



coastal & harbour
engineering consultants

Getijanalyse Westerscheldemon

deel 2

november 1997

Project: K2000 * KOP

C

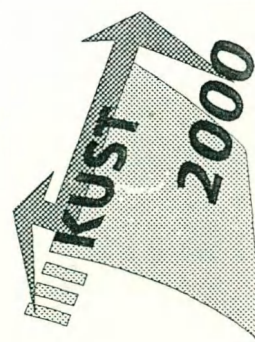
1
9
8
9

Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek

C-1989 712
deel 2

712





C-1989 712
deel 2

Getijanalyse Westerscheldemon

deel 2

november 1997

Project: K2000*KOP



INHOUDSOPGAVE

Pag. nr.

Voorwoord	- 2 -
1. Inleiding	- 3 -
1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA KUST*2000	- 3 -
1.2 DEFINITIE STUDIEGEBIED	- 3 -
1.3 DOEL EN OPZET GETIJ-ANALYSE	- 4 -
1.4 OPBOUW VAN HET RAPPORT	- 4 -
2. Mondingsgebied Westerschelde als ebgetijdedelta	- 6 -
2.1 ALGEMEEN MODEL EBGETIJDEDELTA'S	- 6 -
2.2 WESTERSCHELDEMONDING ALS EBGETIJDEDELTA	- 7 -
3. Samenhang getijbeweging en structuur mondingsgebied	- 10 -
3.1 ALGEMEEN	- 10 -
3.2 INVLOED ONTWIKKELINGEN EN INGEPEN IN OMGEVING OP GETIJBEWEGING MONDINGSGEBIED	- 11 -
3.3 INVLOED GETIJBEWEGING OP MORFOLOGISCHE VERANDERINGEN	- 14 -
3.4 INVLOED INGEPEN IN MONDINGSGEBIED OP GETIJBEWEGING	- 15 -
3.5 UITWERKING HYPOTHESEN	- 16 -
4. Interpretatie getijwaarnemingen	- 17 -
4.1 VERLOOP HOOG EN LAAG WATERS	- 17 -
4.2 HARMONISCHE COMPONENTEN	- 18 -
4.3 ANALYSE VERVALLEN	- 19 -
4.4 STROMINGEN	- 23 -
4.5 TOETSING HYPOTHESEN	- 24 -
5. Conclusies en aanbevelingen	- 25 -
5.1 BESCHIKBARE MEETGEGEVENS	- 25 -
5.2 GROOTSCHALIG GEDRAG	- 25 -
5.3 VERVOLGSTUDIES	- 26 -
Verklarende woordenlijst	- 27 -
Lijst van figuren	- 28 -
Lijst van tabellen	- 28 -
Literatuurlijst	- 29 -

Voorwoord

Het voorliggende rapport is de rapportage van een getijanalyse van het mondingsgebied van de Westerschelde. Deze studie is in opdracht van het RIKZ uitgevoerd als onderdeel van het onderzoeksproject K2000*KOP. De beschreven getijanalyse heeft primair tot doel om de in de definitiestudie Westerscheldemondd geformuleerde hypothesen verder te onderzoeken. Belangrijk onderdeel van deze studie is de analyse van metingen van het getij. Deel 1 van dit rapport beschrijft de beschikbare meetgegevens, de hiervan afgeleide grootheden en de grootschalige ontwikkelingen en ingrepen in de Westerscheldemondd en omgeving. Onderdeel van dit rapport is een CD ROM met de digitaal beschikbare gegevens t.b.v. vervolgstudies. In deel 2 van dit rapport wordt de ruimtelijke structuur van het studiegebied en de samenhang van getijbeweging en geometrie beschreven. Op basis hiervan wordt een voorlopige prognose voor toekomstige ontwikkelingen gegeven. Deze studie geeft verder suggesties voor andere studies die binnen K2000*KOP zullen worden uitgevoerd.

