschil tussen de geulen aan weerszijden van de plaat. Dergelijke vervallen worden zowel bij eb als bij vloed bepaald door tijdsverschillen in het getij in de parallelle geulen. Met name het tijdsverschil dat ontstaat door verschillende looptijden van de getijgolf in de afzonderlijke geulen is belangrijk. Hoe groter het tijdsverschil, hoe groter ook het verval over de kortsluitgeul en omgekeerd. Het afnemen van de mesodynamiek in bovengenoemde plaatcomplexen wordt veroorzaakt door veranderingen in de getijdoordringing. Na het doorbreken van de Schaar van de Spijkerplaat (bochtgroep 5) omstreeks 1970, zijn de faseverschillen tussen de Pas van Terneuzen en de Everingen (bochtgroep 4) afgenomen. Daarmee nam ook het maximale verval over de zich tussen deze geulen bevindende Middelpaalt af. Het maximale verval over het plaatcomplex Baarland, ofwel de platen tussen de geulen Middelpaalt, Gat van Ossensisse en Overloop van Hansweert, is eveneens afgenomen door een vermindering van de faseverschillen in het binnendringen van het getij. Door de versnelde getijdoordringing in het

Zuidergat (bochtgroep 2) zijn de faseverschillen met de Schaar van Valkenisse afgenomen en daarmee ook het maximale verval over het plaatcomplex Valkenisse.



Figuur 2.8: topografie van de Westerschelde (1650)



Figuur 2.9: topografie van de Westerschelde (1800)

2.4.2.3 Microdynamiek

De microdynamiek, ofwel de beweeglijkheid van het bodemoppervlak, is een maat voor de (in)stabiliteit van het bovenste deel van de bodem. De microdynamiek heeft grote invloed op de mogelijkheid of zelfs onmogelijkheid voor bodemdieren om zich in de bodem te vestigen. Daarmee is de microdynamiek mede bepalend voor de ruimtelijke verspreiding van zowel bodemalgen (De Jonge en De Jong, 1994) als bodemdieren (Coosen e.a., 1994).

Vrijwel alle sedimentpakketten in de Westerschelde zijn over een periode van enkele jaren instabiel. Uitzonderingen hierop zijn resistente klei- of veenlagen en harde oeververdedigingen. De bovenlaag van de geologische ondergrond van de Westerschelde is een zeer compacte en stugge veenlaag en daardoor erosiebestendig. Door geulerosie is deze laag momenteel alleen nog aanwezig onder enkele slikken en schorren bij o.a. Bath, Saeftinghe, de Platen van Hulst en de Slikken van Terneuzen. De veenlaag beïnvloedt de slikvorm en vertraagt naar alle waarschijnlijkheid de erosie van de aangrenzende geulen.

Door de grote transportcapaciteit is de microdynamiek van de geulen hoog. Uit waarnemingen is gebleken dat het overgrote deel van de geulbodem is bedekt met ribbels, met uitzondering van de drempels en relatief steile plaat-geulhellingen (Ruessink, 1991). Behalve op de geulbodem, blijken ribbels ook veelvuldig voor te komen op de lagere delen van het intergetijdgebied. De getijstroom is hier relatief sterk. Vlakke gebieden, de zogenaamde laagdynamische eenheden, liggen in het algemeen op relatief beschutte locaties voor zowel golven als stroming. Voorbeelden hiervan zijn de slikken en de centrale en hogere delen van de platen. Plaat-geulovergangen die ongeveer evenwijdig liggen ten opzichte van de stroming zijn vrijwel altijd vlak. De slikken zijn over het algemeen laagdynamisch, met uitzondering van enkele slikken bij Waarde en Saeftinghe. De aanwezigheid van ribbelvelden is in dit soort gebieden sterk afhankelijk van de ligging van kortsluitgeulen direct voor het slik. Het relatieve aandeel aan laagdynamische plaatgebieden in de Westerschelde is sinds 1955 ongeveer gelijk gebleven (Huijs, 1995). In het oostelijke deel van het estuarium is het relatieve aandeel afgenomen van 60% naar 40%, maar door uitbreiding van de platen is netto het areaal aan laagdynamische platen slechts licht afgenomen. In het centrale deel is een toename van het areaal aan laagdynamische platen waargenomen, zowel relatief (van 30% naar 50%) als absoluut (300 ha). In het westelijke deel zijn geen noemenswaardige veranderingen opgetreden.

2.4.3 Sedimenttransport

Het transporterend vermogen van sediment in de Westerschelde is groot. Dit wordt mogelijk gemaakt door de combinatie van sterke getijdestromingen en relatief fijn bodemmateriaal. Het overgrote deel van het sedimenttransport bestaat uit zand dat in suspensie wordt verplaatst. Grofweg kan worden gesteld dat de grootte van het sedimenttransport nauw samenhangt met de omvang van de geul. Door grote geulen wordt meer zand getransporteerd dan door kleinere geulen. Dit zegt echter weinig over de omvang van het netto transport, ofwel de resultante van de zandverplaatsingen over een groot aantal getijcycli. Een eerste indicatie voor het netto transport van sediment wordt gegeven door de zandbalans. Een zandbalans is een 'boekhouding' die in afgebakende perioden de netto zanduitwisselingen beschrijft tussen

bepaalde gebieden. Door de waargenomen inhoudsveranderingen te combineren met de kunstmatige ingrepen (baggeren, storten, zandwinnen) ontstaat een zandbalans. Deze wordt tussen de afzonderlijke vakken kloppend gemaakt door de sluitpost 'natuurlijk zandtransport'. Aan minimaal één rand van de zandbalans moet een bepaald natuurlijk transport worden aangenomen. Uit de zandbalans van de Westerschelde blijkt dat het sediment zich verplaatst in landwaartse richting. De zandbalans geeft echter geen duidelijk antwoord op de vraag hoe die verplaatsingen zich bijvoorbeeld in de afzonderlijke geulen voltrekken. In de Westerschelde is het getijgedreven transport het belangrijkste transportmechanisme. Andere mechanismen, zoals bijvoorbeeld transport ten gevolge van dichtheidsstromen, zijn relatief onbelangrijk. Onder invloed van golven komt incidenteel tijdens zware stormen een significant zandtransport voor dat is gericht van de plaat naar de windafwaarts gelegen geulrand (zie blz. 54 van het eindrapport van het project 'Oostwest'). Met nadruk wordt gesteld dat de kennis van de transportprocessen in de Westerschelde nog beperkt is.

2.4.3.1 Patronen van netto zandtransport

Residuele sedimenttransporten kunnen onmogelijk direct worden gemeten. Dit wordt veroorzaakt door grote variaties van het transport in ruimte en tijd en door onnauwkeurigheden in de metingen zelf. Uit verschillende methodieken om op een indirecte wijze meer inzicht te verkrijgen in residuele transportpatronen (waterbewegingsmodellen, waarnemingen van bodemribbels via sonaropnames en luchtfoto's, McLaren-analyse), ontstaat steeds hetzelfde beeld. Het residuele sedimenttransport verloopt voornamelijk via circulatiecellen in de grotere geulen om de plaatcomplexen heen. Deze cellen volgen vaak het patroon van de eb- en vloedgedomineerde stroming in de afzonderlijke geulen. Aangezien de maximale stroomsnelheden bij vloed optreden bij een hoger waterniveau dan bij eb, is het sedimenttransport in het intergetijdegebied overwegend vloeddominant. De schorren en de beschutte en hogere delen van platen en slikken zijn onbelangrijk voor het algemene patroon van residueel sedimenttransport. Deze gebieden hebben voornamelijk een bergende functie.

2.4.3.2 Drempels

In de Westerschelde wordt permanent gebaggerd ter hoogte van de drempels. Op deze wijze worden kunstmatig sedimentbronnen (de stortlocaties) en sedimentputten (de baggerlocaties) in stand gehouden. Deze zijn mede bepalend voor het netto patroon van zandtransporten in het estuarium. Hoe hoger de baggerintensiteit, hoe groter de kans dat het netto zandtransport door het baggeren en storten zal worden beïnvloed. Daarnaast zijn er ook natuurlijke sedimentbronnen en -putten die ontstaan door geulmigraties, veranderingen van geulprofielen en erosie of sedimentatie van platen, slikken en schorren.

De afgelopen decennia zijn alle gebaggerde drempels in het oostelijke deel van de Westerschelde (de drempels van Bath, Valkenisse en Hansweert) veranderd van het 'botsende' type in het 'ontwijkende' type. Dit is veroorzaakt door een verandering van de waterbeweging na het verdiepen van de vaarweg. Het getijvolume is hierdoor sterker geconcentreerd geraakt in de hoofdgeul. De sedimentatie op de drempels wordt bepaald door de profielverruiming ter plaatse, de beschikbaarheid van sediment in de omgeving van de drempel en het vermogen van het systeem als geheel om dit sediment naar de drempels te transporteren (Pieters, 1993).

In de richting van de verruimde drempels wordt de stroming aanvankelijk vertraagd. Na het passeren van de drempels vindt vervolgens een versnelling plaats. De vertraging is enerzijds het gevolg van aftapping van water in de scharen en anderzijds van het kunstmatig ruime dwarsprofiel. Door het vertragen van de stroom zet het sediment zich af op de drempels. Voor de netto aanvoer van sediment zijn de gradiënten van de zandtransportcapaciteit in langsrichting (de primaire stromingscomponent) van doorslaggevend belang en niet de secundaire component in dwarsrichting (Tank, 1996).

De in deze paragraaf gedane constatering omtrent de bodemligging van de Westerschelde maken het beeld van de morfologische veranderingen nogal complex. De invloed van het baggeren en storten blijkt nadrukkelijk aanwezig te zijn, terwijl tegelijkertijd de natuur zelf deze menselijke beïnvloeding weer nuanceert. De morfologische veranderingen in het oostelijke deel van het estuarium zijn in belangrijke mate onnatuurlijk. De Westerschelde is haar grilligheid in dit deel kwijt, want de grootschalige dynamiek is uit het systeem gehaald. Veel van de morfologische veranderingen in het midden en het westelijke deel van het estuarium zijn wat betreft aard en grootte vergelijkbaar met de veranderingen in het oostelijke deel. Deze veranderingen vinden hun oorzaak echter in de natuurlijke dynamiek die hier nog volop aanwezig is. Het is mogelijk dat de natuurlijke variatie in dit deel van de Westerschelde een onderliggende trend verhuult, waarvan de resultaten pas op langere termijn zichtbaar zullen zijn. De menselijke beïnvloeding in het oostelijke deel kan alleen maar worden aangetoond omdat deze zo sterk is. Een belangrijk nog te onderzoeken aspect in dit verband is bijvoorbeeld de invloed van de fixatie van de hoofdgeul. Het gevolg van deze vastlegging is dat de geul in zijn natuurlijke uitbocht wordt gehinderd. Een vraag hierbij is welke rol de fixatie van de hoofdgeul speelt in de waargenomen groei van de platen in het estuarium.

2.4.4 Aanvullende opmerkingen bij menselijke ingrepen in het estuarium

Onder het verzamelbegrip 'menselijke ingrepen' vallen activiteiten zoals inpolderingen, verdiepen en baggeren, storten en zandwinnen. In het voorgaande zijn enkele van deze onderwerpen reeds aan de orde geweest. In deze paragraaf worden hierbij nog enkele aanvullende opmerkingen gemaakt. Met name de inpolderingen hebben het Schelde-estuarium zijn huidige vorm gegeven. Binnen deze opgelegde grenzen voltrekken zich de huidige natuurlijke ontwikkelingen en de andere genoemde ingrepen. Deze ingrepen zijn sinds 1960 aanzienlijk geïntensiveerd en manifesteren zich vooral in het oostelijke deel van het estuarium. Daardoor zijn de morfologische ontwikkelingen in dit deel van de Westerschelde in hoge mate onnatuurlijk. In de overige gebieden is het minder goed mogelijk om de morfologische ontwikkelingen te koppelen aan menselijke ingrepen. In dit deel van het estuarium is de beïnvloeding zichtbaar minder sterk in verhouding tot de natuurlijke morfologische veranderingen.

2.4.4.1 Inpolderingen

Langs de oevers van de Westerschelde is sinds de elfde eeuw ca. 125.000 ha land ingepolderd, hetgeen overeenkomt met een gebied dat vier keer zo groot is als het huidige

buitendijkse oppervlak. De eerste inpolderingen betroffen voornamelijk relatief hoogliggend land en eenvoudig af te dammen kreken. Ten gevolge van de groei van de technische mogelijkheden en kennis konden later ook lager gelegen slik- en schordelen worden ingepolderd. Vooral na 1600 zijn veel gebieden permanent ingepolderd. Het areaal aan ingepolderde gebieden steeg snel door bedijking van de 'Brede Watering bewesten Yerseke' in Zuid-Beveland in 1530 en de aanleg van grote polders langs de Braakman, het Hellegat en Saeftinghe. Van het gehele estuarium is in vergelijking met 1600 nog slechts de helft over. Na 1930 is ca. 4000 ha land ingepolderd en aan de Westerschelde onttrokken, waarvan 1450 ha zelfs na 1960. De laatste grote inpoldering vond plaats bij Ossendrecht en dateert van 1976. Onderstaande tabellen tonen de oppervlakte van respectievelijk het totale ingepolderde gebied sinds 1100 (tabel 2.4) en de oppervlakte van enkele grote inpolderingen langs de Westerschelde (tabel 2.5). Indien van een bepaalde periode geen gegevens bekend zijn, is dit in de tabellen aangegeven met een liggend streepje.

Gebied	Oppervlak
Walcheren	21435 ha
Zuid-Beveland	34794 ha
Zeeuws-Vlaanderen west	33953 ha
Zeeuws-Vlaanderen oost	35540 ha

Tabel 2.4: totaal ingepolderd gebied rond de Westerschelde sinds 1100

Periode	Sloe/Kaloot	Braakman	Hellegat	Saeftinghe	Ossendrecht
1800-1850	96 ha	2434 ha	54 ha	1639 ha	-
1850-1900	518 ha	1394 ha	409 ha	1061 ha	1515 ha
1900-1950	481 ha	835 ha	132 ha	316 ha	620 ha
1950-1995	200 ha	1525 ha	-	-	890 ha
Totaal	1295 ha	6188 ha	595 ha	3016 ha	3025 ha

Tabel 2.5: totaal ingepolderd gebied van enkele belangrijke gebieden rond de Westerschelde (naar Mol, 1995)

Door de inpolderingen is het landschappelijke aanzien van het estuarium in de loop van de tijd veranderd. Uitgestrekte slik- en schorgebieden zijn verdwenen, met uitzondering van Saeftinghe. Hiervoor in de plaats is cultuurlandschap gekomen. De inpolderingen hebben geleid tot een verlies aan ruimte in het estuarium. Het getij kan niet meer worden geborgen in de ingepolderde gebieden, hetgeen heeft geleid tot een verandering in de getijdoordringing. Tevens is het gebied waarbinnen de hoofdgeul zich vrij kan bewegen kleiner geworden. In de afgelopen eeuwen zijn de ebgeulen steeds meer vast komen te liggen op de plaatsen waar de geul de zeekering ontmoette. Ten gevolge hiervan is de grootschalige morfologische dynamiek afgenomen. Door het uitbochten van de hoofdgeul tot aan de randen van het

estuarium en door het afnemen van de morfologische dynamiek is voor de platen tijd en ruimte ontstaan om te groeien. Hierop wordt verder ingegaan in de volgende paragraaf.

2.4.4.2 Verdiepen en baggeren

Het verdiepen en vervolgens op diepte houden van de vaarweg vindt plaats op de drempels in de vaargeul en in scherpe binnenbochten. Ten gevolge van de drempelverdieping neemt het debiet door de hoofdgeul toe ten koste van de nevengeulen. Hierdoor nemen de stroomsnelheden in de hoofdgeul toe, hetgeen leidt tot erosie en verruiming van de geul tussen de drempels. Pas na enige tijd heeft de geul zich aangepast aan de grotere getijvolumina. Dit aanpassingsproces duurde na de vorige verdieping (begin jaren '70) ongeveer vijftien jaar. Gedurende die tijd was veel onderhoudsbaggerwerk nodig: $12 \text{ à } 14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. Nadat het nieuwe evenwicht tussen het toegenomen getijvolume en het nieuwe geulprofiel zich had ingesteld, nam het onderhoudsbaggerwerk af tot de huidige $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

In het algemeen kan worden gesteld dat het verdiepen en baggeren de morfologische ontwikkelingen die in gang zijn gezet door de inpolderingen verder versterken. Door de inpolderingen is het gebied waar water kan worden geborgen verkleind, terwijl door het verdiepen de hoofdgeul is vergroot. Beide veranderingen in de geometrie van de Westerschelde hebben geleid tot een snellere voortplanting van de getijgolf in het estuarium, hogere hoogwaterstanden en een toename van het getijverschil. Ten gevolge van de 'zachte regulatie' in het oostelijke deel van de Westerschelde zijn de kortsluitgeulen minder actief geworden, waardoor het verlandingsproces wordt versterkt: platen groeien aaneen tot plaatcomplexen en nemen toe in hoogte. Door de combinatie van plaatgroei en toegenomen afmetingen van de hoofdgeul is het areaal aan ondiepwatergebied sterk verminderd. Doordat bij gebrek aan morfologische dynamiek deze patronen gehandhaafd zullen blijven, is de afname in het oostelijke deel van blijvende aard. Een toename van de hoeveelheid water door de hoofdgeul impliceert dat deze verder wil uitbochten, waardoor de druk op de tussen de hoofdgeul en de zeewering ingeklemde slikken en schorren groter wordt. Indien deze gebieden niet worden verdedigd, zullen ze in de toekomst gaan eroderen.

2.4.4.3 Storten

Enkele decennia geleden werd bij voorkeur gestort in de nevengeulen zoals de Schaar van Noord en de Schaar van Waarde. De bergingscapaciteit van deze geulen is echter beperkt, waardoor het stortpatroon in de loop van de tijd steeds meer is verschoven naar de hoofdgeulen. Sinds de tweede helft van de jaren '70 wordt daar ongeveer 75% van de totale hoeveelheid gestort. In tegenstelling tot het baggeren lijkt het storten weinig (direct) effect te hebben op het getij: miljoenen kubieke meters zand die in de buitenbochten zijn gestort, zijn vrijwel geheel door de getijstroming naar andere delen van het estuarium getransporteerd (Storm, 1996). Stortingen zorgen wel voor een extra aanbod van sediment, waardoor natuurlijke sedimentatiegebieden (kreken, schorren van Saeftinghe) versneld kunnen worden opgevuld. Ten gevolge van zachte regulering zijn de geuldebieten afgenomen, waardoor de nevengeulen in verhouding tot het getijvolume te ruim werden. Op deze wijze ontstond ruimte om het sediment te bergen. Tevens is sediment terecht gekomen in de kortsluitgeulen en op de platen.

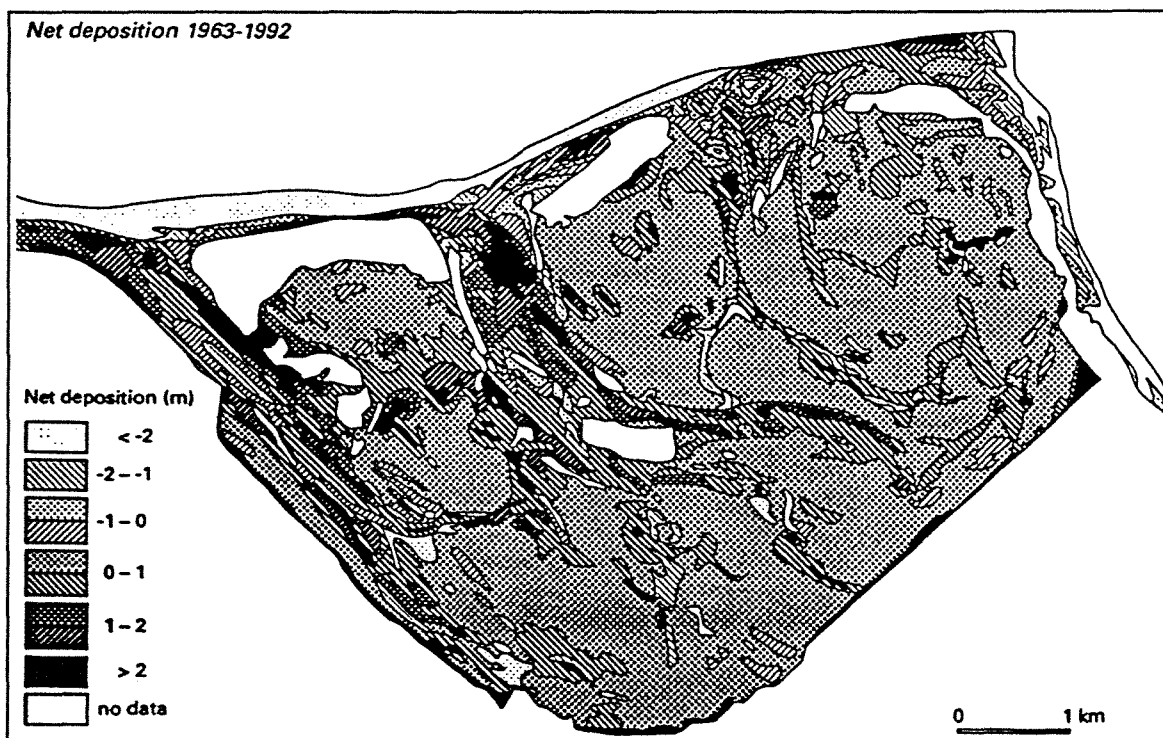
2.4.4.4 Zandwinnen

Tot het begin van de jaren '90 is vooral zand gewonnen in het gebied ten westen van Terneuzen. Sinds 1955 is in totaal ca. $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand aan de Westerschelde onttrokken. Door sedimentimport vanuit het mondingsgebied is de totale inhoud van het estuarium verruimd met slechts $15 \text{ à } 20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De effecten van de zandwinning op systeemniveau zijn hierdoor zeer beperkt. Doordat het geïmporteerde sediment is geborgen in het westelijke deel, dus het deel waar ook de zandwinning heeft plaatsgevonden, zijn hier geen effecten van zandwinning waarneembaar. Op een termijn van bijvoorbeeld een eeuw kan zandwinning echter een doorslaggevende rol gaan spelen in de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde. Het is namelijk een ingreep die het estuarium steeds iets groter maakt en daarmee continu dezelfde richting op werkt. Uiteraard geldt dit alleen als de zandwinning de import vanuit het mondingsgebied overtreft, hetgeen in de afgelopen decennia zeker het geval is geweest.

2.5 Het Verdrongen Land van Saeftinghe

Deze grootste brakwaterschorren van West-Europa zijn gelegen in het zuidoostelijke deel van de Westerschelde. Er bevinden zich 2000 ha moerassen en 1000 ha geulen en intergetijdegebieden. In de Middeleeuwen werd het gebied ingepolderd. In de Tachtigjarige Oorlog (1584) werden de dijken opzettelijk doorgestoken door de Nederlanders in een poging een Spaanse belegering van Antwerpen te voorkomen. De stad viel echter en de polder inundeerde. In latere eeuwen werd een deel van het verloren gegane land weer drooggelegd.

Het gemiddelde getijverschil bedraagt ter hoogte van Saeftinghe 4,50 m. Voor springtij en doodtij gelden gemiddelde bandbreedtes van respectievelijk 5,20 m en 3,60 m. Ten gevolge van de aanvoer van zoet water door de Schelde-rivier is het water brak: de saliniteit bedraagt ongeveer 0,9%, tegenover 1,65% elders langs de Noordzee. Door natuurlijke processen en menselijke ingrepen (vooral het storten van gebaggerd materiaal), vindt in dit deel van het estuarium waarschijnlijk een versnelde verlanding plaats. Dit proces van versnelde sedimentatie en uitbreiding van schorgebieden duurt nog voort tot op de dag van vandaag. Volgens gedetailleerde topografische metingen deed zich in de periode 1949-1992 een netto sedimentatie voor van ca. $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De afgelopen dertig jaar is een verticale opslibbing geregistreerd van gemiddeld 0,013 m per jaar (Krijger, 1993). Ruimtelijke verschillen in sedimentatie zijn weergegeven in figuur 2.10 (data Rijkswaterstaat). In het algemeen is de ophoping van sediment in de geulen sterker dan in de moerasgebieden. De extreme sedimentatie in de meest westelijke geul hangt mogelijk samen met de nabije aanwezigheid van een stortlocatie voor baggerspecie. In de periode 1965-1990 is meer dan $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand gestort op deze locatie (Van den Berg e.a., 1991).



Figuur 2.10: ruimtelijke verschillen in sedimentatie in het Verdrongen Land van Saeftinghe

Hoofdstuk 3 - Morfologische ontwikkeling volgens een dynamisch model

3.1 Inleiding

Het eerste deel van dit afstudeeronderzoek naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650 is uitgevoerd met behulp van een dynamisch, dus procesbeschrijvend, model. Daarbij is gebruik gemaakt van de - oorspronkelijk voor stationaire stroming afgeleide - sedimenttransportformule van Englund en Hansen. De rekenmethode en de resultaten hiervan komen aan de orde in paragraaf 3.3. In de tweede fase van het afstudeerwerk is de toepassing van het dynamisch-empirische model Asmita onderzocht. De resultaten van dit deels procesbeschrijvende en deels op empirische relaties gebaseerde model worden besproken in hoofdstuk 4. Voor beide modellen geldt dat de benodigde invoergegevens (waterstanden, stroomsnelheden en/of debieten) afkomstig zijn van een getijsimulatie met behulp van het ééndimensionale waterbewegingsmodel Duflow. Deze getijsimulatie is uitgevoerd door dr. A.J.F. van der Spek (1993) en reproduceert de waterbeweging in het Schelde-estuarium voor de jaren 1968, 1800 en 1650. De invloed van lokale golven op het sedimenttransport en transporten ten gevolge van dichtheidsstromen zijn dus buiten beschouwing gelaten. Dit is een verantwoorde aanname, aangezien deze mechanismen van geringe invloed blijken te zijn op het totale sedimenttransport (zie paragraaf 2.4.3). Van der Spek heeft gebruik gemaakt van een bestaande bodemschematisatie voor 1968 en vervolgens bodemschematisaties gereconstrueerd voor de jaren 1800 en 1650. Om een tweetal redenen is ervoor gekozen om de in het kader van dit afstudeerproject uit te voeren morfologische berekeningen in beide gevallen in eerste instantie uit te voeren over de periode 1800-1968:

- de bodemschematisatie voor 1968 representeert de bodem van de Westerschelde voorafgaand aan de verdieping van de drempels in 1970: aangezien de morfologie van het estuarium sindsdien in belangrijke mate wordt bepaald door menselijke ingrepen zoals deze, leek het niet zinvol om deze situatie als uitgangspunt te nemen voor de morfologische berekeningen;
- uit de zeventiende eeuw zijn geen nautische kaarten van de Westerschelde bekend, zodat een berekende morfologie van vóór 1800 niet of slechts zeer globaal kan worden vergeleken met bestaande diepte-informatie.

De eerste hydrografische opnamen van de Westerschelde dateren van 1799. Sinds die tijd kan worden beschikt over min of meer systematisch verkregen gegevens met betrekking tot de bekkenmorfologie en -geometrie. Zoals vermeld, bestaat de opzet van het afstudeerwerk in eerste instantie uit een toepassing van de beide morfologische modellen op de situatie van 1800. Indien dit bevredigende resultaten oplevert, kan eveneens een berekening voor 1650 worden uitgevoerd. Gezien het grote belang van de door Van der Spek uitgevoerde getijsimulatie voor dit afstudeerproject, wordt in paragraaf 3.2 een samenvatting hiervan gegeven. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar het door hem geschreven rapport R 93-10: *'Getijsimulatie voormalige getijdebekkens, Deel I: de Westerschelde in 1650 en 1800'* (Instituut voor marien en atmosferisch onderzoek Utrecht, 1993). In de genoemde paragraaf wordt tevens ingegaan op de algemene modelopzet van het waterbewegingsmodel Duflow.

3.2 Samenvatting getijsimulatie Westerschelde door dr. A.J.F. van der Spek

3.2.1 Waterbewegingsmodel Duflow

Het programma Duflow is een pc-pakket voor de berekening van ééndimensionale, niet-stationaire stroming. Het pakket bestaat uit drie hoofdmodules: een inputmodule ten behoeve van het genereren en bewerken van invoergegevens, een rekenmodule en een outputmodule ten behoeve van het bewerken van uitvoergegevens tot grafieken en tabellen (waterstanden, stroomsnelheden, debieten). De rekenresultaten kunnen worden weggeschreven naar beeldscherm, printer en plotter. Voor meer gedetailleerde informatie omtrent het praktische gebruik van het pakket wordt verwezen naar de gebruikershandleiding (Spaans e.a., 1989).

3.2.1.1 Differentiaalvergelijkingen

Het Duflow-pakket is gebaseerd op de twee onderstaande partiële differentiaalvergelijkingen. Dit stelsel, bestaande uit respectievelijk een continuïteitsvergelijking en een bewegingsvergelijking, geeft een ééndimensionale beschrijving van niet-stationaire stroming in open waterlopen. Bij de afleiding van de differentiaalvergelijkingen is uitgegaan van een goed gemengde vloeistof met een constante dichtheid. Tevens geldt de relatie $Q = u \cdot A$.

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha Qu)}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = b \gamma w^2 \cos(\Phi - \varphi)$$

Betekenis van de symbolen:

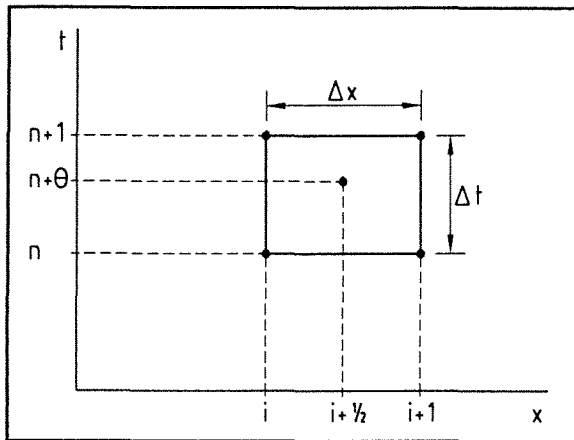
- t : tijd;
- x : afstand (gemeten langs de geulas);
- $H(x,t)$: waterstand (ten opzichte van een referentievlak);
- $Q(x,t)$: debiet (op locatie x en tijdstip t);
- $u(x,t)$: snelheid (gemiddeld over de dwarsdoorsnede);
- $A(x,H)$: stroomvoerend oppervlak;
- $B(x,H)$: bergende breedte;
- $C(x,H)$: Chézy-coëfficiënt;
- $R(x,H)$: hydraulische straal;
- $b(x,H)$: stroomvoerende breedte;
- $w(t)$: windsnelheid;
- $\Phi(t)$: windrichting (in graden);
- $\varphi(t)$: richting van de geulas (gemeten in graden met klok mee vanuit het noorden);
- $\gamma(x)$: windconversiecoëfficiënt;
- g : versnelling door de zwaartekracht;
- α : correctiefactor voor de niet-uniformiteit van de snelheidsverdeling in de advectieterm.

De correctiefactor α voor de niet-uniformiteit van de snelheidsverdeling in de advectieterm is gedefinieerd als:

$$\alpha = \frac{A}{Q^2} \int_A u(y,z)^2 dy dz .$$

3.2.1.2 Discretisatie

Het in de vorige paragraaf genoemde stelsel partiële differentiaalvergelijkingen wordt gediscetiseerd volgens het vierpunts (impliciete) Preissmann-schema (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1: Preissmann-schema

Het stelsel partiële differentiaalvergelijkingen kan aldus worden geschreven als een stelsel algebraïsche vergelijkingen. De continuïteitsvergelijking gaat daarbij over in:

$$B_{i+\frac{1}{2}}^* \frac{H_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - H_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}^{n+\theta} - Q_i^{n+\theta}}{\Delta x_i} = 0 .$$

Voor de gediscetiseerde bewegingsvergelijking geldt:

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - Q_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} + \frac{g A_{i+\frac{1}{2}}^* (H_{i+1}^{n+\theta} - H_i^{n+\theta})}{\Delta x_i} + \frac{\alpha \left(\frac{Q_{i+1}^n}{A_{i+1}^*} Q_{i+1}^{n+1} - \frac{Q_i^n}{A_i^*} Q_i^{n+1} \right)}{\Delta x_i} + \frac{g \left(Q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} |Q_{i+\frac{1}{2}}^n| \right)}{(C^2 AR)_{i+\frac{1}{2}}^*} = \\ & = b^n \gamma \left(w_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \right)^2 \cos(\Phi^{n+1} - \varphi) . \end{aligned}$$

De * in bovenstaande vergelijkingen geeft aan dat aan de betreffende variabele een waarde wordt toegekend op het tijdstip $t = t^{n+\theta}$. Deze discretisatie is van tweede orde in tijd en ruimte voor $\theta = 0,5$. In dat geval is het gediscetiseerde systeem volledig massabehoudend. In de praktijk wordt vaak gewerkt met een iets grotere waarde voor θ (bijvoorbeeld $\theta = 0,55$ of

$\theta=0,60$) aangezien dit de stabiliteit van de oplossing vaak ten goede komt (Roache, 1972).

Definieer een geulsectie met een lengte Δx (van knoop $x=x_i$ tot $x=x_{i+1}$) en een tijdsinterval Δt (van tijdstip $t=t^n$ tot $t=t^{n+1}$). De discretisatie van de waterstand in knoop $x=x_i$ op tijdstip $t=t+\theta\Delta t$ verloopt dan als volgt:

$$H_i^{n+\theta} = (1-\theta)H_i^n + \theta H_i^{n+1}.$$

Op overeenkomstige wijze kunnen ook de overige variabelen numeriek worden benaderd.

3.2.1.3 Randvoorwaarden en beginvoorwaarden

Om tot een unieke oplossing van het stelsel vergelijkingen te komen, dienen na de algemene definitie van het model (aantal knooppunten, lengte van de geulsecties, ruwheden etc.) nog enkele aanvullende condities te worden gespecificeerd. Op de fysische randen van het model kunnen de randvoorwaarden waterstand, debiet of een relatie tussen beide worden opgelegd. Om de berekening te starten moeten voor de overige knopen beginwaarden voor de waterstand en het debiet worden opgegeven, waarbij de waterstand geen discontinuïteit mag vertonen.

