

GETIJANALYSE SCHELDE-ESTUARIUM

INVLOED PLAATSELIJKE VERANDERINGEN BERGENDE OPPERVLAKTE
OP GETIJVOORTPLANTING

EEN ANALYSE MET TRECOS-WESTERSCHELDE 1997

Rapport BGW - 97.6

In opdracht van
Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ

T. Pieters
C. Verspuy

oktober 1997

Vlissingen, Delft

GETIJANALYSE SCHELDE-ESTUARIUM
INVLOED PLAATSELIJKE VERANDERINGEN BERGENDE OPPERVLAKE
OP GETIJVOORTPLANTING

EEN ANALYSE MET TRECOS-WESTERSCHELDE

INHOUD

- 0 Aanleiding
- 1 Inleiding
- 2 Analysemiddelen
 - 2.1 TRECOS-Westerschelde
 - 2.2 DUFLOW
- 3 Getijvoortplanting en ingrepen in het Schelde-estuarium
 - 3.1 *Getijvoortplanting in een systeem als het Schelde-estuarium*
 - 3.2 Getijvoortplanting in het Schelde-estuarium
 - 3.3 Ingrepen in het Schelde-estuarium
- 4 Vergroting bergende oppervlakte bij grens en bij Kruibeke
 - 4.1 Invloed lokale verandering bergende oppervlakte algemeen
 - 4.2 Verkenning invloed plaats en omvang lokale verandering bergende oppervlakte in Schelde-estuarium
 - 4.3 Vergroting bergende oppervlakte bij grens
 - 4.4 Vergroting bergende oppervlakte bij Kruibeke
 - 4.5 Vergelijking invloed verandering bergende oppervlakten bij grens en bij Kruibeke
- 5 Samenvatting en conclusies invloed ingrepen
- 6 Aanbevelingen voortzetting getijanalyse Schelde-estuarium
 - 6.1 Analyse getijvoortplanting
 - 6.2 Te gebruiken gereedschap

Literatuur

- Bijlage A Het Schelde-estuarium
- Bijlage B-1 DUFLOW-schematisatie 1992
- Bijlage B-2 Sectiegegevens DUFLOW-schematisatie

0 AANLEIDING

Bij de direktie Zeeland en het Rijksinstituut voor Kust en Zee(RIKZ) van Rijkswaterstaat in Zeeland bestaat een dringende behoefte aan een dieper inzicht in bredere kring in de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium. De sectie Vloeistofmechanica van de vakgroep Waterbouwkunde van de Technische Universiteit Delft heeft de expertise en middelen om te helpen voorzien in deze behoefte. Omgekeerd wil de Technische Universiteit Delft haar taak als opleider van wetenschappelijk gevormde beroepsbeoefenaren gericht en afgestemd houden op de praktijk. De betrokkenheid bij de konkrete ingrepen in het Schelde-estuarium vormt daartoe een uitstekende gelegenheid.

De beschikbare mathematische getijmodellen kunnen vrijwel elke gewenste detailvraag uit de praktijk met een redelijke betrouwbaarheid benaderen. De hier bedoelde behoefte betreft echter iets anders. Met name omdat op veel plaatsen de grenzen van het menselijke ingrijpen in watersystemen in het zicht zijn gekomen, bereikt zijn of soms eigenlijk zijn overschreden met onvoorziene en ongewenste gevolgen, tracht Rijkswaterstaat sinds medio tachtiger jaren meer "vanuit het systeem te denken". Dit is nodig om zowel de eventueel nog aanwezige ruimte voor gebruik verantwoord te onderkennen en te benutten, als om duidelijk te krijgen welke al ongewild verloren gegane eigenschappen en waarden terug moeten en kunnen worden gewonnen en hoe dat zou kunnen gebeuren. Dit "denken vanuit het systeem" moet "integraal" gebeuren. Dat betekent dat de betrokken toegepaste onderzoeker, adviseur of beheerder zelf een redelijk inzicht moet hebben in zowel het fysische systeem, als ook het ecologische systeem en de behoeften voor en gevolgen van het gebruik. Alleen vanuit dit "integrale inzicht" kunnen nieuwe, creatieve, optimale en duurzame oplossingen worden ontwikkeld.

De ontwikkeling van fysische naar analoge naar mathematische getijmodellen hebben de mogelijkheden om de gevolgen van ingrepen op de getijvoortplanting te voorspellen geweldig vergroot. Zonder aan de waarde van deze ontwikkeling te willen afdoen, moet echter worden onderkend dat ze heeft bevorderd, dat voor de gebruikers van de resultaten van deze modelberekeningen de "afstand" tot de "fysica" van bijvoorbeeld de getijvoortplanting op een estuarium als de Schelde sterk is vergroot. Aan het weer verkleinen van deze afstand en de tegemoetkoming aan eerdergenoemde behoeften, kan substantieel worden bijgedragen door het gebruik in de beroepspraktijk van een aantal aan de TUD in eerste instantie voor het onderwijs ontwikkelde softwarepakketten. Het gaat hier om TRECOS (Tidal propagation in Rivers and Estuaries with Computer Organized Simulations), te gebruiken met het eendimensionale mathematische getijmodel DUFLOW met de bijbehorende applicaties ECDUFLOW voor contoleberekeningen.en PAGRAPH voor grafische presentaties.

In augustus en oktober 1996 zijn door medewerkers van TUD en RIKZ gezamenlijk een aantal simulaties uitgevoerd met TRECOS-WESTERSCHELDE. Verdere verwerking en interpretatie vergt bewuste keuzen. Daaraan werd door capaciteitsgebrek en personeelwisselingen bij RIKZ geruime tijd niet toegekomen, waardoor de voortgang stagneerde.

In februari 1997 werden op basis van de uitgevoerde simulaties een aantal ingrepen met bijbehorende simulaties geselecteerd voor nadere interpretatie. In mei/juni 1997 werd de schrijver van deze rapportage door RIKZ gevraagd op te treden als intermediair tussen RIKZ en de TUD en bij te dragen aan de voltooiing van de interpretaties en de rapportage. In juni, juli en augustus en in het najaar van 1997 tijdens het schrijven van dit rapport werden nog aanvullende simulaties uitgevoerd, waarvan gebruik werd gemaakt bij de interpretaties.

Deze rapportage is opgesteld door ir. T. Pieters, Bureau Getijdewateren en tot januari 1997 medewerker bij het Rijksinstituut voor Kust en Zee van Rijkswaterstaat, en door ir. C. Verspuy, werkzaam bij de Vakgroep Waterbouwkunde van de Technische Universiteit Delft. Laatstgenoemde leverde de kennis van het getij in het algemeen en de ervaring met TRECOS-toepassingen. Eerstgenoemde fungeerde vooral als vragensteller en als toetser van de relevantie en bruikbaarheid van de interpretaties voor de praktijk rond het Schelde-estuarium.

1 INLEIDING

Het doel van dit rapport is tweeledig. In de eerste plaats gaat het om de interpretatie van een aantal geselecteerde simulaties van de invloed op de getijvoortplanting van ingrepen in de geometrie van het Schelde-estuarium. De simulaties werden uitgevoerd met het door de TUD ontwikkelde softwarepakket "user interface TRECOS", dat was gekoppeld aan een Schelde-schematisatie van het eendimensionale mathematische getijmodel DUFLOW tot TRECOS-WESTERSCHELDE. De simulaties werden gezamenlijk of in overleg uitgevoerd door TUD en RIKZ tussen juli 1996 en juli 1997. In de tweede plaats beoogt dit rapport ook te onderzoeken en te illustreren wat de mogelijkheden zijn van de gebruikte hulpmiddelen, in eerste instantie DUFLOW en TRECOSW, voor een getijanalyse voor een systeem als het Schelde-estuarium.

De interpretatie dient niet uitsluitend om om de betrouwbaarheid of consequenties van de resultaten van de betreffende simulaties te beschouwen, maar om inzicht te krijgen in de getijvoortplanting in het estuarium en de gevoeligheid ervan voor ingrepen. Wel zijn, om ook de praktische toepasbaarheid van de probleemanalyseaanpak met TRECOSW te kunnen toetsen, realistische ingrepen en geometrieveranderingen geformuleerd en gesimuleerd.

Hoewel de simulaties onderling en deze rapportage op ver uit elkaarliggende tijdstippen werden uitgevoerd, is ernaar gestreefd zoveel mogelijk de oorspronkelijke opzet aan te houden en daarbij hoofdzakelijk gebruik te maken van de resultaten van de al uitgevoerde simulaties.

In augustus en oktober 1996 werden gezamenlijk uitgebreide series simulaties uitgevoerd. De *samenvattende simulatieuitkomsten* zijn serie I en II (augustus) en serie III (oktober) genoemd. Bij verwijzing in dit rapport zijn deze serienummers aan de simulatienummers toegevoegd.

Als leidraad voor deze rapportage fungeert een serie simulaties (nummer VI), die in juni 1997 door de TUD werd uitgevoerd, op basis van de keuze door RIKZ van verder uit te werken ingrepen. Plaats en omvang van deze ingrepen werden bepaald met behulp van de simulatieresultaten van de series I t/m III. Deze ingrepen betreffen vergroting van bergende oppervlakte bij de grens met 600 ha (bij de selectie in februari 1997 genoemd V6-6), verdieping van de hoofdvaargeul in het oostelijke deel van de Westerschelde met 2m (V6-7), verdieping van de Beneden-Zeeschelde met 2m (V6-8) en vergroting van bergende oppervlakte landwaarts van Antwerpen bij Kruike met ongeveer 600 ha (V6-9). Tenslotte zijn er door de samenstellers en door de schrijver van dit rapport nog een aantal aanvullende simulaties uitgevoerd, waarnaar respectievelijk wordt verwezen als de series V en VI. De simulaties van de veranderingen van de bergende oppervlakten leverden zoveel materiaal en mogelijkheden tot verruiming van het inzicht in de getijvoortplanting, dat mede uit praktische overwegingen werd besloten deze rapportage te beperken tot en te concentreren op dit onderwerp.

Gezien de doelstelling beperken de interpretaties in deze rapportage zich tot de TRECOS-resultaten, aangevuld met enkele theoretische onderbouwingen. De grafieken zijn afkomstig van het in TRECOS ingebouwde pakket PAGRAPH, de grafische applicatie op DUFLOW-uitvoer. Geen gebruik is nog gemaakt van ECDUFLOW, waarmee inzicht kan worden verkregen in de onderlinge verhoudingen van de invloed van de termen in de (bewegings)vergelijkingen op de verschillende plaatsen en tijdstippen. Dat met toepassing van deze hulpmiddelen, het inzicht in belangrijke mate kan worden uitgebreid, zal worden aangegeven in de hoofdstukken 3 en 4. In deze hoofdstukken worden respectievelijk het Scheldegetij in het algemeen en, aan de hand van de simulaties, de invloed van bergingsvergrotingen op de getijvoortplanting beschreven en geanalyseerd. Hoofdstuk 5 bevat een samenvatting van en de conclusies uit dit deel van de getijanalyse. In hoofdstuk 6 worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek naar het getij in het Schelde-estuarium. Daar wordt ook ingegaan op de nog niet gebruikte mogelijkheden van de hulpmiddelen, evenals op de aanpassings- en uitbreidingswenselijkheden en -mogelijkheden. In hoofdstuk 2 worden globaal deze hulpmiddelen in hun huidige vorm beschreven en worden hun mogelijkheden en beperkingen besproken.

2 ANALYSEGEREEDSCHAP

2.1 User interface TRECOS-Westerschelde

Voor RIKZ is in 1995 en 1996 een nieuwe User Interface ontwikkeld, TRECOSW (=Tidal propagation in Rivers and Estuaries with Computer Organized Simulations Westerschelde), speciaal gericht op het analyseren van ingrepen in het getijregiem van het Schelde-estuarium (Verspuy en Kasbergen, 1995).

Met TRECOSW kan de onderzoeker of adviseur interactief de gevolgen van ingrepen in de geometrie of andere veranderingen van geometrie of wrijving op de getijvoortplanting analyseren.

Veranderingen kunnen worden aangebracht in stroomvoerende breedte, bergende breedte, sectielengte, diepte en C-waarde van één of meerdere secties van de toegepaste DUFLOW-schematisatie. Binnen enkele minuten kan op deze wijze een simulatie worden uitgevoerd.

Het resultaat wordt in eerste instantie cijfermatig uitgedrukt in de getijversterkingsfactor G en het maximale debiet Q in een te voren op te geven knooppunt, resp. sectie. Ze kunnen worden vergeleken met de overeenkomstige uitkomsten van een zg. basisberekening, een berekening met het oorspronkelijke netwerk. De getijversterkingsfactor is de verhouding tussen de getijslag ter plaatse en die in Vlissingen. Het maximale debiet is het gemiddelde van maximale eb- en vloeddebieten. Met het ingebouwde pakket PAGRAPH kunnen vervolgens verschillende grafische presentaties worden opgevraagd: vijf H-t-krommen of Q-t-krommen van verschillende lokaties, H-t-krommen aan begin en eind van de sectie met Q-t-kromme in midden van de sectie of H-t-krommen van basisberekening en simulatie.

Het TRECOS-pakket biedt ook de mogelijkheid harmonische berekeningen uit te voeren. Daartoe wordt de DUFLOW-schematisatie gelineariseerd. De gelineariseerde sectiekaracteristieken worden getoond op het scherm. De harmonische berekeningen kunnen worden gebruikt om een gerichte strategie voor de probleemanalyse via de simulaties met het niet gelineariseerde model voor te bereiden. De uitkomsten van een harmonische berekening kunnen getalsmatig op het scherm worden vergeleken met die van een vorige ingreep of met een berekening zonder ingreep (basisberekening). Een belangrijke faciliteit in deze zg. HARMSHEL-module is het berekenen en presenteren van een zg. s_1/s_2 -figuur. In deze figuur wordt de getijversterkingsfactor getoond, als functie van de relatieve invloed van de weerstand (s_1) en van de bekkenlengte/golfte- s_2 verhouding (s_2) van een tot één sectie vereenvoudigd deelsysteem. De getijversterkingsfactor geeft de verhouding tussen de getijslag aan het eind en het begin (randvoorwaarde) van het deelsysteem. Dit deelsysteem kan zelf worden gedefinieerd door de "deelnemende" secties op te geven, waarvan de gelineariseerde sectiekaracteristieken gewogen worden meegenomen in de door het programma uitgevoerde ombouw naar één sectie.

De harmonische berekening gebruikt de M2-component van het randvoorwaardengetij als randvoorwaarde en geeft sinusvormige oplossingen voor $h(x,t)$ en $Q(x,t)$. Vervorming en middenstandsveranderingen worden niet berekend, waardoor, vergeleken met de resultaten van de niet-lineaire DUFLOW-berekening, explicieter amplitudeveranderingen en faseverschuivingen zichtbaar worden.

2.2 Eendimensionale mathematische getijmodel DUFLOW

De TRECOS-simulaties worden berekend met het ééndimensionale mathematische getijmodel DUFLOW. Een volledige en gedetailleerde beschrijving van het DUFLOW-pakket is te vinden in de gebruikershandleiding DUFLOW.

De Schelde-schematisatie die in deze getijanalyse is gebruikt is beschreven in Bollebakker (1996). In afwijking van de voordien gebruikte zeer gedetailleerde IMPLIC-schematisaties, bestaande uit enkele honderden secties, zijn in 1995 een tweetal veel eenvoudiger schematisaties gemaakt op basis van de bodemliggingen van 1960 en 1992. Hierin is het hoofdgeulensysteem, inclusief de Zeeschelde tot Gent, geschematiseerd in rond 35 secties. Bijlage B bevat het netwerk en de sectiegegevens. De tot rond zestig doorlopende nummering komt doordat het Land van Saeftinge zeer gedetailleerd is meegenomen met 28 secties.

In deze getijanalyse is de schematisatie van 1992 gebruikt, met een gemiddeld springtij als waterstandsrandvoorwaarde in de raai Vlissingen-Breskens.