Deze studie is uitgevoerd door Bram Blik, Arie de Gelder en Caroline Gautier (Svašek) en Tom Pieters (Getijdewateren) onder verantwoordelijkheid van eerstgenoemde. Hierbij willen wij Miriam van Endt en Daan Dunsbergen (RIKZ) bedanken voor hun stimulerende begeleiding en assistentie bij het verzamelen van de meetgegevens. Ook gaat onze dank uit naar dhr. C.A. Wirtz (Meetdienst Vlissingen), dhr. D. den Brauwer en dhr. G. Dumon (Belgische Dienst der Hydrografie) en de Belgische autoriteiten in het algemeen voor het beschikbaar stellen en bewerken van de meetgegevens. Verder zijn wij Annemieke v.d. Slikke en Fred Tank (UU), Ad Langerak en Koos Doekes (RIKZ), Michel Ruijter en Bas Les (Svašek) erkentelijk voor hun bijdragen, commentaar en suggesties.

1. Inleiding

1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA KUST*2000

Om de landelijke beleidsuitvoering van de kustlijnverzorg te ondersteunen wordt door het RIKZ het onderzoeksprogramma KUST*2000 uitgevoerd. Dit programma bestaat uit 3 projecten, waaronder het project K2000*KOP dat uit kustmorfologisch onderzoek bestaat, gerelateerd aan de erosieproblematiek rond eilandkoppen. Eén van de studiegebieden is de Westerscheldemondd. De ontwikkelde kennis moet uiteindelijk leiden tot een optimale integratie van vaarweg- en kustbeheer, ingepast in het totale beheer van het gebied.

In een eerder stadium van het KUST*2000 programma is de beheersproblematiek geïnventariseerd en zijn een aantal hypothesen opgesteld omtrent de invloed van vormveranderingen van de bodem op de waterbeweging en de invloed van deze veranderde waterbeweging op de morfologie (Svašek, 1995). Als onderdeel van het project K2000*KOP is een analyse van het gemeten getij in de Westerscheldemondd uitgevoerd om bovengenoemde hypothesen te onderzoeken. In dit rapport worden de resultaten van deze studie gepresenteerd. De volgende hypothesen zijn door het RIKZ als uitgangspunt gekozen:

- 1 Het geulengedrag in de Westerscheldemondding kan worden verklaard uit de grootschalige waterbeweging van het gebied. De waterbeweging is substantieel en doorgaand aan verandering onderhevig t.g.v. natuurlijke morfologische ontwikkelingen en menselijke ingrepen. De tijd- en ruimteschaal van de veranderingen in de waterbeweging komen sterk overeen met de die van het geulensysteem in het gebied.
- 2 De erosie aan de ZW-kust van Walcheren wordt in belangrijke mate bepaald door het hydraulische gedrag van de voor de kust gelegen geul Oostgat.

Parallel aan deze getijanalyse is een studie naar bodemligging en zandbalans van de Westerscheldemondd uitgevoerd. Een gedeelte van de resultaten van deze studie is bij de getij-analyse betrokken. Ook een geologische studie naar de opbouw van de bodem is onderdeel van K2000*KOP. Verder vindt binnen K2000*KOP met een mathematisch model een reconstructie van het getij in de Westerscheldemondd plaats en worden m.n. in het Oostgat veldmetingen uitgevoerd.

1.2 DEFINITIE STUDIEGEBIED

De westelijke grens van het mondingsgebied van de Westerschelde strekt zich globaal uit van de uitloop van de Scheur ter hoogte van Oostende (België) tot de uitloop van het Oostgat ten noorden van Westkapelle op Walcheren (de NAP -20 m dieptelijn). In dit laatste gebied is duidelijk sprake van een interferentie met het mondingsgebied van de Oosterschelde. Aan de oostzijde wordt in het algemeen de lijn Vlissingen-Breskens aangehouden als scheiding tussen de Westerschelde zelf en het mondingsgebied. In grote lijnen bestaat het gebied uit de geulensystemen Wielingen/Scheur en Oostgat/Sardijngeul met Deurloo, met daartussen een uitgestrekt bankengebied, de Vlake van de Raan (zie figuur 1.2.1). De diepte van de grote geulen bedraagt op de meeste plaatsen tussen 15 en 20 m ten opzichte van NAP. De banken op de Vlake van de Raan hebben een diepte van ongeveer 5 m.