3.2.1.4 Oplossing van het stelsel vergelijkingen

Het door de gebruiker ingevoerde netwerk van knooppunten en verbindende geulsecties wordt door het pakket beschouwd als een verzameling afzonderlijke elementen. Het totale aantal op te lossen variabelen bedraagt $2J+I$, waarbij J staat voor het aantal geulsecties en I voor het aantal knooppunten. Duflow geeft als uitvoer voor ieder knooppunt de waterstand en voor iedere geulsectie de debieten en de stroomsnelheden. De stroomsnelheid wordt gegeven voor het midden van een geulsectie. Het aantal op te lossen vergelijkingen bedraagt eveneens $2J+I$. Voor elke geulsectie j worden twee vergelijkingen opgesteld. Deze volgen rechtstreeks uit de continuïteitsvergelijking en de bewegingsvergelijking. Voor elk knooppunt i wordt een balansvergelijking voor de stroming opgesteld, waarbij wordt verondersteld dat de berging van water plaatsvindt in de geulsecties en dus niet in de knooppunten. Voor randknopen kan een aanvullende voorwaarde worden gedefinieerd, zodat voor alle punten in het netwerk geldt dat per knooppunt één vergelijking moet worden opgelost met de waterstand als (enige) onbekende.

De oplossingsprocedure verloopt als volgt. Veronderstel dat Q_i en Q_{i+1} het debiet aan respectievelijk het begin en het einde van de beschouwde geulsectie voorstellen. Definieer tevens de bijbehorende waterstanden H_i en H_{i+1} . Na substitutie van de gediscretiseerde vergelijkingen:

$$Q_i^{n+1} = N_{11}H_i^{n+1} + N_{12}H_{i+1}^{n+1} + N_{13}$$

$$Q_{i+1}^{n+1} = N_{21}H_i^{n+1} + N_{22}H_{i+1}^{n+1} + N_{23}$$

in de vergelijking:

$$\sum_j Q_{j,i} + q_i = 0$$

wordt tenslotte een stelsel lineaire vergelijkingen verkregen waarin de waterstanden de enige overgebleven onbekenden zijn. Dit stelsel kan als volgt worden weergegeven:

$$\sum_j M_{ij} H_j = R_i.$$

Het bovenstaande stelsel, dat ook kan worden genoteerd als een matrix-vectorsysteem, wordt voor iedere geulsectie opgesteld. Voor een geulsectie met een beginknoop i en een eindknoop j bepalen de coëfficiënten N_{11} , N_{12} , N_{21} en N_{22} de waarden van respectievelijk de matrixelementen M_{ii} , M_{ij} , M_{ji} en M_{jj} . De coëfficiënten N_{13} en N_{23} bepalen de waarden van respectievelijk de vectorelementen R_i en R_j . Wanneer alleen stroming wordt gesimuleerd, zijn de waarden van de genoemde N -elementen direct gelijk aan deze matrix- en vectorelementen. Indien het model tevens constructies bevat zoals stuwen, onder- en overlagen, werkt de invloed hiervan uiteraard door in de coëfficiënten van het op te lossen matrix-vectorsysteem. Dit geldt ook voor de modellering van het transport van in water opgeloste stoffen.

Uiteindelijk wordt per geulsectie het volgende matrix-vectorsysteem verkregen:

$$\mathbf{M} * \mathbf{H} = \mathbf{R} \quad \leftrightarrow \quad \begin{pmatrix} M_{ii} & M_{ij} \\ M_{ji} & M_{jj} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} H_i \\ H_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i \\ R_j \end{pmatrix}.$$

De oplossingsmethode waarvan het DufLOW-pakket gebruik maakt is gebaseerd op de zogenaamde LU-decompositie. Voor nadere details omtrent deze wijze van oplossen wordt verwezen naar numerieke handboeken.

3.2.2 Vakindeling en bodemschematisatie Westerschelde

Bij de schematisatie van de Westerschelde is voor zowel 1968, 1800 als 1650 een vakindeling aangehouden zoals deze door Kleinjan (1933) is opgezet: *'Deze verdeeling in vijf vakken is zoodanig gekozen, dat ongeveer binnen elk vak valt een groote bocht van het hoofdvaarwater met het aan de holle zijde daarvan gelegen bankencomplex en vloed-schaar'* (Kleinjan, 1933: blz. 20). Deze vakindeling beslaat de Westerschelde vanaf de lijn Vlissingen-Breskens tot aan de Belgisch/Nederlandse grens. Deze indeling is gevolgd omdat zij morfologisch gezien het meest voor de hand liggend is: zij komt namelijk overeen met de in paragraaf 2.4.2.1 van dit verslag genoemde bochtgroepen. De (voormalige) zijtakken Sloe, Braakman, Hellegat, Saeftinghe en Kreekrak vallen grotendeels buiten deze vakken. Bijlage 2a bij dit verslag toont de hier bedoelde vakindeling, bijlage 2b geeft daarbij een overzicht van de toegepaste nummering van modelknopen en -vakken voor de situatie van 1968.

Een bodemschematisatie in DufLOW bestaat uit een aantal geulsecties met een specifieke lengte, welke begrensd worden door een begin- en een eindknoop. Deze vakken worden op de knooppunten aan elkaar gekoppeld. De knoopnummers van een vak, de lengte en de bergende breedte ervan, de natte geuldoorsnede en de hydraulische straal worden opgegeven in een netwerkfile. Deze file heeft standaard de extensie '.NET'. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om gebruik te maken van reeds bestaande Implic-schematisaties. Gezien de aard van de beschikbare morfologische gegevens is ervoor gekozen om DufLOW aan te sturen volgens de Implic-methode. Van de hedendaagse Westerschelde bestaat een aantal

gedetailleerde Implic-schematisaties. De basisgegevens van de schematisatie voor de situatie 1968/1969 zijn gebruikt voor de uiteindelijke getijsimulatie. Voor de Schelde stroomopwaarts van de Belgisch/Nederlandse grens is eveneens gebruik gemaakt van bestaande schematisaties. Om te voorkomen dat voor iedere zijtak van de rivier een apart modelvak moest worden gemaakt, zijn de natte doorsnede en de bergende breedte van de zij-armen opgeteld bij die van de Schelde-rivier. Aangezien morfologische veranderingen van de Schelde-rivier bij het afstudeerwerk buiten beschouwing zijn gelaten, wordt de schematisatie ervan hier verder niet behandeld. De bijlagen 3a, 3b en 3c bij dit verslag tonen de gebruikte netwerk-invoerfiles voor respectievelijk 1968, 1800 en 1650. Voor ieder vak zijn per 0,50 m, tussen NAP-2,50 m en NAP+7,00 m, de volgende hydraulische parameters opgegeven: de natte geuldoorsnede aan zowel het begin als aan het einde van het vak (respectievelijk A_1 en A_2), de voor het vak gemiddelde bergende breedte (B_b) en de hydraulische straal (R). De stroomvoerende breedte is gemakshalve gelijkgesteld aan de bergende breedte. Boven NAP+3,00 m zijn de waarden voor B_b gelijk gehouden.

De bodemschematisatie voor 1800 is gebaseerd op uit 1817 daterend kaartmateriaal van de Franse hydrograaf C.F. Beautemps-Beaupré. Het basismateriaal van de bodemschematisatie voor 1650 bestaat uit een topografische kaart van de provincie Zeeland uit 1655. Deze kaart wordt in het rapport R 93-10 aangeduid als de 'Roman-Visscherkaart'. Zoals vermeld in paragraaf 3.1 van dit verslag, zijn uit de zeventiende eeuw geen nautische kaarten van de Westerschelde bekend. Zeekaarten van de monding bestaan wel (Vlam, 1940), maar de diepte-informatie is slechts globaal en zeer ongelijkmatig weergegeven en derhalve weinig bruikbaar. Het risico bestaat dat voor sommige delen van Zeeland verouderde of onvolledige informatie is gebruikt, waardoor fouten in de topografische weergave niet zijn uitgesloten en de compilatie niet altijd schaalgetrouw is. Over het algemeen wordt de Roman-Visscherkaart echter goed bruikbaar geacht.

3.2.3 Randvoorwaarden

De aan het model opgelegde randvoorwaarden worden, gezamenlijk met de stuurparameters voor de berekening, opgegeven in een randvoorwaardenfile. Deze file heeft standaard de extensie '.BND'. Als randvoorwaarde voor de situatie 1968/1969 is een waterstandsregistratie gebruikt van een matig springtij, welke is opgenomen te Vlissingen van 10-05-1971 (08:00 uur) tot en met 12-05-1971 (24:00 uur). De waterstanden worden per 5 minuten gegeven in meters ten opzichte van NAP. Aangezien voor de situatie van 1800 geen waterstandsregistraties beschikbaar waren die als randvoorwaarde konden worden gebruikt (de oudste bruikbare systematische getijregistraties te Vlissingen dateren namelijk van 1862), is de voor 1968 gebruikte randvoorwaarde gecorrigeerd voor twee veranderingen: het toegenomen getijverschil en het gestegen gemiddelde zeeniveau. Om de prestaties van de voor 1968 en 1800 opgestelde getijsimulatie te testen, zijn tenslotte berekeningen uitgevoerd met de slechts globaal bekende bekkenmorfologie rond 1650. Op grond van (schaarse) historische gegevens kon een schatting worden gemaakt van het gemiddelde zeeniveau in die tijd. Uiteindelijk is gekozen voor een gemiddelde zeespiegel die 0,70 m lager ligt dan tegenwoordig. Tabel 3.1 op de volgende bladzijde geeft een overzicht van de voor 1968, 1800 en 1650 gebruikte randvoorwaarden met betrekking tot het gemiddelde zeeniveau en het getijverschil te Vlissingen.

Randvoorwaarde	1968	1800	1650
Gemiddeld zeeniveau	NAP+0,00 m	NAP-0,47 m	NAP-0,70 m
Getijverschil te Vlissingen	4,16 m	3,92 m	3,75 m

Tabel 3.1: randvoorwaarden m.b.t. gemiddeld zeeniveau en getijverschil te Vlissingen

Aangezien de afvoer van de rivier geen significante bijdrage levert aan de waterbeweging in de Westerschelde, is in alle gevallen het rivierdebiet gelijk aan nul gesteld.

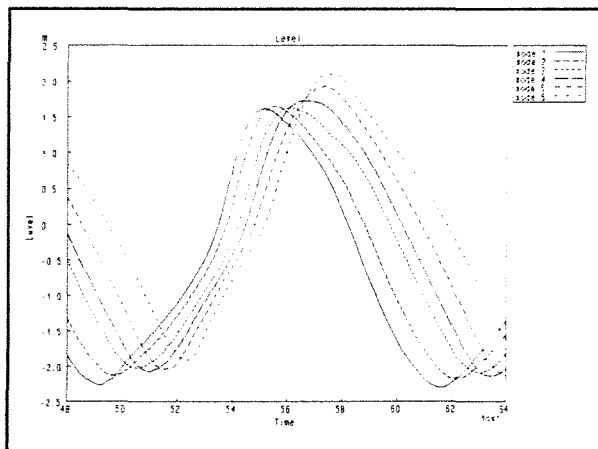
Voor de stuur- en overige parameters tijdens de uitvoering van de getijsimulatie zijn de in tabel 3.2 weergegeven waarden ingesteld.

Parameter	Standaardwaarde per getijsimulatie
Start berekening	10-05-1971 (08:00 uur)
Einde berekening	12-05-1971 (24:00 uur)
Start uitvoer	10-05-1971 (08:00 uur)
Tijdstap	5 minuten
Uitvoer-interval	10 minuten
Ruwheid	0 (Manning)
Theta	0,60
Froude-term	0
Echo boundary	0
Echo netwerk	0
Iteratie	0,00
Gauss-eliminatie	0
Extra iteraties	0
Optimalisatie netwerk	0
Alfa	1,000
Tijdstappen tussen triggers	3

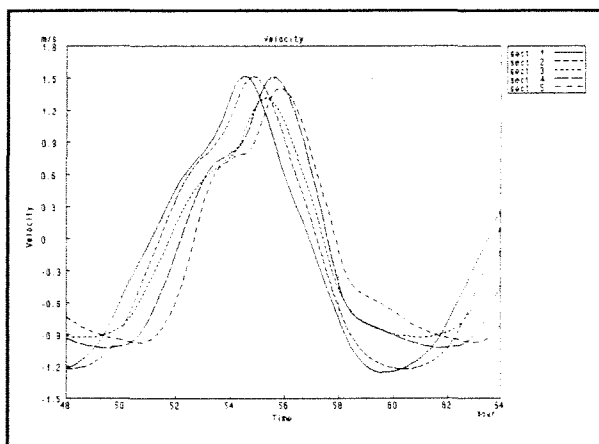
Tabel 3.2: stuur- en overige parameters bij de getijsimulaties voor 1968, 1800 en 1650

3.2.4 Uitvoer

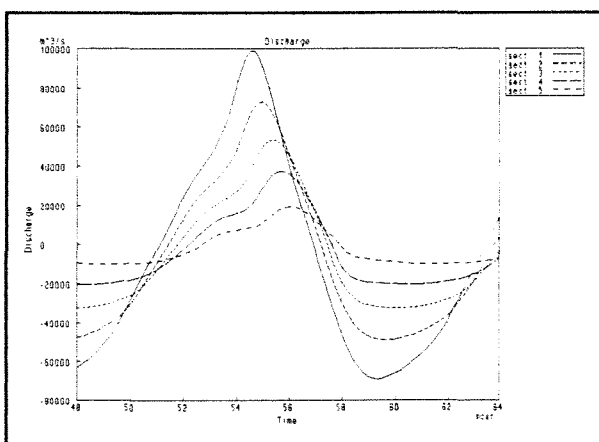
Zoals vermeld in paragraaf 3.2.1 van dit verslag, bestaat de uitvoer van DufLOW uit waterstanden, stroomsnelheden en debieten. De uitvoer kan zowel grafisch als in tabelvorm worden weergegeven. Van de totale berekening zijn alleen de resultaten van de laatste 24 uur (12-05-1971) als resultaat gebruikt. De voorafgaande dagen zijn als inspeelperiode aangehouden. Ter illustratie is in figuur 3.2 het verloop van de waterstand in de knopen 1 tot en met 6 voor 1800 weergegeven. De figuren 3.3 en 3.4 tonen respectievelijk het bijbehorende verloop van de stroomsnelheid en het debiet in de secties 1 tot en met 5. De grafieken tonen de uitkomsten van de laatste 16 uur van de berekening.



Figuur 3.2: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1800)



Figuur 3.3: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 5 (1800)



Figuur 3.4: verloop van het debiet in de secties 1 t/m 5 (1800)

3.2.5 Conclusie

De waterbeweging in het Schelde-estuarium is goed weer te geven met behulp van DufLOW en een zeer eenvoudige schematisatie van de geometrie in slechts 12 vakken. Voor een nadere verklaring van deze uitspraak wordt verwezen naar het rapport R 93-10. Een cruciale parameter voor de afregeling van het model voor 1968 blijkt de bodemruwheid in eb- en vloedrichting te zijn. De hier gebruikte waarde is k , welke de reciproke is van de weerstandscoefficiënt van Manning. In de berekeningen is $C=k \cdot R^{1/6}$ ingevuld in de Chézy-vergelijking. De uiteindelijke modelresultaten voor zowel 1968, 1800 als 1650 zijn verkregen met de volgende waarden voor de bodemruwheid: $k_{\text{vloed}}=48$ en $k_{\text{eb}}=37$ voor de Westerschelde en $k_{\text{vloed}}=48$ en $k_{\text{eb}}=45$ voor de Schelde-rivier. Manipulaties met de ebruwheid leiden tot grote variaties in zowel de laagwaterstand als in het tijdstip van laagwater. Bij een lagere bodemruwheid (dus bij een hogere k -waarde) valt het laagwater eerder en is de laagwaterstand lager. Het tijdstip en de hoogte van het hoogwater worden hierdoor echter niet of nauwelijks beïnvloed. Manipulaties met de vloedruwheid leiden tot vergelijkbare resultaten voor het hoogwater, zonder dat de laagwaters daardoor beïnvloed worden. Daar de bodemruwheid een zeer gevoelige parameter blijkt te zijn, is de simulatie voor 1968 hiermee afgeregeld. Opvallend daarbij is dat k_{eb} in de hier toegepaste schematisatie kleiner is dan k_{vloed} , terwijl dit bij het gedetailleerde Implic-model precies andersom is (Bollebakker, 1985). Bij de getijsimulaties voor 1800 en 1650 zijn de hierboven genoemde waarden voor k_{vloed} en k_{eb} zonder verdere controle overgenomen.

Een opmerking bij de voor 1800 en 1650 berekende stroomsnelheden is op zijn plaats. Deze snelheden lijken aan de (te) hoge kant te zijn. De achtergrond hiervan is niet helemaal duidelijk. Enerzijds is het niet onwaarschijnlijk dat de stroomsnelheden in de Westerschelde in het verleden hoger waren dan tegenwoordig, aangezien het estuarium zich tijdens zijn ontstaan inschuurde in een nogal erosieresistente ondergrond. Hierdoor konden de geuldoorsneden zich niet snel aanpassen aan de stroomsnelheden. Anderzijds worden de hoge stroomsnelheden veroorzaakt door grote debieten in de DufLOW-resultaten ($u=Q/A$). Waarschijnlijk is er met de gebruikte geuldoorsneden niet veel mis, aangezien deze zijn afgeleid uit historische lodingskaarten. De gereconstrueerde berging in de (voormalige) zijtakken Sloe, Braakman, Hellegat, Saeftinghe en Kreekrak kan echter te groot zijn. Hierdoor worden de debieten overschat en worden hoge stroomsnelheden verkregen. Het is helaas niet eenvoudig om hier een snelle controle op uit te voeren.

3.3 Toepassing van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen

3.3.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde met behulp van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen. Deze formule wordt nader toegelicht in paragraaf 3.3.2. Voor de situatie van 1800 zijn in totaal vier analyses uitgevoerd. Deze worden besproken in paragraaf 3.3.3. De parameters waarmee is gevarieerd en waarin de ene analyse zich dus onderscheidt van de andere, zijn de bodemruwheid (k) en de stroomvoerende breedte (B_s). Met nadruk wordt gesteld dat pas is overgegaan naar een nieuwe variant indien de vorige een niet bevredigend of onrealistisch resultaat opleverde. In paragraaf 3.3.4 worden conclusies geformuleerd met betrekking tot de verkregen resultaten.

De sedimenttransporten zijn 'semi-automatisch' berekend met behulp van het spreadsheetprogramma Quattro Pro 5.00. Van de totale Duflow-berekening zijn alleen de resultaten van de laatste getijperiode beschouwd. De overige resultaten zijn als inspeelperiode aangehouden.

De sedimenttransportberekeningen zijn uitgevoerd onder de volgende algemene aannamen:

- de duur van een getijperiode is gesteld op 12,5 uur (in plaats van 12 uur en 25 minuten);
- de waterbeweging in één getijperiode is representatief gesteld voor de gehele periode waarover gerekend wordt;
- alleen de ontwikkeling van de bodemligging van de Westerschelde is beschouwd, morfologische veranderingen van de Schelde-rivier zijn dus buiten beschouwing gelaten;
- om een uitspraak te kunnen doen over de waterstand per sectie, zijn de door Duflow berekende waterstanden in de begin- en eindknoop van een sectie rekenkundig gemiddeld;
- de gebruikte bodemschematisaties bevatten per 0,50 m, tussen NAP-2,50 m en NAP+7,00 m, getalswaarden voor A_1 , A_2 , B_s en R : bij tussenliggende waarden is lineair geïnterpoleerd;
- omdat de bodemschematisaties geen gedetailleerde informatie geven onder het niveau NAP-2,50 m, is de geuldoorsnede hieronder aangenomen als een rechthoekig bakprofiel;
- per dwarsprofiel is de berekende hoeveelheid gesedimenteerd of geërodeerd materiaal evenredig verdeeld naar de diepte, waarbij de bovengrens is gesteld op het niveau van hoogwater (daarboven stroomt immers geen water, dus daar treedt ook geen transport van sediment op).

3.3.2 De sedimenttransportformule van Englund en Hansen

De mathematische beschrijving van sedimenttransport is een tamelijk complexe aangelegenheid. Om tot betrouwbare formules te komen, zijn - naast theoretische beschouwingen - vele laboratoriumproeven noodzakelijk. De meeste transportformules zijn dan ook (semi-)empirisch van aard.

Het aantal sedimenttransportformules is zeer groot. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat de meeste formules slechts geldig zijn binnen nauwkeurig vastgestelde grenzen met betrekking tot bijvoorbeeld de korreldiameter of de bodemruwheid. Om een sedimenttrans-

portformule toe te passen op een willekeurige situatie, moeten soms de constanten in de formule enigszins worden aangepast aan de omstandigheden. De bestaande transportformules kunnen worden onderscheiden in formules ten behoeve van de beschrijving van bodemtransport, zwevend transport en totaaltransport. Voor de Westerschelde is de totaaltransportformule van Englund en Hansen geschikt. Het berekende transport bevat zowel bodemtransport als zwevend transport van bodemmateriaal (exclusief washload). In het onderstaande wordt de formule nader toegelicht.

3.3.2.1 Formule en controle toepassing voor de Westerschelde

De sedimenttransportformule van Englund en Hansen is oorspronkelijk afgeleid voor bodemtransport, maar blijkt vooral goed toepasbaar voor het transport van relatief fijn materiaal waarbij zwevend transport een belangrijke rol speelt. De formule is gebaseerd op laboratoriumproeven waarbij alleen sediment met een mediane korreldiameter $D_{50} > 190 \mu\text{m}$ is gebruikt. De formule kan als volgt worden geschreven:

$$\frac{s}{\sqrt{g\Delta D_{50}^3}} = 0,084 \left(\frac{u_*}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \right)^3 \left(\frac{u}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \right)^2.$$

Betekenis van de symbolen:

- s : sedimenttransport per eenheid van breedte;
- Δ : dichtheidsverhouding tussen sediment en water ($\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$);
- u_* : schuifspanningssnelheid;
- u : dieptegemiddelde snelheid.

Om de formule te mogen toepassen, moet worden voldaan aan twee voorwaarden:

- $0,19 \leq D_{50} \leq 0,93 \text{ mm}$;
- $w_s(D_{50}) < u_*$.

Voor de bodem van de Westerschelde mag worden uitgegaan van een mediane korreldiameter $D_{50} = 0,20 \text{ mm}$ (Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ), dus aan de eerste voorwaarde wordt voldaan.

Indien wordt uitgegaan van een kinematische viscositeit van water van $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, een soortelijke massa van sediment van $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ en een soortelijke massa van water van $\rho_w = 1010 \text{ kg/m}^3$, geldt voor de valsnelheid (w_s) van een mediane korrel in stilstaand water:

$$\begin{aligned} w_s(D_{50}) &= \frac{10\nu}{D_{50}} \left(\sqrt{1 + \frac{0,01\Delta g D_{50}^3}{\nu^2}} - 1 \right) = \\ &= \frac{10 * 10^{-6}}{200 * 10^{-6}} * \left(\sqrt{1 + \frac{0,01 * 1,62 * 9,81 * (200 * 10^{-6})^3}{(10^{-6})^2}} - 1 \right) = \underline{0,025 \text{ ms}^{-1}}. \end{aligned}$$

Voor de schuifspanningssnelheid (u_*) geldt:

$$u_* = \frac{u}{C} \sqrt{g}.$$

Uit het verloop van de stroomsnelheid voor de Westerschelde anno 1800 (zie figuur 3.3) volgt voor de maximaal optredende stroomsnelheid: $u_{\max} \approx 1,5 \text{ ms}^{-1}$. Onderstaande tabel geeft de grootte van de bijbehorende schuifspanningssnelheid bij diverse waarden voor de Chézy-coëfficiënt (C).

$C \text{ [m}^{1/2}\text{/s]}$	30	40	50	60	70	80
$u_* \text{ [ms}^{-1}\text{]}$	0,157	0,117	0,094	0,078	0,067	0,059

Tabel 3.3: schuifspanningssnelheid bij diverse Chézy-coëfficiënten

Omdat in deze fase van het onderzoek nog geen werkelijke Chézy-coëfficiënten zijn berekend, is voor verschillende waarden van C een berekening van de schuifspanningssnelheid gemaakt. Uit de tabel blijkt dat voor alle redelijkerwijs te verwachten C -waarden wordt voldaan aan de voorwaarde $w_s(D_{50}) < u_*$. Op de kentering van het getij wordt niet voldaan aan deze voorwaarde, aangezien de optredende stroomsnelheden dan zeer klein zijn. De morfologie van het estuarium wordt echter met name bepaald bij grotere snelheden. De transportcapaciteit van het systeem is dan namelijk groter. De formule van Englund en Hansen mag dus worden gebruikt voor de berekening van sedimenttransporten in de Westerschelde.

3.3.2.2 Toepassing bij morfologische modellering

De op de vorige bladzijde gegeven gedaante van de formule van Englund en Hansen leent zich niet voor een snelle indicatie van het morfologische gedrag van een open waterloop. Om hierin toch snel enig inzicht te verkrijgen, wordt bij morfologische analyses vaak de volgende formulering gebruikt:

$$s = au^b \Leftrightarrow s = \frac{0,084}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} u^5.$$

Bij gebruik van een willekeurige sedimenttransportformule geldt voor b :

$$b = \frac{u}{s} \frac{\partial s}{\partial u}.$$

Indien - zoals bij de Westerschelde - het zwevend transport een belangrijke rol speelt, berekent de transportformule in feite alleen de transportcapaciteit. Het werkelijke transport hangt onder meer af van de omgeving en de situatie in het verleden in verband met de aanpassingslengte en de aanpassingstijd. Als deze relatief klein zijn ten opzichte van de roosterafstand en de rekentijdstap moet worden aangenomen dat het transport gelijk is aan de transportcapaciteit.

3.3.3 Sedimenttransporten 1800

Hoewel de gebruikte schematisatie van de Westerschelde bestaat uit vijf vakken, zijn bij alle beschouwde situaties tevens sedimenttransporten berekend voor sectie 6. Dit is gedaan om ook voor de meest landinwaarts gelegen knoop van sectie 5 een nieuw dwarsprofiel te kunnen berekenen. Hiermee wordt bereikt dat de overgang tussen de Westerschelde en de Scheldेरивier gelijkmatiger verloopt, waardoor de gesimuleerde waterbeweging in dit deel van het estuarium minder afhankelijk wordt van een plotselinge verandering van het dwarsprofiel.

3.3.3.1 Situatie 1

In eerste instantie zijn sedimenttransportberekeningen uitgevoerd met gebruikmaking van de door Van der Spek (1993) gehanteerde waarden voor de ruwheidsparemeters en de stroomvoerende breedte: $k_{vloed}=48$, $k_{cb}=37$ en ' $B_s=B_b$ ' (dat wil zeggen: de door Van der Spek gebruikte definitie van de stroomvoerende breedte). Op de bladzijden 51 en 52 zijn de resultaten weergegeven van de berekening voor sectie 1 (spreadsheetprogramma Quattro Pro 5.00). Deze sectie wordt begrensd door de knopen 1 en 2, waarbij knoop 1 de meest zeewaarts gelegen knoop is. Ter verduidelijking wordt hieronder een handmatige berekening gegeven van het sedimenttransport op het tijdstip $t=52,167$ uur. Het aldus berekende transport wordt representatief gesteld voor een periode van 10 minuten, ofwel het uitvoerinterval waarop Duflo is ingesteld.

Beschouw de Duflo-resultaten op bijlage 4 (respectievelijk de stroomsnelheid in sectie 1 en de waterstanden in de knopen 1 en 2): $u=0,54 \text{ ms}^{-1}$, $h_1=-1,01 \text{ m}$ en $h_2=-1,19 \text{ m}$. Voor de gemiddelde waterstand gedurende dit tijdsinterval geldt:

$$h_{gem.} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{-1,01 - 1,19}{2} = \underline{-1,10 \text{ m}} .$$

Deze waarde geldt ten opzichte van NAP. De bij deze waterstand behorende hydraulische straal wordt gevonden door lineaire interpolatie in de bodemschematisatie van bijlage 3b. De berekende $h_{gem.}$ ligt tussen NAP-1,50 m en NAP-1,00 m, dus de te berekenen hydraulische straal ligt tussen $R=10,92 \text{ m}$ en $R=11,04 \text{ m}$. Lineaire interpolatie geeft:

$$R = 10,92 + \frac{(11,04 - 10,92) * (1,50 - 1,10)}{0,50} = \underline{11,02 \text{ m}} .$$

Het teken van de stroomsnelheid is positief, dus er is sprake van vloedstroming in het estuarium (de grootste stroomsnelheden treden op bij vloed, dit is in overeenstemming met de Duflo-resultaten). Voor de bodemruwheid geldt dus:

$$C = k_{vloed} * R^{1/6} = 48 * (11,02)^{1/6} = \underline{72 \text{ m}^{1/2}/s} .$$

Voor de berekening van de stroomvoerende breedte bij $h_{gem.}=-1,10 \text{ m}$ wordt opnieuw lineair geïnterpoleerd in de bodemschematisatie van bijlage 3b:

$$B_s = B_b = 6073 + \frac{(6326 - 6073) * (1,50 - 1,10)}{0,50} = \underline{6275 \text{ m}} .$$

Tenslotte kan de hoeveelheid getransporteerd sediment worden berekend gedurende een tijdsinterval van 10 minuten:

$$\begin{aligned}
 S &= B_s * s * \Delta t = B_s * \frac{0,084}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} * u^5 * \Delta t = \\
 &= 6275 * \frac{0,084}{\sqrt{9,81} * (72)^3 * (1,62)^2 * (200 * 10^{-6})} * (0,54)^5 * (10 * 60) = \\
 &= \underline{23,1 \text{ m}^3} .
 \end{aligned}$$

Op deze wijze is voor elk tijdsinterval van de getijcyclus het bijbehorende sedimenttransport berekend. Het gemiddelde netto transport in een sectie gedurende één getijcyclus wordt bepaald door de totale hoeveelheid getransporteerd sediment te delen door de duur van een getijperiode. Voor de hier beschouwde sectie 1 wordt aldus een transport van -0,44 m³/s gevonden (ebgedomineerd).

Modelresultaten:

Run	Jaar	Sectie 1	Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	Sectie 5	Sectie 6
1	1800	-0,44	-0,30	+0,02	+0,40	+0,29	-0,02

Tabel 3.3: netto sedimenttransporten [m³/s] bij $k_{\text{vloed}}=48$, $k_{\text{eb}}=37$ en ' $B_s=B_b$ '

De berekende sedimenttransporten zijn in enkele gevallen ebgedomineerd. Dit geldt voor de secties 1, 2 en 6. Deze resultaten zijn in tegenspraak met het algemeen bekende verschijnsel dat estuaria neigen naar verlanding. Een ebgedomineerd sedimenttransport bewerkstelligt precies het tegenovergestelde. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 3.3.4. Bovenstaande tabel geeft een overzicht van de berekende transporten voor de secties 1 tot en met 6. Een minteken staat voor een ebgedomineerd sedimenttransport en een plusteken voor een vloedgedomineerd sedimenttransport.