Het gebruikte DUFLOW-model 1992, en ook het 1960-model, is nog niet volledig afgebouwd en gecalibreerd. Enkele belangrijke roosterwijzigingen waren voorgenomen, toen afbouw, calibratie en verificatie wegens capaciteitsgebrek en vervolgens personele mutaties bij RIKZ moest worden stilgelegd. Met name de debietverdelingen over enkel parallelgeulsystemen in de Westerschelde en de getijslag landwaarts van Antwerpen worden nog niet goed gesimuleerd. In paragraaf 3.2 is te zien dat in de natuur de getijslag landwaarts van Rupelmonde weer gaat afnemen, terwijl ze in het model blijft toenemen. Voor de kwalitatieve en kwantitatieve globale conclusies uit deze getijanalyse is dit niet bezwaarlijk. Voor nadere, gedetailleerdere en kwantitatieve analyses moeten afbouw, calibratie en verificatie eerst worden afgerond.

3 GETIJVOORTPLANTING EN INGEPEN IN HET SCHELDE-ESTUARIUM

3.1 Getijvoortplanting in een systeem als het Schelde-estuarium

De getijbeweging op het Schelde-estuarium krijgt haar specifieke vorm uit de interactie tussen het aan de mond door de Noordzee aangeboden vertikale getij, de geometrie van het bekken en de rivierafvoer aan de landzijde. De normale gemiddelde rivierafvoer heeft alleen substantiële invloed op de getijbeweging op de Boven-Zeeschelde, tussen Rupelmonde en Gent, en wordt daarom hierna in eerste instantie buiten beschouwing gelaten.

Bepalende karakteristieken van het aangeboden vertikale getij aan de mond zijn het dubbeldaagse karakter en de ordegrootte van de getijslag van 4 á 5 m. Van de geometrie van het bekken bepalen de verhoudingen van lengte, breedte en diepte, zowel onderling als tot de sterkte van het getij in de mond, de specifieke wijze van getijvoortplanting en -vervorming. De grote lengte ten opzichte van breedte en diepte geeft de getijvoortplanting een duidelijk ééndimensionaal karakter. Dit is een duidelijk verschil met bijvoorbeeld de Waddenzee, waar sprake is van een stelsel van "tidal inlets" en vloedkommen. De relatief grote getijslag, ten opzichte van de diepte, levert een zodanig substantiële variatie van de waterdiepte, dat op veel plaatsen binnen een getijcyclus de rol en onderlinge verhoudingen van bijvoorbeeld weerstand en traagheid significant veranderen.

De getijbeweging op het bekken wordt aangedreven, eigenlijk beter verwoord met "onderhouden", door het aan de mond aangeboden vertikale Noordzeegetij. De energie die de golfbeweging op het bekken "verbruikt", hoofdzakelijk om wrijvingsweerstand te overwinnen, wordt per saldo getijgemiddeld ongeveer aangevuld door het Noordzeegetij. Per getijcyclus wordt een klein deel van de in het bekken geaccumuleerde energie verbruikt. Als de aanvoer zou worden geblokkeerd, door een denkbeeldige schuif in de hals bij Vlissingen-Breskens, zou het bekken nog een aantal getijden "doorslingeren" om alle bewegingsenergie "op te maken". De aanvoer is vrijwel nooit helemaal gelijk aan het "verbruik". Bijvoorbeeld in de fase van dood naar een springtij wordt er elke getijcyclus "iets meer" aangevoerd dan er wordt gedissipeerd en bij een stormvloed kan dat in korte tijd heel veel meer zijn.

Als er in het systeem relatief weinig, dwz. weinig ten opzichte van de geaccumuleerde energie, energie wordt geaccumuleerd, krijgt de getijbeweging het karakter van een opslingerende staande golf. Als er binnen een getijcyclus relatief veel wordt gedissipeerd, als er dus veel weerstand en derhalve wrijvingsverliezen zijn, dan bestaat de beweging uit een uitdempende lopende golf. In relatief korte, ruime systemen heeft de getijbeweging een meer staande golf karakter, terwijl relatief lange nauwe systemen een uitdempende lopende golf laten zien. Hier slaat relatief op getijslag-diepteverhouding en golflengte-bekkenlengteverhouding. Bij systemen als het Schelde-estuarium gaat het meestal om een situatie tussen een staande en lopende golf.

De getijbeweging binnen een getijcyclus wordt bepaald door een tweetal balansen: de massabalans en de impulsbalans. Een veel gebruikte mathematische presentatie van de massabalans is de zg. continuïteitsvergelijking:

$$\delta Q / \delta x = - Bb(t) * \delta h / \delta t,$$

of geïntegreerd in langsrichting over een gebied of geul:

$$Q_2 - Q_1 = - (Bb(t))_g * L * (\delta h / \delta t)_g = - Fb(t) * (\delta h / \delta t)_g$$

Volgens de massabalans moet op elk moment de langsgradient van het debiet gelijk zijn aan het produkt van waterstandsverandering per eenheid van tijd en bergende breedte, de momentane berging.

De impulsbalans is mathematisch geformuleerd in de bewegingsvergelijking:

$$\delta Q / \delta t + \delta / \delta x (Q / As) + g * As * \delta h / \delta x + g * (Q * |Q|) / (C * C * As * R) = 0$$

of, in langsrichting geïntegreerd over een gebied of geul:

$$h_2 - h_1 = - 1 / (g * (As)) * \{ (\delta Q / \delta t) * \Delta x + Q * (u_2) - Q * (u_1) \} - \Delta x * (Q * |Q|) / (C * C * As * R) g$$

De bewegingsvergelijking drukt uit dat de met de vervallen gepaard gaande hydrostatische drukverschillen het water versnellen of vertragen, daarbij respectievelijk "tegengewerkt" of "geholpen" door de weerstand. De eerste en tweede term in de eerstgenoemde vorm zijn de traagheidstermen, respectievelijk de lokale en de advectieve, de derde term geeft het hydrostatische drukverschil weer en de vierde term is de weerstandsterm. In de geïntegreerde vorm laat de vergelijking zien dat op elk moment het "beschikbare" verval "verdeeld wordt" tussen weerstand en traagheid.

De lokale traagheid is in systemen als het Schelde-estuarium meestal belangrijker dan de advectieve traagheid. Laatstgenoemde factor kan alleen substantiële waarden bereiken bij snelle ruimtelijke doorstroombrofielvariaties, bijvoorbeeld door sterke verhangen door grote weerstand of door sterke geometrieveranderingen over korte afstand. Essentieel is de verhouding tussen de lokale traagheid en de weerstand. Daar wordt hierna nader op ingegaan.

Het volgende "beeld" kan behulpzaam zijn bij het krijgen van enig "gevoel" voor en inzicht in de werkingen van traagheid en weerstand.

Een "mooie" sinusvormige M2-getijgolf loopt een prismatisch kanaal binnen. Er is geen weerstand, de golfvoortplantingssnelheid is orde 10 m/s en de watersnelheden zijn orde 1 m/s. De golflengte is dus rond 450 km. De "golfvorm" loopt met een snelheid van 10 m/s "over" de met snelheden van orde 1 m/s over een afstand van rond 10 km heen en weer bewegende waterdeeltjes heen.

Beschouw een "sectie" water met een lengte van 1000 m, begrensd door twee dwarsprofielen, de waterspiegel, de bodem en de oevers. Vanaf ongeveer het "voorbijkomen" van een dal tot ongeveer het "voorbijkomen" van een top werkt op de watermassa een verhangkracht in de richting van de golfvoortplanting, de vloedrichting. Uitgaande van een situatie, dat de vervalkracht bij afwezigheid van wrijving de enige resulterende uitwendige kracht is op de watermassa, ondergaat het een versnelling in de vloedrichting. Met het passeren van de golftop keert de verhangkracht om van richting en ondergaat de watermassa een versnelling in de ebrichting, tot het voorbijkomen van het volgende dal. Op de tijdstippen dat de verhangkracht omkeert, bij het passeren van top of dal, heeft ze het langst in dezelfde richting gewerkt op het blok, ongeveer een halve golfperiode, en heeft de watermassa de maximale snelheid gekregen in de richting van de vervalkracht. De maximale vloed- en ebsnelheden treden dus op onder respectievelijk top en dal. Direct na het passeren van top of dal zijn verhang en watersnelheid tegengesteld gericht en wordt de watermassa vertraagd. De eerste helft van een halve golfperiode, die de verhangkracht in eenzelfde richting werkt, is nodig om de in de voorgaande kwartgolfperiode opgebouwde maximale watersnelheid weer tot nul terug te brengen. Vervolgens wordt in de volgende kwartgolfperiode de watermassa weer versneld tot de maximale watersnelheid in de richting van de vervalkracht.

Het zal duidelijk zijn dat de hiervoor geschetste "volkomen" symmetrie niet mogelijk is bij een lopende golf met de hiergenoemde afmetingen. Dit doet geen afbreuk aan de juistheid van het bedoelde te schetsen beeld: zonder/bij heel weinig weerstand is het faseverschil tussen horizontaal en verticaal getij gering. De maximale watersnelheden treden ongeveer op bij de grootste uitwijkingen uit de middenstand, onder top en dal, en de kenteringen ongeveer als de waterstand door de middenstand gaat. Het horizontale getij, de watersnelheden, loopt echter wél 90° achter bij de aandrijvende kracht, de verhangkracht. Immers de snelheden zijn maximaal onder top en dal, ongeveer een kwart golfperiode nadat de helling van de waterspiegel in de overeenkomstige richting, die de verhangkracht veroorzaakt, haar maximale waarde bereikte, tijdens ongeveer de doorgang door de middenstand van de waterstand. Op dat tijdstip ongeveer treedt de kentering op en worden de snelheden juist minimaal, namelijk gelijk nul.

Na het passeren van een top of dal, als de waterstand weer respectievelijk daalt of stijgt, stroomt het water nog gedurende een kwart golfperiode in respectievelijk vloed- of ebrichting. De traagheid overheerst volkomen: zowel het versnellen als het vertragen moet geheel alleen door de vervalkracht gebeuren. De vervalkracht is steeds gelijk aan de "traagheidskracht" of het waterstandsverval is steeds gelijk aan het "traagheidsverval".

De vervalkracht is evenredig aan de helling van de waterspiegel. Bij een enigszins ongeveer sinusvormige golf neemt die helling, en daarmee de verhangkracht, toe na het voorbijkomen van een top of een dal, bereikt een maximum waarde op een buigpunt, nabij de middenstand, en neemt weer af bij het naderen van dal of top. Als er wél sprake is van enige significante weerstand, bereikt die haar maximale waarde als de snelheid maximaal is. Deze maximale snelheid wordt nu bereikt als resultaat van de versnelling door verhangkracht minus weerstandskracht. De snelheid neemt toe zolang verhangkracht nog groter is als weerstandskracht en bereikt haar maximum als ze gelijk zijn geworden. Dit laatste gebeurt bij enige weerstand in elk geval als de verhangkracht weer afneemt, dus ná het bereiken van haar grootste waarde, maar vóórdat ze nul is geworden tijdens het passeren van top of dal. Het zal eerder gebeuren naarmate de weerstand groter is. De maximale vloed- en ebsnelheden, een daarmee meestal ook de bijbehorende maximale debieten, treden dus op vóór het optreden van resp. hoog- en laagwater. Omdat de weerstand nu "helpt" met vertragen, wat al begint voordat met het passeren van top of dal de verhangkracht daaraan gaat bijdragen, zal ook de stroomkentering korter daarna optreden. Bij aanwezigheid van weerstandsinvloed ontstaat er dus een faseverschil tussen horizontaal en verticaal getij en wordt het faseverschil tussen horizontaal getij en

aandrijvende kracht, de verhangkracht, kleiner: het horizontaal getij gaat vóórlopen op het verticale getij en minder achterlopen op de aandrijvende kracht.

3.2 Getijvoortplanting in het Schelde-estuarium

De getijvoortplanting op het Schelde-estuarium is complex proces en ook voor veel betrokkenen bij het estuarium moeilijk fysisch "te volgen". Het ontstaat uit de interactie tussen het Noordzeegetij en de relatief grillige geometrie van het estuarium. Daarbij spelen op de verschillende plaatsen en tijdstippen vrijwel alle bij getijvoortplanting mogelijke processen, zoals weerstand/demping, traagheid, berging, contractie en reflectie, elk hun rol. Behalve in de Boven-Zeeschelde is de invloed van de rivierafvoer op de getijvoortplanting zeer klein. Ze wordt daarom in de meeste beschouwingen in deze rapportage verwaarloosd.

De hoofdcomponent van het Noordzeegetij en derhalve van het Schelde-getij, het M2-getij, is dubbeldaags. De golflengte van deze component bedraagt, bij een gemiddelde diepte van het estuarium van ordegrootte 10 tot 15 m, rond 500 km.

De getijslag bij gemiddeld getij neemt van Vlissingen tot ongeveer Rupelmonde toe van 3.80 m tot 5.30 m. Rupelmonde ligt landinwaarts van Antwerpen op ruim 90 km afstand van Vlissingen.

Vervolgens neemt ze over de volgende 80 km weer af tot ongeveer 2.00 m bij Gent, het einde van het aan getij onderhevige deel van de Schelde. Deze afname noemt van Veen (1944) "de vloedkuil".

In onderstaande tabel is voor een aantal plaatsen voor springtij de verhouding tussen de getijslag ter plaatse en die in Vlissingen weergegeven, de getijversterkingsfactor G . Ook is de waarde weergegeven die het in deze getijanalyse toegepaste DUFLOW-model bij springtij levert. De betreffende knooppuntnummers van de DUFLOW-schematisatie zijn achter de overeenkomstige plaatsnamen vermeld. De natuurwaarden zijn overgenomen uit Claessen en Meyvis (1994).

plaats	getijslag in m	G in natuur	G volgens DUFLOW1992
Vlissingen (1)	4.46	1.00	1.00
Terneuzen (4)	4.81	1.08	1.06
Hansweert (12)	5.03	1.13	1.15
Bath (16)	5.48	1.23	1.25
Antwerpen (20)	5.87	1.32	1.35
Rupelmonde (22)	5.93	1.33	1.48
Temse	5.87	1.32	----
Dendermonde	4.24	0.95	----
Gent (53)	2.34	0.52	1.60

Tot de omgeving van Antwerpen wordt de getijversterking redelijk gereproduceerd, verder landwaarts is de demping in het model te zwak.

Bij Bath, op rond 40 km van Vlissingen treedt een vrij sterke vernauwing van het dwarsprofiel van het estuarium op en gaat het meergeulenstelsel over in een eengeulstelsel.

3.3 Ingrepen in Schelde-estuarium

In het Schelde-estuarium wordt al eeuwenlang ingegrepen door de mens. Met bedijken werd een tiental eeuwen geleden begonnen. Vooral in de 15e en 16e eeuw traden veel dijkdoorbraken met grote overstromingen op, aanvankelijk door stormvloed, later ook door oorlogshandelingen. In die tijd had het Schelde-estuarium, waarvan toen ook nog de huidige Oosterschelde deel uitmaakte, haar grootste kombergende oppervlakte. Vanaf de 17e eeuw kregen de bedijkingen met inpolderingen, het vergroten van de veiligheid werd steeds meer gecombineerd met landaanwinning, de overhand (Mol, 1996). De bergende oppervlakte nam doorgaand af (van der Spek, 1994). In de tweede helft van de vorige eeuw werden Oosterschelde en Westerschelde van elkaar gescheiden. Sinds 1800 is de oppervlakte van de huidige Westerschelde afgenomen van ongeveer 45000 ha naar 30.000 ha, een afname met een derde deel.