Ook de ontwikkelingen in de omgeving van het studiegebied (Noordzee, Westerschelde en Oosterschelde) die de getijbeweging in het studiegebied zelf beïnvloeden worden in deze studie beschreven en geanalyseerd.

1.3 DOEL EN OPZET GETIJ-ANALYSE

Het doel van deze studie is te onderzoeken of en hoe de morfologische structuur van het mondingsgebied van de Westerschelde bepaald wordt en te verklaren is uit de waterbeweging in het gebied. De gangbare opvatting is dat met name de oriëntatie en afmetingen van de belangrijkste geulen in het gebied in eerste instantie verklaard moeten kunnen worden uit de getijbeweging. Zowel van Veen (1936) als Sha en van den Berg (1993) gaan uit van deze relatie. Zij werken hem echter verschillend uit.

Uit de analyse moet duidelijk worden óf en, zo ja, hoe het mondingsgebied in dit opzicht voldoet aan het algemene model van een ebgetijdedelta en welke rollen volgens dit model de aanwezige geulen in het hydrodynamische systeem vervullen. Als deze functies duidelijk zijn zal het (beter) mogelijk zijn het toekomstige gedrag te voorspellen, zowel tengevolge van veranderingen in de grootschalige natuurlijke randvoorwaarden als van menselijke ingrepen. Uiteraard moeten de inzichten die deze studie oplevert, worden aangevuld met de resultaten van de specifieke studies naar morfologie, sedimentstromen, zandbalans en geologie. De verkregen kennis moet een optimale integratie van vaarwegen en kustbeheer onderling en in het totale beheer van het gebied mogelijk maken.

Een belangrijke complicatie om de relatie tussen getijbeweging en geulenstructuur te toetsen is het feit dat de relatie niet eenzijdig is: de uit de getijbeweging te verklaren oriëntatie en omvang van de aanwezige geulen hebben een belangrijke invloed op die getijbeweging. De grootste kans om de relevante relaties te verifiëren leveren daarom analyses van oorzaken en gevolgen van waargenomen substantiële, in tijd, ruimte en/of omvang, en consistente veranderingen van getij en morfologie. Een begrenzing van de mogelijkheden van deze aanpak wordt gevormd door de beperkte beschikbaarheid van getijgegevens uit een wat verder verleden. Pas sedert enkele decennia zijn er langs alle begrenzingen van het gebied waarnemingsreeksen van het verticale getij beschikbaar, wat een relatief korte termijn is voor substantiële en consistente morfologische veranderingen. Uit perioden met langer geleden opgetreden grootschalige morfologische ontwikkelingen zijn maar op enkele lokaties en alleen langs de randen van het gebied gegevens van het verticale getij beschikbaar. Gegevens van het horizontale getij (stromingen) zijn slechts van de laatste decennia beschikbaar en zijn gebaseerd op incidentele metingen.

De getij-analyse en de getij-reconstructie vormen een elkaar aanvullend geheel. De rapportage van de getij-analyse moet dan ook vooral als een tussenrapport worden gezien. Voor het beschrijven van de huidige en historische functies van de geulen in het systeem dient het horizontale en verticale getij ruimtelijk (2DH) te worden beschreven. Vervolgens kunnen de verschillende historische meetgegevens verder worden geanalyseerd.

1.4 OPBOUW VAN HET RAPPORT

Deel 1 van dit rapport beschrijft de beschikbare meetgegevens, de hiervan afgeleide grootheden en de grootschalige ontwikkelingen en ingrepen in de Westerscheldemondd en omgeving. Onderdeel van dit rapport is een CD ROM met de digitaal beschikbare gegevens t.b.v. vervolgstudies.

In deel 2 van dit rapport wordt de getijbeweging in het studiegebied en de samenhang van deze getijbeweging en de geometrie beschreven. Verder worden de in deel 1 beschreven gegevens geanalyseerd. Vooral in hoofdstuk 4 van deel 2 wordt veelvuldig verwezen naar de in deel 1 gepresenteerde meetgegevens. Op basis hiervan worden voorlopige conclusies getrokken en aanbevelingen voor vervolgstudies gedaan.