Sedimenttransport sectie 1 (1800)

(Run 1)

t	u	h(1)	h(2)	h(gem.)	h(a)	h(b)	R(a)	R(b)	R(h)	k	C	s	Bb(a)	Bb(b)	Bb(h)	S
[uren]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m(1/2)/s]	[m2/s]	[m]	[m]	[m]	[m3/s]
51,500	0,20708	-1,360	-1,527	-1,444	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,934	48	71,510	0,0000000530	6073	6326	6101,589	0,0000043086
51,667	0,29285	-1,270	-1,465	-1,368	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,952	48	71,530	0,0000002993	6073	6326	6140,045	0,0000245042
51,833	0,38244	-1,190	-1,367	-1,279	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,973	48	71,553	0,0000011358	6073	6326	6185,079	0,0000936657
52,000	0,46235	-1,100	-1,284	-1,192	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,994	48	71,576	0,0000029304	6073	6326	6228,848	0,0002433720
52,167	0,53632	-1,010	-1,190	-1,100	-1,50	-1,00	10,92	11,04	11,016	48	71,600	0,0000061483	6073	6326	6275,400	0,0005144395
52,333	0,60062	-0,910	-1,107	-1,009	-1,50	-1,00	10,92	11,04	11,038	48	71,624	0,0000108193	6073	6326	6321,699	0,0009119546
52,500	0,65951	-0,820	-1,000	-0,910	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,038	48	71,624	0,0000172705	6326	6665	6387,105	0,0014707767
52,667	0,71364	-0,710	-0,906	-0,808	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,036	48	71,622	0,0000256232	6326	6665	6456,217	0,0022057176
52,833	0,76252	-0,610	-0,793	-0,702	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,034	48	71,619	0,0000356891	6326	6665	6528,268	0,0031065037
53,000	0,81216	-0,480	-0,699	-0,590	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,032	48	71,617	0,0000489250	6326	6665	6604,268	0,0043081867
53,167	0,86980	-0,340	-0,574	-0,457	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,063	48	71,650	0,0000688353	6665	6810	6677,500	0,0061286393
53,333	0,93364	-0,170	-0,443	-0,307	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,177	48	71,773	0,0000975849	6665	6810	6721,054	0,0087449799
53,500	1,01100	0,020	-0,284	-0,132	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,310	48	71,914	0,0001444372	6665	6810	6771,672	0,0130410876
53,667	1,09600	0,240	-0,130	0,055	0,00	0,50	11,41	11,77	11,450	48	72,062	0,0002149342	6810	6970	6827,560	0,0195663451
53,833	1,20900	0,510	0,046	0,278	0,00	0,50	11,41	11,77	11,610	48	72,230	0,0003486225	6810	6970	6899,034	0,0320687792
54,000	1,33100	0,760	0,300	0,530	0,50	1,00	11,77	12,13	11,792	48	72,416	0,0005594353	6970	7111	6978,463	0,0520533167
54,167	1,43600	1,010	0,553	0,782	0,50	1,00	11,77	12,13	11,973	48	72,601	0,0008115614	6970	7111	7049,410	0,0762803877
54,333	1,50100	1,220	0,798	1,009	1,00	1,50	12,13	12,42	12,135	48	72,764	0,0010058292	7111	7313	7114,695	0,0954155709
54,500	1,52400	1,380	1,025	1,203	1,00	1,50	12,13	12,42	12,247	48	72,876	0,0010803093	7111	7313	7192,810	0,1036061292
54,667	1,50500	1,500	1,222	1,361	1,00	1,50	12,13	12,42	12,339	48	72,966	0,0010108389	7111	7313	7256,844	0,0978066716
54,833	1,44500	1,570	1,396	1,483	1,00	1,50	12,13	12,42	12,410	48	73,036	0,0008224264	7111	7313	7306,132	0,0801167405
55,000	1,35100	1,610	1,509	1,560	1,50	2,00	12,42	12,57	12,438	48	73,063	0,0005868812	7313	7585	7345,368	0,0574781139
55,167	1,23900	1,620	1,580	1,600	1,50	2,00	12,42	12,57	12,450	48	73,075	0,0003805555	7313	7585	7367,400	0,0373827261
55,333	1,11700	1,600	1,631	1,616	1,50	2,00	12,42	12,57	12,455	48	73,080	0,0002265929	7313	7585	7375,832	0,0222841453
55,500	0,98393	1,560	1,651	1,606	1,50	2,00	12,42	12,57	12,452	48	73,077	0,0001201859	7313	7585	7370,392	0,0118109005
55,667	0,85137	1,520	1,638	1,579	1,50	2,00	12,42	12,57	12,444	48	73,069	0,0000583127	7313	7585	7355,976	0,0057192899
55,833	0,71619	1,450	1,608	1,529	1,50	2,00	12,42	12,57	12,429	48	73,054	0,0000245796	7313	7585	7328,776	0,0024018436
56,000	0,59565	1,400	1,561	1,481	1,00	1,50	12,13	12,42	12,409	48	73,035	0,0000097890	7111	7313	7305,122	0,0009534658
56,167	0,48158	1,340	1,509	1,425	1,00	1,50	12,13	12,42	12,376	48	73,003	0,0000033861	7111	7313	7282,498	0,0003287862
56,333	0,37206	1,270	1,459	1,365	1,00	1,50	12,13	12,42	12,341	48	72,968	0,0000009333	7111	7313	7258,258	0,0000903233
56,500	0,26601	1,200	1,392	1,296	1,00	1,50	12,13	12,42	12,302	48	72,929	0,0000001746	7111	7313	7230,584	0,0000168370
56,667	0,15676	1,110	1,327	1,219	1,00	1,50	12,13	12,42	12,257	48	72,885	0,0000000124	7111	7313	7199,274	0,0000011936
56,833	0,04534	1,030	1,247	1,139	1,00	1,50	12,13	12,42	12,210	48	72,839	0,0000000000	7111	7313	7166,954	0,0000000024
57,000	-0,07278	0,930	1,173	1,052	1,00	1,50	12,13	12,42	12,160	37	56,108	-0,0000000006	7111	7313	7131,806	-0,0000000559
57,167	-0,18898	0,840	1,084	0,962	0,50	1,00	11,77	12,13	12,103	37	56,064	-0,0000000696	6970	7111	7100,284	-0,0000065859
57,333	-0,30291	0,740	0,995	0,867	0,50	1,00	11,77	12,13	12,035	37	56,011	-0,0000007381	6970	7111	7073,507	-0,0000061142
57,500	-0,41758	0,620	0,912	0,766	0,50	1,00	11,77	12,13	11,961	37	55,954	-0,0000036861	6970	7111	7044,968	-0,0003462500
57,667	-0,53038	0,490	0,819	0,655	0,50	1,00	11,77	12,13	11,881	37	55,892	-0,0000122255	6970	7111	7013,596	-0,0011432671
57,833	-0,64211	0,350	0,714	0,532	0,50	1,00	11,77	12,13	11,793	37	55,822	-0,0000319151	6970	7111	6979,079	-0,0029698411
58,000	-0,75280	0,190	0,616	0,403	0,00	0,50	11,41	11,77	11,700	37	55,748	-0,0000709690	6810	6970	6938,909	-0,0065659697

Sedimenttransport sectie 1 (1800)
(Run 1 - vervolg)

t	u	h(1)	h(2)	h(gem.)	h(a)	h(b)	R(a)	R(b)	R(h)	k	C	s	Bb(a)	Bb(b)	Bb(h)	S
[uren]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m(1/2)/s]	[m2/s]	[m]	[m]	[m]	[m3/s]
58,167	-0,85990	0,030	0,503	0,267	0,00	0,50	11,41	11,77	11,602	37	55,670	-0,0001385925	6810	6970	6895,293	-0,0127418103
58,333	-0,95411	-0,130	0,376	0,123	0,00	0,50	11,41	11,77	11,498	37	55,587	-0,0002341196	6810	6970	6849,298	-0,0213807335
58,500	-1,03300	-0,290	0,235	-0,028	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,389	37	55,499	-0,0003499625	6665	6810	6802,025	-0,0317393867
58,667	-1,09900	-0,470	0,109	-0,180	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,273	37	55,404	-0,0004794412	6665	6810	6757,684	-0,0431988310
58,833	-1,15600	-0,650	-0,028	-0,339	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,152	37	55,305	-0,0006206889	6665	6810	6711,620	-0,0555443796
59,000	-1,19900	0,810	-0,186	-0,498	-0,50	0,00	11,03	11,41	11,032	37	55,204	-0,0007491047	6665	6810	6665,587	-0,0665763043
59,167	-1,22700	-0,960	-0,343	-0,652	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,033	37	55,206	-0,0008406980	6326	6665	6562,185	-0,0735575421
59,333	-1,24700	-1,120	-0,491	-0,805	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,036	37	55,208	-0,0009113579	6326	6665	6457,966	-0,0784735796
59,500	-1,25700	-1,260	-0,649	-0,955	-1,00	-0,50	11,04	11,03	11,039	37	55,211	-0,0009483625	6326	6665	6356,774	-0,0803803533
59,667	-1,25700	-1,390	-0,803	-1,096	-1,50	-1,00	10,92	11,04	11,017	37	55,192	-0,0009493190	6073	6326	6277,209	-0,0794543173
59,833	-1,25400	-1,530	-0,933	-1,232	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,984	37	55,165	-0,0009394298	6073	6326	6208,760	-0,0777692538
60,000	-1,24800	-1,650	-1,076	-1,363	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,953	37	55,139	-0,0009184879	6073	6326	6142,322	-0,0752219772
60,167	-1,23800	-1,770	-1,209	-1,490	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,923	37	55,113	-0,0008834998	6073	6326	6078,313	-0,0716025125
60,333	-1,22400	-1,870	-1,349	-1,610	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,905	37	55,098	-0,0008353443	5796	6073	6012,337	-0,0669649491
60,500	-1,20300	-1,970	-1,463	-1,717	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,890	37	55,086	-0,0007666286	5796	6073	5953,059	-0,0608504743
60,667	-1,17600	-2,040	-1,589	-1,815	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,876	37	55,074	-0,0006848056	5796	6073	5898,767	-0,0538601121
60,833	-1,14900	-2,130	-1,681	-1,906	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,863	37	55,063	-0,0006100779	5796	6073	5848,353	-0,0475726821
61,000	-1,11900	-2,190	-1,787	-1,989	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,852	37	55,053	-0,0005347712	5796	6073	5802,371	-0,0413725453
61,167	-1,08000	-2,240	-1,878	-2,059	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,841	37	55,044	-0,0004480821	5546	5796	5766,500	-0,0344515382
61,333	-1,03900	-2,280	-1,961	-2,121	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,831	37	55,036	-0,0003694143	5546	5796	5735,750	-0,0282515767
61,500	-0,99134	-2,300	-2,037	-2,169	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,823	37	55,029	-0,0002922155	5546	5796	5711,750	-0,0222541552
61,667	-0,93385	-2,300	-2,100	-2,200	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,818	37	55,025	-0,0002168087	5546	5796	5696,000	-0,0164659014
61,833	-0,86478	-2,270	-2,154	-2,212	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,816	37	55,023	-0,0001476583	5546	5796	5690,000	-0,0112023441
62,000	-0,78488	-2,230	-2,173	-2,202	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,818	37	55,025	-0,0000909311	5546	5796	5695,250	-0,0069050025
62,167	-0,69546	-2,180	-2,160	-2,170	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,823	37	55,029	-0,0000496542	5546	5796	5711,000	-0,0037809987
62,333	-0,61529	-2,120	-2,155	-2,138	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,828	37	55,033	-0,0000269085	5546	5796	5727,250	-0,0020548244
62,500	-0,52613	-2,040	-2,135	-2,088	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,836	37	55,040	-0,0000122969	5546	5796	5752,250	-0,0009431309
62,667	-0,43685	-1,970	-2,089	-2,030	-2,50	-2,00	10,77	10,85	10,845	37	55,048	-0,0000048507	5546	5796	5781,250	-0,0003739095
62,833	-0,34535	-1,890	-2,038	-1,964	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,855	37	55,056	-0,0000014971	5796	6073	5815,944	-0,0001160928
63,000	-0,25584	-1,820	-1,969	-1,895	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,865	37	55,065	-0,0000003339	5796	6073	5854,447	-0,0000260828
63,167	-0,17404	-1,750	-1,911	-1,831	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,874	37	55,072	-0,0000000486	5796	6073	5889,903	-0,0000038183
63,333	-0,08894	-1,680	-1,842	-1,761	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,883	37	55,080	-0,0000000017	5796	6073	5928,406	-0,0000001339
63,500	-0,00228	-1,600	-1,781	-1,691	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,893	37	55,089	-0,0000000000	5796	6073	5967,463	-0,0000000000
63,667	0,08792	-1,530	-1,700	-1,615	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,904	48	71,478	0,0000000007	5796	6073	6009,290	0,0000000586
63,833	0,17598	-1,450	-1,631	-1,541	-2,00	-1,50	10,85	10,92	10,914	48	71,489	0,0000000235	5796	6073	6050,563	0,0000018954
64,000	0,27034	-1,360	-1,554	-1,457	-1,50	-1,00	10,92	11,04	10,930	48	71,507	0,0000000209	6073	6326	6094,758	0,0000163221

Totaal sedimenttransport bij vloed: S(vloed) = 0,7361979808 m3/s
Totaal sedimenttransport bij eb: S(eb) = -1,1781928171 m3/s
Netto sedimenttransport: S(netto) = -0,4399948363 m3/s

3.3.3.2 Situatie 2

Zoals blijkt uit de spreadsheets op de vorige twee bladzijden (situatie 1), bestaat er een groot verschil tussen de C -waarden bij eb en vloed (orde van grootte respectievelijk $55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $72 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$). De C -waarde heeft een aanzienlijke invloed op de grootte van het sedimenttransport, want deze zit immers tot de derde macht in de formule van Englund en Hansen:

$$s = \frac{0,084}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} u^5 .$$

Om discontinuïteiten in de bodemruwheid en dus ook in het sedimenttransport te nivelleren, is ervoor gekozen om de berekening uit te voeren met een gemiddelde k -waarde:

$$k_{\text{gem.}} = \frac{k_{\text{vloed}} + k_{\text{eb}}}{2} = \frac{48 + 37}{2} = 42,5 .$$

Ter verduidelijking van de modelresultaten (waarbij is gerekend met de aanname ' $B_i = B_b$ ') volgt hieronder een handmatige berekening van de grootte van de tijdstap (Δt) tussen run 1 en run 2, waarin de getijbeweging in het estuarium constant wordt verondersteld ('frozen tide'). Knoop 5 blijkt wat dat betreft maatgevend te zijn, dus deze knoop is als uitgangspunt genomen. Daarna volgt een uitleg over de bepaling van het nieuwe dwarsprofiel waarmee vervolgens met behulp van DufLOW de waterbeweging in het estuarium wordt gesimuleerd.

Knoop 5 vormt de verbinding tussen de secties 4 en 5. Na de eerste run worden voor deze secties netto sedimenttransporten gevonden van respectievelijk $0,99 \text{ m}^3/\text{s}$ en $0,69 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor de vaklengtes gelden waarden van respectievelijk 9900 m en 9600 m (zie bijlage 3b). De hart-op-hart afstand van beide secties bedraagt dus 9750 m . De snelheid waarmee een morfologische verstoring zich voortplant over de bodem van een waterweg, wordt gegeven door $(5 \cdot s_0)/h_0$. Hierin is s_0 het sedimenttransport per eenheid van breedte en h_0 de gemiddelde diepte. Uitgaande van een gemiddelde stroomvoerende breedte van $\langle B_s \rangle = 5823 \text{ m}$ en een gemiddelde waterdiepte van $h_0 = \langle R(h) \rangle = 7,89 \text{ m}$, gelden voor het sedimenttransport per eenheid van breedte en de voortplantingssnelheid van een verstoring over de bodem:

$$s_0 = \frac{S}{\langle B_s \rangle} = \frac{0,99}{5823} = 1,71 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} = 14,8 \text{ m}^2/\text{dag} ;$$

$$\frac{5 \cdot s_0}{h_0} = \frac{5 \cdot 14,8}{7,89} = 9,3 \text{ m/dag} .$$

De bovengrens van de tijdstap tussen run 1 en run 2 is dus (onder de aanname dat een maand bestaat uit 30 dagen):

$$\Delta t = \frac{9750}{9,3} = 1043 \text{ dagen} \approx 35 \text{ maanden} .$$

Gekozen is voor $\Delta t = 24$ maanden (2 jaar). Het aantal getijcycli (N_T) in deze periode is dan:

$$N_T = \frac{24 \cdot (2 \cdot 360)}{12,5} = 1383 .$$

Op de volgende bladzijde wordt een spreadsheet gegeven van de berekening van de profielverandering per knoop na 1383 cycli. Een minteken staat voor erosie en een plusteken voor sedimentatie. De op de vorige bladzijde beschreven methode voor de bepaling van Δt volstaat indien slechts enkele runs worden gemaakt. Wanneer over een periode van vele jaren wordt gerekend, komt op den duur de stabiliteit van de oplossing in gevaar. Dit probleem kan worden ondervangen door gebruik te maken van het volgende numerieke schema (bron: collegedictaat f10 - Voortgezette rivierwaterbouwkunde):

$$\frac{z_k^{n+1} - z_k^n}{\Delta t} + \frac{s_{k+1}^n - s_k^{n-1}}{2\Delta x} - \frac{1}{4\Delta t} * \left[(\alpha_{k+1}^n + \alpha_k^n)(z_{k+1}^n - z_k^n) - (\alpha_k^n + \alpha_{k-1}^n)(z_k^n - z_{k-1}^n) \right] = 0.$$

Bij de in deze paragraaf beschouwde situatie is geen gebruik gemaakt van dit schema, aangezien het voornemen bestond om eerst het gedrag van het model gedurende ten hoogste vijf tijdstappen te beschouwen en te analyseren. Uit de modelresultaten (zie hieronder) blijkt echter dat reeds bij run 3 ebgedomineerde sedimenttransporten voor sectie 1 optreden.

De bepaling van het nieuwe dwarsprofiel van een knoop gebeurt als volgt. Ten eerste wordt vastgesteld hoeveel m³ zand er bij iedere knoop sedimenteert of erodeert. Dit gebeurt door het verschil in sedimenttransport tussen de twee aanliggende secties te bepalen. Vervolgens wordt deze hoeveelheid gedeeld door de hart-op-hart afstand van deze secties. Dan is bekend met hoeveel m² het dwarsprofiel van een knoop verruimt of vernauwt. Tenslotte wordt de aldus berekende oppervlakte evenredig verdeeld naar de diepte, waarbij als bovengrens de hoogwaterstand is aangehouden. Bijlage 5 toont ter verduidelijking hiervan een handmatige berekening van het dwarsprofiel van knoop 2 (1802).

Modelresultaten:

Run	Jaar	Sectie 1	Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	Sectie 5	Sectie 6
1	1800	+0,29	+0,49	+0,21	+0,99	+0,68	+0,003
2	1802	+0,16	+0,37	+0,13	+0,57	+0,42	+0,001
3	1803	-0,02	+0,21	+0,09	+0,17	+0,32	+0,001

Tabel 3.4: netto sedimenttransporten [m³/s] bij $k_{vloed} = k_{eb} = 42,5$ en ' $B_s = B_b$ '

Bij de derde run vertoont sectie 1 een ebgedomineerd sedimenttransport. Het is opvallend dat de grootte van de transporten in de loop van de tijd afneemt. Hoewel het aantal waarnemingen gering is, lijkt er voor alle secties een trend te bestaan om naar nul te naderen en wellicht negatief (ebgedomineerd) te worden. Er kan dus geconcludeerd worden dat het rekenen met een gemiddelde k -waarde niet heeft geleid tot een verbetering van het uiteindelijke resultaat. Het in de eerste run berekende transport voor sectie 4 (0,99 m³/s, ofwel ca. $30 \cdot 10^6$ m³/jaar) lijkt aan de hoge kant te zijn. Het transport voor sectie 1 lijkt daarentegen te laag. Waarnemingen uit het verleden wijzen immers op een aanzienlijke sedimentimport vanuit het mondingsgebied. Het is dus merkwaardig dat juist dáár uiteindelijk ebgedomineerde sedimenttransporten worden berekend. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 3.3.4.

Profielveranderingen sectie 1 t/m 6 (1800)

(Na run 1)

Sectie	S [m ³ /s]	Getijcyclus [s]	Totaaltransport [m ³ /getij]	Verschiltransport [m ³ /getij]	Vaklengte [m]	Profielverandering per getijcyclus [m ²]	Profielverandering na 1728 getijcycli [m ²]
1	0,2845011987	45000	12802,554	-9248,223	12900	-0,716916501	-991,495520787
2	0,4900172623	45000	22050,777	12493,235	13300	0,939340944	1299,108525739
3	0,2123898277	45000	9557,542	-35191,521	11200	-3,142100096	-4345,524432929
4	0,9944236294	45000	44749,063	13632,243	9750	1,398178791	1933,681268272
5	0,6914848913	45000	31116,820	30981,100	9483	3,267014678	4518,281300042
6	0,0030159981	45000	135,720				

3.3.3.3 Situatie 3

De eerste twee onderzochte situaties leidden al in een vroeg stadium tot onrealistische resultaten in de zin van ebgedomineerde sedimenttransporten. Bij het derde beschouwde geval is de aanname ' $B_s=B_b$ ' komen te vervallen. De stroomvoerende breedte is vanaf situatie 3 gedefinieerd als het quotiënt van de gemiddelde natte doorsnede van een sectie en de daarbij behorende gemiddelde diepte. Aangezien de breedte van de Westerschelde zeer groot is ten opzichte van de diepte, is voor de gemiddelde diepte de waarde van de hydraulische straal aangehouden. In het vakgebied van de rivierwaterbouwkunde is dit een algemeen bekende aanname. Bij deze situatie zijn de ruwheidsparementers weer ingesteld op de oorspronkelijke waarden: $k_{vloed}=48$ en $k_{eb}=37$. Op de bladzijden 58 en 59 zijn de resultaten weergegeven van de berekening voor sectie 1. Ter verduidelijking volgt hieronder een handmatige berekening van de stroomvoerende breedte op het tijdstip $t=52,167$ uur. Voor de berekening van $h_{gem.}$, R en C wordt verwezen naar paragraaf 3.3.3.1.

De natte doorsnede, behorend bij de door Duflow berekende waterstand in de knopen 1 en 2, wordt gevonden door lineaire interpolatie in de bodemschematisatie van bijlage 3b:

$$A(h_1) = 69761 + \frac{(71874 - 69761) * (1,50 - 1,01)}{0,50} = 71832 \text{ m}^2 ;$$

$$A(h_2) = 34498 + \frac{(36866 - 34498) * (1,50 - 1,19)}{0,50} = 35966 \text{ m}^2 .$$

Dan geldt voor de gemiddelde natte doorsnede:

$$A(h_{gem.}) = \frac{A(h_1) + A(h_2)}{2} = \frac{71832 + 35966}{2} = 53899 \text{ m}^2 .$$

Vervolgens kan de stroomvoerende breedte worden berekend:

$$B_s = \frac{A_{gem.}}{R_{gem.}} = \frac{53899}{11,02} = 4893 \text{ m} .$$

Opmerking: onder de aanname ' $B_s=B_b$ ' werd gerekend met een stroomvoerende breedte van $B_s=6275$ m. De nu berekende waarde is een factor 1,28 kleiner, hetgeen een realistischer beeld te zien geeft.

Tenslotte kan op de in paragraaf 3.3.3.1. gedemonstreerde wijze het sedimenttransport gedurende het beschouwde tijdsinterval van 10 minuten worden berekend. Voor het resultaat hiervan wordt verwezen naar het spreadsheet op blz. 58.

Modelresultaten:

Run	Jaar	Sectie 1	Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	Sectie 5	Sectie 6
1	1800	-0,38	-0,26	+0,01	+0,11	+0,049	-0,01

Tabel 3.5: netto sedimenttransporten [m^3/s] bij $k_{vloed}=48$, $k_{eb}=37$ en $B_s=A_{gem.}/R_{gem.}$

Evenals bij situatie 1 worden reeds na de eerste run ebgedomineerde sedimenttransporten gevonden. De hier gedane aanname omtrent de definitie van de stroomvoerende breedte heeft (kwalitatief) dus geen effect gehad op het uiteindelijke resultaat. Voorts valt op dat de bij situatie 3 berekende sedimenttransporten in alle gevallen kleiner zijn dan bij situatie 1. Dit wordt veroorzaakt door de veronderstelling dat het transport van sediment alleen optreedt in het stroomvoerende deel van een sectie. Een kleinere B_s impliceert automatisch een kleiner sedimenttransport.

Sedimenttransport sectie 1 (1800)
(Run 1)

t	u	h(1)	h(2)	h(gem.)	h(a)	h(b)	h(a)	h(b)	h(h)	C	s	h(1a)	h(1b)	A(1a)	A(1b)	A(1(h))	h2(a)	h2(b)	A2(a)	A2(b)	A2(h2)	A(h)	Qs	Q
[uren]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m(1/2)/s]	[m2/s]	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m2]	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m2]	[m2]	[m]	[m3/s]
51.500	0.20708	1.380	1.527	1.444	1.50	1.00	10.92	11.04	10.934	71.510	0.0000000530	1.50	1.00	89781	71874	70352.640	2.00	1.50	32131	34498	34370.182	52381.411	4788.054	0.0000033816
51.667	0.29285	1.270	1.485	1.388	1.50	1.00	10.92	11.04	10.952	71.530	0.0000002983	1.50	1.00	89781	71874	70732.980	1.50	1.00	34498	36886	34663.780	52686.370	4811.848	0.0000182035
51.833	0.38244	1.180	1.367	1.279	1.50	1.00	10.92	11.04	10.973	71.553	0.0000011358	1.50	1.00	89781	71874	71071.080	1.50	1.00	34498	36886	35127.868	53089.474	4836.032	0.0000732815
52.000	0.46235	1.100	1.284	1.192	1.50	1.00	10.92	11.04	10.994	71.576	0.0000028304	1.50	1.00	89781	71874	71451.400	1.50	1.00	34498	36886	35520.978	53486.188	4865.070	0.0001800888
52.167	0.53632	1.010	1.190	1.100	1.50	1.00	10.92	11.04	11.018	71.600	0.0000081483	1.50	1.00	89781	71874	71831.740	1.50	1.00	34498	36886	35968.180	53896.850	4892.788	0.0004010988
52.333	0.60082	0.910	1.107	1.008	1.50	1.00	10.92	11.04	11.038	71.624	0.0000108193	1.50	1.00	89781	74017	72259.740	1.50	1.00	34498	36886	36358.248	54308.484	4920.247	0.0007087842
52.500	0.65951	0.820	1.000	0.910	1.00	0.50	11.04	11.03	11.038	71.624	0.0000172705	1.00	0.50	71874	74017	72845.480	1.00	0.50	36886	39339	36867.237	54756.358	4960.825	0.0011422972
52.667	0.71384	0.710	0.906	0.808	1.00	0.50	11.04	11.03	11.038	71.622	0.0000258232	1.00	0.50	71874	74017	73116.940	1.00	0.50	36886	39339	37331.518	55224.228	5003.838	0.0017085588
52.833	0.76252	0.610	0.793	0.702	1.00	0.50	11.04	11.03	11.034	71.619	0.0000358891	1.00	0.50	71874	74017	73545.540	1.00	0.50	36886	39339	37888.140	55716.840	5049.544	0.0024028488
53.000	0.81216	0.480	0.688	0.590	1.00	0.50	11.04	11.03	11.032	71.617	0.0000489250	0.50	0.00	74017	78180	74102.720	1.00	0.50	36886	39339	38354.004	56228.362	5086.938	0.0033248047
53.167	0.86880	0.340	0.574	0.457	0.50	0.00	11.03	11.41	11.063	71.650	0.0000888353	0.50	0.00	74017	78180	74702.760	1.00	0.50	36886	39339	38874.035	56838.387	5137.814	0.0047155079
53.333	0.93384	0.170	0.443	0.307	0.50	0.00	11.03	11.41	11.177	71.773	0.0000975848	0.50	0.00	74017	78180	75431.380	0.50	0.00	39339	41812	39618.845	57525.112	5146.786	0.0068866487
53.500	1.01100	0.020	0.284	0.132	0.50	0.00	11.03	11.41	11.310	71.914	0.0001444372	0.00	0.50	78180	78348	76247.520	0.50	0.00	39339	41812	40405.704	58328.612	5157.286	0.0098320555
53.667	1.08800	0.240	0.130	0.055	0.00	0.50	11.41	11.77	11.450	72.082	0.0002148942	0.00	0.50	78180	78348	77210.240	0.50	0.00	39339	41812	41187.784	59188.012	5168.567	0.0148148679
53.833	1.20800	0.510	0.046	0.278	0.00	0.50	11.41	11.77	11.610	72.230	0.0003486225	0.50	1.00	78348	80536	78391.780	0.00	0.50	41812	44434	42055.638	60223.888	5187.081	0.0241111081
54.000	1.33100	0.780	0.300	0.530	0.50	1.00	11.77	12.13	11.782	72.418	0.0005394353	0.50	1.00	78348	80536	79485.780	0.00	0.50	41812	44434	43385.305	61435.532	5210.107	0.0388828050
54.167	1.43800	1.010	0.553	0.782	0.50	1.00	11.77	12.13	11.873	72.601	0.0008115814	1.00	1.50	80536	82784	80580.980	0.50	1.00	44434	47057	44713.035	62846.987	5232.488	0.0588195863
54.333	1.50100	1.220	0.786	1.009	1.00	1.50	12.13	12.42	12.135	72.784	0.0010058292	1.00	1.50	80536	82784	81525.120	0.50	1.00	44434	47057	45886.828	63781.975	5254.254	0.0704651023
54.500	1.52400	1.380	1.025	1.203	1.00	1.50	12.13	12.42	12.247	72.878	0.0010803093	1.00	1.50	80536	82784	82244.480	1.00	1.50	47057	49889	47196.600	64721.540	5284.491	0.0781184680
54.667	1.50500	1.500	1.222	1.381	1.00	1.50	12.13	12.42	12.338	72.966	0.0010106389	1.00	1.50	80536	82784	82784.000	1.00	1.50	47057	49889	48314.408	65549.204	5312.198	0.0715889819
54.833	1.44500	1.570	1.386	1.483	1.00	1.50	12.13	12.42	12.410	73.036	0.0008224264	1.50	2.00	82784	85032	83098.720	1.00	1.50	47057	49889	49299.844	66199.332	5334.294	0.0584941836
55.000	1.35100	1.610	1.509	1.580	1.50	2.00	12.42	12.57	12.408	73.063	0.0005888812	1.50	2.00	82784	85032	83278.580	1.50	2.00	49889	52722	49639.994	66809.277	5355.368	0.0418062071
55.167	1.23800	1.620	1.580	1.600	1.50	2.00	12.42	12.57	12.450	73.075	0.0003805555	1.50	2.00	82784	85032	83323.520	1.50	2.00	49889	52722	50342.280	66832.900	5368.104	0.0272381542
55.333	1.11700	1.600	1.631	1.616	1.50	2.00	12.42	12.57	12.455	73.080	0.0002285828	1.50	2.00	82784	85032	83233.600	1.50	2.00	49889	52722	50631.248	66832.423	5374.081	0.0182364080
55.500	0.98383	1.580	1.651	1.606	1.50	2.00	12.42	12.57	12.452	73.077	0.0001201858	1.50	2.00	82784	85032	83053.780	1.50	2.00	49889	52722	50744.566	66889.183	5372.715	0.0088086640
55.667	0.85137	1.520	1.638	1.578	1.50	2.00	12.42	12.57	12.444	73.068	0.0000583127	1.50	2.00	82784	85032	82873.920	1.50	2.00	49889	52722	50670.908	66772.414	5365.961	0.0041720486
55.833	0.71619	1.450	1.608	1.529	1.50	2.00	12.42	12.57	12.428	73.054	0.0000245798	1.00	1.50	80536	82784	82559.200	1.50	2.00	49889	52722	50500.828	66530.084	5352.938	0.0017543087
56.000	0.59585	1.400	1.581	1.481	1.00	1.50	12.13	12.42	12.408	73.033	0.0000087880	1.00	1.50	80536	82784	82334.400	1.50	2.00	49889	52722	50234.828	66284.513	5341.782	0.0008972102
56.167	0.48158	1.340	1.509	1.425	1.00	1.50	12.13	12.42	12.378	73.003	0.0000033881	1.00	1.50	80536	82784	82084.840	1.50	2.00	49889	52722	49939.994	66002.317	5332.868	0.0002407713
56.333	0.37206	1.270	1.459	1.385	1.00	1.50	12.13	12.42	12.341	72.988	0.0000009333	1.00	1.50	80536	82784	81748.920	1.00	1.50	47057	49889	48856.778	65703.348	5323.812	0.0000862506
56.500	0.26801	1.200	1.392	1.298	1.00	1.50	12.13	12.42	12.302	72.928	0.0000001746	1.00	1.50	80536	82784	81435.200	1.00	1.50	47057	49889	48277.288	65356.244	5312.798	0.0000123713
56.667	0.15876	1.110	1.327	1.219	1.00	1.50	12.13	12.42	12.257	72.885	0.0000000124	1.00	1.50	80536	82784	81030.580	1.00	1.50	47057	49889	48808.128	64868.844	5300.749	0.0000008788
56.833	0.04534	1.030	1.247	1.139	1.00	1.50	12.13	12.42	12.210	72.838	0.0000000000	1.00	1.50	80536	82784	80670.880	1.00	1.50	47057	49889	48456.008	64563.444	5287.808	0.0000000018
57.000	-0.07278	0.830	1.173	1.052	1.00	1.50	12.13	12.42	12.160	56.108	0.0000000008	0.50	1.00	78348	80536	80228.880	1.00	1.50	47057	49889	48036.872	64133.278	5274.174	0.0000000413
57.167	-0.18898	0.840	1.084	0.982	0.50	1.00	11.77	12.13	12.103	56.064	0.0000000698	0.50	1.00	78348	80536	79835.840	1.00	1.50	47057	49889	47532.778	63684.308	5262.018	0.0000048808
57.333	-0.30291	0.740	0.985	0.887	0.50	1.00	11.77	12.13	12.035	56.011	0.0000000786	0.50	1.00	78348	80536	79388.240	0.50	1.00	44434	47057	47029.354	63213.787	5252.714	0.0000518841
57.500	-0.41758	0.620	0.912	0.788	0.50	1.00	11.77	12.13	11.961	55.954	0.0000038861	0.50	1.00	78348	80536	78873.120	0.50	1.00	44434	47057	46583.728	62733.423	5244.852	0.0002577670
57.667	-0.53038	0.480	0.819	0.655	0.50	1.00	11.77	12.13	11.881	55.882	0.0000122255	0.00	0.50	78180	78348	78304.240	0.50	1.00	44434	47057	46108.471	62206.355	5235.849	0.0008534488
57.833	-0.64211	0.350	0.714	0.532	0.50	1.00	11.77	12.13	11.793	55.822	0.0000319151	0.00	0.50	78180	78348	77881.600	0.50	1.00	44434	47057	45558.880	61825.145	5225.480	0.0022388279
58.000	-0.75280	0.180	0.618	0.403	0.00	0.50	11.41	11.77	11.700	55.748	0.0000708880	0.00	0.50	78180	78348	76981.440	0.50	1.00	44434	47057	45040.857	61016.148	5215.035	0.0049347478