Vanaf het begin van deze eeuw wordt door baggeren ook rechtstreeks ingegrepen in de diepte van de geulen, om het estuarium geschikt te houden als vaarweg naar de op een na grootste haven van West-Europa, Antwerpen. In de zestiger en zeventiger jaren zijn deze baggerwerken sterk geïntensiveerd en uitgebreid over het hele estuarium. Met name in het mondingsgebied, het oostelijke deel van de Westerschelde, en de Beneden-Zeeschelde worden hoofdgeulenpatroon, dwarsprofielen van geulen en sedimentstromen substantieel beïnvloed door het baggeren en het elders in het estuarium terugstorten van sediment. Dit jaar is begonnen met het op een grotere diepte brengen en onderhouden van de ondiepste plaatsen, de drempels, waardoor de baggeromvang ongeveer anderhalf maal zo groot zal worden. Het westelijke en middendeel zullen nu ook sterker beïnvloed gaan worden, vooral door het terugstorten van in het oostelijke deel gebaggerd sediment.

In het verleden, in de huidige situatie en in de toekomst werd en wordt op natuurlijke en kunstmatige wijze de geometrie van het estuarium veranderd. Voor de getijvoortplanting betekent dit in grote lijnen veranderingen in doorstroomprofielen en in bergende oppervlakten. Veranderingen in bergende oppervlakten bestonden in het verleden vooral uit het verdwijnen van laterale bergende overstromingsgebieden en in geringere mate uit veranderingen van de bergende breedte van geulen. De meeste geulen werden in het verleden dieper. De interne verticale berging nam toe, waarbij ook de verdeling langs het estuarium veranderde, omdat zowel afname van de bergende oppervlakten als toename van geuldiepten weerstand en demping doen afnemen waardoor de getijslag toeneemt, zoals in hoofdstuk 4 zal worden geïllustreerd.

4 VERGROTING BERGENDE OPPERVLAKTE BIJ GRENS EN BIJ KRUIBEKE.

4.1 Invloed lokale verandering bergende oppervlakte algemeen.

In deze paragraaf wordt nagegaan wat er achtereenvolgens gebeurt als bij een periodieke getijgolf plaatselijk in een systeem zoals het Schelde-estuarium de bergende oppervlakte wordt veranderd. Zoals in hoofdstuk 3 is uiteengezet kan het getij op het Schelde-estuarium niet worden beschouwd als een getijgolf, die elk getij opnieuw, tweemaal per dag, met een stagnante waterspiegel als beginvoorwaarde wordt opgewekt. In het bekken heeft zich op de opgelegde randvoorwaarden een vrijwel periodieke waterbeweging ingesteld, als "een gedwongen slingering" (Dronkers, 1964). De bepalende randvoorwaarden zijn: de door de Noordzee aangeboden getijbeweging aan de mond, de relatief kleine rivierafvoer aan de landinwaartse rand en de geometrie, de vaste begrenzingen in horizontale en verticale richting, gevormd door waterkeringen en bodem. Bij een verandering in de geometrie zal zich een andere periodieke waterbeweging instellen, die weer voldoet aan de nieuwe voorwaarden. Een ingreep in de geometrie veroorzaakt uiteraard in eerste instantie ter plaatse een verandering in de getijbeweging. Afhankelijk van aard, lokatie en omvang van de ingreep kan het effect van de geometrieverandering op het getij in ruimte en tijd marginaal of significant zijn. Elke verandering in de geometrie moet echter tenminste ter plaatse enige invloed hebben. Daarom is het verstandig daar te beginnen bij de analyse.

De rol van de berging in de getijbeweging komt het meest expliciet tot uitdrukking in de continuïteitsvergelijking:

$$\delta Q / \delta x = - Bb(t) * \delta h / \delta t,$$

die zegt dat de langsgrediënt van het debiet op elk moment gelijk moet zijn aan het produkt van stijgsnelheid van waterspiegel en bergende breedte. Dit produkt wordt de interne berging genoemd. Geïntegreerd in langsrichting van het systeem, bijvoorbeeld over de afstand waarover de bergende breedte wordt vergroot, ziet de vergelijking er als volgt uit:

$$Q_1 - Q_2 = (Bb(t))_g * L * (\delta h / \delta t)_g = Fb(t) * (\delta h / \delta t)_g$$

Deze geïntegreerde continuïteitsvergelijking zegt dat het verschil tussen de debieten over zee- en landwaartse rand, resp. Q_1 en Q_2 , op elk moment gelijk moet zijn aan het produkt van bergende oppervlakte en de over het gebied gemiddelde stijgsnelheid van de waterspiegel. Het rechterlid beschrijft wat er binnen het gebied gebeurt. In de veranderingen van de debieten in het linkerlid komt de reactie van het systeem als geheel tot uitdrukking.

Wat er "achtereenvolgens" gebeurt bij, of wel hoe het getij reageert op een verandering van de bergende oppervlakte, wordt hierna beschreven voor een vergroting van deze bergende oppervlakte. In principe treden uiteraard bij een verkleining in principe soortgelijke veranderingen op.

- Als in een deel van het estuarium nu de bergende oppervlakte $Fb(t)$ wordt vergroot, neemt in eerste instantie de (gemiddelde) stijgsnelheid van de waterspiegel, $(\delta h / \delta t)_g$, ter plaatse af: het gebied vult en leegt zich langzamer. Als het debietverschil over de grenzen van het gebied, $(Q_1 - Q_2)$, gelijk zou blijven, zou $(\delta h / \delta t)_g$ omgekeerd evenredig met $\Delta Fb(t)$ afnemen. Dit zal niet het geval zijn; de getijbeweging past zich aan en er gaan compensaties optreden. Nagegaan moet worden of en hoe Q_1 en Q_2 zullen veranderen.
- Als $(\delta h / \delta t)_g$ afneemt ter plaatse van de vergroting van de bergende oppervlakte, worden de waterstandsverschillen, die vervallen, met het zeewaarts gelegen gebied over het grootste deel van de getijcyclus groter, waardoor de snelheden en de debieten (Q_1) op de randen toenemen. Het verschil $Q_1 - Q_2$ neemt toe, waardoor de initiële afname van de stijgsnelheid, $(\delta h / \delta t)_g$, wordt beperkt. Het eerste directe effect door de toename van de bergende oppervlakte wordt nu in enige mate beperkt door de toename van de debietverschillen tussen land- en zeewaarts gelegen rand.
- De afgenomen $(\delta h / \delta t)_g$ vormt de nieuwe waterstandsrandvoorwaarde voor het landwaarts gelegen gebied. Bij gelijkblijvende bergende oppervlakte in dit gebied zullen derhalve de debieten landwaarts van de ingreep (Q_2) in eerste instantie afnemen. Ook hierdoor neemt het verschil $Q_1 - Q_2$ toe, waarmee de initiële afname van $(\delta h / \delta t)_g$ verder wordt beperkt.
- Bij een kleine ingreep is het mogelijk dat de effecten zich beperken tot in feite deze primaire gevolgen van de veranderingen binnen het gebied waarin is ingegrepen. De debietveranderingen op de randen worden dan lokaal gecompenseerd. Als de ingreep voldoende groot is beperkt de invloed zich niet tot de randen.

- e) Afhankelijk van de omvang van de toename van debieten en snelheden op de zeewaarts gelegen rand, in relatie tot waterbeweging en geometrie in de aangrenzende gebieden, nemen ook de debieten en snelheden in het zeewaarts gelegen gebied toe. Als in dit gebied weerstand en wrijvingsverliezen een substantiële rol spelen zal daardoor de demping toenemen en de opslingering afnemen, waardoor ook in dit gebied de $\delta h/\delta t$ afneemt. Door deze afname wordt op de zeewaarts gelegen rand van het gebied waarvan de bergende oppervlakte is vergroot, de toename van de waterstandsverschillen beperkt en derhalve ook de toename van de debieten. Hier treedt dus een tweede correctie op deze toename op.
- f) De afname van de $\delta h/\delta t$ in het zeewaarts gelegen gebied betekent ook een afname van de interne berging in dit gebied, waardoor de initiële toename van de debieten hier, door de toename van de berging door de vergroting van de bergende oppervlakte, wordt tegengewerkt. Dit is een heel belangrijk effect. Het is mogelijk dat de totale afname van de interne berging in het zeewaarts gelegen gebied groter wordt dan de bergingstoename door de vergroting van de bergende oppervlakte. In zo'n geval nemen dus bij een lokale vergroting van de bergende oppervlakte in zeewaartse richting gaande vanaf een bepaalde plaats de debieten af in plaats van toe!
- g) Tenslotte nemen, zoals genoemd onder a), met de afnemende $(\delta h/\delta t)_g$ ter plaatse van de ingreep de waterstandsverschillen met het landwaarts gelegen gebied af en derhalve ook de snelheden en de debieten. Als weerstand en wrijvingsverliezen in dit gebied een substantiële rol spelen, kan de in het zeewaarts gelegen gebied veroorzaakte toename van de demping in het landwaarts gelegen gebied worden beperkt door de geringere demping bij de kleinere snelheden.

4.2 Verkenning invloed plaats en omvang lokale vergrotingen bergende oppervlakte in Schelde-estuarium.

Na het voorgaande is het leerzaam eerst in algemene zin te kijken naar de invloed van plaats en omvang van kombergingsoppervlaktevergrotingen in het Schelde-estuarium. Er wordt daarbij vooral gebruik gemaakt van de eerste in augustus 1996 uitgevoerde deelserie simulaties (serie I), waarbij op verschillende plaatsen langs het estuarium de kombergingsoppervlakte werd vergroot. In een TRECOS-simulatie wordt de invloed van een ingreep in eerste instantie uitgedrukt in de getijversterkingsfactor en het maximale debiet op te voren op te geven lokaties. De getijversterkingsfactor is de getijslag ter plaatse gedeeld door de getijslag te Vlissingen. Het maximale debiet is hier het gemiddelde van de absolute waarden van maximale eb- en vloeddebieten. Als "leereffect" moeten deze waarden voor de simulatie worden voorspeld, door degeen die de simulatie uitvoert (zie originele TRECOS-uitvoer in bijlagen). Als referentie worden de waarden van deze parameters berekend met een simulatie zonder ingreep, de zg. basisberekening.

De kombergingsoppervlakte werd op de verschillende plaatsen vergroot met 900 ha. Om de gedachten te bepalen: een vergroting van de kombergingsoppervlakte met 900 ha betekent bij een getijslag van 4.50 m een potentiële waterbergingstoename van rond 40 Mm³. De ingrepen vonden plaats, gaande van west naar oost, in Vaarwater langs Paulinapolder (P, sectie 10), Ebschaar Everingen (S, sectie 63), Gat van Ossenis (O, sectie 15), Schaar van Waarde/Zimmermangeul (W, sectie 22), Hedwigepolder (H, sectie 61) en bij Kruikebeke (K, sectie 28). Voor deze serie werd de invloed uitgedrukt in de getijversterkingsfactor in Bath (GB, in knooppunt 16) en in het maximale debiet bij de grens (QG, in sectie 21). Per abuis werd de kombergende oppervlakte aan de grens (sim I-16) met slechts 90 ha vergroot. Om toch een indruk te geven is een simulatie met een vergroting van 800 ha met bijbehorende basisberekening uit serie III toegevoegd. Voor de invloed op de getijslag fungeerde in deze serie Antwerpen (GA, in knooppunt 20) als referentie.

De uitkomsten van de simulaties waren:

sim IV-12	dB = 0 ha	GB = 1.25	QG = 12950 m ³ /s
sim I-12	dB _P = 900 ha	GB = 1.26	QG = 12930 m ³ /s
sim...I-13	dB _S = 900 ha	GB = 1.26	QG = 12930 m ³ /s
sim I-14	dB _O = 900 ha	GB = 1.26	QG = 12900 m ³ /s
sim I-15	dB _W = 900 ha	GB = 1.24	QG = 12770 m ³ /s
sim I-16	dB _H = 90 ha	GB = 1.25	QG = 13220 m ³ /s
sim III-29	dB = 0 ha	GA = 1.35	QG = 12950 m ³ /s
sim III-33	dB _H = 800 ha	GA = 1.32	QG = 15290 m ³ /s
sim I-17	dB _K = 900 ha	GB = 1.20	QG = 13810 m ³ /s

De getijslag- en debietveranderingen in Bath en aan de grens geven voor de simulaties I-12 t/m I-16 de invloed landwaarts van de ingreep weer. Bij een vergroting van de bergende oppervlakte zullen met de afname van de $(\delta h / \delta t)_g$ ter plaatse landwaarts ervan de debieten en getijslag afnemen. De ingrepen westelijk van Hansweert blijken in deze omvang weinig invloed op de getijslag in Bath en het debiet aan de grens te hebben. De ingrepen zijn daarvoor te klein en er zullen met name in de gebieden zelf en de tussenliggende gebieden, onder andere via de parallelgeulen, compenserende effecten optreden. Een nader onderzoek in de directe omgeving en tussenliggende gebieden zou hierover meer duidelijk kunnen maken.

Dat er lokaal, ook bij ingrepen van deze omvang in het ruime westelijke deel, wel effecten optreden, blijkt uit de volgende simulaties. Bij een verkleining van de bergende breedte van de Everingen (dBE) met 900 ha verandert de versterking in Bath niet, maar neemt het maximale debiet in de Everingen zelf (QE) af met 3 tot 4 %.

sim	dBE = 0 ha	GB = 1.25	QE = 40000 m ³ /s
sim I-41	dBE = -900 ha	GB = 1.25	QE = 38650 m ³ /s
sim I-42	dBE = -1500 ha	GB = 1.25	QE = 37760 m ³ /s

Enigszins opmerkelijk is de relatief geringe invloed van de vergroting van de bergende oppervlakte in het Valkenissegebied (sim I-15). De vergroting van de bergende breedte is aangebracht in de Schaar van Waarde / Zimmermangeul (sectie 22), de kleinste van drie parallelgeulen door het gebied. De getijslag in Bath neemt af met minder dan 1 % (≈ 0.05 m) en het maximale debiet aan de grens met 1.5 % (≈ 180 m³/s).

Aan dit verschijnsel werd een aparte serie simulaties besteed (I-19 t/m I-24, bijl.). Van deze serie zijn hierna alleen de simulaties met de grootste uitbreiding en de grootste verkleining van de bergende breedte weergegeven:

sim IV-12	dB = 0 ha	GB = 1.25	QG = 12950 m ³ /s
sim I-23	dB _W = 1300 ha	GB = 1.23	QG = 12680 m ³ /s
sim I-24	dB _W = -1600 ha	GB = 1.26	QG = 13190 m ³ /s

Ook bij deze nog grotere ingrepen blijft de invloed relatief klein. Getijslag en maximale debiet nemen bij de vergroting af met resp. 1.5 % (≈ 0.10 m) en 2 % (270 m³/s). Bij de in absolute waarde grotere verkleining van BW zijn de toenames van getijslag en debiet kleiner dan deze afnamen.

De totale berging tussen LW en HW tussen Hansweert en Bath bedraagt rond 150 Mm³. De geringe veranderingen van de getijslag bij Bath betekenen dat de aangebrachte bergingsaf- en toenames over vrijwel hun hele potentiële omvang van rond 70 Mm³ worden "gebruikt". Dit betekent weer dat de interne berging in het gebied met deze ingrepen resp. de helft kleiner of anderhalf maal zo groot wordt. Het vloedvolume zeewaarts van het gebied, nabij Hansweert, bedraagt zonder de toename van de bergende oppervlakte rond 350 Mm³. Als de interne berging toeneemt met 20 % daarvan, moeten gemiddeld over het getij de snelheden ook met 20 % toenemen. Het is opmerkelijk dat een snelheidstoename van deze orde een dergelijke geringe toename van de demping tot gevolg heeft. Geconcludeerd lijkt te kunnen worden dat in het middengebied van de Westerschelde de weerstand een beperkte rol speelt en dat als gevolg daarvan de berging in het oostelijke deel van beperkte invloed is op de getijvoortplanting.