Na een beschrijving en voor zover mogelijk een verklaring van het huidige getij in hoofdstuk 2 wordt in deze getijanalyse ook relatief veel aandacht besteed aan het traceren

en analyseren van een aantal substantiële natuurlijke ontwikkelingen en ingrepen en het formuleren van hypothesen voor oorzaken vanuit of gevolgen voor de getijbeweging (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 worden deze hypothesen vervolgens getoetst aan de beschikbare waarnemingen. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 samengevat wat op basis van de meetgegevens gezegd kan worden van de getij-ontwikkeling in het mondingsgebied en wordt een voorlopige prognoses van toekomstige ontwikkelingen en gevolgen van verdere ingrepen gegeven. Tenslotte worden aanbevelingen gedaan voor een verdere uitwerking van deze voorlopige prognose, conclusies en hypothesen, met name gericht op de uit te voeren getijreconstructie.

2. Mondingsgebied Westerschelde als ebgetijdedelta

2.1 ALGEMEEN MODEL EBGETIJDDELTA'S

Langs het niet door zeegaten onderbroken deel van de Nederlandse kust, de zogenaamde gladde kust, heeft de overgang tussen strand en zeebodem een min of meer regelmatig doorgaand verloop. De positie en profielvorm van deze zg. vooroever worden bepaald door een dynamisch evenwicht ter plaatse tussen de land- en zeewaarts gerichte sedimenttransportprocessen. Ter plaatse van zeegaten worden zogenaamde ebgetijdedelta's uitgebouwd (zie figuur 2.1.1), soms vrij uitgestrekte, relatief ondiepe gebieden met banken, platen en geulen, waarbij de overgang naar de zeebodem verder zeewaarts ligt. Kennelijk versterkt de uitstroming uit het estuarium de zeewaarts gerichte transportcomponent zodanig dat het dynamische evenwicht, dat de vooroever op zijn plaats houdt, hier pas verder zeewaarts kan worden bereikt.

Tijdens vloed wordt het estuarium of de zeearm gevuld, waarbij het water van alle zijden toestroomt naar de nauwere hals. In de monding treden contractie en versnellingen op, het sterkst aan de buitenzijde langs de aangrenzende kusten, waar relatief ondiepe vloedgeulen ontstaan. De uitstroming vindt meer geconcentreerd in de geulen plaats, waardoor direct buiten de hals volgens de uitstroomrichting georiënteerde diepere ebscharen aanwezig zijn. Deze ebscharen vormen daarom meestal de aanzetten voor de sterkst ontwikkelde hoofdgeulen en liggen meer in het centrale deel van het mondingsgebied. De voortplanting van het getij langs de Nederlandse kust van zuid naar noord gaat gepaard met faseverschillen tussen de getijbewegingen in de mondingen van aangrenzende estuaria en zeearmen. De hiermee samenhangende vervallen onderhouden kortsluitgeulen langs de koppen van de eilanden. Door golven geïnduceerd kustwaarts gericht zandtransport over de platen heen, houdt deze kortsluitgeulen meestal dicht tegen de kust aangedrukt. Dit transport over de platen, de brandingsstroom langs de kust en de flanken van ondiepe gebieden en de vloedstroom brengen sediment naar de hals van het estuarium. De ebstroom, die buiten de hals vertraagt, transporteert het sediment weer in zeewaartse richting. Deze processen houden in een dynamisch evenwicht de ebgetijdedelta in stand. Variaties in volume en omvang treden op door eventuele resulterende sedimentuitwisseling met het estuarium of met de aangrenzende kust- en zeegebieden.

De vorm en structuur die een ebgetijdedelta op een bepaalde plaats aanneemt wordt binnen de omgevingsrandvoorwaarden bepaald door de interactie ter plaatse tussen de waterbeweging, de bodemligging en -structuur en de sedimentstromen in het gebied. Over de bepalende factoren en processen voor de werking en de structuur van ebgetijdedelta's als geheel bestaan verschillende inzichten.