Sedimenttransport sectie 1 (1800)
(Run 1 - vervolg)

t	u	h(1)	h(2)	h(gem.)	h(a)	h(b)	R(a)	R(b)	R(h)	C	a	h1(a)	h1(b)	A1(a)	A1(b)	A1(h1)	h2(a)	h2(b)	A2(a)	A2(b)	A2(h2)	A(h)	Be	S
[uren]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m(1/2)/s]	[m2/s]	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m2]	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m2]	[m2]	[m]	[m3/s]
58.167	0.85890	0.030	0.503	0.267	0.00	0.50	11.41	11.77	11.602	55.670	0.0001365925	0.00	0.50	76160	76348	76291.280	0.50	1.00	44434	47007	44450.156	60370.719	5203.516	0.0086155784
58.333	0.95411	0.130	0.378	0.123	0.00	0.50	11.41	11.77	11.498	55.587	0.0002341196	0.50	0.00	74017	76160	75602.820	0.00	0.50	41812	44434	43781.899	58682.258	5191.345	0.0162002758
58.500	1.03300	0.290	0.235	0.028	0.50	0.00	11.03	11.41	11.389	55.498	0.0003498625	0.50	0.00	74017	76160	74917.080	0.00	0.50	41812	44434	43044.340	58980.700	5178.687	0.0241846675
58.667	1.08900	0.470	0.109	0.180	0.50	0.00	11.03	11.41	11.273	55.404	0.0004794412	0.50	0.00	74017	76160	74145.580	0.00	0.50	41812	44434	42364.645	58285.112	5188.802	0.0330405450
58.833	1.15600	0.650	0.028	0.339	0.50	0.00	11.03	11.41	11.152	55.305	0.0006206869	1.00	0.50	71874	74017	73374.100	0.50	0.00	38338	41812	41671.136	57522.819	5157.972	0.0428886141
59.000	1.19900	0.810	-0.186	0.498	-0.50	0.00	11.03	11.41	11.032	55.204	0.0007491047	1.00	-0.50	71874	74017	72686.340	0.50	0.00	38338	41812	40862.281	56780.316	5147.988	0.0514185048
59.167	1.22700	-0.860	-0.343	-0.652	1.00	-0.50	11.04	11.03	11.033	55.206	0.0008406980	1.00	-0.50	71874	74017	72045.440	0.50	0.00	38338	41812	40114.068	56079.784	5082.886	0.0589757463
59.333	1.24700	-1.120	-0.491	0.805	-1.00	-0.50	11.04	11.03	11.036	55.208	0.0009113579	1.50	-1.00	69781	71874	71366.880	0.50	0.00	38338	41812	39384.899	55375.889	5017.701	0.0609722918
59.500	1.25700	-1.280	-0.649	0.955	-1.00	-0.50	11.04	11.03	11.039	55.211	0.0009483625	1.50	-1.00	69781	71874	70775.240	1.00	-0.50	38966	38338	38900.858	54688.089	4954.040	0.0626430041
59.667	1.25700	-1.380	-0.803	-1.098	-1.50	-1.00	10.92	11.04	11.017	55.182	0.0009493190	1.50	-1.00	69781	71874	70225.880	1.00	-0.50	38966	38338	37841.104	54033.482	4904.818	0.0620806304
59.833	1.25400	-1.530	-0.933	-1.232	-1.50	-1.00	10.92	11.04	10.994	55.185	0.0009394298	2.00	-1.50	67848	69781	69634.220	-1.00	-0.50	38966	38338	37195.404	53414.812	4862.782	0.0609100215
60.000	1.24800	-1.650	-1.076	-1.383	-1.50	-1.00	10.92	11.04	10.953	55.139	0.0009184679	2.00	-1.50	67848	69781	69127.100	-1.50	-1.00	34498	38966	36506.064	52818.582	4822.164	0.0590546538
60.167	1.23800	-1.770	-1.209	-1.490	-1.50	-1.00	10.92	11.04	10.923	55.113	0.0008934986	2.00	-1.50	67848	69781	68619.980	-1.50	1.00	34498	38966	35878.176	52248.078	4783.519	0.0563486380
60.333	1.22400	-1.870	-1.348	-1.610	-2.00	1.50	10.85	10.92	10.905	55.086	0.0008353443	2.00	-1.50	67848	69781	68187.380	-1.50	1.00	34498	38966	35213.136	51705.258	4741.570	0.0528112455
60.500	1.20300	-1.970	-1.463	-1.717	-2.00	1.50	10.85	10.92	10.880	55.086	0.0007966286	2.00	1.50	67848	69781	67774.780	-1.50	1.00	34498	38966	34673.232	51224.006	4703.889	0.0480819203
60.667	1.17800	-2.040	-1.589	-1.815	-2.00	1.50	10.85	10.92	10.878	55.074	0.0008848056	2.50	-2.00	65550	67848	67480.180	2.00	-1.50	32131	34498	34078.674	50778.417	4688.863	0.0426301801
60.833	1.14800	-2.130	-1.681	-1.908	-2.00	1.50	10.85	10.92	10.863	55.063	0.0006100779	2.50	2.00	65550	67848	67102.320	2.00	-1.50	32131	34498	33641.146	50371.633	4638.911	0.0377183833
61.000	1.11900	-2.180	-1.787	-1.989	-2.00	1.50	10.85	10.92	10.852	55.053	0.0005347712	2.50	2.00	65550	67848	66850.780	2.00	-1.50	32131	34498	33138.342	49995.051	4607.155	0.0328503186
61.167	1.08000	-2.240	-1.878	-2.058	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.841	55.044	0.0004480821	2.50	2.00	65550	67848	66640.980	2.00	1.50	32131	34498	32708.548	49674.754	4582.305	0.0273786518
61.333	1.03900	-2.280	-1.961	-2.121	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.831	55.036	0.0003684143	2.50	2.00	65550	67848	66473.120	2.00	-1.50	32131	34498	32315.626	49384.373	4560.561	0.0224632518
61.500	0.99134	-2.300	-2.037	-2.188	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.823	55.029	0.0002922155	2.50	2.00	65550	67848	66389.200	2.50	2.00	30227	32131	31960.104	49189.852	4544.802	0.0177078734
61.667	0.93385	-2.300	-2.100	-2.200	-2.50	-2.00	10.77	10.85	10.818	55.025	0.0002168087	2.50	2.00	65550	67848	66389.200	2.50	-2.00	30227	32131	31750.200	49068.700	4535.931	0.0131123829
61.833	0.86478	-2.270	-2.154	-2.212	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.816	55.023	0.0001476563	2.50	2.00	65550	67848	66315.080	2.50	2.00	30227	32131	31544.568	49029.824	4533.049	0.0089245856
62.000	0.78498	-2.230	-2.173	-2.202	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.818	55.025	0.0000808311	2.50	2.00	65550	67848	66882.920	2.50	2.00	30227	32131	31472.216	49077.588	4536.758	0.0055004312
62.167	0.69248	-2.180	-2.160	-2.170	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.823	55.029	0.0000496542	2.50	2.00	65550	67848	66892.720	2.50	2.00	30227	32131	31521.720	49207.220	4548.626	0.0030101183
62.333	0.61529	-2.120	-2.155	-2.138	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.828	55.033	0.0000289085	2.50	2.00	65550	67848	67144.480	2.50	2.00	30227	32131	31540.780	49342.820	4556.947	0.0016348426
62.500	0.52613	-2.040	-2.135	-2.088	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.836	55.040	0.0000122989	2.50	2.00	65550	67848	67480.180	2.50	2.00	30227	32131	31816.920	49548.540	4572.586	0.0007477148
62.667	0.43685	-1.970	-2.069	-2.030	-2.50	2.00	10.77	10.85	10.845	55.048	0.0000048507	2.00	1.50	67848	69781	67774.780	2.50	2.00	30227	32131	31782.088	49783.434	4580.332	0.0002868854
62.833	0.34535	-1.890	-2.036	-1.964	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.855	55.058	0.0000014971	2.00	1.50	67848	69781	68112.880	2.50	2.00	30227	32131	31986.296	50048.578	4610.723	0.0000920352
63.000	0.25584	-1.820	-1.969	-1.895	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.865	55.065	0.0000003339	2.00	1.50	67848	69781	68408.680	2.00	-1.50	32131	34498	32277.754	50343.217	4633.820	0.0000208279
63.167	-0.17404	-1.750	-1.911	-1.831	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.874	55.072	0.0000000486	2.00	1.50	67848	69781	68704.500	2.00	-1.50	32131	34498	32552.328	50628.413	4656.030	0.0000030184
63.333	0.08894	-1.680	-1.842	-1.761	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.883	55.080	0.0000000017	2.00	-1.50	67848	69781	69000.320	2.00	-1.50	32131	34498	32878.972	50938.646	4680.464	0.0000001057
63.500	0.00228	-1.600	-1.781	-1.691	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.893	55.089	0.0000000000	2.00	-1.50	67848	69781	69338.400	2.00	-1.50	32131	34498	33167.746	51253.073	4704.966	0.0000000000
63.667	0.06782	-1.530	-1.700	-1.615	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.904	71.478	0.0000000007	2.00	-1.50	67848	69781	69634.220	2.00	-1.50	32131	34498	33551.200	51592.710	4731.563	0.0000000462
63.833	0.17598	-1.450	-1.631	-1.541	-2.00	-1.50	10.85	10.92	10.914	71.488	0.0000000235	1.50	1.00	69781	71874	69972.300	2.00	-1.50	32131	34498	33877.646	51925.073	4757.514	0.0000014903
64.000	0.27034	-1.380	-1.554	-1.457	-1.50	-1.00	10.92	11.04	10.930	71.507	0.0000002008	1.50	1.00	69781	71874	70352.640	2.00	-1.50	32131	34498	34242.364	52287.502	4784.627	0.0000128130

Totaal sedimenttransport bij vloed: S(vloed) = 0.5433924861 m3/s
Totaal sedimenttransport bij eb: S(eb) = 0.9194282199 m3/s
Netto sedimenttransport: S(netto) = -0.3760357319 m3/s

3.3.3.4 Situatie 4

Bij het vierde beschouwde geval is - evenals bij situatie 2 - gerekend met een gemiddelde waarde voor de ruwheidsparemeters: $k_{vloed} = k_{eb} = 42,5$. Voor de stroomvoerende breedte is $B_s = A_{gem.} / R_{gem.}$ aangehouden.

Modelresultaten:

Run	Jaar	Sectie 1	Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	Sectie 5	Sectie 6
1	1800	+0,18	+0,27	+0,16	+0,37	+0,20	+0,00
2		+0,15	+0,25	+0,13	+0,32	+0,28	+0,01
3	1805	+0,11	+0,22	+0,10	+0,22	+0,34	+0,01
4		+0,07	+0,18	+0,09	+0,15	+0,31	+0,01
5	1808	+0,03	+0,15	+0,08	+0,10	+0,25	+0,02
6	1810	+0,03	+0,15	+0,09	+0,09	+0,20	+0,02
7	1813	+0,02	+0,17	+0,11	+0,13	+0,25	+0,02
8	1815	+0,02	+0,14	+0,10	+0,09	+0,20	+0,02
9	1818	-0,03	+0,08	+0,08	+0,05	+0,11	+0,01

Tabel 3.6: netto sedimenttransport [m^3/s] bij $k_{vloed} = k_{eb} = 42,5$ en $B_s = A_{gem.} / R_{gem.}$.

Van de in totaal vier beschouwde gevallen kunnen bij deze laatste analyse de meeste tijdstappen worden gemaakt voordat ebgedomineerde sedimenttransporten optreden. Pas bij stap 9 (1818) geeft sectie 1 een negatief transport te zien. Deze sectie vertoont bij de daaraan voorafgaande runs echter wel een duidelijke tendens in die richting. Opmerkelijk is dat opnieuw bij sectie 1 (als eerste) een ebgedomineerd sedimenttransport optreedt. Mogelijke oorzaken hiervan komen aan de orde in paragraaf 3.3.4. Voor enkele secties lijkt sprake te zijn van een trendbreuk in de grootte van het netto sedimenttransport. De reden hiervan is onduidelijk: bij alle berekeningen zijn dezelfde basisspreadsheets gebruikt, met dezelfde formules. Het aldus verkregen beeld van sedimentatie en erosie komt vooral gedurende de eerste runs kwalitatief goed overeen met wat men vooraf zou verwachten: vrij sterke sedimentatie in het oostelijke deel van de Westerschelde en enkele profielverruimingen elders in het estuarium. Knoop 6 vertoont echter een extreem grote vraag naar zand. Ten gevolge hiervan wordt de aanvankelijke sedimentatie in knoop 5 reeds na de tweede run omgezet in erosie, waardoor deze knoop gaat fungeren als 'zandleverancier' voor knoop 6. Tabel 3.7 toont de profielveranderingen per getijcyclus van de knopen 5 en 6. Een minteken staat voor erosie en een plusteken voor sedimentatie. Voor run 9 is geen berekening meer gemaakt, aangezien toen al een ebgedomineerd sedimenttransport was geconstateerd voor sectie 1. Volledigheidshalve zijn nog wel transporten berekend voor de overige secties (zie tabel 3.6).

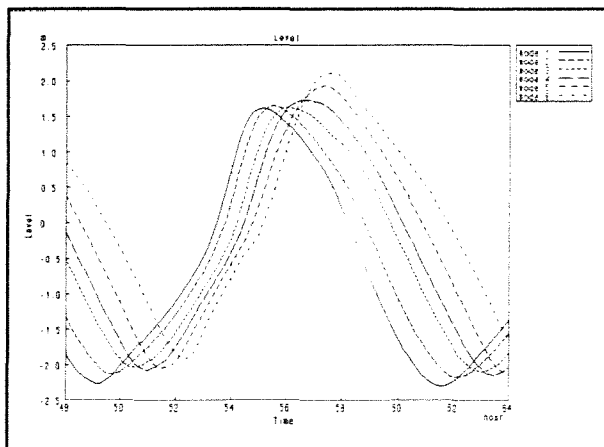
Run	Jaar	Knoop 5	Knoop 6
1	1800	+0,80	+0,92
2		+0,21	+1,28
3	1805	-0,54	+1,55
4		-0,73	+1,40

Run	Jaar	Knoop 5	Knoop 6
5	1810	-0,68	+1,10
6	1813	-0,50	+0,85
7	1815	-0,57	+1,13
8	1818	-0,53	+0,84

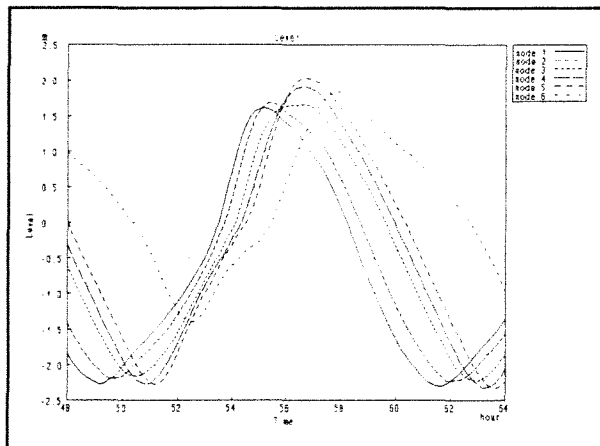
Tabel 3.7: profielveranderingen per getijcyclus [m^2] van de knopen 5 en 6

De figuren 3.5, 3.6 en 3.7 op deze en de volgende bladzijde tonen het verloop van de waterstand in de knopen 1 tot en met 6 voor respectievelijk de jaren 1800, 1808 en 1815. De waterstand in knoop 1 is in alle gevallen gelijk, omdat het dwarsprofiel van deze meest zeewaarts gelegen knoop steeds constant is gehouden. Dit is een noodzakelijke aanname, aangezien vanwege de aard van de modeldefinitie in DufLOW niet kan worden beschikt over de benodigde invoergegevens (stroomsnelheden) voor deze knoop: knoop 1 vormt namelijk de rand van het model.

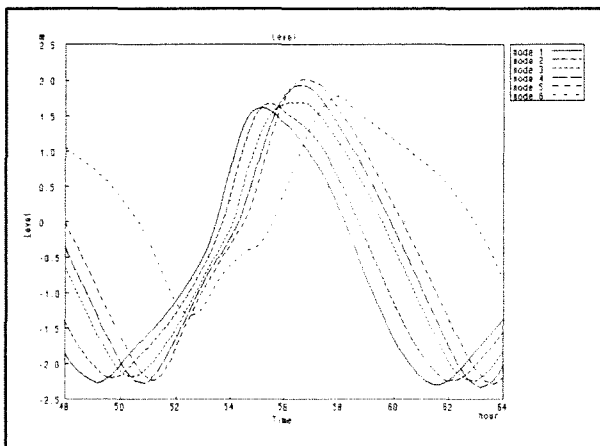
Met name de waterstand in knoop 6 wijkt na enige jaren opmerkelijk af ten opzichte van de basissituatie (1800). Dit hangt samen met de extreme sedimentatie in dit gedeelte van de Westerschelde. Door de hiermee gepaard gaande profielvernauwing neemt de gemiddelde diepte af. Hierdoor neemt ook de C -waarde af ($C = k \cdot R^{1/6}$). Een kleinere C -waarde betekent een grotere bodemruwheid. De DufLOW-resultaten geven een duidelijke verandering te zien van het verloop van de stroomsnelheden (zie de figuren 3.8, 3.9 en 3.10). De invloed van de stroomsnelheid op het sedimenttransport is aanzienlijk: deze zit immers tot de vijfde macht in de sedimenttransportformule van Englund en Hansen. Het gebied nabij knoop 6 fungeert als het ware als een grote zandvang. Deze ontwikkeling heeft een merkbare invloed op de waterbeweging in het estuarium. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 3.3.4. De figuren laten zien dat de getijgolf in knoop 6 na verloop van tijd duidelijk vervormt ten opzichte van de overige knopen.



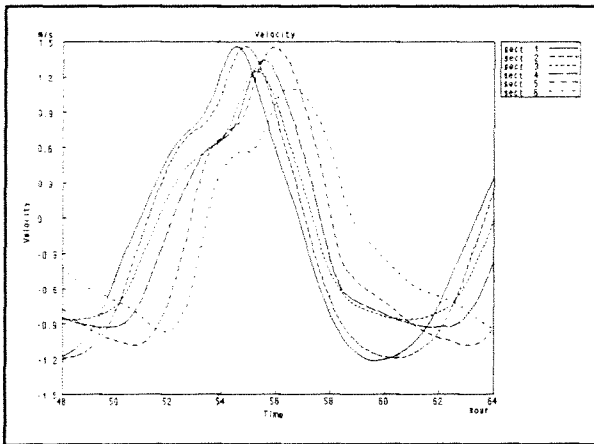
Figuur 3.5: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1800)



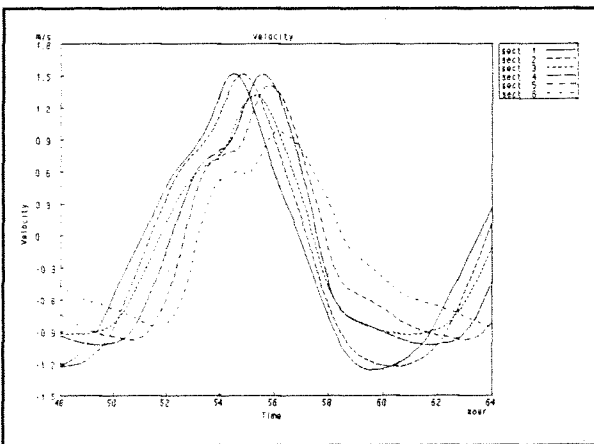
Figuur 3.6: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1808)



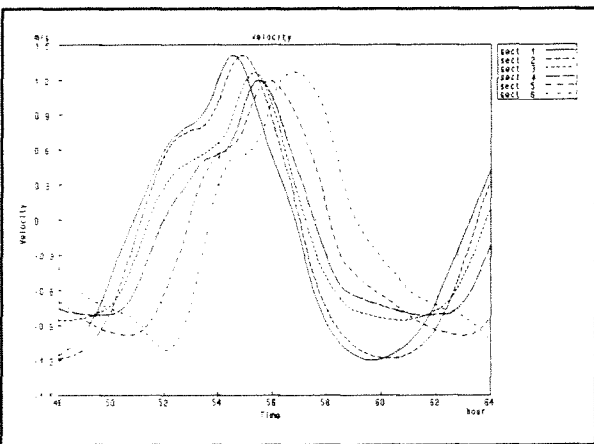
Figuur 3.7: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1815)



Figuur 3.8: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 6 (1800)



Figuur 3.9: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 6 (1808)



Figuur 3.10: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 6 (1815)

3.3.4 Interpretatie modelresultaten en conclusie

Bij alle uitgevoerde sedimenttransportberekeningen voor de Westerschelde anno 1800 worden na korte of langere tijd netto ebgedomineerde transporten gevonden. Enkele 'snelle' berekeningen voor 1650 geven hetzelfde resultaat. In alle gevallen is afwisselend gevarieerd met de bodemruwheid (k_{vloed} en k_{eb}) en de definitie van de stroomvoerende breedte (B_s). Het is algemeen bekend dat getijdebekkens op den duur neigen naar verlanding. Op grond hiervan kan worden geconcludeerd dat de verkregen modelresultaten geen betrouwbare benadering zijn van de werkelijkheid. In deze paragraaf wordt een aantal mogelijke oorzaken hiervan besproken.

Een kritische opmerking aangaande de toepassing van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen is op zijn plaats. Deze formule is oorspronkelijk afgeleid voor stationaire stroming. Bij rivieren is in het algemeen sprake van (stationaire) stroming in één richting, onder een bepaald (bodem-)verhang. Bij estuaria ligt dit anders: door de invloed van het getij vindt afwisselend stroming plaats in twee richtingen, waardoor in de meeste gevallen geen eenduidig bodemverhang kan worden gedefinieerd. Bij toepassing van deze transportformule op een willekeurige situatie, moeten soms de constanten in de formule enigszins worden aangepast. Bij dit afstudeeronderzoek is echter gewerkt met de 'basisvorm' zoals die wordt gehanteerd bij het college f8 - Rivierwaterbouwkunde.

Vakindeling en bodemschematisatie:

De waterbeweging in de Westerschelde en de Schelde-rivier is goed weer te geven met behulp van Duflow en een zeer eenvoudige schematisatie van de geometrie in slechts 12 vakken (Westerschelde: 5 vakken, Schelde-rivier: 7 vakken). Voor sedimenttransportberekeningen is deze schematisatie waarschijnlijk te grof, aangezien de morfologie van de Westerschelde tamelijk complex is (eb-, vloed- en kortsluitgeulen, al dan niet bij laagwater droogvallende platen). Per sectie is een natte geuldoorsnede gedefinieerd voor zowel de begin- als de eindknoop ervan. Twee doorsneden worden dus representatief gesteld voor een vaklengte van ca. 10 kilometer. Ter verkrijging van betrouwbare resultaten omtrent de morfologische ontwikkeling, is mijns inziens een meer gedetailleerde bodemschematisatie vereist.

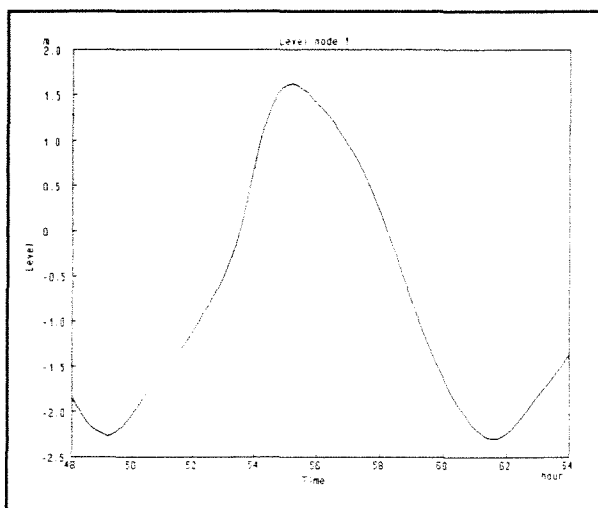
De Duflow-resultaten geven globale informatie over de waterbeweging in het Schelde-estuarium. Over de uitkomsten van de berekeningen met de sedimenttransportformule van Englund en Hansen kunnen dientengevolge ook slechts globale uitspraken worden gedaan. De morfologie van een waterloop wordt echter met name bepaald door de lokale waterbeweging. In of nabij een geul heersen bijvoorbeeld andere stromingscondities dan boven een zandplaat. Bij het afstudeeronderzoek is getracht om dit probleem te ondervangen door de oorspronkelijke aanname ' $B_s = B_b$ ' te laten vervallen ten gunste van $B_s = A_{\text{gem.}} / R_{\text{gem.}}$. Deze aanname blijkt echter geen effect te hebben op het uiteindelijke resultaat (ebgedomineerde sedimenttransporten voor tenminste één sectie). Een mogelijk van invloed zijnde factor hierop kan de grootte van de door Duflow berekende stroomsnelheden zijn. Deze lijken voor 1800 en 1650 aan de (te) hoge kant te zijn (Van der Spek, 1993). De achtergrond hiervan is niet helemaal duidelijk, maar de gevolgen voor het te berekenen sedimenttransport kunnen aanzienlijk zijn. De stroomsnelheid zit immers tot de vijfde macht in de formule van Englund en Hansen. Mogelijk heeft dit kunnen bijdragen aan het ontstaan van een netto ebgedomineerd sedimenttransport.

Door de sterke sedimentatie in het oostelijke deel van de Westerschelde, ontstaat bij knoop 6 een duidelijke profielvernauwing. Aangezien morfologische veranderingen van de Schelderivier bij dit afstudeerwerk buiten beschouwing zijn gelaten, zijn bij iedere run de dwarsprofielen van de knopen 7 tot en met 13 ongewijzigd gelaten. Het is niet uitgesloten dat de waterbeweging in het estuarium hierdoor nadelig wordt beïnvloed. Omdat morfologische veranderingen het gevolg zijn van de waterbeweging, kan deze aanname zeker van invloed zijn op de uiteindelijke modelresultaten. Een nader onderzoek hieromtrent is dan ook gewenst.

Ruwheidsparemeters en getijasyrmetrie:

Het uitgangspunt voor de bij dit afstudeerproject verrichte sedimenttransportberekeningen was de door Van der Spek opgestelde getijsimulatie met behulp van het ééndimensionale waterbewegingsmodel DufLOW. Zoals vermeld in paragraaf 3.2.5 van dit verslag, is deze getijsimulatie voor 1968 afgeregeld op de ruwheidsparemeters (k_{vloed} en k_{eb}). De bodemruwheid blijkt namelijk een zeer gevoelige paremeter te zijn. Het is opmerkelijk dat k_{eb} in de hier gebruikte schematisatie kleiner is dan k_{vloed} (respectievelijk 37 en 48), terwijl dit bij een gedetailleerd Implic-model precies andersom is (Bollebakker, 1985). Bij alle in dit hoofdstuk beschreven gevallen is de waterbeweging gesimuleerd met de oorspronkelijke waarden. Immers: bij toepassing van deze k -waarden wordt de waterbeweging in het estuarium prima gereproduceerd. Door echter in twee gevallen (situatie 2 en 4) sedimenttransportberekeningen uit te voeren met een gemiddelde waarde voor de bodemruwheid, wordt een belangrijke concessie aan het model gedaan. De invloed van deze 'afregelparemeters' is groot: de C -waarde zit namelijk tot de derde macht in de formule van Englund en Hansen.

Op een indirecte wijze wordt getijasyrmetrie op het sedimenttransport betrokken. De door DufLOW berekende stroomsnelheden vormen namelijk een invoerparemeter voor deze sedimenttransportformule. Metingen uit het verleden wijzen op een aanzienlijke sedimentimport vanuit het mondingsgebied van de Westerschelde. Dit kan als volgt worden beredeneerd. Beschouw onderstaande figuur van het verloop van de waterstand in knoop 1 (1800).



Figuur 3.11: verloop van de waterstand in knoop 1 (1800)

De stroomsnelheden bij vloed zijn groter dan bij eb. Het transporterend vermogen (transportcapaciteit) van de getijgolf is bij vloed dus groter dan bij eb. Het feit dat getijasymmetrie in de Westerschelde aanwezig is, maakt het optreden van ebgedomineerde sedimenttransporten ongeloofwaardig. Bovendien is de verhouding tussen de maximale vloed- en ebstroom sinds 1650 afgenomen van 1,30 naar 1,21 (zie paragraaf 2.3.3 van dit verslag). Dit duidt erop dat de Westerschelde vroeger meer sediment importeerde dan tegenwoordig. Het lijkt er derhalve op dat de invloed van getijasymmetrie op het sedimenttransport in de hier gehanteerde modelopzet onvoldoende tot uiting komt. Een verder onderzoek aangaande dit onderwerp is wenselijk. Het is tevens zinvol om de formules van Englund en Hansen toe te passen op het op de vorige bladzijde genoemde gedetailleerde Implic-model, aangezien bij deze schematisatie geheel andere k -waarden zijn gedefinieerd. Als bijkomend voordeel geldt daarbij dat dit model fijner van opzet is, wat mogelijk tot betere morfologische voorspellingen leidt.

Conclusie:

De directe toepassing van de resultaten van het ééndimensionale waterbewegingsmodel Duflow (waterstanden, stroomsnelheden) op een dynamisch morfologisch model geeft geen realistische uitkomsten, in die zin dat voor iedere van de in totaal vier onderzochte situaties voor de Westerschelde anno 1800 voor tenminste één sectie in of nabij het mondingsgebied van het estuarium een netto ebgedomineerd sedimenttransport wordt gevonden. Het lijkt aannemelijk dat de gebruikte bodemschematisatie te grof is voor het uitvoeren van morfologische berekeningen.

Hoofdstuk 4 - Morfologische ontwikkeling volgens een dynamisch-empirisch model

4.1 Inleiding

Het tweede deel van dit afstudeeronderzoek naar de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde sinds 1650 is uitgevoerd met behulp van het dynamisch-empirische model Asmita. Dit model is in staat om een indicatie te geven van de ontwikkeling van de bodemligging van estuaria en lagunes op een tijdschaal van decennia. Het model is gebaseerd op zowel fysische wetmatigheden met betrekking tot hydrodynamica en sedimenttransport (dynamische gedeelte) als op op praktijkwaarnemingen berustende relaties ter verkrijging van een morfologisch evenwicht (empirische gedeelte). In de ingenieurspraktijk blijkt dat bij de berekening van de langetermijnonwikkeling van de morfologie van estuaria in belangrijke mate gebruik moet worden gemaakt van empirische relaties. Morfologische variabelen zoals de gemiddelde natte geuldoorsnede van een sectie, worden daarbij gerelateerd aan hydrodynamische parameters zoals het getijvolume. Het getijvolume (V) is gedefinieerd als de som van het vloed- en het ebvolume (respectievelijk V_v en V_e): $V = V_v + V_e$ (Allersma, 1994). Asmita combineert de voordelen van procesbeschrijvende modellen met die van empirische beschrijvingen. Tevens kunnen met dit model de effecten van menselijke ingrepen (baggeren, storten, inpolderen) op de morfologie worden onderzocht.

De theoretische achtergronden van het model worden toegelicht in paragraaf 4.2. Vervolgens wordt in paragraaf 4.3 een overzicht gegeven van enkele oriënterende berekeningen met betrekking tot geulvolumina, evenwichtsvolumina, hydraulische parameters en initiële morfologische tendensen. Modelresultaten en conclusies komen aan de orde in respectievelijk de paragrafen 4.4 en 4.5. De stromingsberekeningen zijn uitgevoerd met behulp van DufLOW. Voor de empirisch-dynamische berekeningen is gebruik gemaakt van het rekenprogramma Asmita (WL | Delft Hydraulics).

4.2 Algemene modelopzet

De belangrijkste veronderstelling bij dit model is dat voor elk element van het beschouwde systeem een evenwichtstoestand kan worden gedefinieerd. Deze toestand wordt bepaald door de hydrodynamische parameters. Om een morfologische evenwichtstoestand te definiëren, worden voor elk element empirische relaties met betrekking tot het evenwichtsvolume (V_e) opgesteld. Het empirische aspect van het model komt juist hierin naar voren. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 4.3.2. Het evenwichtsvolume is een functie van het getijvolume:

$$V_e = f(V) .$$

Een sleutelement in het modelconcept is de evenwichtswaarde voor de sedimentconcentratie in het gehele estuarium. Wanneer alle elementen van een morfologisch systeem in evenwicht verkeren, heerst in het systeem een constante sedimentconcentratie. Deze concentratie wordt aangeduid als de globale evenwichtskoncentratie (c_E). Voor elk systeem-element kan tevens een lokale sedimentconcentratie (c_e) worden gedefinieerd. Een geulenstelsel verkeert in morfologisch evenwicht indien $c_e = c_E$. Morfologische veranderingen doen zich voor wanneer

de lokale sedimentconcentratie afwijkt van de globale evenwichtsconcentratie. Indien $c_e > c_E$ vertoont de betreffende geul een erosietendens. Voor $c_e < c_E$ bestaat daarentegen een neiging tot sedimentatie. Dit morfologische gedrag kan zichtbaar worden gemaakt door middel van een eenvoudige machtsrelatie:

$$c_e = c_E * \left(\frac{V_e}{V} \right)^n .$$

Een belangrijk verschil tussen het hier behandelde empirisch-dynamische model en procesbeschrijvende modellen in het algemeen is gelegen in het feit dat de evenwichtsconcentraties niet direct worden berekend uit de hydrodynamische parameters, maar uit een morfologische evenwichtstoestand. Hierdoor convergeert het model altijd naar een toestand waarin wordt voldaan aan de evenwichtsrelaties. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 4.3.2. Morfologische veranderingen doen zich voor wanneer de lokale sedimentconcentratie afwijkt van de lokale evenwichtswaarde. Erosie treedt op indien de lokale sedimentconcentratie kleiner is dan de evenwichtswaarde. Bij sedimentatie geldt het omgekeerde. De tijdsafhankelijke verandering van het bijbehorende geulvolume kan worden beschreven met de differentiaalvergelijking:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = w_s * B_{s, \text{gem.}} * L_{\text{vak}} * (c_e - c) .$$

Bij de bepaling van geulvolumina wordt gerekend met de hoeveelheid water die zich bevindt onder het niveau van de gemiddelde waterstand in een sectie. Dit niveau wordt ook aangehouden bij de berekening van (evenwichts-)dwarsprofielen. In bovenstaande differentiaalvergelijking wordt dit zichtbaar gemaakt door het product $B_{s, \text{gem.}} * L_{\text{vak}}$, ofwel de gemiddelde horizontale natte oppervlakte van een sectie. Hierin is $B_{s, \text{gem.}}$ de bij de gemiddelde waterstand behorende stroomvoerende breedte.

Het gedrag van gesuspendeerd sediment in een sectie kan worden beschreven door onderstaande advection-diffusievergelijking (massabalansvergelijking voor de hoeveelheid sediment in een geul).

$$\frac{\partial A_c c}{\partial t} + \frac{\partial A_c u c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_c D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = w_s * B_{s, \text{gem.}} * (c_e - c)$$

Betekenis van de symbolen:

- A_c : natte geuldoorsnede bij de gemiddelde waterstand;
- c : lokale sedimentconcentratie;
- u : stroomsnelheid;
- D : longitudinale diffusiecoëfficiënt;
- w_s : valsnelheid van een mediane korrel;
- $B_{s, \text{gem.}}$: stroomvoerende breedte bij de gemiddelde waterstand;
- L_{vak} : lengte van een sectie;
- c_e : evenwichtswaarde voor de lokale sedimentconcentratie.