Voor de kombegingsvergrotingen bij de grens en bij Kruibeke geven de getijversterking- en debietveranderingen bij resp. Bath en de grens een indruk van de invloed zeewaarts van de b.o.-veranderingen. Het debiet aan de grens reageert sterk op de bergingsvergroting direct landwaarts ervan (sim I-16, III-33). Ook de getijslag in Antwerpen (GA) landinwaarts reageert hierop significant. Hoewel dan 35 km verder landinwaarts gesitueerd, heeft de vergroting van de bergende breedte bij

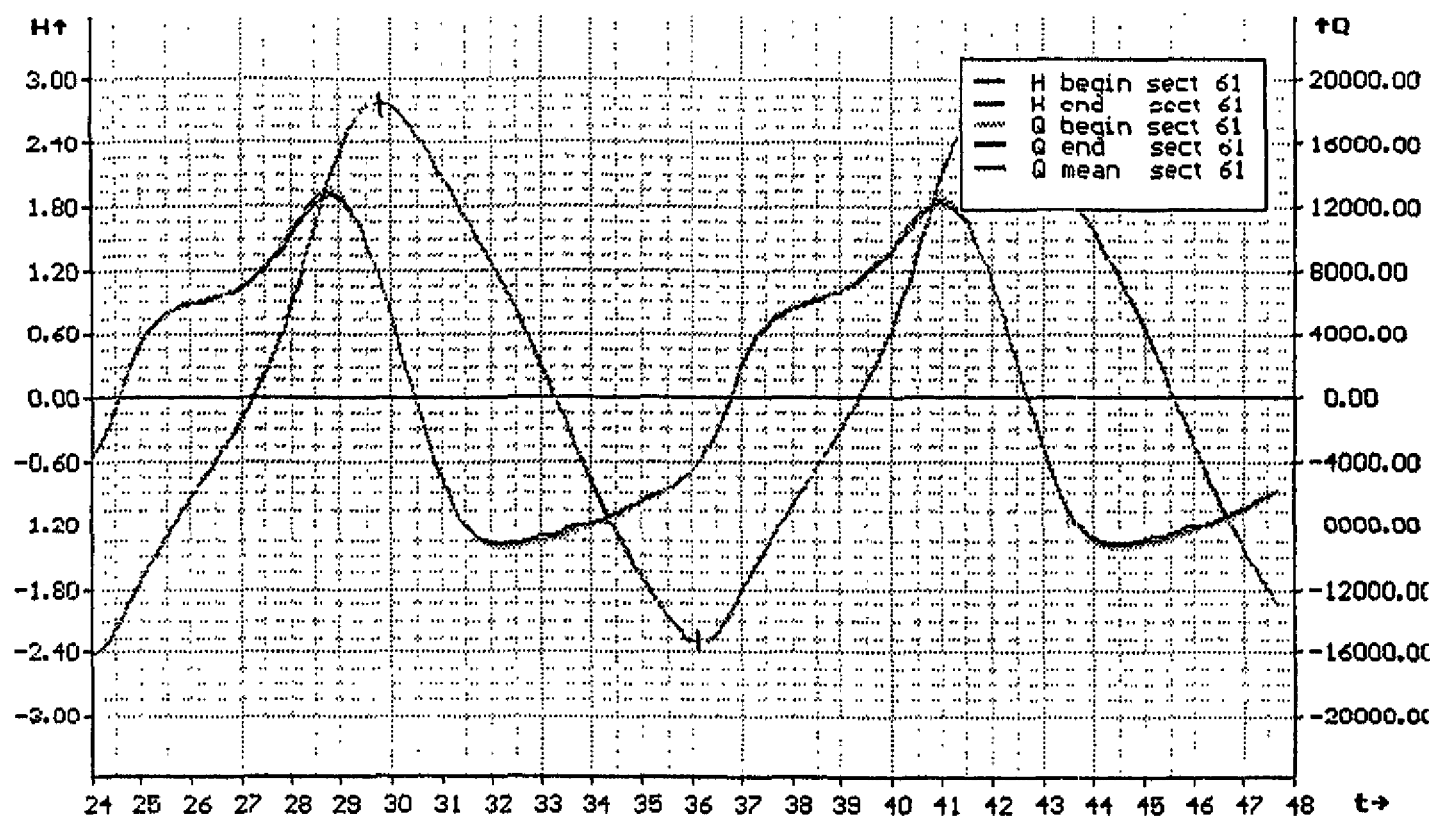


fig. 4.1 waterstands- en debietkrommen vóór ingreep

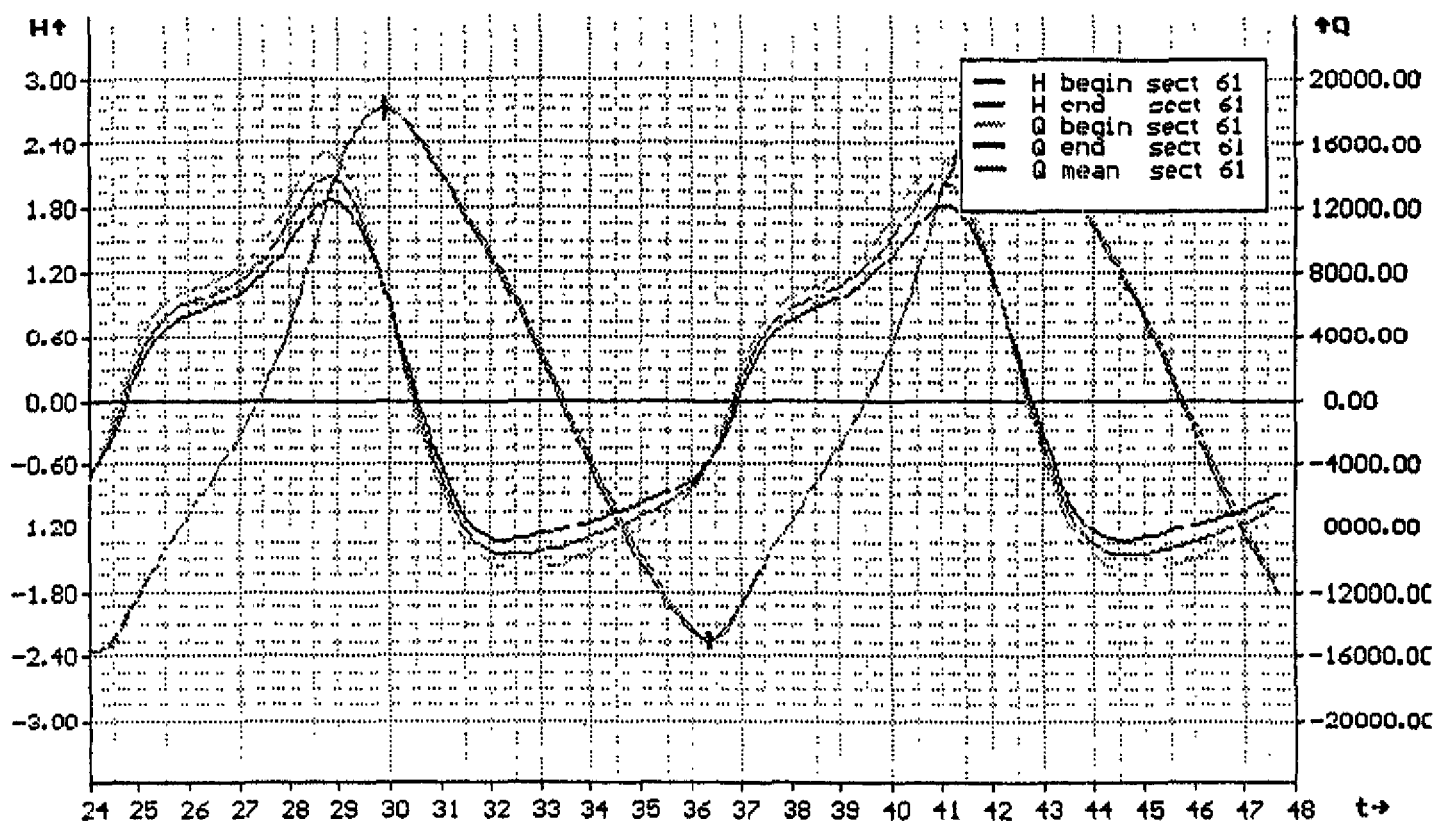


fig. 4.2 waterstands- en debietkrommen ná ingreep

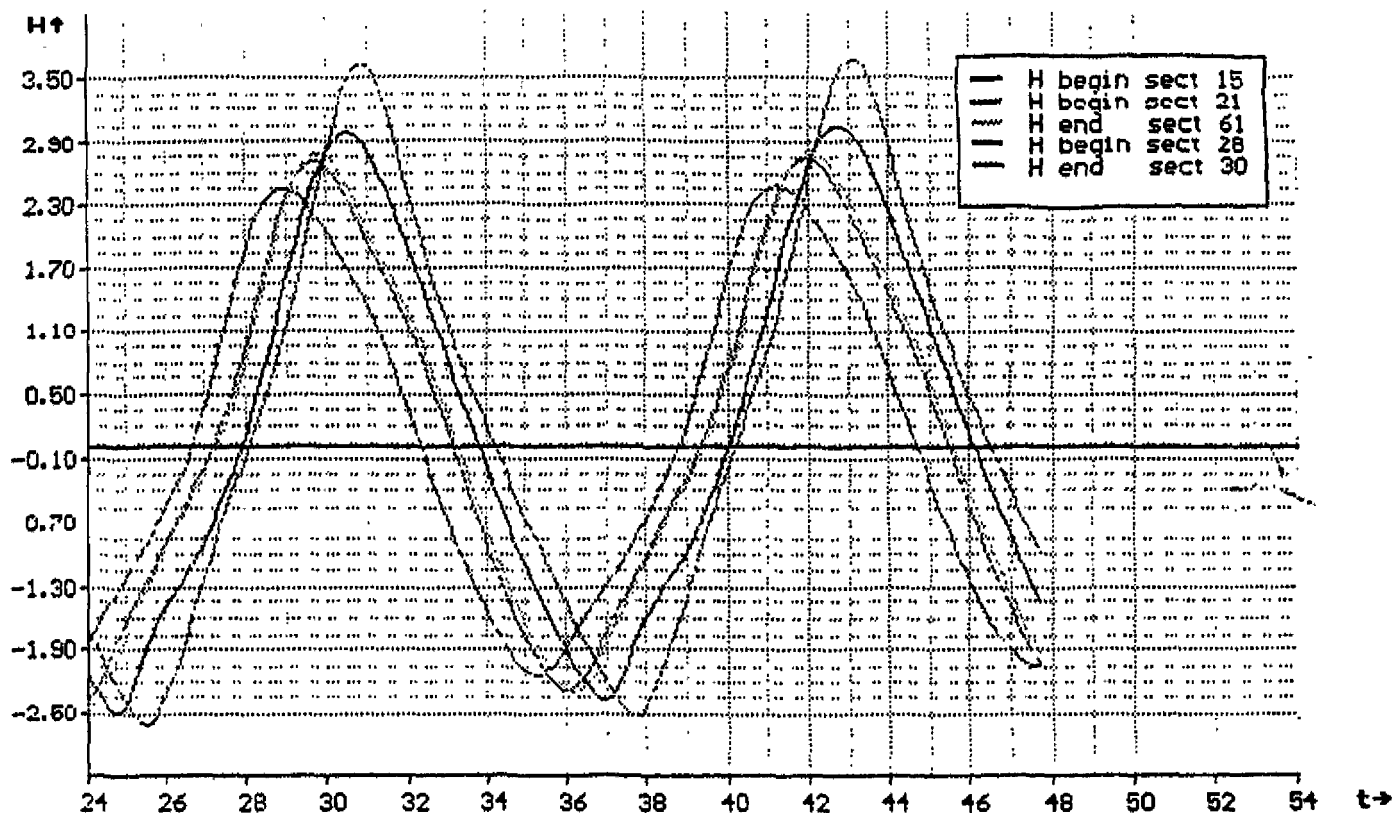


Fig. 4.3 waterstandskrommen vóór ingreep

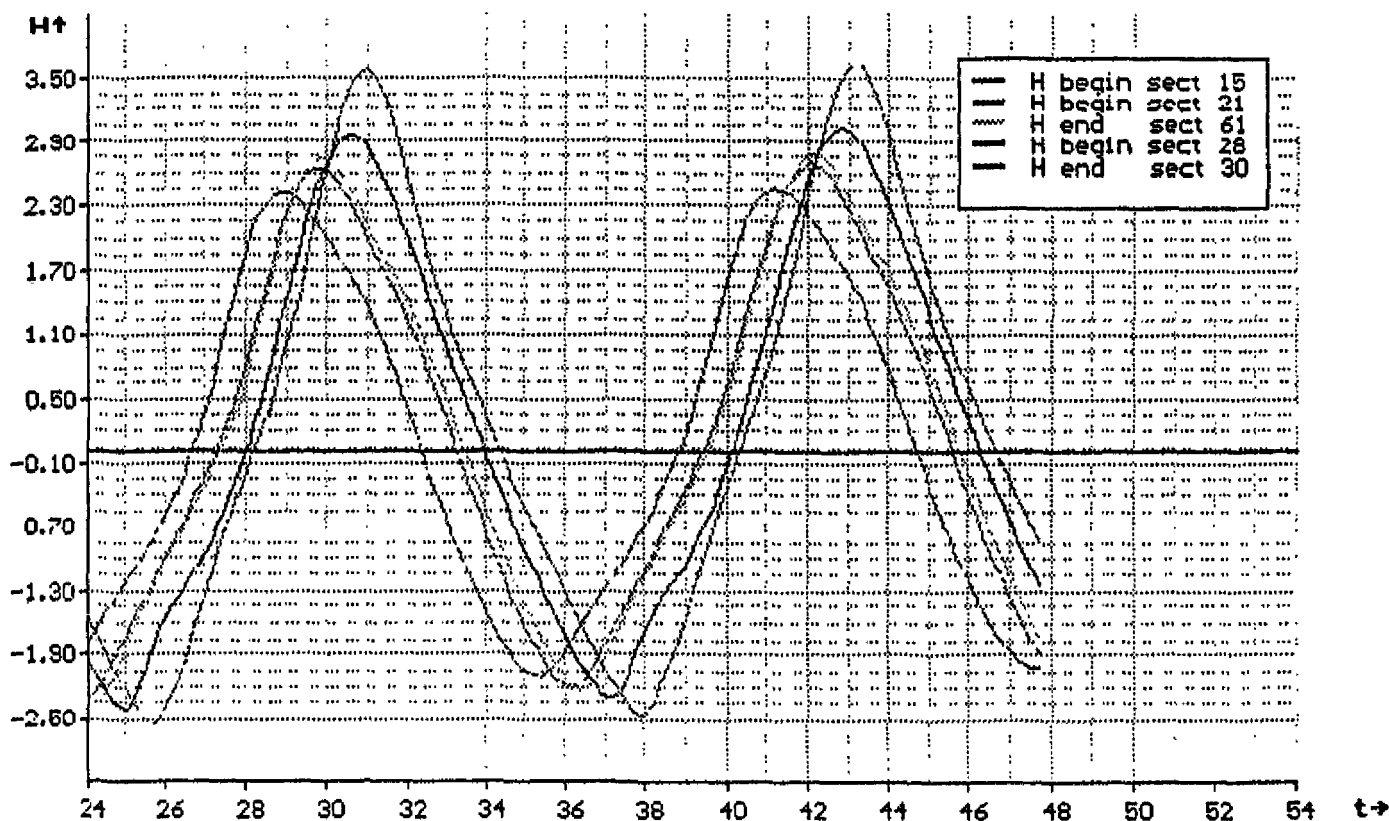


Fig. 4.4 waterstandskrommen ná ingreep

Kruikeke nog aanmerkelijke invloed in Bath. Op deze ingrepen wordt in de volgende paragrafen, resp. 4.3 en 4.4, uitgebreid ingegaan.

4.3 Vergroting bergende oppervlakte bij grens

Een vergroting van de bergende oppervlakte bij de grens heeft praktische betekenis. Ter sprake is geweest om de Hedwigepolder, met een oppervlakte van rond 300 ha, weer aan de rivier toe te voegen. In België bestaan zeer serieuze plannen voor de aanleg van een in open verbinding met de rivier staande containerhaven bij Doel.