Sha en van den Berg (1993) hebben de ebgetijdedelta's langs de Nederlandse en Duitse kust onderling en met een aantal andere ebgetijdedelta's vergeleken. Zij onderscheiden duidelijke structuurverschillen tussen de getijdedelta's in het Waddengebied en het Deltagebied. Zij schrijven ze toe aan een significant verschillend verloop in de beide gebieden van het faseverschil tussen het horizontale getij langs de kust op zee en in de hals van het zeegat. Strukturele verschillen in omvang en oriëntatie tussen getijdedelta's langs de Waddenkust onderling, verklaren zij uit de grotere invloed van golfgeïnduceerd langtransport naarmate het getijvolume kleiner is en omgekeerd. Het feit dat in de getijdedelta's in ZW-Nederland de aftakkingen van de ebgeul naar het zuidwesten meestal het sterkst ontwikkeld zijn, schrijven zij toe aan de afname van het getijverschil langs de kust in noordelijke richting.

Volgens van Veen (1936) wordt de ligging en oriëntatie van de belangrijkste geulen in de eerste plaats bepaald door de faseverschillen in het verticale getij over het gebied en de daaruit voortkomende vervallen en verhangen. Deze faseverschillen komen voort uit de voortplantingsrichting van het getij van zuid naar noord en uit het verschil in voortplantingssnelheid tussen het op dieper water langs de kust naar het noorden lopende Noordzeegetij en het zich naar de hals van het estuarium voortplantende getij door het ondiepere mondingsgebied (fig. 2.1.2). Eenvoudig gesteld hebben geulen de grootste kansen tot ontstaan en bestaan in die richting, waarin over een zo groot mogelijk deel van de getijfase de grootste verhangen optreden. Een verhang is een verval over een bepaalde afstand. Vervallen komen voort uit faseverschillen, amplitudeverschillen en vervormingen van het getij, zowel in de getijvoortplantingsrichting als in andere richtingen. Op ruim en niet zeer ondiep water overheerst het verval uit het faseverschil in de voortplantingsrichting en staan de grootste verhangen ongeveer loodrecht op de lijnen van gelijke fase van de langs de kust lopende getijgolf. Deze lijnen buigen in de ondiepere kustzone naar de kust toe. Daarom kunnen in principe in deze richting de sterkst ontwikkelde geulen bestaan tussen de zeerand en de hals van het estuarium, richting BA in figuur 2.1.2 en langs de Nederlandse kust naar het zuidwesten. In de getijvoortplantingsrichting nemen de faseverschillen tussen hals en zeerand af en dus ook het eruit voortkomende deel van de vervallen en verhangen tussen hals en zeerand. In die richting worden vervallen en verhangen door amplitudeverschillen en vervormingen van de getijkromme belangrijker en op een gegeven moment bepalend voor het bestaan van geulen. Meestal hebben deze vervallen niet over de hele eb- en/of vloedfase een substantiële waarde en kan ook het verhang langs de geul sterk variëren. De geulen in dit gebied, bijvoorbeeld CB in figuur 2.1.2, hebben vaak een gemengde functie en ze zijn minder stabiel. Volgens van Veen kan hier een "wantij" bestaan, waarmee hij een geul bedoelt waarin de stromen sterk in fase kunnen verschillen met de nabije omgeving.

2.2 WESTERSCHELDEMONDING ALS EBGETIJDDELTA

In de Westerscheldemondding zijn meerdere aspecten terug te vinden van het algemene model van een zogenaamde ebgetijdedelta (Svašek, 1995). Een vergelijking van het mondingsgebied van de Westerschelde met het algemene model van een eb-getijdedelta geeft inzicht in de bepalende factoren voor de structuur en in de functies van de verschillende elementen in het gebied. Er zijn een drietal factoren die de overeenkomsten beïnvloeden en de vergelijking bemoeilijken:

- In de eerste plaats worden vorm en structuur in belangrijke mate bepaald door ligging en oriëntatie, onderling en ten opzichte van de hele Noordzeekust, van de landwaartse begrenzingen, de kusten van Walcheren, Zeeuwsch-Vlaanderen en Noordwest-België.
- In de tweede plaats heeft het gebied op meerdere plaatsen een relatief resistente bodemstructuur, waardoor aanpassingen aan veranderende randvoorwaarden niet altijd vrij en overal kunnen optreden of sterk worden vertraagd.
- Tenslotte is er vooral in de laatste decennia de toenemende invloed van menselijke ingrepen, zoals het baggeren en storten en de havenuitbouw bij Zeebrugge.