De morfologische tijdschaal wordt verondersteld vele malen groter te zijn dan de door de sedimentconcentratie benodigde tijd om zich aan te passen aan de evenwichtswaarde. De morfologische tijdschaal is gedefinieerd als de tijd waarin de amplitude van een verstoring afneemt met een factor e . De grootte van de morfologische tijdschaal wordt bepaald door zowel de geometrie van de afzonderlijke elementen van het beschouwde systeem als de invloed van een morfologische verstoring op de bodemligging. De belangrijkste van invloed zijnde factoren op de morfologische tijdschaal zijn de parameters D , w_s , c_E en n . Deze factoren bepalen met welke snelheid een bepaalde evenwichtstoestand wordt bereikt. Voor een enkel element kan de morfologische tijdschaal (T) worden geschreven als:

$$T = \frac{1}{c_E n} * \left(\frac{V_e}{w_s B_{s, gem.} L_{vak}} + \frac{V_e}{\delta} \right).$$

Bron: Morphodynamics of a Tidal Lagoon and the Adjacent Coast (Stive e.a., 1997). In deze formule is δ een longitudinale uitwisselingsparameter voor sediment: $\delta = (D * A_{gem.}) / L_{h.o.h.}$. Hierin is $L_{h.o.h.}$ de hart-op-hart afstand tussen twee secties. De uitwisseling van sediment tussen een element c en de aangrenzende elementen d en f kan worden beschreven door:

$$\delta_{cd}(c_d - c_c) - \delta_{cf}(c_c - c_f) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{ce} - c_c) = 0.$$

De toepassing van de in deze paragraaf gegeven vergelijkingen op de vijf secties van de Westerschelde leidt tenslotte tot het volgende stelsel van vijf lineaire vergelijkingen voor de sedimentconcentratie in een vak:

$$\begin{aligned} \delta_{12}(c_E - c_1) - \delta_{12}(c_1 - c_2) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{e1} - c_1) &= 0 \\ \delta_{12}(c_1 - c_2) - \delta_{23}(c_2 - c_3) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{e2} - c_2) &= 0 \\ \delta_{23}(c_2 - c_3) - \delta_{34}(c_3 - c_4) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{e3} - c_3) &= 0 \\ \delta_{34}(c_3 - c_4) - \delta_{45}(c_4 - c_5) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{e4} - c_4) &= 0 \\ \delta_{45}(c_4 - c_5) - \delta_{45}(c_5 - c_E) + w_s B_{s, gem.} L_{vak}(c_{e5} - c_5) &= 0 \end{aligned}$$

De aldus berekende sedimentconcentraties (c_1 tot en met c_5) vormen de basis voor de berekening van de geulvolumina (V_1 tot en met V_5) door het rekenprogramma Asmita.

4.3 Oriënterende berekeningen

4.3.1 Getijvolumina en hydraulische parameters

Ten eerste is per sectie het getijvolume berekend uit de DufLOW-resultaten voor de Westerschelde anno 1800. Van de laatste getijperiode is de som bepaald van de absolute waarden van de berekende debieten ($\Sigma |Q|$). Door vermenigvuldiging hiervan met het uitvoer-interval waarop DufLOW is ingesteld (10 minuten, ofwel 600 seconden), wordt het getijvolume per sectie verkregen. Tabel 4.1 toont de berekende getijvolumina voor de secties 1 tot en met 5. Het spreadsheet van de berekening van $\Sigma |Q|$ per sectie is weergegeven op bladzijde 71.

Sectie [-]	$\Sigma Q $ [m ³ /s]	Δt [s]	V [m ³]
Sectie 1	$3,47 \cdot 10^6$	600	$2,08 \cdot 10^9$
Sectie 2	$2,66 \cdot 10^6$	600	$1,60 \cdot 10^9$
Sectie 3	$1,94 \cdot 10^6$	600	$1,16 \cdot 10^9$
Sectie 4	$1,31 \cdot 10^6$	600	$0,78 \cdot 10^9$
Sectie 5	$0,66 \cdot 10^6$	600	$0,40 \cdot 10^9$

Tabel 4.1: getijvolumina sectie 1 tot en met 5 (1800)

Vervolgens zijn per sectie gemiddelde waarden bepaald voor de hydraulische parameters natte geuldoorsnede (A), hydraulische straal (R) en stroomvoerende breedte (B_s). Dit is gedaan op de volgende wijze. Dufrow geeft als uitvoer de waterstand per knoop. De gebruikte bodemschematisatie bevat getalswaarden per knoop met betrekking tot de natte geuldoorsnede en getalswaarden per sectie met betrekking tot de bergende breedte en de hydraulische straal (zie de bijlagen 3a, 3b en 3c). Om tot een uitspraak te komen omtrent sectie-gemiddelde waarden voor A , R en B_s , is per knoop eerst de gemiddelde waterstand bepaald. Om $A_{gem.}$ te berekenen, is daarna door middel van lineaire interpolatie in de bodemschematisatie de bijbehorende natte geuldoorsnede bepaald. Het sectie-gemiddelde is tenslotte vastgesteld door de aldus verkregen waarden voor $A_{gem.}$ in de begin- en de eindknoop rekenkundig te middelen. Op deze wijze wordt voor sectie 1 de volgende gemiddelde natte geuldoorsnede gevonden:

$$A_{gem.;sect.1} = \frac{A_{gem.;kn.1} + A_{gem.;kn.2}}{2} = \frac{74011 + 39818}{2} = 56915 \text{ m}^2.$$

De gemiddelde hydraulische straal per sectie is eveneens bepaald door lineaire interpolatie in de bodemschematisatie. Voor de gemiddelde waterstand is in dit geval uitgegaan van het rekenkundige gemiddelde van de gemiddelde waterstand in de begin- en de eindknoop van een sectie. De stroomvoerende breedte is tenslotte gedefinieerd als $B_{s,gem.} = A_{gem.}/R_{gem.}$. Dit komt overeen met de bij situatie 3 uit het eerste gedeelte van dit afstudeerproject gedane aanname. Onderstaande tabel toont de op deze wijze verkregen resultaten voor de Westerschelde anno 1800. In het vervolg van dit hoofdstuk zal de stroomvoerende breedte worden aangeduid als B_s .

Sectie [-]	L_{vak} [m]	V [m ³]	$A_{gem.}$ [m ²]	$R_{gem.}$ [m]	B_s [m]
Sectie 1	11700	$2,08 \cdot 10^9$	56915	11,07	5143
Sectie 2	14100	$1,60 \cdot 10^9$	41460	9,50	4365
Sectie 3	12500	$1,16 \cdot 10^9$	36020	10,71	3364
Sectie 4	9900	$0,78 \cdot 10^9$	21078	7,91	2666
Sectie 5	9600	$0,40 \cdot 10^9$	11478	5,80	1978

Tabel 4.2: getijvolumina en gemiddelde hydraulische parameters sectie 1 tot en met 5 (1800)

Debietten sectie 1 t/m 5 (1800):

Tijd [uren]	Sectie 1 [m3/s]	[Q1] [m3/s]	Sectie 2 [m3/s]	[Q2] [m3/s]	Sectie 3 [m3/s]	[Q3] [m3/s]	Sectie 4 [m3/s]	[Q4] [m3/s]	Sectie 5 [m3/s]	[Q5] [m3/s]
51.500	10843,00	5421,50	1902,30	951,15	-4985,40	2492,70	-7959,20	3979,60	-7180,50	3590,25
51.667	15432,50	15432,50	5858,00	5858,00	-1984,60	1984,60	-6321,10	6321,10	-8505,70	6505,70
51.833	20307,50	20307,50	9730,00	9730,00	1015,10	1015,10	-4374,90	4374,90	-5851,50	5851,50
52.000	24730,00	24730,00	13619,30	13619,30	4038,60	4038,60	-2370,90	2370,90	-4982,50	4982,50
52.167	28907,50	28907,50	17244,00	17244,00	7058,10	7058,10	-248,80	248,80	-4011,10	4011,10
52.333	32620,00	32620,00	20557,50	20557,50	9981,40	9981,40	1950,30	1950,30	-2852,90	2852,90
52.500	36112,50	36112,50	23532,00	23532,00	12590,30	12590,30	4221,30	4221,30	-1570,40	1570,40
52.667	39410,50	39410,50	26152,50	26152,50	14937,00	14937,00	6293,80	6293,80	-36,20	36,20
52.833	42485,50	42485,50	28616,00	28616,00	16775,50	16775,50	8389,50	8389,50	1557,70	1557,70
53.000	45666,50	45666,50	30599,50	30599,50	18672,50	18672,50	10103,50	10103,50	3118,00	3118,00
53.167	49438,50	49438,50	32476,50	32476,50	20238,00	20238,00	11786,20	11786,20	4276,10	4276,10
53.333	53708,00	53708,00	34601,00	34601,00	21678,50	21678,50	12976,80	12976,80	5342,80	5342,80
53.500	58973,00	58973,00	37262,00	37262,00	22852,50	22852,50	13969,50	13969,50	6130,10	6130,10
53.667	64894,00	64894,00	40525,50	40525,50	24191,00	24191,00	14585,50	14585,50	6827,40	6827,40
53.833	72818,00	72818,00	44051,50	44051,50	25816,00	25816,00	15277,50	15277,50	7223,90	7223,90
54.000	81796,00	81796,00	48909,00	48909,00	27289,50	27289,50	16284,00	16284,00	7518,50	7518,50
54.167	89939,50	89939,50	54964,50	54964,50	29563,00	29563,00	16992,50	16992,50	8059,00	8059,00
54.333	95734,50	95734,50	61419,50	61419,50	32907,50	32907,50	18079,00	18079,00	8385,30	8385,30
54.500	98616,50	98616,50	66913,00	66913,00	37435,50	37435,50	19895,00	19895,00	8591,30	8591,30
54.667	98613,50	98613,50	70675,00	70675,00	42483,50	42483,50	22595,50	22595,50	9020,30	9020,30
54.833	95645,00	95645,00	72778,50	72778,50	46901,50	46901,50	26038,50	26038,50	9998,00	9998,00
55.000	89991,50	89991,50	72946,00	72946,00	50431,00	50431,00	29498,50	29498,50	11641,60	11641,60
55.167	82804,50	82804,50	71041,50	71041,50	52694,50	52694,50	32810,50	32810,50	13445,30	13445,30
55.333	74772,00	74772,00	67488,50	67488,50	53566,50	53566,50	35441,50	35441,50	15276,60	15276,60
55.500	65825,00	65825,00	62985,00	62985,00	53040,00	53040,00	36980,00	36980,00	16993,20	16993,20
55.667	56849,50	56849,50	57586,00	57586,00	51350,50	51350,50	37484,50	37484,50	18275,80	18275,80
55.833	47648,00	47648,00	51774,00	51774,00	48547,00	48547,00	37135,50	37135,50	19009,70	19009,70
56.000	39482,50	39482,50	45163,00	45163,00	45236,00	45236,00	35813,50	35813,50	19275,10	19275,10
56.167	31785,00	31785,00	38808,50	38808,50	40857,00	40857,00	33977,50	33977,50	19040,50	19040,50
56.333	24446,00	24446,00	32685,00	32685,00	35983,50	35983,50	31350,00	31350,00	18460,50	18460,50
56.500	17385,50	17385,50	26549,00	26549,00	31045,00	31045,00	28060,00	28060,00	17427,90	17427,90
56.667	10184,70	10184,70	20488,50	20488,50	25915,50	25915,50	24558,50	24558,50	15808,30	15808,30
56.833	2927,60	2927,60	14119,80	14119,80	21016,50	21016,50	20509,50	20509,50	14009,50	14009,50
57.000	-4667,40	-4667,40	7821,60	7821,60	15620,50	15620,50	16515,50	16515,50	11877,70	11877,70
57.167	-12035,00	12035,00	1141,80	1141,80	10096,80	10096,80	12101,50	12101,50	9830,10	9830,10
57.333	-19148,50	19148,50	-5636,80	5636,80	3962,80	3962,80	7629,40	7629,40	7689,40	7689,40
57.500	-26196,50	26196,50	-12160,80	12160,80	-2630,40	2630,40	2898,20	2898,20	5560,60	5560,60
57.667	-32993,00	32993,00	-18464,00	18464,00	-9018,10	9018,10	-2183,10	2183,10	3338,10	3338,10
57.833	-39570,00	39570,00	-24410,00	24410,00	-14725,50	14725,50	-6964,50	6964,50	767,75	767,75
58.000	-45933,00	45933,00	-29829,00	29829,00	-19322,00	19322,00	-11067,50	11067,50	-1841,90	1841,90
58.167	-51913,00	51913,00	-34462,00	34462,00	-22898,50	22898,50	-14278,60	14278,60	-3663,40	3663,40
58.333	-56953,00	56953,00	-38343,00	38343,00	-25698,50	25698,50	-16430,50	16430,50	-5439,50	5439,50
58.500	-60958,00	60958,00	-41533,00	41533,00	-27812,00	27812,00	-17749,50	17749,50	-6323,90	6323,90
58.667	-64040,50	64040,50	-43970,50	43970,50	-29452,50	29452,50	-18395,50	18395,50	-6912,60	6912,60
58.833	-66474,00	66474,00	-45773,00	45773,00	-30518,50	30518,50	-18842,00	18842,00	-7261,30	7261,30
59.000	-68083,50	68083,50	-47165,00	47165,00	-31066,00	31066,00	-19216,00	19216,00	-7525,00	7525,00
59.167	-68808,50	68808,50	-48107,50	48107,50	-31459,50	31459,50	-19435,50	19435,50	-7794,80	7794,80
59.333	-69076,50	69076,50	-48512,00	48512,00	-31884,00	31884,00	-19602,00	19602,00	-7987,50	7987,50
59.500	-68733,00	68733,00	-48746,50	48746,50	-32145,50	32145,50	-19800,00	19800,00	-8131,40	8131,40
59.667	-67904,00	67904,00	-48913,50	48913,50	-32362,00	32362,00	-19905,00	19905,00	-8362,20	8362,20
59.833	-66984,00	66984,00	-48776,00	48776,00	-32621,00	32621,00	-19978,00	19978,00	-8599,60	8599,60
60.000	-65940,00	65940,00	-48475,00	48475,00	-32706,00	32706,00	-20163,50	20163,50	-8765,70	8765,70
60.167	-64712,00	64712,00	-48023,00	48023,00	-32714,50	32714,50	-20245,50	20245,50	-9031,30	9031,30
60.333	-63312,50	63312,50	-47508,50	47508,50	-32504,00	32504,00	-20381,00	20381,00	-9251,30	9251,30
60.500	-61619,50	61619,50	-46885,50	46885,50	-32339,50	32339,50	-20345,50	20345,50	-9518,00	9518,00
60.667	-59698,00	59698,00	-46243,00	46243,00	-32100,50	32100,50	-20351,50	20351,50	-9666,10	9666,10
60.833	-57891,50	57891,50	-45299,00	45299,00	-31989,00	31989,00	-20238,50	20238,50	-9803,50	9803,50
61.000	-55929,50	55929,50	-44354,50	44354,50	-31599,00	31599,00	-20237,50	20237,50	-9833,30	9833,30
61.167	-53655,00	53655,00	-43329,00	43329,00	-31178,50	31178,50	-20100,00	20100,00	-9926,50	9926,50
61.333	-51341,50	51341,50	-42135,00	42135,00	-30715,50	30715,50	-19932,00	19932,00	-9964,00	9964,00
61.500	-48764,50	48764,50	-40864,00	40864,00	-30116,00	30116,00	-19737,50	19737,50	-9958,80	9958,80
61.667	-45823,00	45823,00	-39493,00	39493,00	-29478,00	29478,00	-19447,50	19447,50	-9943,40	9943,40
61.833	-42400,50	42400,50	-37969,00	37969,00	-28752,50	28752,50	-19128,00	19128,00	-9859,50	9859,50
62.000	-38520,50	38520,50	-36116,00	36116,00	-28049,50	28049,50	-18696,50	18696,50	-9786,80	9786,80
62.167	-34221,00	34221,00	-33905,00	33905,00	-27226,50	27226,50	-18250,00	18250,00	-9695,00	9695,00
62.333	-30360,00	30360,00	-31222,00	31222,00	-26137,00	26137,00	-17910,00	17910,00	-9520,40	9520,40
62.500	-26069,50	26069,50	-28482,50	28482,50	-24622,50	24622,50	-17457,50	17457,50	-9455,70	9455,70
62.667	-21747,50	21747,50	-25411,50	25411,50	-23045,50	23045,50	-16792,50	16792,50	-9400,00	9400,00
62.833	-17284,50	17284,50	-22157,50	22157,50	-21203,00	21203,00	-16071,50	16071,50	-9251,80	9251,80
63.000	-12879,80	12879,80	-18624,00	18624,00	-19241,50	19241,50	-15179,50	15179,50	-9082,80	9082,80
63.167	-8811,30	8811,30	-14936,00	14936,00	-16966,00	16966,00	-14247,50	14247,50	-8827,80	8827,80
63.333	-4530,30	4530,30	-11305,70	11305,70	-14437,00	14437,00	-13114,00	13114,00	-8580,50	8580,50
63.500	-116,80	116,80	-7800,90	7800,90	-11831,50	11831,50	-11802,50	11802,50	-8253,20	8253,20
63.667	4536,00	4536,00	-3747,50	3747,50	-9198,10	9198,10	-10321,00	10321,00	-7865,00	7865,00
63.833	9137,60	9137,60	275,90	275,90	-6365,30	6365,30	-8827,50	8827,50	-7350,50	7350,50
64.000	14138,60	7069,30	4304,90	2152,45	-3326,00	1663,00	-7169,00	3584,50	-6812,10	3406,05

3472215,30

2663352,20

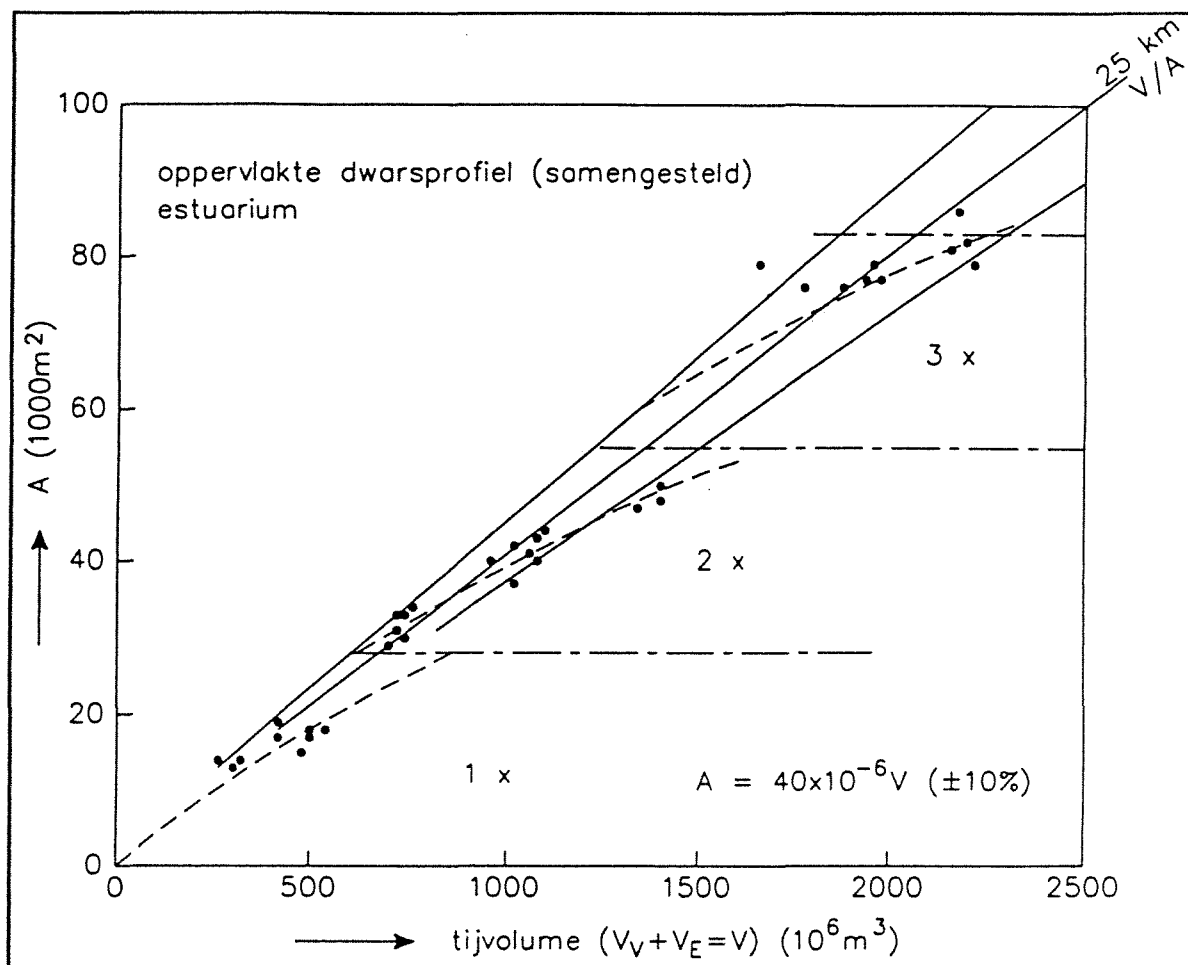
1940058,80

1305908,00

659316,65

4.3.2 Evenwichtsvolumina en initiële morfologische tendensen

Zoals vermeld in paragraaf 4.2, is het empirische karakter van het model Asmita juist gelegen in de bepaling van het evenwichtsvolume (V_e). Figuur 4.1 toont een relatie tussen het samengestelde dwarsprofiel (A) en het getijvolume (V) voor de huidige Westerschelde (Allersma, 1994). Het evenwichtsvolume wordt berekend door de lengte van de beschouwde sectie te vermenigvuldigen met een evenwichtswaarde voor de natte geuldoorsnede, welke is gedefinieerd als het quotiënt van het getijvolume per sectie en de fictieve lengtemaat $L = V/A$.



Figuur 4.1: relatie tussen A en V voor de huidige Westerschelde (Allersma, 1994)

De evenwichtsvolumina per sectie zijn in eerste instantie berekend met de uit deze figuur volgende $L=25$ km. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 4.3 op de volgende bladzijde. Ter verduidelijking wordt op deze plaats een handmatige berekening van het evenwichtsvolume voor sectie 1 gegeven. Het getijvolume in deze sectie bedraagt $2,08 \cdot 10^9$ m³ (zie paragraaf 4.3.1). Voor de evenwichtswaarde van het dwarsprofiel geldt dan:

$$A_e = \frac{V}{L} = \frac{2,08 \cdot 10^9}{25000} = 83333 \text{ m}^2.$$

De gemiddelde natte geuldoorsnede bedraagt echter $A_{gem.} = 56915 \text{ m}^2$. Sectie 1 neigt dus naar erosie, want $A_{gem.} < A_e$. Uitgaande van een vaklengte van 11700 m, geldt voor het evenwichtsvolume:

$$V_e = A_e \cdot L_{vak} = 83333 \cdot 11700 = \underline{0,98 \cdot 10^9 \text{ m}^3}.$$

Sectie [-]	L_{vak} [m]	V [m ³]	$A_{gem.}$ [m ²]	A_e [m ²]	Morf. tendens [-]	V_e [m ³]
Sectie 1	11700	$2,08 \cdot 10^9$	56915	83333	$A_{gem.} < A_e$ erosie	$0,98 \cdot 10^9$
Sectie 2	14100	$1,60 \cdot 10^9$	41460	63920	$A_{gem.} < A_e$ erosie	$0,90 \cdot 10^9$
Sectie 3	12500	$1,16 \cdot 10^9$	36020	46561	$A_{gem.} < A_e$ erosie	$0,58 \cdot 10^9$
Sectie 4	9900	$0,78 \cdot 10^9$	21078	31342	$A_{gem.} < A_e$ erosie	$0,31 \cdot 10^9$
Sectie 5	9600	$0,40 \cdot 10^9$	11478	15824	$A_{gem.} < A_e$ erosie	$0,15 \cdot 10^9$

Tabel 4.3: evenwichtsvolumina sectie 1 tot en met 5 voor $L=25 \text{ km}$ (1800)

De aldus verkregen resultaten zijn geen reële weergave van de werkelijkheid, aangezien alle secties een initiële erosietendens vertonen. Om tot een realistischer situatie te komen, zijn de hierboven berekende waarden voor $A_{gem.}$ uitgezet tegen het bijbehorende getijvolume per sectie. Met behulp van een computerprogramma voor correlatie en lineaire regressie is daarna een 'best passende lijn' door de puntenwolk getrokken. Uit deze grafiek volgt voor de fictieve lengtemaat $L=37 \text{ km}$ (zie bijlage 6). De secties 1, 3 en 5 vertonen daarbij een sedimentatie-tendens, de secties 2 en 4 neigen naar erosie. Met nadruk wordt gesteld dat het hier gaat om initiële morfologische tendensen. Het daadwerkelijk optreden van sedimentatie of erosie hangt af van het netto resultaat van sedimentuitwisselingen tussen afzonderlijke secties.

Om de gevoeligheid van het model voor veranderingen van L na te gaan, zijn tenslotte dezelfde berekeningen uitgevoerd voor respectievelijk $L=40 \text{ km}$ en $L=43 \text{ km}$. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de tabellen 4.4 en 4.5 op deze en de volgende bladzijde. Tabel 4.4 geeft een overzicht van de resultaten met betrekking tot evenwichtswaarden voor de natte geuldoorsnede per sectie. Tussen haakjes staat de initiële morfologische tendens van een sectie vermeld (s =sedimentatie, e =erosie). Tabel 4.5 geeft de bijbehorende evenwichtsvolumina.

Sectie [-]	$A_{gem.}$ [m ²]	V [m ³]	$A_{e;L=25}$ [m ²]	$A_{e;L=37}$ [m ²]	$A_{e;L=40}$ [m ²]	$A_{e;L=43}$ [m ²]
Sectie 1	56915	$2,08 \cdot 10^9$	83333 (e)	56306 (s)	52083 (s)	48450 (s)
Sectie 2	41460	$1,60 \cdot 10^9$	63920 (e)	43189 (e)	39950 (s)	37163 (s)
Sectie 3	36020	$1,16 \cdot 10^9$	46561 (e)	31460 (s)	29101 (s)	27071 (s)
Sectie 4	21078	$0,78 \cdot 10^9$	31342 (e)	21177 (e)	19589 (s)	18222 (s)
Sectie 5	11478	$0,40 \cdot 10^9$	15824 (e)	10692 (s)	9890 (s)	9200 (s)

Tabel 4.4: evenwichtswaarden voor $A_{gem.}$ en initiële morfologische tendensen sectie 1 tot en met 5 (1800)

Sectie [-]	L_{vak} [m]	$V_{e;L=25}$ [m ³]	$V_{e;L=37}$ [m ³]	$V_{e;L=40}$ [m ³]	$V_{e;L=43}$ [m ³]
Sectie 1	11700	$0,98 \cdot 10^9$	$0,66 \cdot 10^9$	$0,61 \cdot 10^9$	$0,57 \cdot 10^9$
Sectie 2	14100	$0,90 \cdot 10^9$	$0,61 \cdot 10^9$	$0,56 \cdot 10^9$	$0,52 \cdot 10^9$
Sectie 3	12500	$0,58 \cdot 10^9$	$0,39 \cdot 10^9$	$0,36 \cdot 10^9$	$0,34 \cdot 10^9$
Sectie 4	9900	$0,31 \cdot 10^9$	$0,21 \cdot 10^9$	$0,19 \cdot 10^9$	$0,18 \cdot 10^9$
Sectie 5	9600	$0,15 \cdot 10^9$	$0,10 \cdot 10^9$	$0,09 \cdot 10^9$	$0,09 \cdot 10^9$

Tabel 4.5: evenwichtsvolumina sectie 1 tot en met 5 (1800)

4.3.3 Invoerfile rekenprogramma Asmita

Alvorens kan worden begonnen met het uitvoeren van morfologische berekeningen, dient de longitudinale uitwisselingscoëfficiënt voor sediment (δ) nog te worden gespecificeerd. Deze parameter is gedefinieerd als $\delta = (D \cdot A_{gem.}) / L_{h.o.h.}$. Hierin is D een intergetijd dispersiecoëfficiënt en $L_{h.o.h.}$ de hart-op-hart afstand tussen twee secties. Voor diffusiecoëfficiënten kunnen geen 'standaardwaarden' worden ingevuld. In het algemeen kan worden gesteld dat de grootte van D wordt bepaald door de mate van betrouwbaarheid van de invoerparameters van het model. Hoe nauwkeuriger deze bekend zijn en hoe fijner de modeldiscretisatie is, des te kleiner kan de grootte van de diffusiecoëfficiënt worden gekozen. Op grond van testresultaten van een gedetailleerd Estmorf-model voor de huidige Westerschelde, is aanvankelijk gekozen voor de combinatie $c_E = 5 \cdot 10^{-5}$ en $D = 250 \text{ m}^2/\text{s}$ (Fokkink en Van der Weck, 1998). Tabel 4.6 geeft een overzicht van waarden van δ bij diverse waarden voor D . Vanwege de vrij grove bodemschematisatie is na de eerste serie morfologische testberekeningen besloten om bij dit afstudeeronderzoek verder te rekenen met $c_E = 7,5 \cdot 10^{-5}$ en $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$.

Voor meer informatie omtrent het genoemde Estmorf-model wordt verwezen naar het door R.J. Fokkink en A. van der Weck geschreven rapport Z 2262: 'Final version of the estmorf model' (WL | Delft Hydraulics, 1998). De waarde $c_E = 7,5 \cdot 10^{-5}$ is verkregen door middeling van de op bladzijde 15 van het rapport gegeven waarden $c_E = 10^{-4}$ en $c_E = 5 \cdot 10^{-5}$.

Overgang [-]	$A_{gem.}$ [m ²]	$L_{h.o.h.}$ [m]	$\delta_{D=250}$ [m ³ /s]	$\delta_{D=750}$ [m ³ /s]	$\delta_{D=1000}$ [m ³ /s]	$\delta_{D=1250}$ [m ³ /s]
Sectie 1-2	39818	12900	772	2315	3087	3858
Sectie 2-3	43101	13300	810	2431	3241	4051
Sectie 3-4	28939	11200	646	1938	2584	3230
Sectie 4-5	13218	9750	339	1017	1356	1695

Tabel 4.6: δ -waarden bij verschillende diffusiecoëfficiënten (1800)

Figuur 4.2 op de volgende bladzijde geeft een voorbeeld van een invoerfile voor het rekenprogramma Asmita, waarbij wordt gerekend met $c_E = 7,5 \cdot 10^{-5}$ en $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$.

```
[01] 5 // # elements
[02] 60173849 0.025 -1 7.5e-5 4. 639902680 // a,w,s,ceglob,en,v
[03] 61548854 0.025 -1 7.5e-5 4. 584582296 // a,w,s,ceglob,en,v
[04] 42049751 0.025 -1 7.5e-5 4. 420251406 // a,w,s,ceglob,en,v
[05] 26390077 0.025 -1 7.5e-5 4. 208674518 // a,w,s,ceglob,en,v
[06] 18986820 0.025 -1 7.5e-5 4. 106685505 // a,w,s,ceglob,en,v
[07] 2 // nc0
[08] 4 // nci
[09] 1 7.5e-5 // j,c0(j)
[10] 5 7.5e-5 // j,c0(j)
[11] 3087. 0.0 // j,delta(0,j),q(0,j)
[12] 1356. 0.0 // j,delta(0,j),q(0,j)
[13] 1 2 3087. 0.0 // i,j,delta(i,j),q(i,j)
[14] 2 3 3241. 0.0 // i,j,delta(i,j),q(i,j)
[15] 3 4 2584. 0.0 // i,j,delta(i,j),q(i,j)
[16] 4 5 1356. 0.0 // i,j,delta(i,j),q(i,j)
[17] 2.25 // H
[18] 1.0 // dt
[19] 3600 // nt
[20] .005 // eps
```

Figuur 4.2: voorbeeld invoerfile rekenprogramma Asmita

Verklaring:

- [01] : aantal secties (5);
- [02] : voor sectie 1 worden de volgende getalswaarden opgegeven voor respectievelijk:
 $B_s * L_{vak} = 60173849 \text{ m}^2$, $w_s = 0,025 \text{ ms}^{-1}$, status van een sectie (-1: nat; +1: droog),
 $c_E = 7,5 \cdot 10^{-5}$ en $A_{gem.} * L_{vak} = 639902680 \text{ m}^3$;
- [03] : idem voor sectie 2;
- [04] : idem voor sectie 3;
- [05] : idem voor sectie 4;
- [06] : idem voor sectie 5;
- [07] : aantal verbindingen met de buitenwereld (2);
- [08] : aantal interne verbindingen (4);
- [09] : globale evenwichtsconcentratie van sediment aan de zeewaartse rand van het model
 $(7,5 \cdot 10^{-5})$;
- [10] : idem voor de landwaartse rand van het model;
- [11] : getalswaarden voor δ en een restdebiet, bijvoorbeeld ten gevolge van een rivier,
aan de zeewaartse rand van het model (respectievelijk 3087 en 0);
- [12] : idem voor de landwaartse rand van het model;
- [13] : getalswaarden voor δ en een restdebiet bij de overgang tussen de secties 1 en 2
(respectievelijk 3087 en 0);
- [14] : idem voor de overgang tussen de secties 2 en 3;
- [15] : idem voor de overgang tussen de secties 3 en 4;
- [16] : idem voor de overgang tussen de secties 4 en 5;

- [17] : opgelegd getijverschil (niet van toepassing voor dit model van de Westerschelde);
- [18] : numerieke tijdstap (1 dag);
- [19] : totale simulatietijd (3600 dagen, ofwel 10 jaar);
- [20] : numerieke nauwkeurigheidseis (0,005).