In serie I werd een aantal simulaties uitgevoerd, waarbij de toename van de bergende oppervlakte aan de grens met stappen van 20 ha werd vergroot tot een toename met 150 ha (I-34 t/m I-40, bijl. D-1). De getijslag in Antwerpen reageert hierop niet meetbaar, terwijl het maximale debiet zeewaarts van de bergingsvergroting lineair toeneemt met 60 m³/s per 20 ha. Bij 150 ha is het maximale debiet met 450 m³/s toegenomen, dat is 3.5 % van de oorspronkelijke waarde. De potentiële toename van de berging, dat is de toename als de getijslag niet zou veranderen, bedraagt bij dBH=150 ha en een getijslag van ruim 5 m rond 8 Mm³, wat rond 5 % is van het vloed- of ebvolume ter plaatse. De (maximale) debieten nemen in dezelfde orde toe als de potentiële berging, die derhalve grotendeels benut lijkt te worden. De getijslagafname door dempingstoename lijkt niet groot te zijn, ofwel weerstand en wrijving spelen in dit gebied kennelijk een relatief beperkte rol. In serie III werden zes simulaties uitgevoerd met grotere toenames van de bergende oppervlakten. dBH werd nu opgevoerd met stappen van 200 ha van 200 t/m 800 ha (sim III-29 t/m III-34, bijl.). Ook nu neemt het maximale debiet aan de zeewaartse rand evenredig toe met de vergroting, nu met 600 m³/s per 200 ha! Bij dBH = 800 ha treedt een toename met 18 % op. Dit moet effect hebben op de getijslag in Bath (zie hierna). Bij deze simulaties werd echter alleen het effect voor Antwerpen weergegeven. Vanaf dBH = 200 ha treedt daar nu wel een, betrekkelijk geringe, reactie op. Bij dBH = 800 ha is de getijslag in Antwerpen afgenomen met iets meer dan 2 %. Deze simulaties bevestigen het beeld uit de simulaties in serie I. Hierna wordt hierop verder ingegaan.

In serie IV werd de invloed van bergingsverandering bij de grens systematisch geanalyseerd aan de hand van een viertal simulaties. Om substantiële invloed te kunnen onderscheiden werd een een relatief grote vergroting van de bergende oppervlakte aangebracht van 600 ha (dBG = 600 ha in sectie 61). Twee runs, IV-13 en IV-15, geven de effecten weer op de getijversterkingsfactor G en het maximale debiet Q, respectievelijk ongeveer direct zeewaarts en landwaarts ervan. Zeewaarts van de ingreep werden G en Q gepresenteerd in respectievelijk Bath (GB in knooppunt 16) en in het Vaarwater boven Bath (QG in sectie 21), landwaarts in respectievelijk Antwerpen (GA in knooppunt 20) en bij Doel (QD in sectie 25). In de runs IV-12 en IV-14, de zg. basisberekeningen, zijn als referentie op dezelfde plaatsen G en Q berekend zonder ingreep.

In de figuren 4.1 t/m 4.4 zijn van de situaties zonder en met ingreep waterstands- en debietkrommen weergegeven nabij de ingreep (4.1, 4.2) en waterstandskrommen op een aantal verder weg gelegen lokaties (4.3, 4.4).

De uitkomsten van de simulaties waren:

sim IV-12	dBG = 0 ha	GB = 1.25	QG = 12950 m ³ /s
sim IV-13	dBG = 600 ha	GB = 1.22	QG = 14710 m ³ /s
sim IV-14	dBG = 0 ha	GA = 1.35	QD = 9330 m ³ /s
sim IV-15	dBG = 600 ha	GA = 1.33	QD = 9140 m ³ /s

In Bath neemt de getijslag af met 2.5 %, dat is rond 0.10 m, en in Antwerpen met 1.5 %, ruim 0.05 m. Het maximale debiet is aan de zeerand met 14 % (bijna 1800 m³/s) toegenomen en aan de landzijde met 2 % afgenomen. De afname van de getijslag in Bath is veroorzaakt door de grotere weerstand met wrijvingsverliezen door de toename van de debieten en snelheden zeewaarts van de ingreep, ook westelijk van Bath. In verhouding tot de debiet-/snelheidstoenames is de toename van demping niet groot. De rol van de weerstand in het gebied is relatief beperkt. Verder zeewaarts wordt bovendien in feite het effect van de kwadratische toename van de weerstand met de snelheden beperkt, doordat de debietstoenames worden verdeeld over meerdere parallelgeulen.

De sterker gedempte getijslag ter plaatse van de ingreep vormt de (nieuwe) waterstandsrandvoorwaarde voor het landwaarts gelegen gebied. De toename van de demping in het zeewaarts van de ingreep gelegen gebied blijkt niet volledig door te werken in Antwerpen. Dit komt

door de afname van de debieten en snelheden landwaarts van de ingreep. Hoewel deze afname klein is (2%), vergeleken met de toename aan de zeezijde, compenseert ze door een geringere demping in het landwaarts gelegen gebied in enige mate de zeewaarts opgetreden toename.

De veranderde relatieve invloed van de weerstand is goed te zien in de H-t- en Q-t- krommen in de figuren 4.1 t/m 4.4. De toename in het zeewaarts gelegen gebied veroorzaakt een vertraging van het verticale getij ter plaatse van de ingreep, een toename van faseverschil en verval met het getij op zee (H sectie 61, fig. 4.1/2). Het faseverschil tussen horizontaal en verticaal getij wordt iets groter: de debieten bereiken iets eerder hun maximum ten opzichte van de tijdstippen van HW en LW, waarop het verval van richting verandert. De stroomkenteringen vinden iets korter na HW en LW plaats. Deze veranderingen duiden op een wat groter geworden invloed van de weerstand ten opzichte van de traagheid. Fig 4.3 en 4.4 laten zien dat de invloed relatief lokaal is. De H-t krommen van begin sectie 15, in het Gat van Ossensisse, aan het begin van sectie 28, boven Antwerpen, en aan het eind van sectie 30, landwaarts van Rupelmonde, laten vrijwel geen verandering zien. De H-t- krommen van sectie 21, bij Bath, en de sectie waar is ingegrepen vertonen een kleine faseverschuiving, een vertraging, het verval ten opzichte van sectie 15 wordt iets groter evenals het onderlinge verval, alles ten gevolge van de toegenomen weerstand.

4.4 Vergroting bergende oppervlakte bij Kruibeke

Bij Kruibeke, Basel en Rupelmonde worden zogenaamde gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's) ingericht. Dit zijn volledig omdijkte aan de rivier grenzende gebieden, waarvan de rivierdijk plaatselijk is verlaagd. Bij een hoge stormvloed zal de dijk daar overlopen, waardoor de hoogwaterstand op de rivier wordt beperkt. De gezamenlijke oppervlakte van de gebieden waarvoor deze plannen bestaan bedraagt rond 600 ha. In deze paragraaf wordt geanalyseerd wat de invloed is op de getijvoortplanting, als deze gebieden weer permanent aan de rivier zouden worden toegevoegd.

Evenals voor de kombergingsvergroting bij de grens, zoals beschreven in par. 4.3, werden in serie IV met een viertal TRECOS-simulaties systematisch de invloeden aan zee- en landwaartse zijde van de ingreep zichtbaar gemaakt. Voordat daarop verder wordt ingegaan, worden hier eerst de eerder uitgevoerde simulaties van kombergingsveranderingen bij Kruibeke gepresenteerd en geïnterpreteerd.

In serie II werd in een aantal simulaties de bergende oppervlakte bij Kruibeke met stappen van 300 ha verhoogd tot 900 ha. De effecten werden uitgedrukt in de getijslag (GA, knooppunt 20) en het maximale debiet (QA, sectie 27) bij Antwerpen. In serie I was een simulatie uitgevoerd, waarbij de effecten op de getijslag in Bath (GB, knooppunt 16) en het maximale debiet bij de grens (QG, sectie 21) werden weergegeven.

De resultaten van deze simulaties waren:

sim IV - 12	dBK = 0 ha	GB = 1.25	QG = 12950 m3/s
sim I - 17	dBK = 900 ha	GB = 1.20	QG = 13810 m3/s
sim II - 39	dBK = 0 ha	GA = 1.35	QA = 5510 m3/s
sim II - 38	dBK = 300 ha	GA = 1.27	QA = 6180 m3/s
sim II - 37	dBK = 600 ha	GA = 1.18	QA = 6700 m3/s
sim II - 36	dBK = 900 ha	GA = 1.09	QA = 7080 m3/s

De vergroting van de bergende oppervlakte bij Kruibeke in deze omvang heeft significante invloed op het getij in het direct zeewaarts gelegen gebied bij Antwerpen. Dit was te verwachten: de potentiële toename van de berging van rond 50 miljoen m3 bij dBK = 900 ha benadert in omvang de aanwezige totale berging landwaarts van Antwerpen. Het maximale debiet bij Antwerpen neemt bij deze b.o.-toename toe met bijna 30 %. De potentiële bergingstoename wordt voor een beperkt deel "gebruikt", omdat door de grotere snelheden, met grotere weerstand en demping, de getijslag sterk afneemt: bij Antwerpen met bijna 20 %. Hoewel de aangebrachte b.o.-toename relatief zeer groot is, mag toch worden geconcludeerd dat weerstand en demping in dit gebied een relatief grote rol spelen. Dit is ook al zichtbaar in de uitgangssituatie: de vanaf Vlissingen toenemende getijslag bereikt hier haar maximum en neemt weer af in landwaartse richting.

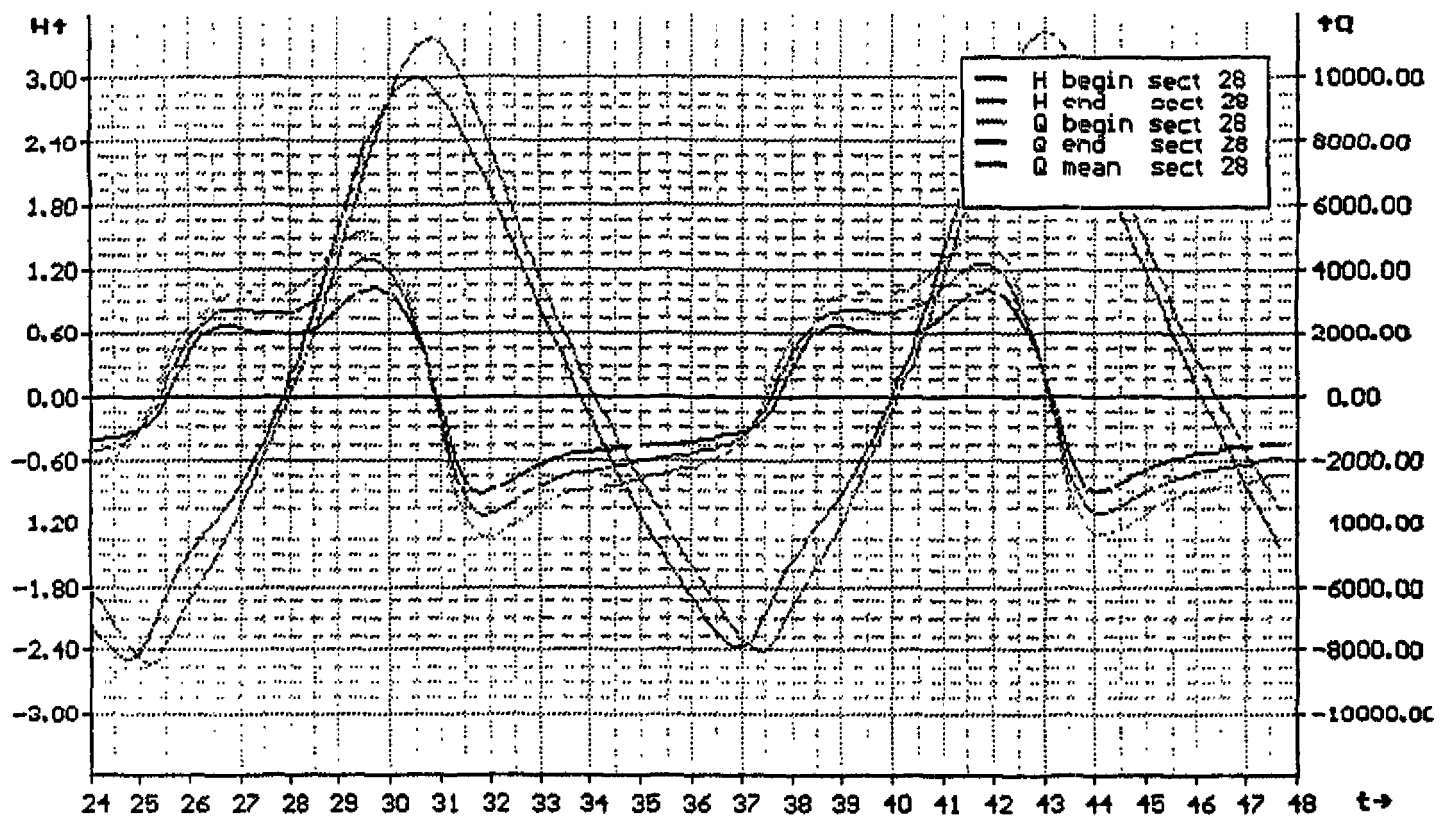


Fig. 4.5 waterstands- en debietkrommen vóór ingreep

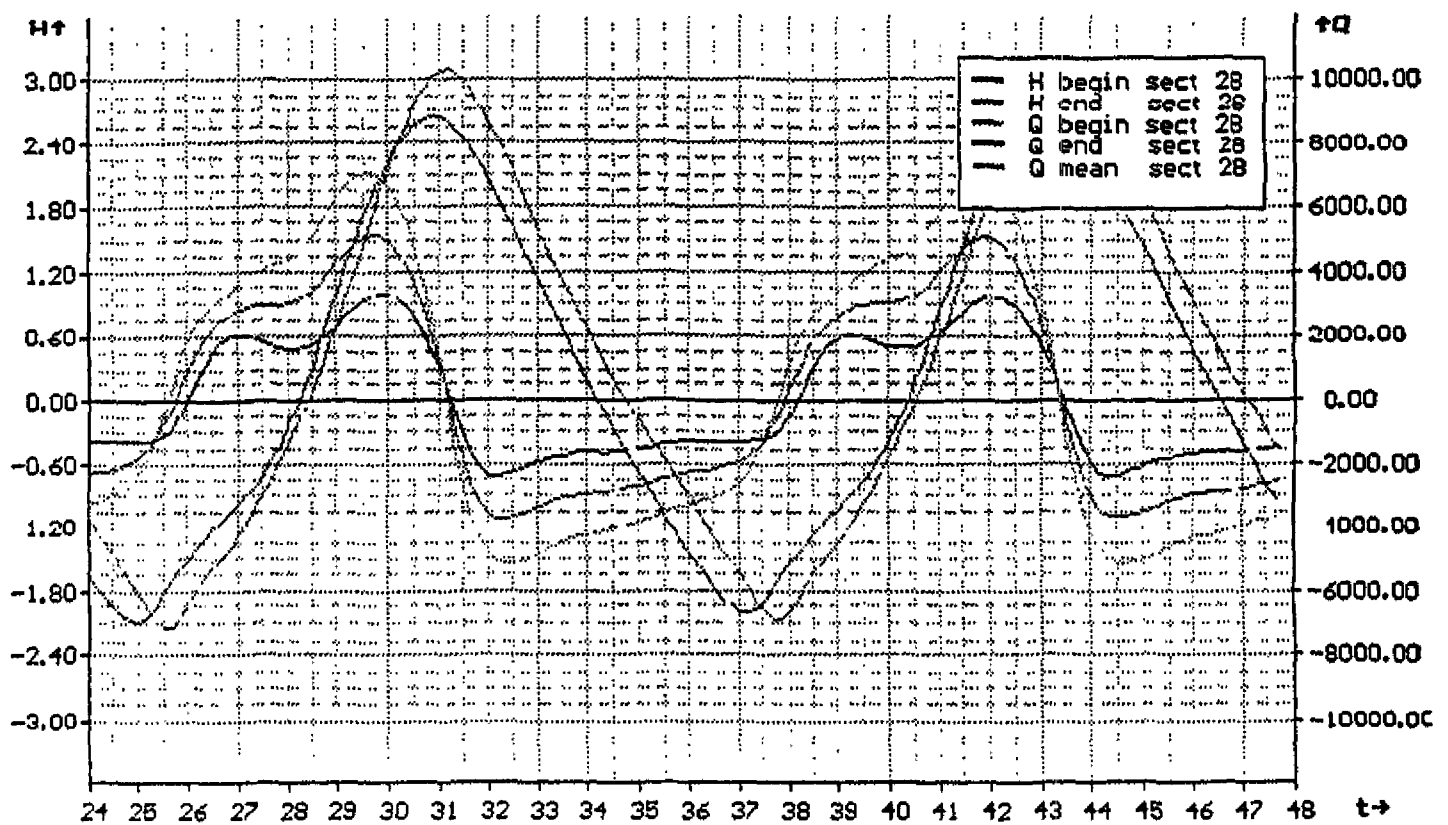


Fig. 4.6 waterstands- en debietkrommen ná ingreep

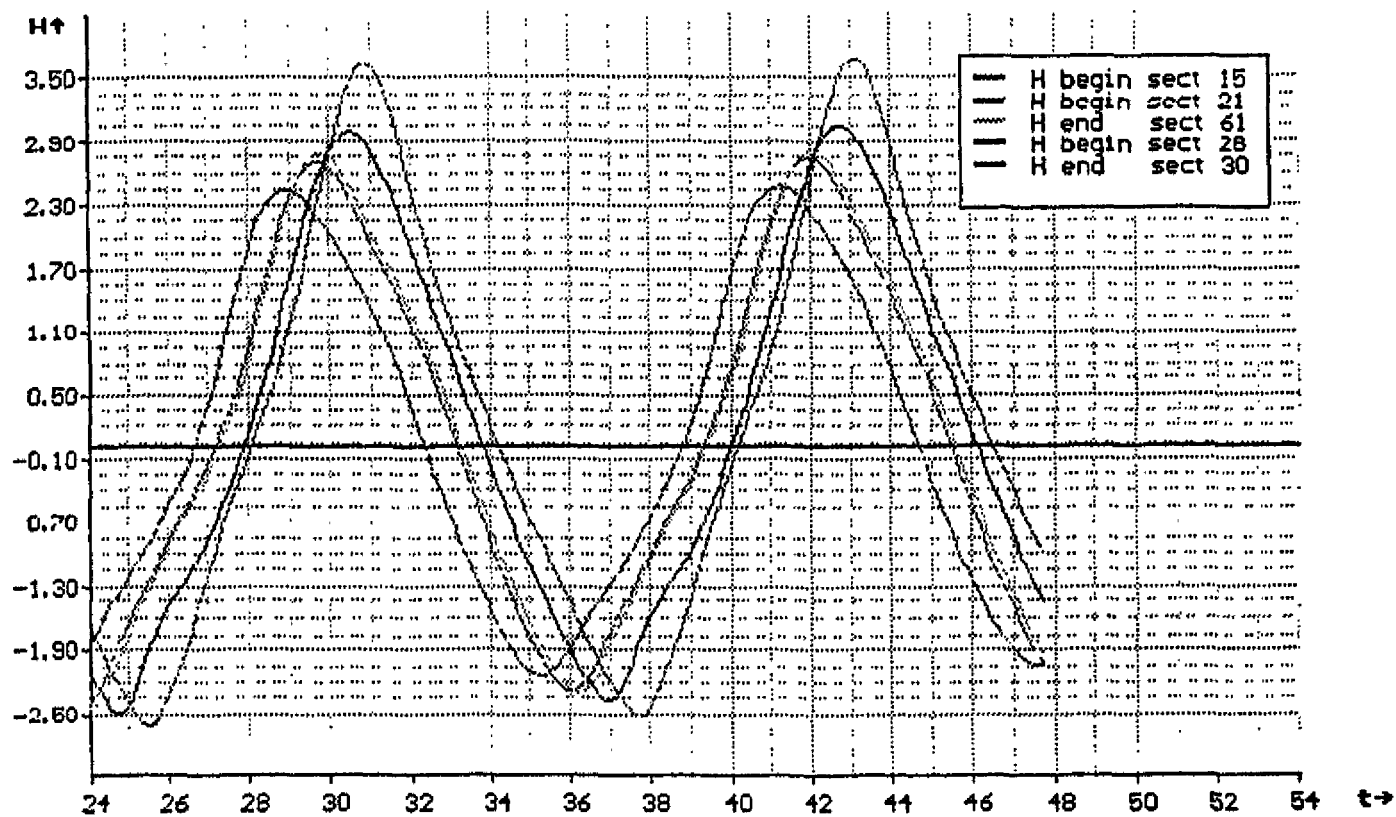


fig. 4.7 waterstandskrommen vóór ingreep

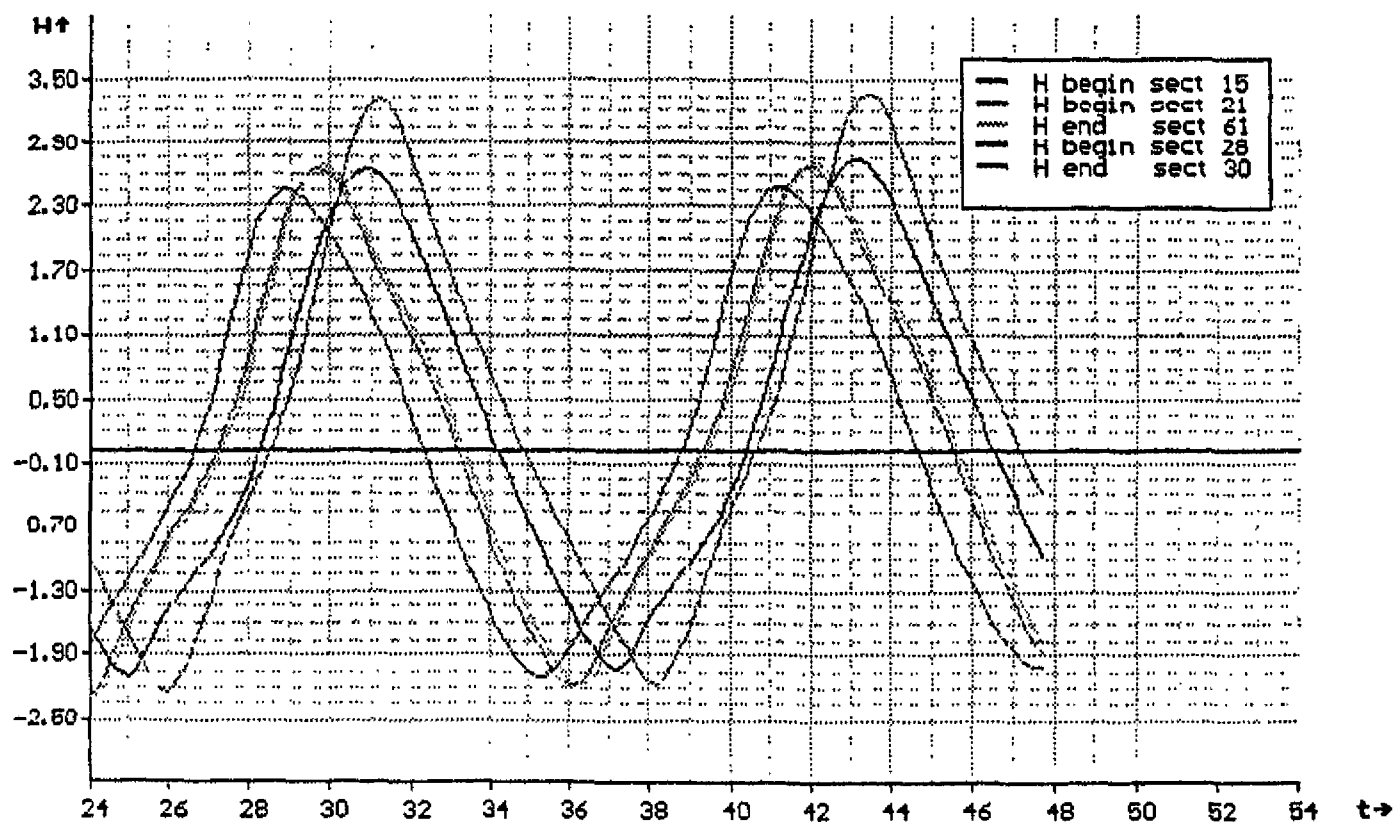


fig. 4.8 waterstandskrommen ná ingreep

De grote invloed van weerstand en demping via de geometrie blijkt ook als tegelijk met de b.o.-vergroting bij Kruibeke (dBK) de Beneden-Zeeschelde tussen de grens en Rupelmonde wordt verdiept (dDZ). De volgende simulaties laten dit zien.

sim II - 39	dBK = 0 ha	GA = 1.35	QA = 5510 m3/s
sim II - 37	dBK = 600 ha	GA = 1.18	QA = 6700 m3/s
sim II - 40	dBK = 600 ha, dDZ = 1.00 m	GA = 1.24	QA = 7130 m3/s
sim II - 41	dBK = 600 ha, dDZ = 2.00 m	GA = 1.27	QA = 7450 m3/s
sim VI -	dDZ = 1.00 m	GA = 1.38	QA = 5760 m3/s
sim VI -	dDZ = 2.00 m	GA = 1.40	QA = 5960 m3/s

Bij een vergroting van de bergende oppervlakte bij Kruibeke met 600 ha neemt de getijslag bij Antwerpen met 13 % af. Als door de bijbehorende debieten- en snelhedentoenamen de Beneden-Zeeschelde vervolgens met 1.00 á 2.00 m zou verdiepen, zou de getijslagafname weer ongeveer worden gehalveerd tot 8 á 6 % van de oorspronkelijke waarde. Vanuit de situatie met een 600 ha grotere bergende oppervlakte veroorzaakt deze verdieping een getijslagtoename van 5 á 8 %. Vanuit de oorspronkelijke situatie zou dit 2 á 4 % zijn.

Er kan ook "omgekeerd" worden geredeneerd: vanuit de huidige situatie veroorzaakt de b.o.-vergroting van 600 ha bij Kruibeke een toename van de getijslag bij Antwerpen met 13 %, terwijl dat bij een 1.00 á 2.00 m diepere Beneden-Zeeschelde rond 9 % zou zijn.

Deze simulaties illustreren duidelijk de sterke niet-lineaire afhankelijkheid van de getijslag bij Antwerpen voor de geometrie van de Beneden-Zeeschelde en de bergende oppervlakte landwaarts van Antwerpen. Laatstgenoemd verschijnsel is al een halve eeuw geledenesignaleerd als het "vloedkuilprobleem voor België" door van Veen (1944). Volgens de simulaties lijkt de invloed ervan groot te zijn, relatief groter ook dan de afzonderlijke invloed van de diepte van de Beneden-Zeeschelde.

Onderstaande simulaties laten zien dat bij een b.o.-vergroting met 900 ha bij Kruibeke direct zeewaarts ervan bij Antwerpen het maximale debiet met bijna 1600 m3/s toeneemt, terwijl verder zeewaarts bij de grens de toename gehalveerd is tot 800 m3/s.

sim II - 39	dBK = 0 ha	GA = 1.35	QA = 5510 m3/s
sim II - 36	dBK = 900 ha	GA = 1.09	QA = 7080 m3/s
sim IV - 12	dBK = 0 ha	GB = 1.25	QG = 12950 m3/s
sim I - 17	dBK = 900 ha	GB = 1.20	QG = 13810 m3/s

De hier waar te nemen afname in zeewaartse richting van de toename van het maximale debiet, zoals die direct zeewaarts van de b.o.-vergroting optreedt, betreft zeker voor een deel het in par. 4.1 onder f) beschreven effect. De grotere snelheden en weerstand veroorzaken een sterkere demping in het zeewaarts gelegen gebied, waardoor daar de interne verticale berging afneemt, die per saldo de bergingstoename door de lokale b.o.-vergroting reduceert en zelfs kan (over-)compenseren. Bij een conclusie als deze is wel enige terughoudendheid geboden. In de eerste plaats is de Qmax-verandering niet altijd volledig representatief voor in tijd en ruimte substantiële debiet- en snelheidsveranderingen. Het is een momentane waarde en veranderingen kunnen ook optreden door faseverschuivingen met het verticale getij, waardoor het bepalende doorstroomprofiel verandert. Bovendien wordt ze hier berekend als gemiddelde van eb- en vloedwaarden, die lang niet altijd in gelijke mate en zin veranderen.

Voor een nadere systematische analyse van de lokale veranderingen door de b.o.-vergroting bij Kruibeke werden in samenhang een viertal simulaties uitgevoerd, twee basisberekeningen, IV-16 en IV-18, en twee berekeningen mét b.o.-vergroting, IV-17 en IV-19. Het effect op de getijversterking werd in alle simulaties weergegeven in Antwerpen (GA in knooppunt 20), zeewaarts van de ingreep gelegen. Het effect op de maximale debieten wordt zowel zeewaarts van de ingreep, bij Antwerpen (QA in sectie 27), als landwaarts bij Rupelmonde (QR in sectie 29) gepresenteerd.

In de figuren 4.5 t/m 4.8 zijn van de situaties zonder en met ingreep waterstands- en debietkrommen weergegeven nabij de ingreep (4.5, 4.6) en alleen waterstandskrommen op een aantal verder weg gelegen lokaties (4.7, 4.8)

De resultaten van de simulaties waren:

sim IV-16	dBK = 0 ha	GA = 1.35	QA = 5510 m3/s
sim IV-17	dBK = 600 ha	GA = 1.18	QA = 6710 m3/s
sim IV-18	dBK = 0 ha	GA = 1.35	QR = 3080 m3/s
sim IV-19	dBK = 600 ha	GA = 1.18	QR = 2690 m3/s

Bij een b.o.-vergroting bij Kruibeke van 600 ha neemt bij Antwerpen de getijslag af met 13 %, dat is orde 0.50 á 1.00 m. Deze afname is het gevolg van de toename van weerstand en damping zeewaarts van de b.o.-vergroting door de sterke toename van de debieten/snelheden daar. Direct zeewaarts neemt het maximale debiet toe met 1200 m³/s, dat is 22 % (sim IV-16,17). Direct landwaarts neemt het maximale debiet af met 390 m³/s, dat is 13 % (sim IV-18,19). Bij onveranderde bergende oppervlakte en bovenafvoer in het landwaarts gelegen gebied moet deze afname worden veroorzaakt door een afgenomen interne verticale berging door een kleinere getijslag in dit gebied. Dit is de in het zeewaarts gelegen gebied veroorzaakte afname van de getijslag, die mogelijk weer in enige mate is beperkt door de kleinere damping bij de afgenomen snelheden. Sterker dan bij de b.o.-vergroting bij de grens zijn hier de gevolgen in de H-t- en Q-t-krommen zichtbaar. Met de grotere weerstand en damping ter plaatse en in het zeewaarts gelegen gebied vertraagt het verticale getij ter plaatse van de ingreep in sectie 28: het faseverschil en verval over sectie 28 zelf als met het zeewaarts gelegen gebied nemen significant toe. Het laatste is vooral ook goed te zien in fig. 4.7 en 4.8. Zoals in 3.1 is beschreven wordt het maximale debiet door de grotere weerstand verder voorlopen op het horizontale getij. Vooral bij het maximale vloeddebiet is dat goed te zien in fig. 4.5 en 4.6. De figuren 4.7 en 4.8 tonen al een duidelijke invloed bij Bath, vooral in de toegenomen damping. Overigens is de getijslag aan het eind van sectie 28 te groot, evenals die in sectie 30. In dit gebied simuleert het model een te kleine damping, zoals ook in 2.2 en 3.2 is genoemd.

5 SAMENVATTING EN CONCLUSIES ANALYSE EFFECTEN INGREPEN

In deze getijanalyse zijn de effecten van veranderingen en ingrepen in de bergende oppervlakten op de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium geanalyseerd.