4.4 Modelresultaten

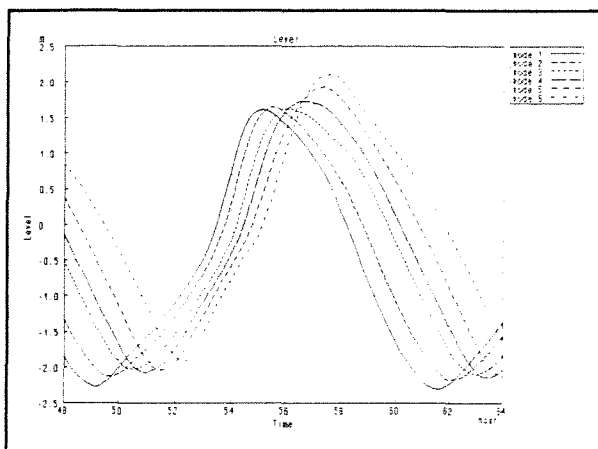
4.4.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de resultaten besproken van de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde volgens het model Asmita. Om dezelfde redenen als genoemd in paragraaf 3.1, is in eerste instantie gekozen voor een beschouwing van de periode 1800-1968. Zoals vermeld in paragraaf 4.3.2, zijn de berekeningen uitgevoerd voor respectievelijk $L=37$ km, $L=40$ km en $L=43$ km. Dat $L=37$ km het resultaat is van curve-fitting, betekent niet dat deze waarde automatisch de goede waarde is. Sterker nog: deze waarde is zeker niet goed, omdat de Westerschelde anno 1800 niet in een morfologische evenwichtstoestand verkeerde. Het is algemeen bekend dat het estuarium een sedimentatietendens vertoont. Juist vanwege dit feit lijkt het dan ook plausibel om een grotere waarde voor L te hanteren. Voor de evenwichtssituatie geldt $L=25$ km. De hier verkregen $L=37$ km is mogelijk het resultaat van een, in morfologisch opzicht, minder gelukkige bodemschematisatie. Ook E. Allersma wijst op deze mogelijkheid in Appendix C van zijn rapport H 1828: '*Geulen in estuaria*' (WL | Delft Hydraulics, 1994).

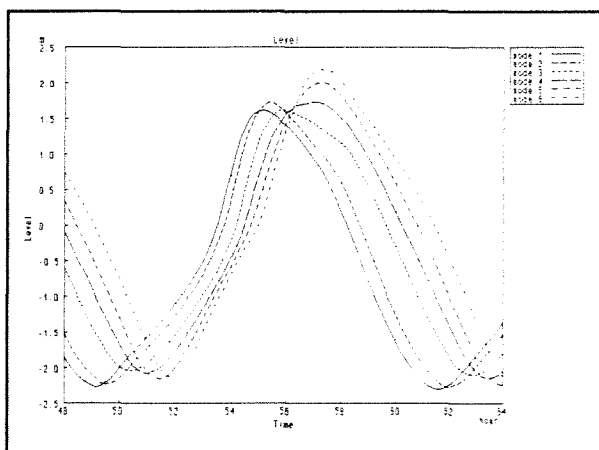
4.4.2 Situatie 1: $L=37$ km

Ondanks het feit dat Asmita in staat is tot het geven van een indicatie van de bodemligging van estuaria op een tijdschaal van enkele decennia, is op grond van de met behulp van de sedimenttransportformule van Englund en Hansen verkregen modelresultaten besloten tot een simulatietijd van tien jaar voor de eerste run (1800-1810). De toepassing van dit dynamische model resulteerde immers in een morfologische gedaanteverwisseling van de Westerschelde over een periode van slechts 18 jaar. Met behulp van de op de vorige bladzijde gegeven invoerfile is een berekening gemaakt van de geulvolumina van de secties 1 tot en met 5. Het verloop van het geulvolume per sectie is achterin dit verslag opgenomen als bijlage 7. Uit deze grafiek blijkt dat de secties 3 en 5 een lichte neiging tot sedimentatie vertonen, want het geulvolume neemt iets af in de tijd. Voor de secties 1, 2 en 4 geldt het tegenovergestelde. Met behulp van de aldus verkregen modelresultaten met betrekking tot geulvolumina voor de secties 1 tot en met 5 is vervolgens is voor 1810 een nieuwe stromingsberekening uitgevoerd. Dit is gebeurd op dezelfde wijze als genoemd in paragraaf 3.3.3.2, met dit verschil dat de breedte waarover bodemmateriaal sedimenteert of erodeert niet meer gelijkgesteld is aan de volledige stroomvoerende breedte op het beschouwde niveau, maar aan de daadwerkelijke breedte waarover sedimentatie of erosie wordt verondersteld plaats te vinden. Bijlage 8 toont ter verduidelijking hiervan een handmatige berekening van het dwarsprofiel van knoop 5

(1810). De figuren 4.3 en 4.4 tonen het verloop van de waterstand in de knopen 1 tot en met 6 voor respectievelijk de jaren 1800 (basissituatie) en 1810. Het verschil tussen hoog- en laagwater neemt enigszins toe. Asmita rekent met een 'frozen tide': gedurende de simulatietijd worden het gedrag en het verloop van de getijgolf constant verondersteld.



Figuur 4.3: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1800)

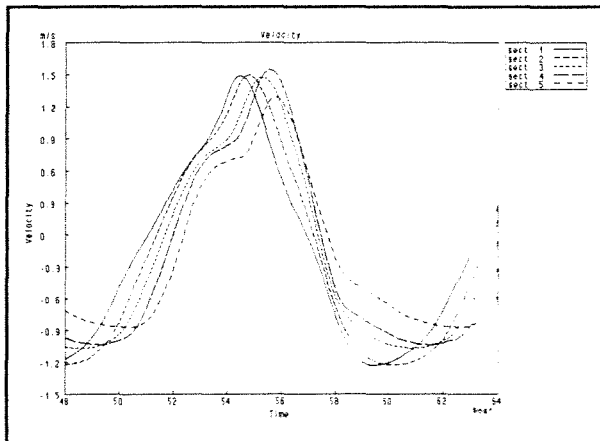


Figuur 4.4: verloop van de waterstand in de knopen 1 t/m 6 (1810)

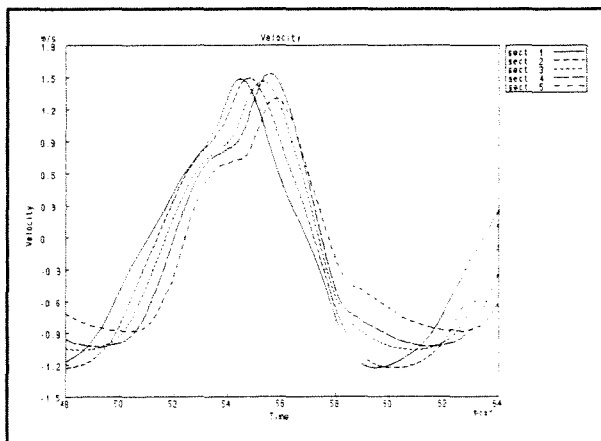
Op overeenkomstige wijze zijn berekeningen uitgevoerd voor respectievelijk de jaren 1825, 1840, 1860, 1880 en 1900. Het verloop van de door Asmita berekende geulvolumina is weergegeven in de grafiek op bijlage 9a. Uit deze grafiek blijkt dat voor alle secties van de Westerschelde het geulvolume toeneemt in de tijd, hetgeen duidt op erosie. Dit beeld wordt bevestigd door de profielberekeningen ten behoeve van nieuwe stromingsberekeningen: aanvankelijke profielvernauwingen worden één of twee runs later omgezet in profielverruimingen, onder min of meer gelijkblijvende stromingscondities. Het idee dat de gebruikte bodemschematisatie minder geschikt is voor morfologische berekeningen wordt hierdoor versterkt, want deze resultaten zijn geen reële weergave van de werkelijkheid. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 4.5.

4.4.3 Situatie 2: $L=40$ km

De voor $L=40$ km verkregen modelresultaten verschillen kwalitatief weinig met het vorige beschouwde geval. De door Asmita berekende geulvolumina zijn weergegeven in de grafiek op bijlage 9b. Hieruit blijkt dat sectie 3 een afnemend geulvolume vertoont tussen 1800 en 1825, hetgeen duidt op sedimentatie. Na 1825 vertonen alle secties echter toenemende geulvolumina. Het beeld van erosie en daarmee gepaard gaande profielverruiming kan over de periode 1800-1840 zou kunnen worden verklaard door het afsluiten van de verbindingsgedul tussen de huidige Oosterschelde en de Westerschelde. Door deze afsluiting is de loop van de Schelde-rivier verlegd naar de huidige Westerschelde, hetgeen waarschijnlijk een verruiming van de dwarsprofielen tot gevolg heeft gehad (Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, Middelburg). Het is overigens de vraag of dit is ingebouwd in het gebruikte model. De verkregen modelresultaten zijn echter niet in overeenstemming met de werkelijkheid, aangezien na 1825 een beeld van structurele erosie ontstaat. De figuren 4.5 en 4.6 tonen het verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 tot en met 5 voor de jaren 1800 en 1810.



Figuur 4.5: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 5 (1800)



Figuur 4.6: verloop van de stroomsnelheid in de secties 1 t/m 5 (1810)

4.4.4 Situatie 3: $L=43$ km

De door Asmita berekende geulvolumina zijn weergegeven in de grafiek op bijlage 9c. In tegenstelling tot de twee voorgaande situaties, worden voor $L=43$ km geen structureel stijgende geulvolumina gevonden. Naar aanleiding hiervan is ervoor gekozen om de simulatietijd te verlengen tot 1968. Hierbij dient te worden opgemerkt dat voor alle stromingsberekeningen de bij de getijsimulatie voor 1800 geldende randvoorwaarde is gebruikt. De randvoorwaarden voor 1800 en 1968 onderscheiden zich met name door het gemiddelde niveau van de zeespiegel (respectievelijk NAP-0,47 m en NAP+0,00 m) en de optredende getijverschillen. Voor het getijverschil te Vlissingen geldt bijvoorbeeld een waarde van 3,92 m in 1800 en 4,16 m in 1968 (zie paragraaf 3.2.3).

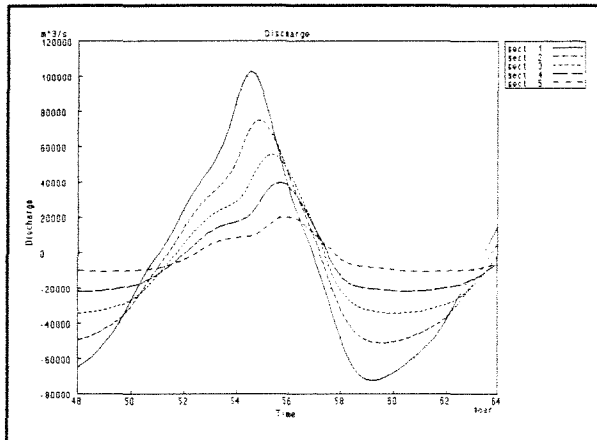
Uit de grafiek blijkt dat de secties 1,2 en 4 eroderen in de periode 1800-1840. Zoals vermeld in de vorige paragraaf, zouden de optredende profielverruiming in deze periode kunnen worden verklaard door het afsluiten van de verbindingsgeul tussen de huidige Oosterschelde en de Westerschelde. Ook sectie 3 verruimt, echter pas na een aanvankelijke afname van het geulvolume in de periode 1800-1840. Het geulvolume van sectie 5 blijft na 1840 nagenoeg gelijk. Omdat de berekende morfologische veranderingen zich manifesteren in een relatief korte tijd, kan in een aantal gevallen worden gesproken van een trendbreuk. Ook dit kan een aanwijzing zijn dat de gehanteerde bodemschematisatie minder geschikt is voor morfologische berekeningen. Uit de modelresultaten blijkt tevens dat na 1860 de geulvolumina nagenoeg constant blijven. Dit kan worden verklaard met behulp van de berekende profielveranderingen. Onderstaande tabel toont de gemiddelde jaarlijkse toe- of afname van het dwarsprofiel voor de knopen 2 tot en met 6. Een minteken staat voor erosie en een plusteken voor sedimentatie. De berekende jaarlijkse profielveranderingen zijn na verloop van tijd verwaarloosbaar klein ten opzichte van de grootte van de dwarsprofielen, waardoor de grootte van de geulvolumina niet significant verandert. Per run valt een duidelijke trendbreuk te constateren ten opzichte van de voorgaande run: aanvankelijke profielvernauwingen worden één of twee runs later omgezet in profielverruiming en vice versa. Hierop wordt teruggekomen in paragraaf 4.5.

Periode	Knoop 2	Knoop 3	Knoop 4	Knoop 5	Knoop 6
1800-1810	-81,7	-448,5	+37,6	-295,5	+37,8
1810-1825	-51,7	-20,2	+22,0	-25,9	+24,8
1825-1840	-39,6	-27,4	+13,2	-8,4	+9,4
1840-1860	-6,3	-9,9	-3,9	+2,9	+2,9
1860-1880	-2,2	-2,6	-2,2	+3,6	+1,8
1880-1900	+0,2	+0,9	+3,0	+15,8	+2,9
1900-1920	+0,2	+0,8	+1,2	-3,1	-1,9
1920-1945	+18,5	+9,1	+6,9	-4,7	-5,2

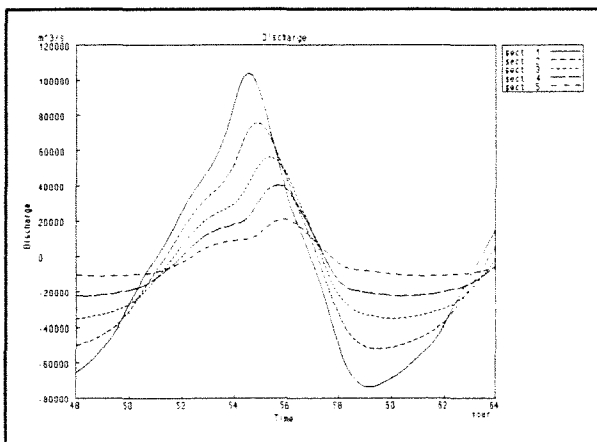
Tabel 4.7: gemiddelde jaarlijkse profielveranderingen [m^2] voor de knopen 2 t/m 6

Het morfologische gedrag van de knopen 5 en 6 is opvallend. Deze knopen bevinden zich in het oostelijke deel van de Westerschelde, ter hoogte van het Verdronken Land van Saeftinghe.

Praktijkwaarnemeningen wijzen op sterke sedimentatietendensen in dit gebied. Door natuurlijke processen en menselijke ingrepen (vooral het storten van gebaggerd materiaal), vindt in dit deel van het estuarium waarschijnlijk een versnelde verlandings plaats (zie paragraaf 2.5). De voor dit gedeelte van de Westerschelde verkregen modelresultaten vertonen een duidelijk 'jojo-effect' en zijn zeker geen goede weergave van de werkelijkheid. De figuren 4.7 en 4.8 tonen het verloop van het debieten in de secties 1 tot en met 5 voor respectievelijk de jaren 1800 en 1810.



Figuur 4.7: verloop van het debiet in de secties 1 tot en met 5 (1800)



Figuur 4.8: verloop van het debiet in de secties 1 tot en met 5 (1810)

4.5 Interpretatie modelresultaten en conclusie

De verkregen modelresultaten zijn geen reële weergave van de werkelijkheid. Dit is in de vorige paragraaf al enkele malen aangegeven. Het was mijns inziens vooraf al enigszins te verwachten dat de rekenresultaten een afwijkend patroon zouden vertonen, aangezien reeds bij de oriënterende berekeningen een waarde voor L werd gevonden die tamelijk fors afwijkt

van de gangbare $L=25$ km (Allersma, 1994). Zoals vermeld in paragraaf 4.4.1, is het plausibel om een grotere waarde voor L te hanteren, aangezien het algemeen bekend is dat de Westerschelde een sedimentatietendens vertoont. Het verschil tussen $L=25$ km en $L=37$ km is echter tamelijk groot.

Alvorens wordt ingegaan op mogelijke oorzaken van de onrealistische uitkomsten, wordt hieronder eerst een recapitulatie gegeven van de modelresultaten:

- $L=37$ km: deze waarde, verkregen door curve-fitting, geeft een beeld van structurele erosie te zien voor alle secties van de Westerschelde over de periode 1810-1900 (zie bijlage 9a) $\Rightarrow$ dit is in tegenspraak met praktijkwaarnemingen, dus onrealistische modelresultaten;
- $L=40$ km: de bij deze waarde behorende modelresultaten vertonen hetzelfde morfologische gedrag als de situatie $L=37$ km, echter met dit verschil dat de erosiesnelheid duidelijk kleiner is (zie bijlage 9b) $\Rightarrow$ dit is in tegenspraak met praktijkwaarnemingen, dus onrealistische modelresultaten;
- $L=43$ km: deze waarde geeft weliswaar voor enkele secties een sedimentatietendens te zien, maar juist in het oostelijke deel van het estuarium worden na verloop van tijd erosietendensen gevonden (zie bijlage 9c) $\Rightarrow$ dit is in tegenspraak met praktijkwaarnemingen, dus onrealistische modelresultaten (bovendien zijn de berekende profielveranderingen verwaarloosbaar klein ten opzichte van de actuele geuldoorsnede).

Onderstaande tabel toont de door Asmita berekende geulvolumina voor $L=43$ km.

Jaar	Sectie 1	Sectie 2	Sectie 3	Sectie 4	Sectie 5
1800	$0,640 \cdot 10^9$	$0,585 \cdot 10^9$	$0,420 \cdot 10^9$	$0,209 \cdot 10^9$	$0,107 \cdot 10^9$
1810	$0,649 \cdot 10^9$	$0,606 \cdot 10^9$	$0,417 \cdot 10^9$	$0,229 \cdot 10^9$	$0,105 \cdot 10^9$
1825	$0,655 \cdot 10^9$	$0,608 \cdot 10^9$	$0,416 \cdot 10^9$	$0,231 \cdot 10^9$	$0,104 \cdot 10^9$
1840	$0,657 \cdot 10^9$	$0,611 \cdot 10^9$	$0,414 \cdot 10^9$	$0,231 \cdot 10^9$	$0,103 \cdot 10^9$
1860	$0,659 \cdot 10^9$	$0,612 \cdot 10^9$	$0,415 \cdot 10^9$	$0,232 \cdot 10^9$	$0,103 \cdot 10^9$
1880	$0,658 \cdot 10^9$	$0,611 \cdot 10^9$	$0,416 \cdot 10^9$	$0,231 \cdot 10^9$	$0,102 \cdot 10^9$
1900	$0,656 \cdot 10^9$	$0,609 \cdot 10^9$	$0,416 \cdot 10^9$	$0,228 \cdot 10^9$	$0,101 \cdot 10^9$
1920	$0,655 \cdot 10^9$	$0,609 \cdot 10^9$	$0,416 \cdot 10^9$	$0,227 \cdot 10^9$	$0,101 \cdot 10^9$
1945	$0,650 \cdot 10^9$	$0,607 \cdot 10^9$	$0,414 \cdot 10^9$	$0,227 \cdot 10^9$	$0,102 \cdot 10^9$
1968	$0,649 \cdot 10^9$	$0,606 \cdot 10^9$	$0,413 \cdot 10^9$	$0,228 \cdot 10^9$	$0,102 \cdot 10^9$

Tabel 4.8: geulvolumina [m^3] voor de secties 1 tot en met 5 (Asmita)

In het vervolg van deze paragraaf komen enkele mogelijke oorzaken aan de orde waardoor de toepassing van het model Asmita niet tot het gewenste resultaat heeft geleid.

Bodemschematisatie:

Zoals vermeld in paragraaf 4.4.1, is de hier verkregen $L=37$ km mogelijk het resultaat van een minder gelukkig gekozen bodemschematisatie. Een feit is echter wel dat de waterbeweging in het estuarium prima wordt gereproduceerd door de getijsimulaties voor 1968, 1800 en 1650 (zie hiervoor het rapport R 93-10 van dr. A.J.F. van der Spek). Als waterbewegingsmodel voldoet de hier gehanteerde schematisatie dus zonder meer. Naar mijn mening is deze

echter te grof voor morfologische berekeningen. Per knoop wordt namelijk één dwarsdoorsnede representatief gesteld voor een vaklengte van ca. 10 km. Een in morfologisch opzicht zodanig complex systeem als de Westerschelde laat zich niet zó eenvoudig modelleren. Het estuarium bestaat uit een ingewikkeld stelsel van ebgeulen, vloedgeulen, kortsluitgeulen en al dan niet bij laagwater droogvallende platen. De enige manier om dit in een dergelijke schematisatie te verwerken, is het hanteren van een bepaalde verhouding tussen natte geuldoorsnede, bergende breedte en hydraulische straal per niveau. De bodemschematisatie geeft diensgevolge geen informatie over de positie en ligging van de diverse geulen en plaatarealen, terwijl dit voor een beschouwing van de morfologie juist essentieel is. Bovendien wordt de invloed van bochten buiten beschouwing gelaten, aangezien de modelvakken in elkaars verlengde zijn geprojecteerd. Behalve de geulen, is ook het estuarium op zich vrij bochtig van vorm. De ebgeulen volgen een meanderend patroon, met relatief diepe drempels. De vloedgeulen zijn relatief recht en volgen min of meer de vorm van het estuarium (zie paragraaf 2.4.2). De door bochten opgewekte stromingsgradiënten zijn mede van invloed op de morfologie van de Westerschelde.

Aannamen en modelparameters:

Bij de conclusies van het onderzoek naar de bodemligging van de Westerschelde met behulp van een dynamisch model is reeds de definitie van de stroomvoerende breedte ter discussie gesteld. Nadat de oorspronkelijke aanname (' $B_s = B_o$ ') niet tot bevredigende resultaten leidde, is destijds gekozen voor de definitie $B_s = A_{\text{gem.}}/R$. Hierdoor ontstond echter op sommige momenten een onrealistisch stroomprofiel, in die zin dat dit smaller werd bij een hoger niveau. Dit wordt bijvoorbeeld geïllustreerd door de bodemschematisatie van knoop 3 voor de Westerschelde anno 1800 (zie bijlage 3b): voor NAP-0,50 m wordt gevonden $B_s = 42411/9,38 = 4521$ m, terwijl voor NAP+0,00 m een waarde van $B_s = 43850/9,73 = 4507$ m wordt gevonden. Dit verschijnsel kan twee oorzaken hebben, namelijk òf de aanname was niet juist òf de bodemschematisatie voldoet niet. In de berekeningen is bovenstaand probleem 'opgelost' door de bij NAP-0,50 m behorende stroomvoerende breedte met 1,00 m te vergroten.

Bij de modelberekeningen is bij zowel knoop 1 als knoop 6 gerekend met de globale evenwichtsconcentratie (c_E). Wellicht was het realistischer geweest om deze voor de Schelde-rivier (knoop 6) gelijk aan nul te stellen.

Voor de intergetijdedispersiecoëfficiënt is een waarde $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$ aangenomen. Indien gebruik wordt gemaakt van een fijnere bodemschematisatie, kan in het algemeen worden volstaan met een kleinere waarde (zie paragraaf 4.3.3). Het is tevens mogelijk dat de hier gehanteerde $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$ alsnog te laag is.

Getijasymmetrie:

De invloed van getijasymmetrie op de morfologie is vrijwel geheel buiten beschouwing gelaten, aangezien uit de Duflow-resultaten slechts het getijvolume wordt gebruikt als invoerparameter voor het rekenprogramma Asmita ($V = \tau \int |Q| dt$). Getijasymmetrie is echter één van de factoren waardoor de Westerschelde een grote vraag naar zand vertoont. Door dit slechts zijdelings te betrekken bij de morfologische berekeningen kunnen alleen zeer globale indicaties met betrekking tot de ontwikkeling van de bodemligging van het estuarium worden gegeven.

Hoofdstuk 5 - Conclusies en aanbevelingen

Het is algemeen bekend dat getijdebekkens op den duur neigen naar verlanding. Dit geldt ook voor de Westerschelde. Op grond hiervan kan worden geconcludeerd dat de verkregen modelresultaten geen reële weergave zijn van de werkelijkheid. De validatie van ééndimensionale rekenmodellen met betrekking tot de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde blijft dus een probleem. Hiervoor zijn enkele oorzaken aan te wijzen. Ten eerste is mijns inziens de gebruikte bodemschematisatie te grof voor morfologische berekeningen. Per knoop wordt namelijk één dwarsdoorsnede representatief gesteld voor een vaklengte van ca. 10 km. Een morfologisch zodanig complex systeem als de Westerschelde laat zich niet zó eenvoudig modelleren. De bodemschematisatie geeft bijvoorbeeld geen informatie over de positie en ligging van de diverse geulen en plaatarealen, terwijl dit voor een morfologische beschouwing juist van groot belang is. Bovendien wordt de invloed van bochten buiten beschouwing gelaten, aangezien de modelvakken in elkaars verlengde zijn gesitueerd. De door bochten opgewekte stromingsgradiënten zijn mede van invloed op de morfologie van de Westerschelde. Om tot betere resultaten te komen zal in ieder geval gewerkt moeten worden met een fijnere bodemschematisatie. Een feit is echter wel dat de waterbeweging in het estuarium prima wordt gereproduceerd door de getijsimulaties voor 1968, 1800 en 1650. Als waterbewegingsmodel voldoet de gehanteerde schematisatie dus zonder meer.

Ten tweede speelt de berekeningswijze van een nieuw dwarsprofiel ten behoeve van een volgende stromingsberekening een rol. Dit is gedaan onder de aanname dat een geërodeerde of gesedimenteerde hoeveelheid bodemmateriaal evenredig wordt verdeeld naar de diepte. Tevens is aangenomen dat een geuldoorsnede onder het niveau NAP-2,50 m een rechthoekig bakprofiel heeft. In een aantal gevallen verandert de afstand tussen het laagwaterniveau (ca. NAP-2,50 m) en de onderliggende bodem met enkele meters per run. Dit heeft zeker invloed op de waterbeweging in het estuarium en dus ook op de bodemligging, aangezien een sectie daardoor vrij plotseling een relatief grote hoeveelheid water meer of minder kan bevatten. Wellicht leidt een andere berekeningswijze voor een nieuw dwarsprofiel tot betere resultaten. Tenslotte is een opmerking over de invloed van getijasymmetrie op de morfologische ontwikkeling op zijn plaats. Bij de toepassing van het dynamische model is in twee gevallen (situatie 2 en 4) gerekend met een gemiddelde k -waarde. Hierdoor wordt de invloed van getijasymmetrie op het transport van bodemmateriaal verwaarloosd, terwijl dit verschijnsel juist mede verantwoordelijk wordt gehouden voor grote sedimentimporten vanuit het mondingsgebied van de Westerschelde. Op een indirecte wijze wordt getijasymmetrie overigens wel op het sedimenttransport betrokken. De waterbeweging in het estuarium is in alle gevallen namelijk gesimuleerd met behulp van de oorspronkelijke k -waarden. De door DufLOW berekende stroomsnelheden vormen vervolgens een invoerparameter voor de sedimenttransportformule van Englund en Hansen. Bij de toepassing van het dynamisch-empirische model Asmita is de invloed van getijasymmetrie vrijwel geheel verwaarloosd, aangezien slechts het uit de DufLOW-resultaten berekende getijvolume als invoerparameter voor het model wordt gebruikt ($V = \tau \int |Q| dt$).

In zijn rapport R 93-10 maakt dr. A.J.F. van der Spek melding van het bestaan van een aantal gedetailleerde Implic-schematisaties van de Westerschelde. Het verdient aanbeveling om de toepassing van beide modellen op deze schematisaties nader te onderzoeken.

Geraadpleegde literatuur

- Allersma, E., 1994. Geulen in estuaria. Rapport H 1828, WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Berg, J.H. van den, M.C.J.L. Jeuken en A.J.F. van der Spek, 1996. Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. In: Nordstrom, K.F. en C.J. Roman (Eds.), *Estuarine Shores: Evolution, Environments and Human Alterations*. John Wiley, Chicester.
- Boeije, R.C., 1992. Perspectief voor het Schelde-estuarium. Rapport DGW 92.034, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren / DGW, Middelburg.
- Fischer, M.M., P.C. Vos, R.M. van Heeringen, D.P. van Dassen, A. Hoogendoorn en A. Koers, 1996. Paleogeografische kaarten van Zeeland, Holoceen, 1:500000. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Fokkink, R.J. en A. van der Weck, 1998. Final version of the estmorf model. Rapport Z 2262, WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Holland, A.M.B. en H. Smit, 1994. Zoet water in het Schelde-estuarium: veranderingen in de saliniteit. Rapport DGW 93.057, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, Middelburg.
- Metzelaar, W., 1989. Nederland Deltaland, 6e dr., 2e opl. Educaboek BV, Culemborg.
- Spaans, W., N. Booij, N. Praagman, R. Noorman en J. Lander, 1989. DUFLOW, a micro-computer package for the simulation of one-dimensional unsteady flow and water quality in open channel systems. SAMWAT, Den Haag.
- Spek, A.J.F. van der, 1993. Getijsimulatie voormalige getijdebekkens, Deel I: de Westerschelde in 1650 en 1800. Rapport R 93-10, Instituut voor marien en atmosferisch onderzoek Utrecht, Universiteit Utrecht, Utrecht.
- Spek, A.J.F. van der, 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Proefschrift. Universiteit Utrecht, Utrecht.
- Vries, M. de, 1996. River Engineering, Lecture notes f10. Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, subfaculteit Civiele Techniek, Delft.
- Vroon, J., K. Storm en J. Coosen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rapport RIKZ 97.023, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, Middelburg.

Bijlagen

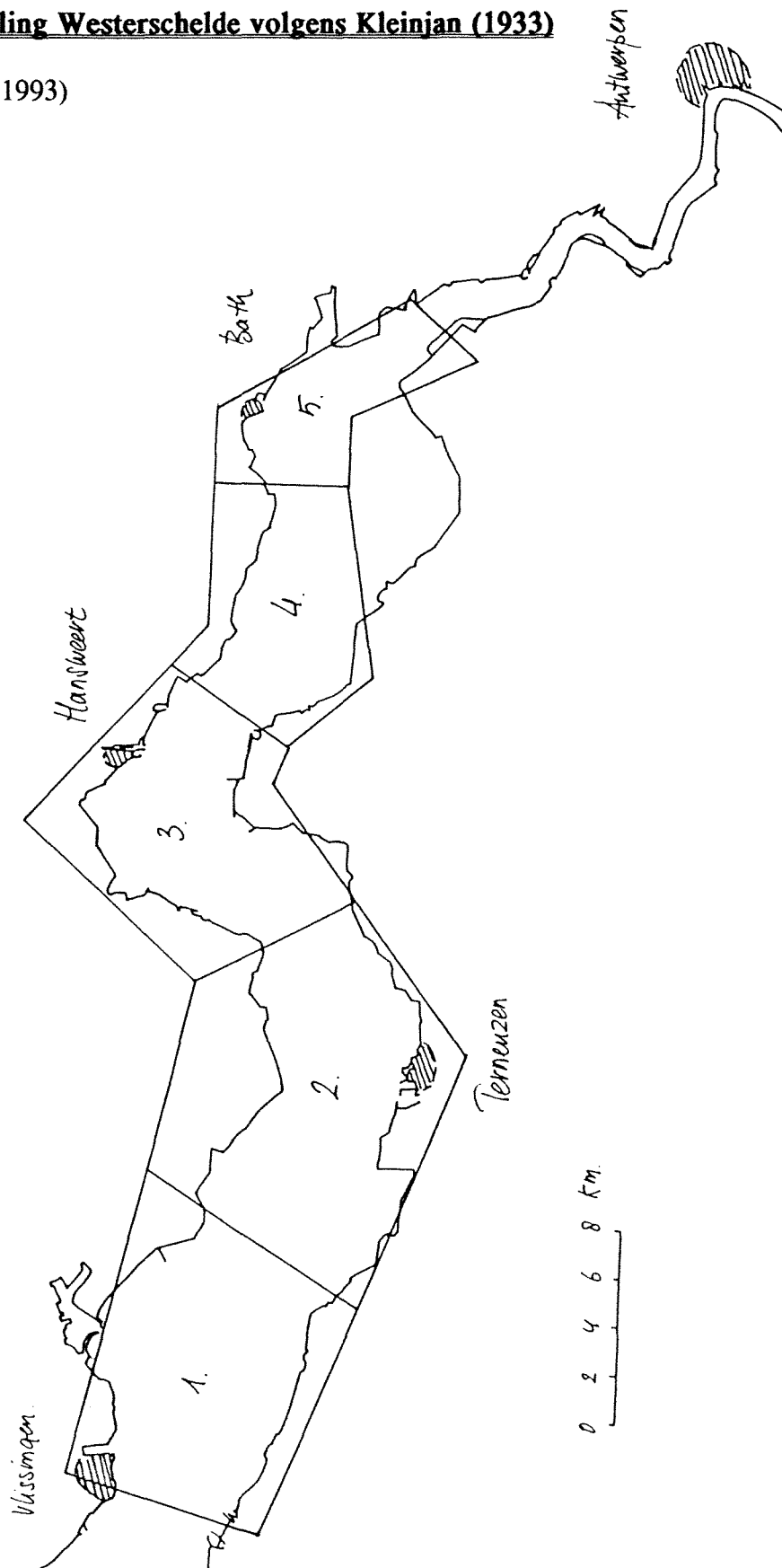
- Bijlage 1** : Indeling van het Holoceen
- Bijlage 2a** : Vakindeling Westerschelde volgens Kleinjan (1933)
- Bijlage 2b** : Vakindeling en modelknopen Schelde-estuarium voor getijsimulatie 1968
- Bijlage 3a** : Bodemschematisatie 1968
- Bijlage 3b** : Bodemschematisatie 1800
- Bijlage 3c** : Bodemschematisatie 1650
- Bijlage 4** : DufLOW-resultaten 1800 (stroomsnelheden en waterstanden)
- Bijlage 5** : Handmatige berekening dwarsprofiel knoop 2 (1802)
- Bijlage 6** : Relatie tussen dwarsprofiel en getijvolume (1800)
- Bijlage 7** : Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1810) voor $L=37$ km en $D=1000$ m²/s
- Bijlage 8** : Handmatige berekening dwarsprofiel knoop 5 (1810)
- Bijlage 9a** : Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1900) voor $L=37$ km
- Bijlage 9b** : Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1900) voor $L=40$ km
- Bijlage 9c** : Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1900) voor $L=43$ km

Bijlage 1: Indeling van het Holoceen

Tijd	Indeling	Afzettingen
+2000	Subatlanticum	■ Jonge duinen en stranden langs de kust ■ Jonge zeeklei en zeezand in Zeeland, Noord-Holland, Friesland en Groningen ■ Jonge rivierklei en -zand langs rivieren en beken ■ Jong laag- en hoogveen
+1000		
0		
-1100		
-2000	Subboreaal	■ Oude duinen en stranden ■ Hollandveen
-3000		
-3850		
-5000	Atlanticum	■ Oude zeeklei
-6000		
-6900		
-8000	Boreaal	■ Basisveen in westelijk Nederland
	Preboreaal	

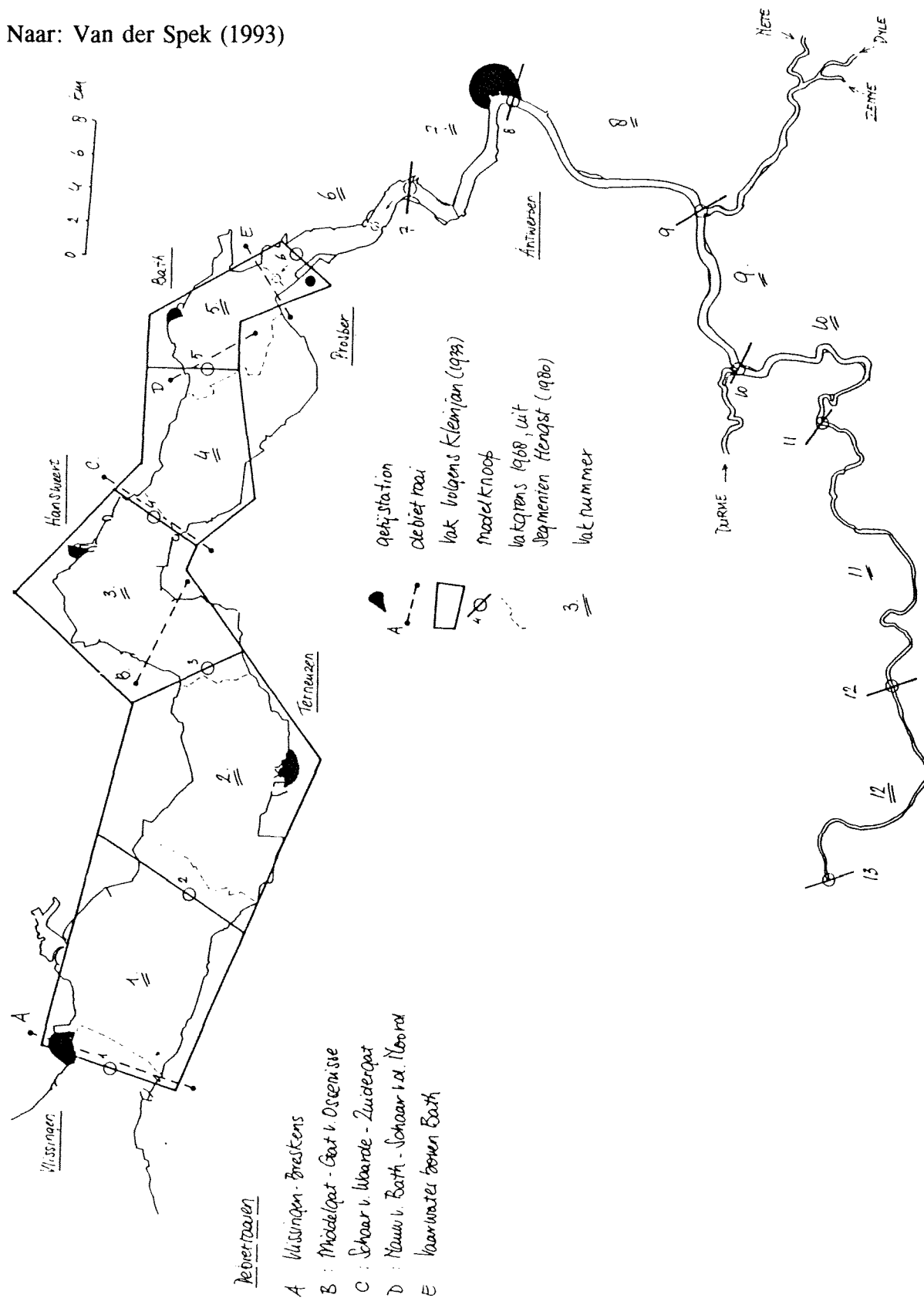
Bijlage 2a: Vakindeling Westerschelde volgens Kleinjan (1933)

Naar: Van der Spek (1993)



Bijlage 2b: Vakindeling en modelknoten Schelde-estuarium voor getijsimulatie 1968

Naar: Van der Spek (1993)



Bijlage 3a: Bodemschematisatie 1968

- * definitieve schematisatie Westerschelde 1968
- * indeling in 12 vakken, waarbij zijtakken Schelde meegenomen
- * NB vakiengtes 10% kleiner, A en BB 10% groter !!!
- *
- *

SECT 1 1 2 13050 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 72153. 74952. 77922. 80894. 84230. 87565. 91092. 94619. 97857. 101096.
104775. 108456. 112135. 115806. 119533. 123250. 127334. 131417. 135250. 139082.
A2 48822. 50942. 53174. 55406. 57841. 60277. 62954. 65631. 68419. 71208.
74089. 76971. 79909. 82846. 85821. 88796. 91754. 94713. 97745. 100777.
BB 4810. 4933. 5091. 5249. 5462. 5674. 5882. 6089. 6262. 6434.
6496. 6557. 6567. 6578. 6620. 6662. 6764. 6865. 6934. 7004.
R 12.51 12.68 12.78 12.88 12.87 12.87 12.92 12.98 13.11 13.24
13.61 13.98 14.46 14.93 15.34 15.75 16.01 16.26 16.60 16.93

SECT 2 2 3 13950 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 48822. 50942. 53174. 55406. 57841. 60277. 62954. 65631. 68419. 71208.
74089. 76971. 79909. 82846. 85821. 88796. 91754. 94713. 97745. 100777.
A2 35717. 37455. 39319. 41183. 43244. 45305. 47581. 49857. 52240. 54624.
57061. 59498. 61989. 64480. 66953. 69427. 71900. 74373. 76882. 79391.
BB 3630. 3743. 3931. 4119. 4312. 4505. 4701. 4897. 4969. 5041.
5091. 5142. 5151. 5159. 5168. 5177. 5186. 5194. 5203. 5211.
R 10.33 10.51 10.50 10.49 10.52 10.55 10.61 10.67 11.01 11.35
11.74 12.11 12.60 13.07 13.56 14.04 14.51 14.97 15.45 15.93

SECT 3 3 4 13950 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 35717. 37455. 39319. 41183. 43244. 45305. 47581. 49857. 52240. 54624.
57061. 59498. 61989. 64480. 66953. 69427. 71900. 74373. 76882. 79391.
A2 22845. 24063. 25483. 26903. 28487. 30072. 31801. 33530. 35350. 37171.
39084. 40997. 42909. 44820. 46733. 48647. 50558. 52470. 54419. 56368.
BB 3228. 3362. 3566. 3769. 3975. 4181. 4375. 4568. 4624. 4680.
4692. 4705. 4716. 4728. 4739. 4751. 4762. 4773. 4785. 4796.
R 10.52 10.58 10.47 10.38 10.34 10.30 10.35 10.39 10.76 11.12
11.59 12.05 12.53 13.01 13.47 13.93 14.40 14.87 15.33 15.80

SECT 4 4 5 11700 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 22845. 24063. 25483. 26903. 28487. 30072. 31801. 33530. 35350. 37171.
39084. 40997. 42909. 44820. 46733. 48647. 50558. 52470. 54419. 56368.
A2 10332. 11080. 11962. 12845. 13870. 14899. 16055. 17217. 18459. 19703.
21126. 22549. 24039. 25528. 27075. 28622. 30132. 31642. 33189. 34736.
BB 1734. 1902. 2185. 2469. 2667. 2865. 3144. 3424. 3628. 3832.
4377. 4922. 4927. 4932. 4938. 4944. 4950. 4956. 4962. 4968.
R 6.75 6.60 6.47 6.36 6.66 6.93 7.07 7.21 7.59 7.97
8.35 8.71 9.19 9.67 10.17 10.68 11.15 11.62 12.12 12.62

SECT 5 5 6 9900 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 10332. 11080. 11962. 12845. 13870. 14899. 16055. 17217. 18459. 19703.
21126. 22549. 24039. 25528. 27075. 28622. 30132. 31642. 33189. 34736.
A2 7088. 7592. 8122. 8661. 9276. 9908. 10644. 11397. 12203. 13015.
13936. 14858. 15883. 16909. 17955. 19001. 20048. 21094. 22140. 23186.
BB 1433. 1512. 1607. 1700. 1805. 1909. 2040. 2172. 2346. 2520.
2783. 3046. 3101. 3157. 3211. 3265. 3278. 3290. 3309. 3328.
R 6.84 6.98 7.11 7.23 7.35 7.44 7.50 7.55 7.51 7.50
7.36 7.27 7.64 8.01 8.38 8.75 9.20 9.66 10.09 10.52

SECT 6 6 7 9242 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 5740. 6139. 6546. 6962. 7386. 7818. 8257. 8704. 9159. 9621.
10091. 10564. 11037. 11510. 11983. 12456. 12929. 13402. 13875. 14348.
A2 4695. 4985. 5282. 5588. 5905. 6237. 6585. 6947. 7318. 7696.
8079. 8463. 8848. 9233. 9617. 10002. 10387. 10771. 11156. 11541.
BB 837. 864. 889. 911. 932. 952. 972. 993. 1012. 1030.
1050. 1072. 1096. 1122. 1147. 1174. 1200. 1225. 1233. 1238.
R 7.98 8.26 8.62 8.96 9.26 9.53 9.77 9.98 10.22 10.48
10.76 11.17 11.59 12.01 12.44 12.88 13.32 13.76 14.20 14.65

SECT 7 7 8 12160 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 4695. 4985. 5282. 5588. 5905. 6237. 6585. 6947. 7318. 7696.
8079. 8463. 8848. 9233. 9617. 10002. 10387. 10771. 11156. 11541.
A2 3190. 3394. 3602. 3814. 4028. 4246. 4467. 4689. 4915. 5142.
5370. 5600. 5829. 6059. 6288. 6517. 6747. 6978. 7206. 7435.
BB 485. 494. 503. 511. 519. 526. 531. 536. 541. 546.
550. 564. 584. 613. 643. 671. 696. 704. 704. 704.
R 8.60 8.94 9.30 9.65 9.99 10.36 10.75 11.13 11.52 11.92
12.36 12.83 13.30 13.77 14.24 14.70 15.16 15.62 16.08 16.54

SECT 8 8 9 14783 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 3190. 3394. 3602. 3814. 4028. 4246. 4467. 4689. 4915. 5142.
5370. 5600. 5829. 6059. 6288. 6517. 6747. 6978. 7206. 7435.
A2 1598. 1777. 1966. 2164. 2370. 2584. 2807. 3037. 3273. 3515.
3763. 4016. 4272. 4529. 4785. 5041. 5297. 5553. 5809. 6065.
BB 324. 331. 337. 342. 347. 352. 355. 359. 362. 366.
368. 375. 384. 400. 418. 439. 448. 448. 448. 448.
R 6.85 7.22 7.56 7.95 8.33 8.71 9.09 9.51 9.91 10.32
10.74 11.20 11.66 12.12 12.58 13.04 13.49 13.94 14.39 14.84

SECT 9 9 10 10425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 1598. 1777. 1966. 2164. 2370. 2584. 2807. 3037. 3273. 3515.
3763. 4016. 4272. 4529. 4785. 5041. 5297. 5553. 5809. 6065.
A2 631. 774. 931. 1102. 1285. 1482. 1692. 1914. 2146. 2388.
2640. 2901. 3169. 3439. 3710. 3980. 4250. 4520. 4791. 5061.
BB 374. 406. 436. 465. 494. 523. 551. 574. 596. 616.
635. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656.
R 3.00 3.50 4.00 4.50 5.00 5.50 6.00 6.50 7.00 7.50
8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 11.50 12.00 12.50

SECT 10 10 11 15300 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 631. 774. 931. 1102. 1285. 1482. 1692. 1914. 2146. 2388.
2640. 2901. 3169. 3439. 3710. 3980. 4250. 4520. 4791. 5061.
A2 191. 253. 322. 397. 479. 568. 664. 766. 876. 991.
1112. 1238. 1369. 1502. 1635. 1768. 1901. 2034. 2167. 2300.
BB 168. 196. 220. 243. 267. 291. 314. 337. 356. 373.
390. 407. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425.
R 2.47 2.97 3.47 3.97 4.47 4.97 5.47 5.97 6.47 6.97
7.47 7.97 8.47 8.97 9.47 9.97 10.47 10.97 11.47 11.97

SECT 11 11 12 24425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 191. 253. 322. 397. 479. 568. 664. 766. 876. 991.
1112. 1238. 1369. 1502. 1635. 1768. 1901. 2034. 2167. 2300.
A2 42. 59. 77. 94. 124. 156. 190. 226. 266. 308.
355. 406. 458. 511. 564. 616. 669. 721. 774. 826.
BB 64. 67. 69. 71. 75. 78. 82. 88. 95. 99.
107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107.
R 0.73 1.23 1.73 2.23 2.73 3.23 3.73 4.23 4.73 5.23
5.73 6.23 6.73 7.23 7.73 8.23 8.73 9.23 9.73 10.23

SECT 12 12 13 18145 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 42. 59. 77. 94. 124. 156. 190. 226. 266. 308.
355. 406. 458. 511. 564. 616. 669. 721. 774. 826.
A2 8. 9. 10. 11. 21. 34. 48. 63. 80. 98.
119. 143. 169. 194. 220. 246. 272. 298. 323. 349.
BB 33. 37. 40. 44. 48. 53. 58. 63. 68. 79.
89. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103.
R 0.74 0.75 0.76 0.77 1.27 1.77 2.27 2.77 3.27 6.49
6.81 7.17 7.55 7.95 8.37 8.78 9.20 9.61 10.03 10.44

Bijlage 3b: Bodemschematisatie 1800

* file: 1800test.net versie 19.05.93

*

* "grove schematisatie" uit dwarsdoorsnedes

* opgemeten uit de kaart van Beautemps-Beaupré

*

* doorsnedes 5% gereduceerd !!!

*

SECT 1 1 2 11700 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 65550. 67648. 69761. 71874. 74017. 76160. 78348. 80536. 82784. 85032.
87909. 90787. 91956. 93125. 94293. 95462. 96601. 97770. 98945. 100108.
A2 30227. 32131. 34498. 36866. 39339. 41812. 44434. 47057. 49889. 52722.
55884. 59046. 60694. 62343. 63991. 65640. 67288. 68937. 70585. 72234.
BB 5546. 5796. 6073. 6326. 6665. 6810. 6970. 7111. 7313. 7585.
7826. 8100. 8100. 8100. 8100. 8100. 8100. 8100. 8100. 8100.
R 10.77 10.85 10.92 11.04 11.03 11.41 11.77 12.13 12.42 12.57
12.84 13.12 13.37 13.62 13.87 14.12 14.37 14.62 14.87 15.12

SECT 2 2 3 14100 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 30227. 32131. 34498. 36866. 39339. 41812. 44434. 47057. 49889. 52722.
55884. 59046. 60694. 62343. 63991. 65640. 67288. 68937. 70585. 72234.
A2 37361. 38545. 39759. 40972. 42411. 43850. 45393. 46937. 48750. 50564.
52557. 54550. 55569. 56588. 57607. 58626. 59645. 60634. 61653. 62672.
BB 4563. 4885. 5185. 5620. 6260. 6571. 6877. 7311. 7888. 8745.
9428. 10086. 10086. 10086. 10086. 10086. 10086. 10086. 10086. 10086.
R 10.12 9.98 10.03 9.83 9.38 9.73 9.99 10.18 10.28 10.35
10.46 10.72 10.97 11.21 11.47 11.72 11.97 12.21 12.46 12.71

SECT 3 3 4 12500 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 37361. 38545. 39759. 40972. 42411. 43850. 45393. 46937. 48750. 50564.
52557. 54550. 55569. 56588. 57607. 58626. 59645. 60634. 61653. 62672.
A2 21970. 23468. 24967. 26466. 27994. 29523. 31081. 32540. 34199. 35757.
37361. 38964. 39774. 40583. 41392. 42201. 43011. 43820. 44629. 45438.
BB 3642. 3762. 3949. 4119. 4191. 4282. 4385. 4523. 4713. 4948.
5133. 5377. 5377. 5377. 5377. 5377. 5377. 5377. 5377. 5377.
R 9.68 9.91 10.00 10.12 10.51 10.87 11.22 11.48 11.64 11.74
12.05 12.31 12.56 12.81 13.06 13.31 13.56 13.81 14.06 14.31

SECT 4 4 5 9900 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 21970. 23468. 24967. 26466. 27994. 29523. 31081. 32540. 34199. 35757.
37361. 38964. 39774. 40583. 41392. 42201. 43011. 43820. 44629. 45438.
A2 9262. 9891. 10655. 11420. 12379. 13338. 14492. 15646. 16864. 18283.
19782. 21280. 22030. 22779. 23528. 24248. 24997. 25746. 26496. 27245.
BB 3225. 3522. 3981. 4570. 5217. 5853. 6531. 7291. 8002. 8861.
9485. 9961. 9961. 9961. 9961. 9961. 9961. 9961. 9961. 9961.
R 7.14 7.41 7.55 7.71 7.87 7.92 8.12 8.20 8.29 8.18
8.38 8.69 8.94 9.19 9.44 9.68 9.93 10.19 10.44 10.69

SECT 5 5 6 9600 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 9262. 9891. 10655. 11420. 12379. 13338. 14492. 15646. 16864. 18283.
19782. 21280. 22030. 22779. 23528. 24248. 24997. 25746. 26496. 27245.
A2 6084. 6714. 7388. 8063. 8797. 9531. 10281. 11030. 11824. 12618.
13503. 14387. 14866. 15331. 15796. 16275. 16755. 17219. 17684. 18163.
BB 2001. 2394. 2958. 3573. 4251. 5051. 5703. 6558. 7261. 7904.
8424. 8811. 8811. 8811. 8811. 8811. 8811. 8811. 8811. 8811.
R 5.00 5.07 5.28 5.47 5.69 5.78 6.09 6.30 6.52 6.72
6.95 6.87 7.12 7.37 7.62 7.87 8.12 8.37 8.61 8.87

SECT 6 6 7 9365 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 6084. 6714. 7388. 8063. 8797. 9531. 10281. 11030. 11824. 12618.
13503. 14387. 14866. 15331. 15796. 16275. 16755. 17219. 17684. 18163.
A2 3187. 3488. 3789. 4089. 4405. 4721. 5051. 5382. 5728. 6074.
6510. 6946. 7532. 8118. 8705. 9291. 9877. 10463. 11050. 11636.
BB 902. 923. 944. 976. 995. 1022. 1045. 1075. 1114. 1142.
1210. 1464. 1464. 1464. 1464. 1464. 1464. 1464. 1464. 1464.
R 5.86 6.21 6.58 6.85 7.23 7.54 7.88 8.14 8.36 8.64
8.67 7.60 8.10 8.60 9.10 9.60 10.10 10.60 11.10 11.60

SECT 7 7 8 12160 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 3187. 3488. 3789. 4089. 4405. 4721. 5051. 5382. 5728. 6074.
6510. 6946. 7532. 8118. 8705. 9291. 9877. 10463. 11050. 11636.
A2 2796. 3007. 3217. 3428. 3653. 3879. 4119. 4360. 4600. 4841.
5096. 5352. 5671. 5989. 6308. 6627. 6946. 7264. 7583. 7902.
BB 544. 551. 551. 565. 576. 586. 598. 609. 625. 641.
675. 856. 856. 856. 856. 856. 856. 856. 856. 856.
R 6.65 7.06 7.55 7.85 8.19 8.53 8.86 9.18 9.44 9.70
9.72 8.06 8.56 9.06 9.56 10.06 10.56 11.06 11.56 12.06

SECT 8 8 9 14783 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 2497. 2657. 2819. 2985. 3153. 3324. 3496. 3671. 3847. 4025.
4204. 4383. 4563. 4743. 4922. 5102. 5281. 5461. 5640. 5820.
A2 1251. 1392. 1539. 1694. 1855. 2023. 2197. 2377. 2562. 2751.
2945. 3144. 3345. 3545. 3745. 3946. 4146. 4347. 4547. 4748.
BB 324. 331. 337. 342. 347. 352. 355. 359. 362. 366.
368. 375. 384. 400. 418. 439. 448. 448. 448. 448.
R 5.36 5.65 5.93 6.22 6.52 6.82 7.12 7.44 7.75 8.08
8.40 8.77 9.13 9.49 9.85 10.21 10.56 10.91 11.26 11.62

SECT 9 9 10 10425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 1251. 1392. 1539. 1694. 1855. 2023. 2197. 2377. 2562. 2751.
2945. 3144. 3345. 3545. 3745. 3946. 4146. 4347. 4547. 4748.
A2 494. 606. 729. 862. 1006. 1160. 1324. 1498. 1680. 1870.
2067. 2271. 2481. 2692. 2904. 3115. 3327. 3539. 3750. 3962.
BB 374. 406. 436. 465. 494. 523. 551. 574. 595. 616.
635. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656.
R 2.35 2.74 3.13 3.52 3.91 4.31 4.70 5.09 5.48 5.87
6.26 6.65 7.05 7.44 7.83 8.22 8.61 9.00 9.39 9.78

SECT 10 10 11 15300 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 494. 606. 729. 862. 1006. 1160. 1324. 1498. 1680. 1870.
2067. 2271. 2481. 2692. 2904. 3115. 3327. 3539. 3750. 3962.
A2 150. 198. 252. 311. 375. 445. 519. 600. 685. 776.
870. 969. 1072. 1176. 1280. 1384. 1488. 1592. 1697. 1801.
BB 168. 196. 220. 243. 267. 291. 314. 337. 356. 373.
390. 407. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425.
R 1.93 2.32 2.72 3.11 3.50 3.89 4.28 4.67 5.06 5.46
5.85 6.24 6.63 7.02 7.41 7.80 8.20 8.59 8.98 9.37

SECT 11 11 12 24425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 150. 198. 252. 311. 375. 445. 519. 600. 685. 776.
870. 969. 1072. 1176. 1280. 1384. 1488. 1592. 1697. 1801.
A2 33. 46. 60. 74. 97. 122. 149. 177. 208. 241.
278. 318. 359. 400. 441. 482. 523. 565. 606. 647.
BB 64. 67. 69. 71. 75. 78. 82. 88. 95. 99.
107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107.
R 0.57 0.96 1.35 1.75 2.14 2.53 2.92 3.31 3.70 4.09
4.49 4.88 5.27 5.66 6.05 6.44 6.83 7.23 7.62 8.01

SECT 12 12 13 18145 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 33. 46. 60. 74. 97. 122. 149. 177. 208. 241.
278. 318. 359. 400. 441. 482. 523. 565. 606. 647.
A2 7. 8. 9. 10. 17. 27. 38. 49. 62. 77.
93. 112. 132. 152. 172. 193. 213. 233. 253. 273.
BB 33. 37. 40. 44. 48. 53. 58. 63. 68. 79.
89. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103.
R 0.57 0.58 0.59 0.60 0.99 1.39 1.78 2.17 2.56 2.95
3.34 3.73 4.13 4.52 4.91 5.30 5.69 6.08 6.47 6.87

Bijlage 3c: Bodemschematisatie 1650

* file: 1650test.net versie 25.05.93

*

* vak 1 t/m 7: "grove schematisatie" uit dwarsdoorsnedes

* opgemeten uit de kaart van Beautemps-Beaupré

* 10 vakken model, doorsnedes 5% gereduceerd !!!

* bergende breedtes uit *550, vaklengtes 1800

*

* vak 8 t/m 12: Schelde-surf. 35% gereduceerd

*

SECT 1 1 2 1*700 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 65550. 67648. 69761. 71*734. 74017. 76160. 78348. 80536. 82784. 85032.
87909. 90787. 91956. 93*25. 94293. 95462. 96601. 97770. 98945. 100108.
A2 30227. 32131. 34498. 36866. 39339. 41812. 44434. 47057. 49889. 52722.
55884. 59046. 60694. 62343. 63991. 65640. 67288. 68937. 70585. 72234.
BB 6120. 6701. 7393. 7572. 8342. 8786. 9265. 9735. 10137. 10530.
10906. 11299. 11299. 11299. 11299. 11299. 11299. 11299. 11299. 11299.
R 10.77 10.85 10.92 11.24 11.03 11.41 11.77 12.13 12.42 12.57
12.84 13.12 13.37 13.62 13.87 14.12 14.37 14.62 14.87 15.12

SECT 2 2 3 1*100 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 30227. 32131. 34498. 36866. 39339. 41812. 44434. 47057. 49889. 52722.
55884. 59046. 60694. 62343. 63991. 65640. 67288. 68937. 70585. 72234.
A2 37361. 38545. 39759. 40972. 42411. 43850. 45393. 46937. 48750. 50564.
52557. 54550. 55569. 56588. 57607. 58626. 59645. 60634. 61653. 62672.
BB 7355. 7752. 8206. 8773. 9277. 9936. 10709. 11560. 12631. 14156.
16340. 20305. 20305. 20305. 20305. 20305. 20305. 20305. 20305. 20305.
R 10.12 9.98 10.03 9.23 9.38 9.73 9.99 10.18 10.28 10.35
10.46 10.72 10.97 11.21 11.47 11.72 11.97 12.21 12.46 12.71

SECT 3 3 4 1*2500 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 37361. 38545. 39759. 40972. 42411. 43850. 45393. 46937. 48750. 50564.
52557. 54550. 55569. 56588. 57607. 58626. 59645. 60634. 61653. 62672.
A2 21970. 23468. 24967. 26466. 27994. 29523. 31081. 32640. 34199. 35757.
37361. 38964. 39774. 40583. 41392. 42201. 43011. 43820. 44629. 45438.
BB 3848. 3952. 4072. 4208. 4384. 4600. 4888. 5376. 5920. 6320.
6576. 6688. 6688. 6688. 6688. 6688. 6688. 6688. 6688. 6688.
R 9.68 9.91 10.00 10*2 10.51 10.87 11.22 11.48 11.64 11.74
12.05 12.31 12.56 12.81 13.06 13.31 13.56 13.81 14.06 14.31

SECT 4 4 5 9900 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 21970. 23468. 24967. 26466. 27994. 29523. 31081. 32640. 34199. 35757.
37361. 38964. 39774. 40583. 41392. 42201. 43011. 43820. 44629. 45438.
A2 9262. 9891. 10655. 11*420. 12379. 13338. 14492. 15646. 16964. 18283.
19782. 21280. 22030. 22779. 23528. 24248. 24997. 25746. 26496. 27245.
BB 3545. 3859. 4303. 4909. 5646. 6566. 7939. 9646. 11535. 12616.
13061. 13758. 13758. 13758. 13758. 13758. 13758. 13758. 13758. 13758.
R 7.14 7.41 7.55 7.71 7.87 7.92 8.12 8.20 8.29 8.18
8.38 8.69 8.94 9.19 9.44 9.68 9.93 10.19 10.44 10.69

SECT 5 5 6 9600 -2.50 -2.50 48. 37.
W . 3.60
A1 9262. 9891. 10655. 11*420. 12379. 13338. 14492. 15646. 16964. 18283.
19782. 21280. 22030. 22779. 23528. 24248. 24997. 25746. 26496. 27245.
A2 6084. 6714. 7388. 8063. 8797. 9531. 10281. 11030. 11824. 12618.
13503. 14387. 14866. 15331. 15796. 16275. 16755. 17219. 17684. 18163.
BB 2271. 2656. 3073. 3656. 4583. 7052. 10573. 11448. 11906. 12135.
12385. 12656. 12656. 12656. 12656. 12656. 12656. 12656. 12656. 12656.
R 5.00 5.07 5.28 5*47 5.69 5.78 6.09 6.30 6.58 6.72
6.95 6.87 7.12 7*37 7.62 7.87 8.12 8.37 8.61 8.87

SECT 6 6 7 9365 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 6084. 6714. 7388. 8063. 8797. 9531. 10281. 11030. 11824. 12618.
13503. 14387. 14866. 15331. 15796. 16275. 16755. 17219. 17684. 18163.
A2 3187. 3488. 3789. 4089. 4405. 4721. 5051. 5382. 5728. 6074.
6510. 6946. 7532. 8118. 8705. 9291. 9877. 10463. 11050. 11636.
BB 641. 683. 715. 758. 801. 844. 897. 940. 982. 1025.
1068. 1111. 1111. 1111. 1111. 1111. 1111. 1111. 1111. 1111.
R 5.86 6.21 6.58 6*55 7.23 7.54 7.88 8.14 8.36 8.64
8.67 7.60 8.10 8*80 9.10 9.60 10.10 10.60 11.10 11.60

SECT 7 7 8 12160 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 3187. 3488. 3789. 4089. 4405. 4721. 5051. 5382. 5728. 6074.
6510. 6946. 7532. 8118. 8705. 9291. 9877. 10463. 11050. 11636.
A2 2796. 3007. 3217. 3428. 3653. 3879. 4119. 4360. 4600. 4841.
5096. 5352. 5671. 5989. 6308. 6627. 6946. 7264. 7583. 7902.
BB 683. 765. 872. 995. 1143. 1316. 1546. 1842. 2130. 2377.
2582. 2763. 2763. 2763. 2763. 2763. 2763. 2763. 2763. 2763.
R 6.65 7.06 7.55 7.85 8.19 8.53 8.86 9.18 9.44 9.70
9.72 8.06 8.56 9.06 9.56 10.06 10.56 11.06 11.56 12.06

SECT 8 8 9 14783 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 2079. 2212. 2347. 2485. 2625. 2767. 2911. 3056. 3202. 3350.
3499. 3649. 3798. 3948. 4097. 4247. 4396. 4546. 4695. 4845.
A2 1042. 1158. 1281. 1410. 1544. 1684. 1829. 1979. 2133. 2290.
2452. 2617. 2784. 2951. 3118. 3285. 3452. 3618. 3785. 3952.
BB 324. 331. 337. 342. 347. 352. 355. 359. 362. 366.
368. 375. 384. 400. 418. 439. 448. 448. 448. 448.
R 4.46 4.70 4.94 5.18 5.43 5.67 5.93 6.19 6.46 6.72
7.00 7.30 7.60 7.90 8.20 8.50 8.79 9.09 9.38 9.67

SECT 9 9 10 10425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 1042. 1158. 1281. 1410. 1544. 1684. 1829. 1979. 2133. 2290.
2452. 2617. 2784. 2951. 3118. 3285. 3452. 3618. 3785. 3952.
A2 411. 504. 607. 718. 837. 966. 1102. 1247. 1398. 1556.
1720. 1891. 2065. 2241. 2417. 2593. 2770. 2946. 3122. 3298.
BB 374. 406. 436. 465. 494. 523. 551. 574. 595. 616.
635. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656. 656.
R 1.95 2.28 2.61 2.93 3.26 3.58 3.91 4.24 4.56 4.89
5.21 5.54 5.86 6.19 6.52 6.84 7.17 7.49 7.82 8.15

SECT 10 10 11 15300 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 411. 504. 607. 718. 837. 966. 1102. 1247. 1398. 1556.
1720. 1891. 2065. 2241. 2417. 2593. 2770. 2946. 3122. 3298.
A2 125. 165. 210. 259. 312. 370. 432. 499. 571. 646.
725. 807. 892. 979. 1066. 1152. 1239. 1326. 1412. 1499.
BB 168. 196. 220. 243. 267. 291. 314. 337. 356. 373.
390. 407. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425. 425.
R 1.61 1.94 2.26 2.59 2.91 3.24 3.56 3.89 4.22 4.54
4.87 5.19 5.52 5.85 6.17 6.50 6.82 7.15 7.47 7.80

SECT 11 11 12 24425 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 125. 165. 210. 259. 312. 370. 432. 499. 571. 646.
725. 807. 892. 979. 1066. 1152. 1239. 1326. 1412. 1499.
A2 28. 39. 50. 62. 81. 102. 124. 147. 173. 201.
231. 264. 299. 333. 367. 402. 436. 470. 504. 539.
BB 64. 67. 69. 71. 75. 78. 82. 88. 95. 99.
107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107. 107.
R 0.48 0.80 1.13 1.45 1.78 2.10 2.43 2.76 3.08 3.41
3.73 4.06 4.39 4.71 5.04 5.36 5.69 6.01 6.34 6.67

SECT 12 12 13 18145 -2.50 -2.50 48. 45.
W . 3.60
A1 28. 39. 50. 62. 81. 102. 124. 147. 173. 201.
231. 264. 299. 333. 367. 402. 436. 470. 504. 539.
A2 5. 6. 7. 8. 14. 22. 31. 41. 52. 64.
77. 93. 110. 127. 144. 160. 177. 194. 211. 227.
BB 33. 37. 40. 44. 48. 53. 58. 63. 68. 79.
89. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103. 103.
R 0.48 0.49 0.50 0.51 0.83 1.15 1.48 1.81 2.13 2.46
2.78 3.11 3.43 3.76 4.09 4.41 4.74 5.06 5.39 5.71

Bijlage 4: DufLOW-resultaten 1800 (stroomsnelheden en waterstanden)

Velocity sect 1		Level		
Time		Time	node 1	node 2
hour	m/s	hour	m	m
=====	=====	=====	=====	=====
51,500	0,20708	51,500	-1,360	-1,52700
51,667	0,29285	51,667	-1,270	-1,46500
51,833	0,38244	51,833	-1,190	-1,36700
52,000	0,46235	52,000	-1,100	-1,28400
52,167	0,53632	52,167	-1,010	-1,19000
52,333	0,60062	52,333	-0,910	-1,10700
52,500	0,65951	52,500	-0,820	-0,99975
52,667	0,71364	52,667	-0,710	-0,90588
52,833	0,76252	52,833	-0,610	-0,79334
53,000	0,81216	53,000	-0,480	-0,69915
53,167	0,86980	53,167	-0,340	-0,57379
53,333	0,93364	53,333	-0,170	-0,44342
53,500	1,01100	53,500	0,020	-0,28433
53,667	1,09600	53,667	0,240	-0,13025
53,833	1,20900	53,833	0,510	0,04646
54,000	1,33100	54,000	0,760	0,30002
54,167	1,43600	54,167	1,010	0,55319
54,333	1,50100	54,333	1,220	0,79829
54,500	1,52400	54,500	1,380	1,02500
54,667	1,50500	54,667	1,500	1,22200
54,833	1,44500	54,833	1,570	1,39600
55,000	1,35100	55,000	1,610	1,50900
55,167	1,23900	55,167	1,620	1,58000
55,333	1,11700	55,333	1,600	1,63100
55,500	0,98393	55,500	1,560	1,65100
55,667	0,85137	55,667	1,520	1,63800
55,833	0,71619	55,833	1,450	1,60800
56,000	0,59565	56,000	1,400	1,56100
56,167	0,48158	56,167	1,340	1,50900
56,333	0,37206	56,333	1,270	1,45900
56,500	0,26601	56,500	1,200	1,39200
56,667	0,15676	56,667	1,110	1,32700
56,833	0,04534	56,833	1,030	1,24700
57,000	-0,07278	57,000	0,930	1,17300
57,167	-0,18898	57,167	0,840	1,08400
57,333	-0,30291	57,333	0,740	0,99473
57,500	-0,41758	57,500	0,620	0,91169
57,667	-0,53038	57,667	0,490	0,81919
57,833	-0,64211	57,833	0,350	0,71439
58,000	-0,75280	58,000	0,190	0,61568
58,167	-0,85990	58,167	0,030	0,50308
58,333	-0,95411	58,333	-0,130	0,37561
58,500	-1,03300	58,500	-0,290	0,23500
58,667	-1,09900	58,667	-0,470	0,10920
58,833	-1,15600	58,833	-0,650	-0,02848
59,000	-1,19900	59,000	-0,810	-0,18595
59,167	-1,22700	59,167	-0,960	-0,34329
59,333	-1,24700	59,333	-1,120	-0,49072
59,500	-1,25700	59,500	-1,260	-0,64922
59,667	-1,25700	59,667	-1,390	-0,80285
59,833	-1,25400	59,833	-1,530	-0,93340
60,000	-1,24800	60,000	-1,650	-1,07600
60,167	-1,23800	60,167	-1,770	-1,20900
60,333	-1,22400	60,333	-1,870	-1,34900
60,500	-1,20300	60,500	-1,970	-1,46300
60,667	-1,17600	60,667	-2,040	-1,58900
60,833	-1,14900	60,833	-2,130	-1,68100
61,000	-1,11900	61,000	-2,190	-1,78700
61,167	-1,08000	61,167	-2,240	-1,87800
61,333	-1,03900	61,333	-2,280	-1,96100
61,500	-0,99134	61,500	-2,300	-2,03700
61,667	-0,93385	61,667	-2,300	-2,10000
61,833	-0,86478	61,833	-2,270	-2,15400
62,000	-0,78488	62,000	-2,230	-2,17300
62,167	-0,69546	62,167	-2,180	-2,16000
62,333	-0,61529	62,333	-2,120	-2,15500
62,500	-0,52613	62,500	-2,040	-2,13500
62,667	-0,43685	62,667	-1,970	-2,08900
62,833	-0,34535	62,833	-1,890	-2,03800
63,000	-0,25584	63,000	-1,820	-1,96900
63,167	-0,17404	63,167	-1,750	-1,91100
63,333	-0,08894	63,333	-1,680	-1,84200
63,500	-0,00228	63,500	-1,600	-1,78100
63,667	0,08792	63,667	-1,530	-1,70000
63,833	0,17598	63,833	-1,450	-1,63100
64,000	0,27034	64,000	-1,360	-1,55400

Bijlage 5: Handmatige berekening dwarsprofiel knoop 2 (1802)

Op deze bijlage wordt een handmatige berekening gegeven van het nieuwe dwarsprofiel van knoop 2 ten behoeve van een stromingsberekening voor de Westerschelde anno 1802. Het dwarsprofiel verruimt met in totaal 992 m². Als bovengrens voor het niveau waarover sedimenttransport plaatsvindt wordt het hoogwaterniveau aangehouden: NAP+1,65 m.