De analyses zijn uitgevoerd op basis van simulaties van de veranderingen met het ééndimensionale mathematische getijmodel DUFLOW, dat is geïntegreerd in het programmapakket TRECOS-WESTERSCHELDE. Met deze zg. user-interface kunnen de veranderingen stapsgewijs en interactief worden gesimuleerd en geanalyseerd. Bij de beoordeling van vooral de kwantitatieve resultaten van deze analyse moet er rekening mee worden gehouden, dat het toepaste DUFLOW-model een nog niet geoptimaliseerde en slechts globaal gecalibreerde en geverifieerde schematisatie van de bodemligging van 1992 bevatte. Onder andere wordt de getijamplitudeafname boven Antwerpen nog niet goed weergegeven.

Onderzocht werden vergrotingen van de bergende breedte bij de Belgisch-Nederlandse grens en tussen Antwerpen en Rupelmonde. De beide vergrotingen van de bergende breedten tonen de veranderingen, en vooral de plaatsafhankelijkheid ervan, als lokaal nieuwe laterale overstromingsgebieden worden toegevoegd.

De resultaten van de analyses leiden tot de volgende conclusies,

algemeen en getij op systeemniveau:

- a) De getijvoortplanting in het Schelde-estuarium is een specifiek complex proces. Als getijprobleem is het het Schelde-getij relatief complex, omdat het niet te schematiseren is tot een speciaal eenvoudiger probleem: vrijwel alle termen in de bewegingsvergelijkingen moeten serieus worden genomen. De specifieke complexiteit wordt veroorzaakt de discontinuïteiten in het verloop van de geometrie, die zijn voortgekomen uit de ontstaanswijze uit rivier en zeearm, de geologische structuur van het gebied en ook de intensieve beïnvloeding door de mens. Een concreet praktisch gevolg hiervan is dat de invloed van geometrieveranderingen en ingrepen relatief sterk plaatsafhankelijk zijn. Ook de huidige beïnvloeding, het plaatselijk op grotere diepte onderhouden van geulen, lijkt hierbij een niet te verwaarlozen rol te spelen. Dit extra complicerende specifieke karakter heeft consequenties voor onderzoek en beheer van het getijsysteem (zie ook 6.1).
- b) Opmerkelijke karakteristieken van het Schelde-getij zijn onder andere het direct toenemen van de getijslag vanaf de hals en het afnemen van de getijslag vanaf ongeveer Rupelmonde ("vloedkuil", van Veen, 1944). In veel estuaria neemt vanaf de hals eerst de getijslag af: daar zijn de debieten en snelheden het grootst, overheerst de wrijving en treedt damping op. Het westelijke deel van de Westerschelde lijkt in dit opzicht hydraulisch relatief ruim voor het getijvolume. De oorzaak hiervan is nog niet duidelijk. Verder landinwaarts is de Beneden-Zeeschelde relatief nauw voor het achterliggende gebied: vanaf Rupelmonde tot Gent dempt de getijslag sterk. Het vullen en legen van het "vloedkuil"-gebied gaat met veel wrijvingsverliezen gepaard. De verklaring heeft ongetwijfeld te maken met het "riviervleed" en de resistente bodem van Boomsche klei van grote delen de Beneden-Zeeschelde.
- c) In de afgelopen twee eeuwen zijn in het Schelde-estuarium doorgaand de bergende oppervlakten afgenomen door opslibbingen en inpolderingen en zijn, vooral in de laatste halve eeuw de meeste geulen verruimd. Beide ontwikkelingen hebben tot gevolg dat de relatieve invloed van de weerstand afneemt, waardoor bij een geringere damping de getijamplitude toeneemt. Deze ontwikkelingen zijn zowel op de Westerschelde als de Beneden-Zeeschelde opgetreden. Uit deze getijanalyse blijkt dat de getijslag bij Antwerpen in dit opzicht vooral gevoelig is voor de landwaarts ervan gelegen bergende oppervlakt, gecombineerd met de diepte van de Beneden-Zeeschelde. Heel waarschijnlijk zijn in eerdere beschouwingen over de sterke toename van de getijslag bij Antwerpen de invloeden van de relatief geringere veranderingen op de Zeeschelde zelf (sterk) onderschat ten opzichte van die op de Westerscheld!

veranderingen bergende oppervlakte:

- a) Direct zeewaarts van een gebied waarvan de bergende oppervlakte wordt vergroot nemen de debieten en en snelheden toe. Hierdoor worden ook weerstand en damping groter, waardoor de getijslag afneemt. De kleinere interne (verticale) berging, die hiervan het gevolg is, beperkt de initiële toename van debieten en snelheden. Per saldo nemen ter plaatse de debieten toe en

- wordt de getijamplitude kleiner. In zeewaartse richting gaande wordt de debiettoename kleiner, door de compensatie door de afgenomen interne berging over een steeds grotere afstand.
- b) De omvang van de afname van de interne (verticale) berging wordt bepaald door de toename van de bergende oppervlakte, de positie in het systeem en de geometrie van de aangrenzende gebieden. De geometrie en de positie bepalen de relatieve toename van de snelheden, de afstand waarover en de mate waarin de weerstand toeneemt en de oppervlakte waarover de demping optreedt. Het is mogelijk dat de totale afname van de interne (verticale) berging in het zeewaarts gelegen gebied groter is dan de plaatselijke toename door vergroting van de bergende oppervlakte. Zeewaarts gaande wordt in een dergelijke situatie dan een punt bereikt waar de debiettoename overgaat in een afname.
 - c) De verkleining van de getijslag, in een nieuwe ingespeelde getijgemiddeld stationnaire situatie na een lokale vergroting van de bergende oppervlakte, wordt veroorzaakt door de grotere weerstand, wrijvingsverliezen en demping over kleinere of grotere delen van het systeem. Het gaat niet om een lokale afvlakking door een soort proces als "berging van het water over een grotere oppervlakte". Het zijn duidelijk de niet-lineaire weerstands- en wrijvingsinvloeden die dominant zijn voor de verandering van de getijslag.
 - d) Vanwege deze niet-lineariteit kan een berekend of waargenomen effect niet zonder meer worden vertaald naar een andere omvang, andere lokatie of andere omstandigheden. Een kleine vergroting van de bergende oppervlakte kan een toename van het getijvolume in de mond veroorzaken; als de bergende oppervlakte verder wordt vergroot kan de toename overgaan in afname als de afname van de interne berging gaat overheersen. Een vergroting van de bergende oppervlakte bij Kruibeke heeft een veel grotere invloed als een evengrote verandering bij de grens. Dit komt omdat zowel de relatieve toename van de snelheden bij de grens kleiner is én omdat de relatieve rol van de weerstand daar kleiner is dan op de Beneden-Zeeschelde. Hiermee kan (nog) niet verklaard worden hoe de invloed op de getijslag bij Bath vrijwel even groot kan zijn.
 - e) Gerealiseerd moet worden dat bergingsveranderingen niet bij stormvloed en niet dezelfde invloed hoeven te hebben als bij gemiddelde omstandigheden. Bij de hogere waterstanden zijn in principe snelheden (grotere doorstroomprofielen) en weerstand kleiner, waardoor ook de demping relatief kleiner kan zijn.
 - f) De resulterende invloed van een lokale bergingstoename is afhankelijk van de (relatieve) grootte van de verandering, de positie in het getijsysteem en de geometrie van het aangrenzende gebied. Afhankelijk van deze factoren kunnen lokale vergrotingen en als verkleiningen op hun beurt elk zowel vergrotingen als verkleiningen van debieten en getijvolumes in de mond veroorzaken. Dit verschijnsel kan verklaren waarom het getijvolume bij Vlissingen in de afgelopen eeuwen niet in dezelfde orde en zelfs heel weinig is veranderd ten opzichte van de grote afname van de bergende oppervlakte door de inpolderingen. Het is namelijk heel goed mogelijk dat de opslibbingen, afdammingen en inpolderingen enerzijds Sloe en Braakman in het westen en anderzijds Saeftinge, Kreekrak en bij Bath in het oosten tegengestelde effecten hadden op de debieten en getijvolumes in de mond. De primaire bergingsafnames in het oosten deden debieten en getijvolumes in de mond waarschijnlijk toenemen door vergroting van de interne (verticale) berging in het in het verleden ondiepere bekken. De bergingsafnames in het westen werden binnen het bekken mogelijk veel minder op deze wijze gecompenseerd en werkten waarschijnlijk vrij rechtstreeks door als afnames van debieten en getijvolumes in de mond.
 - g) In het verleden is vaak aangenomen dat de grote afname van de bergende oppervlakte in het verleden in het getijvolume werd gecompenseerd door de sterkere getijdoordringing door de zich verdiepende geulen. Het voorgaande laat zien dat het heel aannemelijk is dat de afnamen van de bergende oppervlakten op de verschillende plaatsen voor een belangrijk deel elkaar hebben gecompenseerd in het getijvolume. Op systeemniveau beschouwd gebeurt er het volgende. Zowel de afname van de bergende breedte als van de wrijvingsinvloed langs een aanzienlijk deel van het estuarium vergroot de getijfasesnelheid en -golflengte en verkleint derhalve de verhouding bekkenlengte/getijgolflengte.

6 AANBEVELINGEN VOORTZETTING GETIJANALYSE SCHELDE-ESTUARIUM

6.1 Aanbevelingen analyse getijvoortplanting

Ervaren is bij deze getijanalyse dat van het getij van Zeeschelde, Westerschelde en mondingsgebied, gezien de essentiële rol in het zo intensief gebruikte estuarium, opmerkelijk weinig verklarende kennis beschikbaar is. De wél beschikbare vele natuurwaarnemingen en resultaten van modelsimulaties zijn zelden verdergaand dan statistisch of zeer globaal deterministisch geïnterpreteerd. Een belangrijke reden is waarschijnlijk dat het Schelde-getij, zowel in algemene zin als getijprobleem als in de specifieke realisering in dit systeem, relatief gecompliceerd is (zie ook onder a), algemeen, hst. 5).

Een verbetering van het inzicht in het getij is mogelijk, (uiterst) rendabel, maar ook noodzakelijk om:

- vanuit het systeem en integraal denkend, "interactief" met het systeem te kunnen omgaan;
- de nog zeer smalle marges, waar veiligheid, vaarweggebruik, natuurontwikkeling en omgevingsactiviteiten niet te zwaar onderling strijdig zijn, nog optimaal te benutten en waar substantiële strijdigheid onvermijdelijk is verantwoorde en "te verantwoorden" keuzen te kunnen maken;

en, eigenlijk het belangrijkste, om:

- de feitelijk, met name met de recent verhoogde en ruimtelijk uitgebreide bagger- en stortactiviteiten, plaats vindende sturing van de (fysische) ontwikkeling van het estuarium op lange termijn in een voorziene en gewenste richting te laten plaatsvinden.

Ook ervaren is in deze getijanalyse dat een verbetering van het inzicht in het Schelde-getij substantiële vooruitgang zal opleveren in de beantwoording van veel al langer bestaande vragen, die relevant zijn voor beheer en beleid, voor zowel de korte als lange termijn, zoals:

- hoe werken en wat is de invloed van verschillende vormen van verandering van de bergende oppervlakten, op lokaal en op systeemniveau?
- welke specifieke eigenschappen van de Schelde-estuarium-geometrie, op lokaal en op systeemniveau, in relatie tot bepaalde karakteristieken van bepaalde stormen, bepalen de hoogten van de hoogste stormvloedstanden?
- wat is de invloed van bepaalde bagger- en stortstrategieën en hoe kunnen die worden geoptimaliseerd, zowel voor het vaarwegbeheer als voor veiligheid en natuur?
- hoe werkt de eventuele invloed van de zg. zachte regulering op de ontwikkeling van plaatgebieden via de activiteit van kortsluitgeulen of anderszins?
- hoe werken en wat is de rol van drempels in de eerste orde waterbeweging en hoe kan de ontwikkeling ervan worden beïnvloed?
- waarom "gedragen" geulen in het Schelde-estuarium zich (lang) niet altijd volgens de evenwichtsrelaties?
- wat is en bepaalt de "dynamiek" op de verschillende niveau's van het estuarium, wat zijn daarvoor fysische juiste, eenduidige en praktisch bruikbare criteria en parameters en hoe komt daarbij de energieleverende rol van het getij tot uitdrukking?

Om als beheerder en adviseurs via de verbetering van het inzicht in het Scheldegetij de mogelijke substantiële vooruitgang te realiseren, is nodig dat:

- enkele medewerkers zich met voldoende continuïteit de algemene en specifieke aspecten van het Schelde-getij eigen maken (een forse, ook "doorlooptijd" vergende, inspanning) en vervolgens deze kennis bijhouden;
- een volledige systematische getijanalyse wordt uitgevoerd op systeemniveau en op lokaal niveau; op systeemniveau gaat het onder andere om aspecten als verhouding bekkenlengte/golf lengte en weerstand/traagheid, i.v.m. bijv. de invloed op langere termijn op de opslingering van het systeem door de bagger- en stortstrategie; op lokaal niveau moet per geul en geulstelsel de lokale verhouding van weerstand en traagheid worden vastgesteld, belangrijk onder andere voor inzicht in het geulgedrag en de lokale effecten van baggeren en storten.
- schematiseerwerk, calibreer- en verificatiewerk, systeemanalyses en programmeerwerk worden uitgevoerd om de beschikbare hulpmiddelen, zoals DUFLOW, EENDIMS, TRECOSW, ECDUFLOW, PAGRAPH, voor het te voorziene gebruik inhoudelijk te optimaliseren en, met de nu

beschikbare mogelijkheden, beter onderling af te stemmen, gebruikersvriendelijker en breder toegankelijk te maken (zie 6.2);

- met name TRECOSW ook een vertrouwd hulpmiddel wordt voor andere, buiten de in het eerste punt genoemde, specialisten en adviseurs, met name voor morfologen (die ook frequent ECDUFLOW moeten gebruiken) en brede inhoudelijke adviseurs met voldoende fysieke basis; Belangrijk is dat bovengenoemde activiteiten alleen als ze allemaal en in samenhang worden uitgevoerd het Schelde-getij in beleid en beheer de rol kunnen bezorgen, die past bij het belang ervan en die veel rendement kan opleveren. Vooral het eerste en laatste punt zijn belangrijk, terwijl tenminste intensieve deelname van de eigen medewerkers aan de beide andere groepen werkzaamheden noodzakelijk is.