Bepaal de stroomvoerende breedte per niveau

$$\begin{aligned}
 \text{NAP}-2,50 \text{ m: } B_s &= \frac{30227}{10,77} = 2807 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_1 = \underline{1403 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}-2,00 \text{ m: } B_s &= \frac{32131}{10,85} = 2961 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_2 = \underline{1481 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}-1,50 \text{ m: } B_s &= \frac{34498}{10,92} = 3159 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_3 = \underline{1580 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}-1,00 \text{ m: } B_s &= \frac{36866}{11,04} = 3339 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_4 = \underline{1670 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}-0,50 \text{ m: } B_s &= \frac{39339}{11,03} = 3567 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_5 = \underline{1783 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}+0,00 \text{ m: } B_s &= \frac{41812}{11,41} = 3665 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_6 = \underline{1832 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}+0,50 \text{ m: } B_s &= \frac{44434}{11,77} = 3775 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_7 = \underline{1888 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}+1,00 \text{ m: } B_s &= \frac{47057}{12,13} = 3879 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_8 = \underline{1940 \text{ m}} ; \\
 \text{NAP}+1,50 \text{ m: } B_s &= \frac{49889}{12,42} = 4017 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2}B_s = B_9 = \underline{2008 \text{ m}} .
 \end{aligned}$$

Veronderstel dat $\Delta D_0 = 1,0 \text{ m}$ en bepaal ΔA

$$\begin{aligned}
 \Delta D_1 &= \frac{D_1}{D_0} = \frac{4,15}{14,92} = \underline{0,28 \text{ m}} ; & \Delta D_6 &= \frac{D_6}{D_0} = \frac{1,65}{14,92} = \underline{0,11 \text{ m}} ; \\
 \Delta D_2 &= \frac{D_2}{D_0} = \frac{3,65}{14,92} = \underline{0,24 \text{ m}} ; & \Delta D_7 &= \frac{D_7}{D_0} = \frac{1,15}{14,92} = \underline{0,08 \text{ m}} ; \\
 \Delta D_3 &= \frac{D_3}{D_0} = \frac{3,15}{14,92} = \underline{0,21 \text{ m}} ; & \Delta D_8 &= \frac{D_8}{D_0} = \frac{0,65}{14,92} = \underline{0,04 \text{ m}} ; \\
 \Delta D_4 &= \frac{D_4}{D_0} = \frac{2,65}{14,92} = \underline{0,18 \text{ m}} ; & \Delta D_9 &= \frac{D_9}{D_0} = \frac{0,15}{14,92} = \underline{0,01 \text{ m}} . \\
 \Delta D_5 &= \frac{D_5}{D_0} = \frac{2,15}{14,92} = \underline{0,14 \text{ m}} ;
 \end{aligned}$$

Bijlage 5 (vervolg)

$$\begin{aligned}
 \Delta A' &= \Delta D_0 * B_1 + \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2} * B_2 + \frac{\Delta D_2 + \Delta D_3}{2} * B_3 + \frac{\Delta D_3 + \Delta D_4}{2} * B_4 + \\
 &\quad \frac{\Delta D_4 + \Delta D_5}{2} * B_5 + \frac{\Delta D_5 + \Delta D_6}{2} * B_6 + \frac{\Delta D_6 + \Delta D_7}{2} * B_7 + \frac{\Delta D_7 + \Delta D_8}{2} * B_8 + \\
 &\quad \frac{\Delta D_8 + \Delta D_9}{2} * B_9 = \\
 &= 1,0 * 1403 + \frac{0,28 + 0,24}{2} * 1481 + \frac{0,24 + 0,21}{2} * 1580 + \\
 &\quad \frac{0,21 + 0,18}{2} * 1670 + \frac{0,18 + 0,14}{2} * 1783 + \frac{0,14 + 0,11}{2} * 1832 + \\
 &\quad \frac{0,11 + 0,08}{2} * 1888 + \frac{0,08 + 0,04}{2} * 1940 + \frac{0,04 + 0,01}{2} * 2008 = \\
 &= \underline{\underline{3344 \text{ m}^2}} .
 \end{aligned}$$

Tenslotte kan het quotiënt $\Delta A / \Delta A'$ worden bepaald:

$$\frac{\Delta A}{\Delta A'} = \frac{496}{3344} = \underline{\underline{0,15}} .$$

Bepaal de werkelijke waarde van ΔD per niveau

Om de werkelijke waarde van ΔD per niveau te berekenen, worden de hierboven gevonden waarden voor ΔD_1 tot en met ΔD_9 vermenigvuldigd met de factor $\Delta A / \Delta A' = 0,15$. Omdat wordt gewerkt met de gehalveerde doorsnede, kan tevens worden gerekend met $\frac{1}{2} \Delta A = 496 \text{ m}^2$.

$$\Delta D_0 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} = \underline{\underline{0,15 \text{ m}}} ;$$

$$\Delta D_1 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_1}{D_0} = 0,15 * 0,28 = \underline{\underline{0,04 \text{ m}}} ;$$

$$\Delta D_2 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_2}{D_0} = 0,15 * 0,24 = \underline{\underline{0,04 \text{ m}}} ;$$

$$\Delta D_3 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_3}{D_0} = 0,15 * 0,21 = \underline{\underline{0,03 \text{ m}}} ;$$

$$\Delta D_4 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_4}{D_0} = 0,15 * 0,18 = \underline{\underline{0,03 \text{ m}}} ;$$

$$\Delta D_5 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_5}{D_0} = 0,15 * 0,14 = \underline{\underline{0,02 \text{ m}}} ;$$

Bijlage 5 (vervolg)

$$\Delta D_6 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_6}{D_0} = 0,15 * 0,11 = \underline{0,02 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_7 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_7}{D_0} = 0,15 * 0,08 = \underline{0,01 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_8 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_8}{D_0} = 0,15 * 0,04 = \underline{0,01 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_9 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_9}{D_0} = 0,15 * 0,01 = \underline{0,002 \text{ m}} .$$

Bepaal de profielverruiming per niveau

$$\text{NAP}-2,50 \text{ m}: A_e = 2 * \Delta D_0 * B_1 = \underline{416 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-2,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2} * B_2 = \underline{115 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-1,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_2 + \Delta D_3}{2} * B_3 = \underline{107 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-1,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_3 + \Delta D_4}{2} * B_4 = \underline{96 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-0,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_4 + \Delta D_5}{2} * B_5 = \underline{85 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}+0,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_5 + \Delta D_6}{2} * B_6 = \underline{69 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}+0,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_6 + \Delta D_7}{2} * B_7 = \underline{53 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}+1,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_7 + \Delta D_8}{2} * B_8 = \underline{35 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}+1,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_8 + \Delta D_9}{2} * B_9 = \underline{16 \text{ m}^2} .$$

Bepaal het nieuwe dwarsprofiel

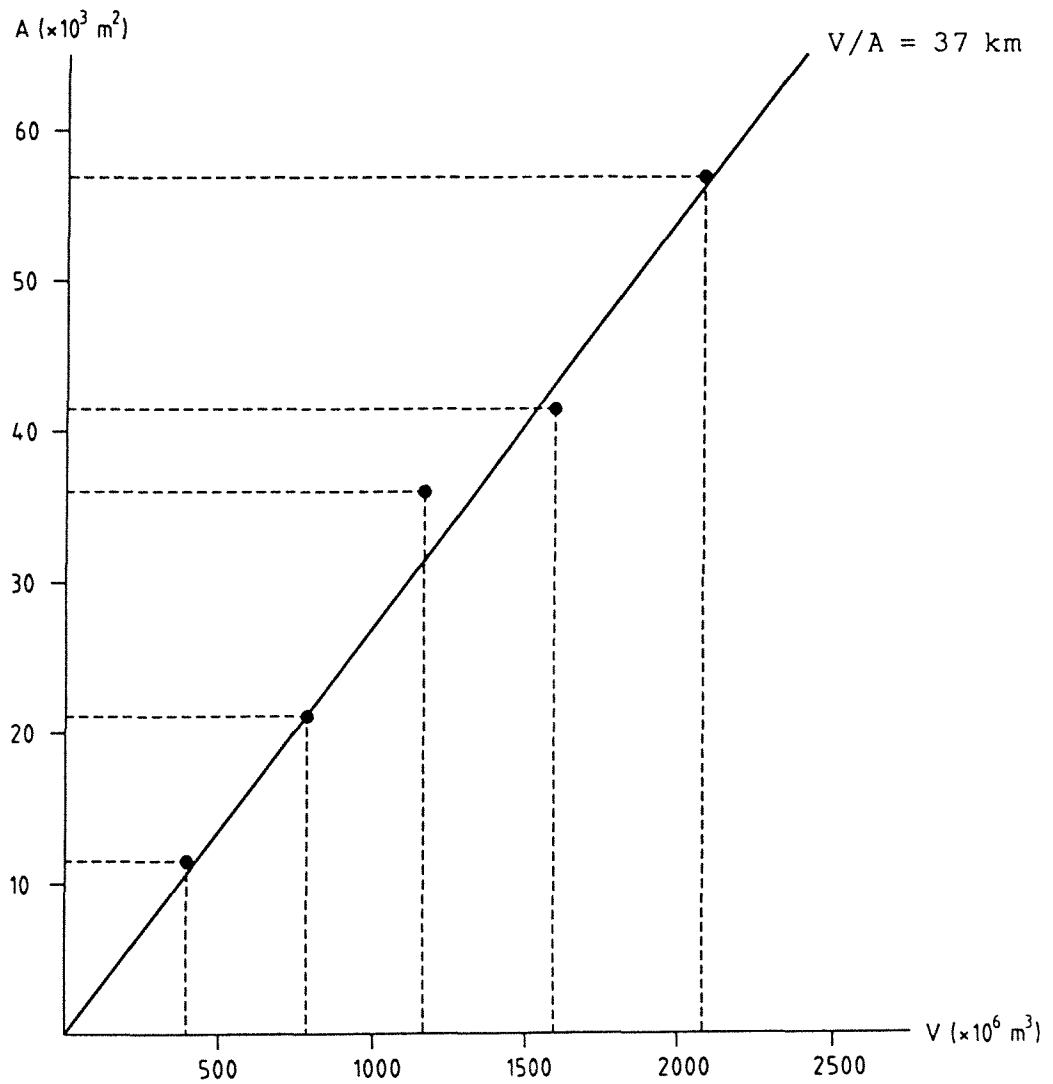
$$\text{NAP}-2,50 \text{ m}: A_{\text{nieuw}} = A_{\text{oud}} + A_e = 30227 + 416 = \underline{30643 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-2,00 \text{ m}: A_{\text{nieuw}} = 32131 + 416 + 115 = \underline{32662 \text{ m}^2} ;$$

$$\text{NAP}-1,50 \text{ m}: A_{\text{nieuw}} = 34498 + 416 + 115 + 107 = \underline{35136 \text{ m}^2} ;$$

etcetera.

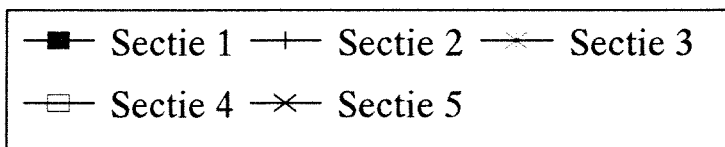
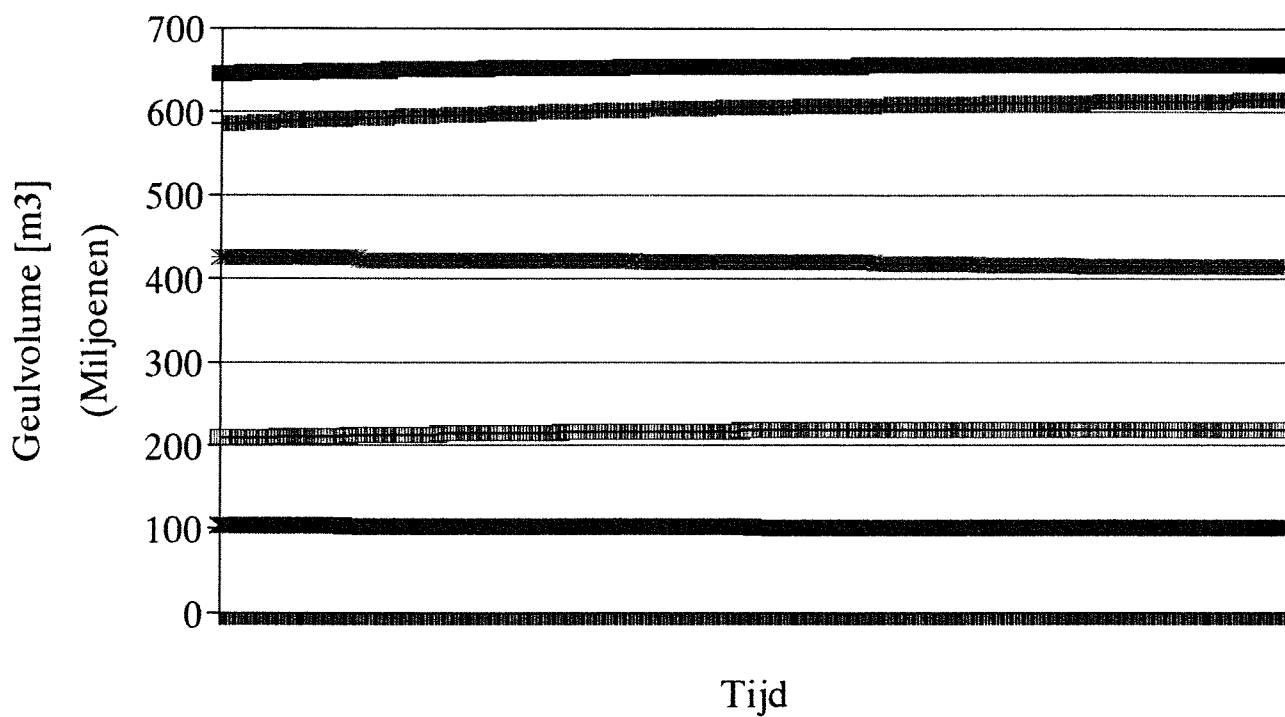
Bijlage 6: Relatie tussen dwarsprofiel en getijvolume (1800)



Bijlage 7

Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1810)

$L=37\text{ km}$, $D=1000$



Bijlage 8: Handmatige berekening dwarsprofiel knoop 5 (1810)

Op deze bijlage wordt een handmatige berekening gegeven van het nieuwe dwarsprofiel van knoop 5 ten behoeve van een stromingsberekening voor de Westerschelde anno 1810. Op basis van de getijsimulatie voor 1800 zijn door het rekenprogramma Asmita geulvolumina berekend voor de vijf secties van de Westerschelde over de periode 1800-1810. Deze bedragen voor 1810 respectievelijk $V_{\text{sectie 4}} = 0,229 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ en $V_{\text{sectie 5}} = 0,105 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Om tot een uitspraak te komen over de profielverandering van de beschouwde knoop, worden deze geulvolumina rekenkundig gemiddeld:

$$V_{\text{gem.}} = \frac{0,229 \cdot 10^9 + 0,105 \cdot 10^9}{2} = \underline{0,162 \cdot 10^9 \text{ m}^3}.$$

De hart-op-hart afstand van beide secties bedraagt $L_{\text{h.o.h.}} = 9750 \text{ m}$, dus voor de natte geuldoorsnede ter hoogte van de gemiddelde waterstand geldt:

$$A_{\text{gem.}} = \frac{V_{\text{gem.}}}{L_{\text{h.o.h.}}} = \frac{0,162 \cdot 10^9}{9750} = \underline{16636 \text{ m}^2}.$$

Uit de getijsimulatie voor 1800 volgt voor knoop 5 een waarde van $A_{\text{gem.}} = 13218 \text{ m}^2$. Het dwarsprofiel is in 1810 dus met $\Delta A = 16636 - 13218 = 3418 \text{ m}^2$ verruimd. Aangezien de Westerschelde ten gevolge van de aanname $B_s = A_{\text{gem.}}/R$ is gemodelleerd als een symmetrisch ééngelussysteem, kan verder worden gerekend met de gehalveerde doorsnede: $\frac{1}{2} \Delta A = \underline{1709 \text{ m}^2}$.

Bepaal de stroomvoerende breedte per niveau

$$\begin{aligned} \text{NAP}-2,50 \text{ m}: B_s &= \frac{9262}{7,14} = 1297 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2} B_s = B_1 = \underline{649 \text{ m}}; \\ \text{NAP}-2,00 \text{ m}: B_s &= \frac{9891}{7,41} = 1335 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2} B_s = B_2 = \underline{667 \text{ m}}; \\ \text{NAP}-1,50 \text{ m}: B_s &= \frac{10655}{7,55} = 1411 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2} B_s = B_3 = \underline{706 \text{ m}}; \\ \text{NAP}-1,00 \text{ m}: B_s &= \frac{11420}{7,71} = 1481 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2} B_s = B_4 = \underline{741 \text{ m}}; \\ \text{NAP}-0,50 \text{ m}: B_s &= \frac{12379}{7,87} = 1573 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{2} B_s = B_5 = \underline{786 \text{ m}}. \end{aligned}$$

Veronderstel dat $\Delta D_0 = 1,0 \text{ m}$ en bepaal ΔA

De gemiddelde waterstand in knoop 5 bedraagt $h_{\text{gem.}} = -0,06 \text{ m}$. Uit de bodemschematisatie van bijlage 3b blijkt dat onder NAP-2,50 m de hydraulische straal een waarde heeft van $R = 7,14 \text{ m}$. Voor de diepte onder de gemiddelde waterstand geldt dus $D_0 = 7,14 + 2,00 + (0,50 - 0,06) = \underline{9,58 \text{ m}}$. Op deze wijze kunnen voor de overige niveaus D_1 tot en met D_5 worden berekend: $D_1 = \underline{2,44 \text{ m}}$, $D_2 = \underline{1,94 \text{ m}}$, $D_3 = \underline{1,44 \text{ m}}$, $D_4 = \underline{0,94 \text{ m}}$ en $D_5 = \underline{0,44 \text{ m}}$.

Bijlage 8 (vervolg)

Om de profielverruiming evenredig te verdelen over de diepte, worden de berekende waarden voor D_1 tot en met D_5 gedeeld door D_0 :

$$\Delta D_1 = \frac{D_1}{D_0} = \frac{2,44}{9,58} = \underline{0,25 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_2 = \frac{D_2}{D_0} = \frac{1,94}{9,58} = \underline{0,20 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_3 = \frac{D_3}{D_0} = \frac{1,44}{9,58} = \underline{0,15 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_4 = \frac{D_4}{D_0} = \frac{0,94}{9,58} = \underline{0,10 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_5 = \frac{D_5}{D_0} = \frac{0,44}{9,58} = \underline{0,05 \text{ m}} .$$

Vervolgens kan $\Delta A'$ worden berekend, ofwel de grootte van het geërodeerde oppervlak indien de veronderstelling $\Delta D_0 = 1,0 \text{ m}$ juist zou zijn:

$$\begin{aligned} \Delta A' &= \Delta D_0 * B_1 + \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2} * (B_2 - B_1) + \frac{\Delta D_2 + \Delta D_3}{2} * (B_3 - B_2) + \frac{\Delta D_3 + \Delta D_4}{2} * (B_4 - B_3) + \\ &\quad \frac{\Delta D_4 + \Delta D_5}{2} * (B_5 - B_4) + \frac{\Delta D_5}{2} * (B_{MSL} - B_5) = \\ &= 1,0 * 649 + \frac{0,25 + 0,20}{2} * (667 - 649) + \\ &\quad \frac{0,20 + 0,15}{2} * (706 - 667) + \frac{0,15 + 0,10}{2} * (741 - 706) + \\ &\quad \frac{0,10 + 0,05}{2} * (786 - 741) + \frac{0,05}{2} * (835 - 786) = \\ &= \underline{668 \text{ m}^2} . \end{aligned}$$

Tenslotte kan het quotiënt $\Delta A / \Delta A'$ worden bepaald:

$$\frac{\Delta A}{\Delta A'} = \frac{1709}{668} = \underline{2,56} .$$

Bepaal de werkelijke waarde van ΔD per niveau

Om de werkelijke waarde van ΔD per niveau te berekenen, worden de hierboven gevonden waarden voor ΔD_1 tot en met ΔD_5 vermenigvuldigd met de factor $\Delta A / \Delta A' = 2,56$. Deze berekening is weergegeven op de volgende bladzijde.

Bijlage 8 (vervolg)

Voor de werkelijke waarde van ΔD per niveau geldt:

$$\Delta D_0 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} = \underline{2,56 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_1 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_1}{D_0} = 2,56 * 0,25 = \underline{0,65 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_2 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_2}{D_0} = 2,56 * 0,20 = \underline{0,52 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_3 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_3}{D_0} = 2,56 * 0,15 = \underline{0,38 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_4 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_4}{D_0} = 2,56 * 0,10 = \underline{0,25 \text{ m}} ;$$

$$\Delta D_5 = \frac{\Delta A}{\Delta A'} * \frac{D_5}{D_0} = 2,56 * 0,05 = \underline{0,12 \text{ m}} .$$

Bepaal de profielverruiming per niveau

$$NAP-2,50 \text{ m}: A_e = 2 * \Delta D_0 * B_1 = \underline{3317 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-2,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2} * (B_2 - B_1) = \underline{22 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-1,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_2 + \Delta D_3}{2} * (B_3 - B_2) = \underline{34 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-1,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_3 + \Delta D_4}{2} * (B_4 - B_3) = \underline{22 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-0,50 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_4 + \Delta D_5}{2} * (B_5 - B_4) = \underline{17 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP+0,00 \text{ m}: A_e = 2 * \frac{\Delta D_5}{2} * (B_{MSL} - B_5) = \underline{6 \text{ m}^2} .$$

Bepaal het nieuwe dwarsprofiel

$$NAP-2,50 \text{ m}: A_{nieuw} = A_{oud} + A_e = 9262 + 3317 = \underline{12579 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-2,00 \text{ m}: A_{nieuw} = 9891 + 3317 + 22 = \underline{13230 \text{ m}^2} ;$$

$$NAP-1,50 \text{ m}: A_{nieuw} = 10655 + 3317 + 22 + 34 = \underline{14029 \text{ m}^2} ;$$

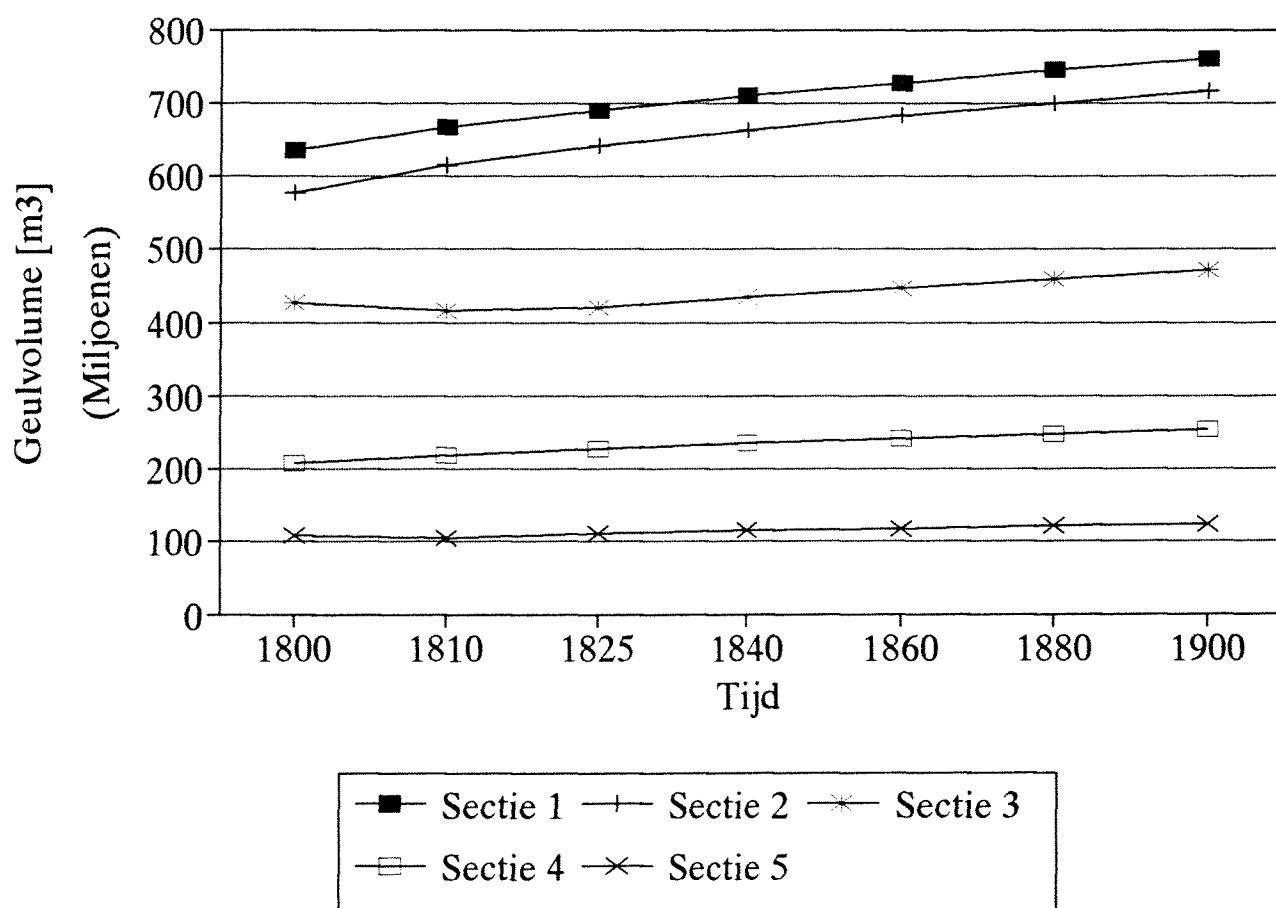
$$NAP-1,00 \text{ m}: A_{nieuw} = 11420 + 3317 + 22 + 34 + 22 = \underline{14816 \text{ m}^2} ;$$

etcetera.

Bijlage 9a

Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1900)

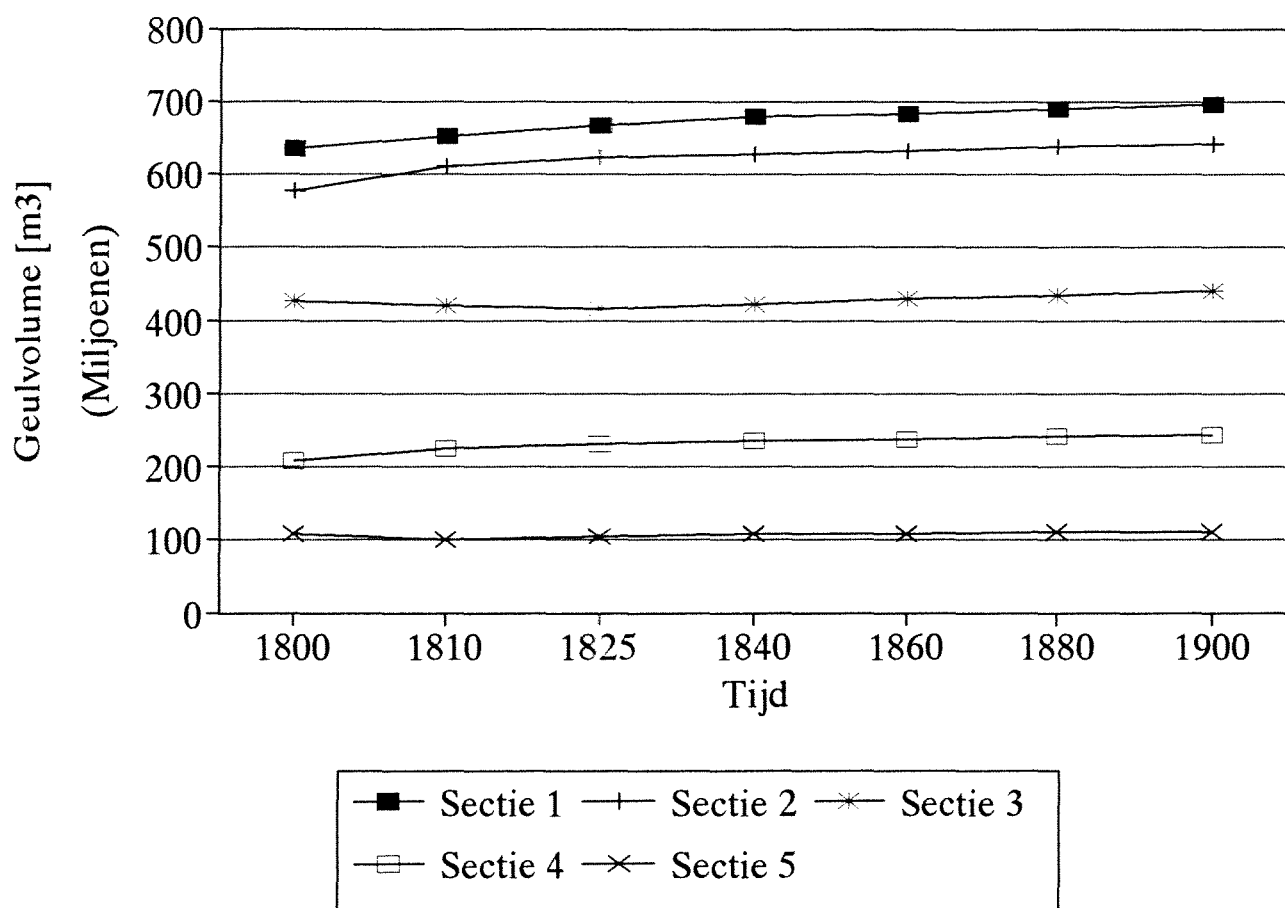
$L=37\text{ km}$



Bijlage 9b

Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1900)

$L=40\text{ km}$



Bijlage 9c

Geulvolume sectie 1 t/m 5 (1800-1968)

$L=43\text{ km}$