6.2 Aanbevelingen te gebruiken gereedschap

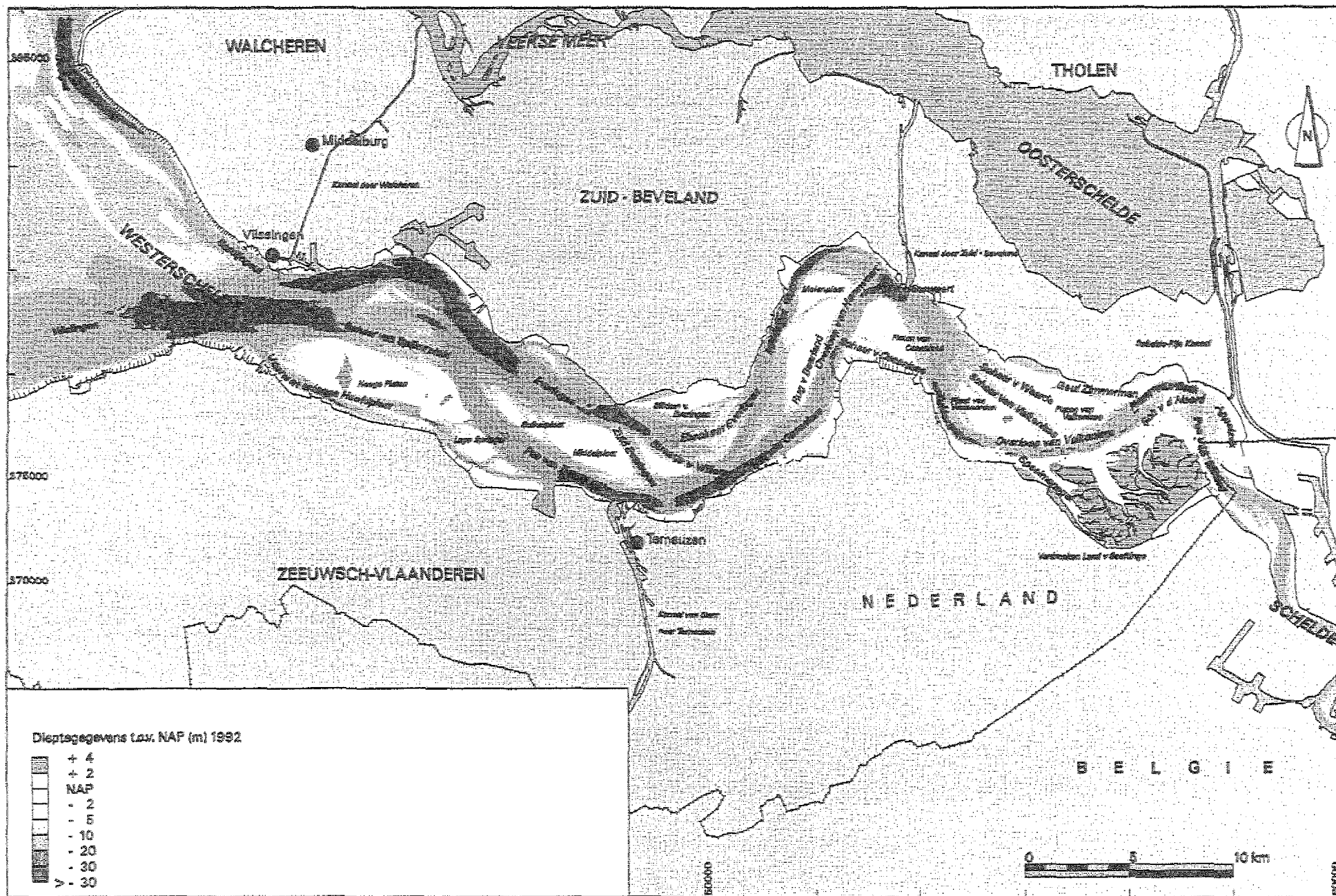
De hulpmiddelen om het getij op de aangegeven wijze een volwaardige plaats te geven in onderzoek, advies en beheer zijn beschikbaar. Met name de programmapakketten EENDIMS, DUFLOW, ECDUFLOW en TRECOS zijn hiervoor in opzet uitstekende hulpmiddelen. De huidige staat van afwerking en onderhoud, de onderlinge afstemming, de gebruikersvriendelijkheid en de "moeizame" bijbehorende presentatiemogelijkheden van resultaten illustreren echter alle gevolgen van een tot nu toe te weinig gebruik van de zeer goede mogelijkheden ervan in deze regio. Dit geldt overigens ook in bepaalde mate voor de getijgegevens, die nodig zijn voor randvoorwaarden, calibraties en verificaties.

Er zijn een viertal activiteiten nodig:

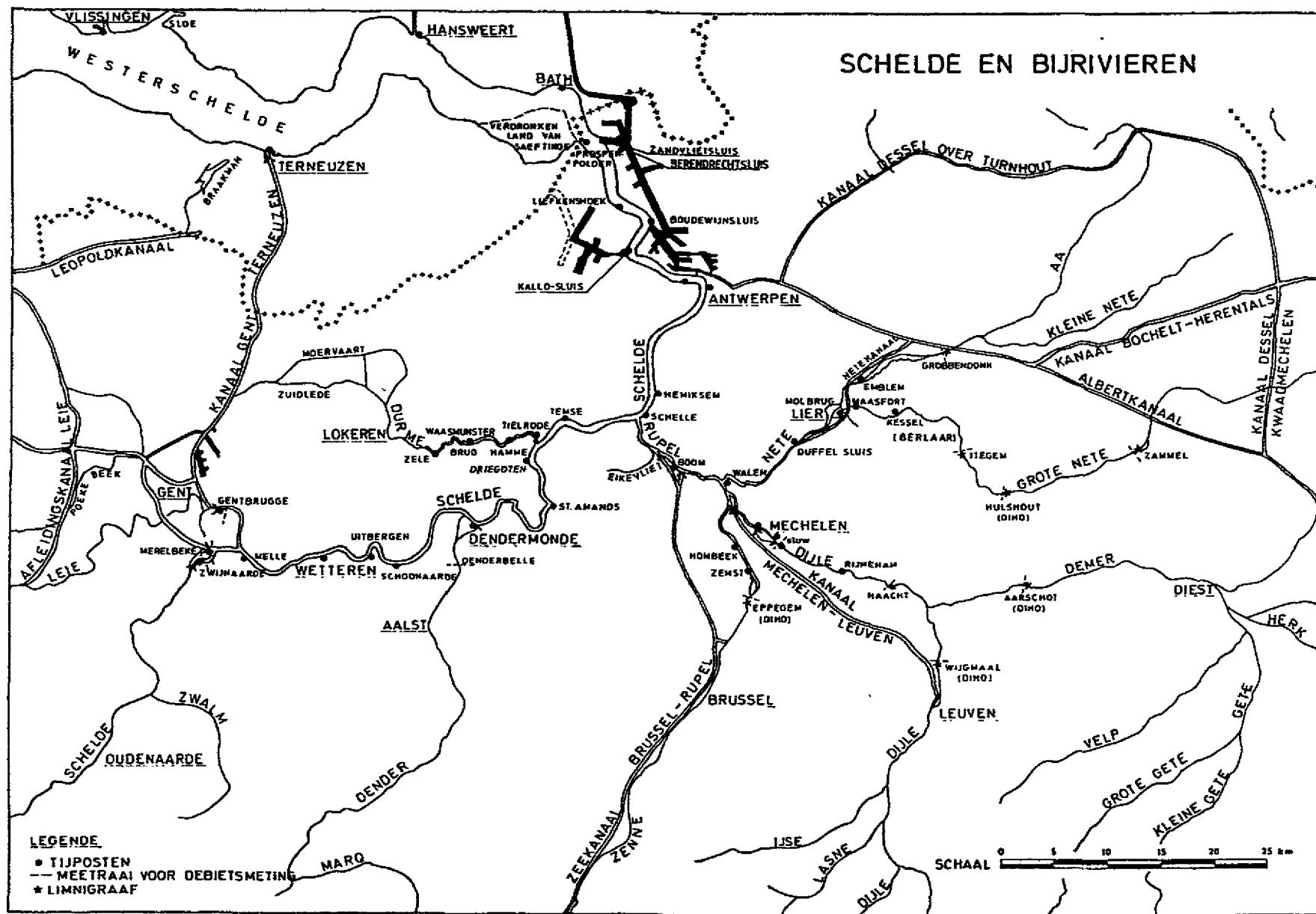
- inwerken op en vertrouwd maken van medewerkers met de programmapakketten;
- optimaliseren, c.q. uitcalibreren en verifiëren van de 200 secties-, 40 secties- en 12 secties-Duflowschematisaties;
- ombouwen van TRECOSW van een studentenversie naar een versie voor professioneel gebruik en uitbreiden tot het zg. "meerknoppen"-systeem, waarmee "geswitcht" kan worden tussen verschillende schematisaties (bijv. globale op systeemniveau en gedetailleerde, actuele en historische) en verschillende randvoorwaardensets (bijv. gem. omstandigheden en stormen);
- organiseren/programmeren van goede onderlinge koppeling van de verschillende betreffende programma's, inclusief de presentatie en printprogrammatuur; mogelijk dat met dit punt en het voorgaande punt al veel te bereiken is door alles "onder WINDOWS te brengen"!

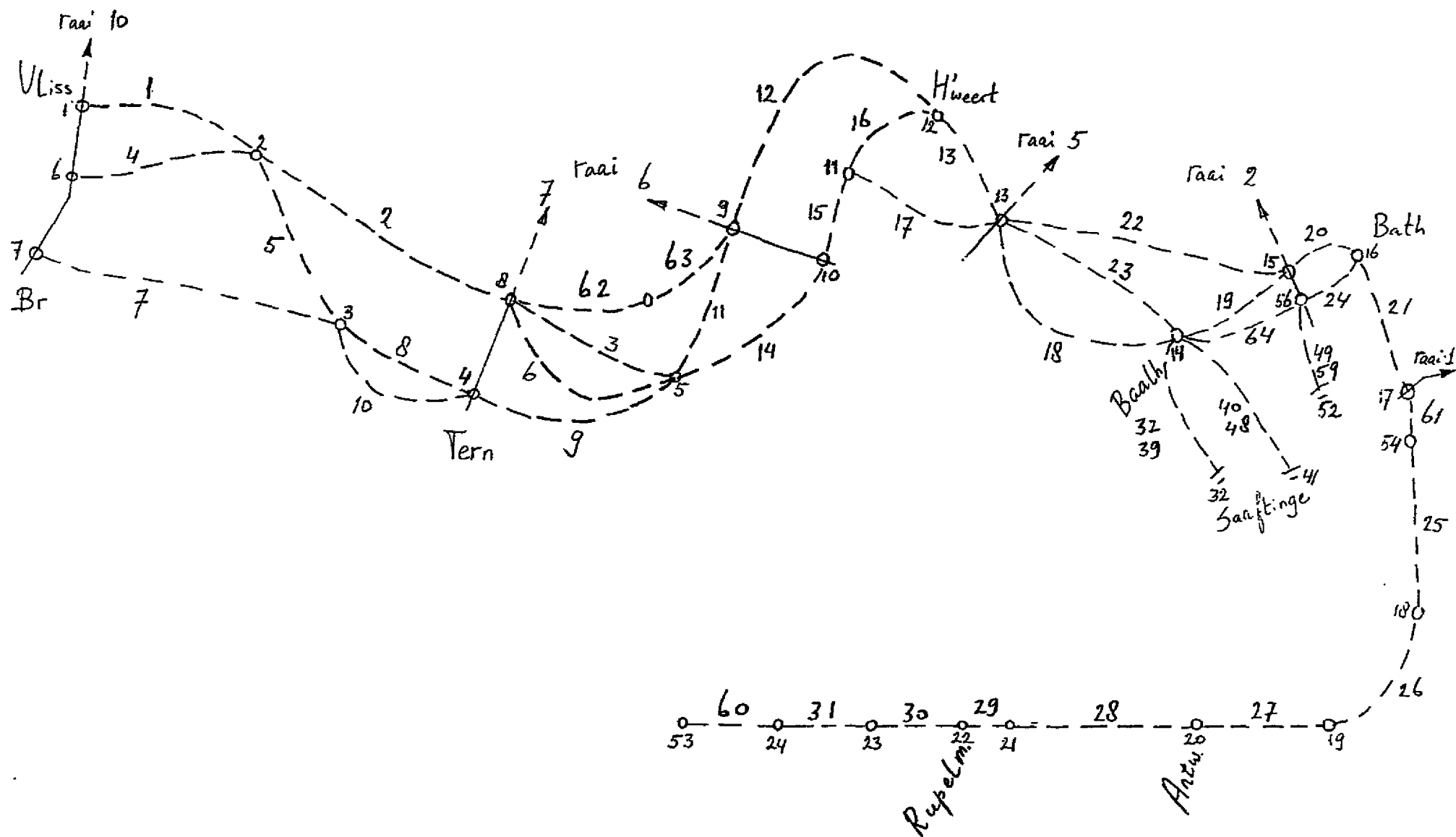
LITERATUUR

- | | | |
|-------------------------|------|---|
| Bollebakker | 1996 | DUFLOW-MODELLEN VAN DE WESTERSCHELDE VOOR 1960 EN 1992
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, RIKZ/AB-96.846X, Middelburg. |
| Claessens,
Meyvis | 1994 | OVERZICHT VAN DE TIJWAARNEMINGEN IN HET ZEESCHELDEBEKKEN
GEDURENDE HET DECENNIOUM 1981-1990
Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Antwerpse Zeehavendienst,
Antwerpen |
| van Veen | 1944 | SCHELDEREKIE EN SCHELDEREKIE
Rijkswaterstaat, R677, Den Haag. |
| Verspuy | 1987 | LANGE GOLVEN
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep
Waterbouwkunde, Collegehandleiding b73, Delft. |
| Verspuy,
Kasbergen | 1995 | USER INTERFACE TRECOS WESTERSCHELDE
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep
Waterbouwkunde, Sectie Vloeistofmechanica, Delft. |
| Vroon, Storm,
Coosen | 1997 | WESTERSCHELDE, STRAM OF STRUIS
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, RIKZ-97.023, Middelburg |



bijlage A-1





netwerk DUFLOW 2

bilage B-1

Sectie	Aslengte	basisho	stroomv. breedte op NAP	stroomv. oppervlak op NAP	hydraul. straal op NAP	K-vloed	K-eb
1	7083	-52	2490	42773	16.89	40	40
2	9145	-60.5	2646	38277	14.36	35	45
3	5680	-32	1107	12087	11.72	35	30
4	5732	-25	3098	30832	9.94	35	40
5	5956	-24.5	1642	19681	11.97	45	50
6	4784	-16	955	7777	8.11	35	35
7	9611	-42	1142	8655	7.41	30	30
8	4886	-36	2178	25259	11.52	45	50
9	7294	-56	1396	23338	16.38	50	50
10	4546	-22.5	660	5857	8.42	35	40
11	5045	-16	1111	9325	8.38	55	60
12	12374	-45.5	1317	16361	12.23	45	50
13	4463	-30.5	2155	24714	11.44	45	40
14	6369	-33.5	1850	21635	11.65	40	40
15	3018	-30	1859	17719	9.48	40	40
16	2513	-27	2433	18032	7.37	40	37
17	4186	-19	883	3515	3.89	30	35
18	9565	-32.5	1236	13178	10.58	40	45
19	3260	-21	707	5717	8.08	45	50
20	2584	-25.5	773	9751	12.55	35	50
21	4915	-26	1877	15134	8.05	40	40
22	7977	-16	1001	3940	3.87	30	35
23	7190	-16.5	952	5105	5.32	35	30
24	2114	-17.5	1314	6131	4.54	45	30
25	1000	-20	1092	9177	8.39	40	40
26	8125	-20	1092	9177	8.39	40	40
27	7080	-20	672	6872	10.21	30	35
28	8600	-20	495	4935	9.92	30	35
29	11940	-15	358	3287	9.14	45	35
30	2843	-15	327	2604	7.92	45	40
31	6000	-15	327	2604	7.92	45	50
32	6000	-15	327	2604	7.92	40	50
33	1050	-3.5		490	1.11	30	80
34	1000	-3.5		155	0.76	50	80
35	850	-3.5		155	0.76	50	80
36	750	-3.5		12	0.42	50	80
37	665	-3.5		12	0.42	50	80
38	580	-3.5		12	0.42	50	80
39	495	-3.5		12	0.42	50	80
40	410	-3.5		12	0.42	50	80
41	750	-3.5		628	1.13	30	80
42	650	-3.5		89	0.66	55	80
43	550	-3.5		89	0.66	55	80
44	520	-3.5		3	0.21	55	80
45	495	-3.5		3	0.21	55	80
46	470	-3.5		3	0.21	55	80
47	445	-3.5		3	0.21	55	80
48	420	-3.5		3	0.21	55	80
49	396	-3.5		3	0.21	55	80
50	550	-3.5		108	0.45	50	80
51	525	-3.5		10	0.29	60	80
52	500	-3.5		10	0.29	60	80
53	476	-3.5		10	0.29	60	80
54	451	-3.5		10	0.29	60	80
55	427	-3.5		10	0.29	60	80
56	402	-3.5		10	0.29	60	80
57	377	-3.5		10	0.29	60	80
58	353	-3.5		10	0.29	60	80
59	329	-3.5		10	0.29	60	80
60	305	-3.5		10	0.29	40	80
61	6000	-15	327	2604	7.92	45	50
62	4680	-30.5	1329	10675	7.95	30	30
63	3535	-17	1316	9895	7.46	30	30
64	3430	-27	1044	11787	11.21	55	40