Van de ebgetijdedelta's langs de Nederlandse en Duitse kust is de Westerscheldemondd de grootste en meest zuidelijke. In figuur 3.3.1 en 3.3.2 is te zien dat de Westerschelde hierdoor wellicht ook een andere relatie tot het Noordzeegetij heeft dan de meer noordelijk gelegen zeegaten.

Model van Sha en van de Berg

Sha en van de Berg (1993) onderscheiden duidelijke verschillen in de verschillende ebgetijdedelta's. Zij besteden vrij veel aandacht aan de invloed van golven in relatie tot de getijstromen. Een indicatie hiervan is het quotiënt van getijvolume en significante

golfhoogte. Voor de Westerschelde is dit getal erg groot in vergelijking met de 27 door Sha en van de Berg beschreven delta's. Hoewel golven zeker een invloed zullen hebben lijkt het getij voor de Westerscheldemond de belangrijkste factor. Verder is naast het gebied zelf ook het getijverschil in de Westerscheldemond is groter dan bij de andere delta's.

Voor de Zeeuwse ebgetijdelta's stellen Sha en van de Berg (1993) een beschrijvend model voor waarin veel invloed wordt toegekend aan de faserelatie tussen het horizontale getij in de hals en het horizontale Noordzeegetij. Hoe groter de ebgetijdelta, des te zwakker is echter de directe impuls van het horizontale getij. De stromingen in de Westerscheldemond zullen dan ook beïnvloed worden door de vervallen over het gebied. Ook de invloed die Sha en van de Berg toekennen aan de amplitudeverschillen langs de zeerland van het gebied (0.5 m) wijst hierop.

Model van Van Veen

Omdat in deze historische getij-analyse, vanwege de gegevensbeschikbaarheid bijna uitsluitend aandacht kan worden besteed aan het verticale getij is de Westerschelde m.n. vergeleken met het model van Van Veen (1936). In dit hoofdstuk wordt een globale beschrijving van het geulensysteem in relatie tot het verticale getij gegeven. In het volgende hoofdstuk wordt de getijbeweging uitgebreider beschreven. Hierbij wordt m.n. aan de historische interactie van getijbeweging en geulenstructuur aandacht besteed.

In figuur 2.2.1 zijn voor gemiddeld getij het verloop van het verticale getij met de onderlinge vervallen voor Zeebrugge, Westkapelle en Vlissingen weergegeven. Deze drie stations zijn enigszins te vergelijken met respectievelijk de lokaties A, B en C in de principeschets van Van Veen (fig. 2.1.2). Het getij in Zeebrugge en vooral in Westkapelle is uiteraard niet geheel representatief voor het Noordzeegetij op dieper water.

Van Veen (1936) besteedt alleen aandacht aan de vervallen door verschillen in fase. Vanwege de uitgestrektheid van de Westerscheldemond zijn tussen de drie beschouwde station ook belangrijke verschillen in amplitude en vervorming. De faseverschillen worden bepaald door het faseverloop en de voortplantingsrichting van het Noordzeegetij en de beïnvloeding van de voortplantingssnelheid door de waterdiepte in het relatief ondiepe mondingsgebied. De amplitudeverschillen en vervormingen ontstaan tijdens de voortplanting op ondiep water op de trajecten tussen de lokaties én door de voor elke lokatie specifieke lokale invloeden.

Geulenstructuur

De voorwaarden voor het bestaan van een geul in het mondingsgebied kunnen, om de gedachten te bepalen, sterk gesimplificeerd als volgt worden afgeschat. Om een geulprofiel in stand te houden zijn volgens de bekende evenwichtsrelaties getij- en profielgemiddelde stroomsnelheden nodig van rond 0.7 m/s. De diepte van de geulen in het mondingsgebied is groter dan 10 á 15 m. Bij deze waterdiepte zijn verhangen nodig van rond 1.0 cm/km om de vereiste snelheden te genereren.

● Vlissingen-Zeebrugge:

Over het deel van de Wielingen tussen Zeebrugge en Vlissingen treedt over de hele getijfase een substantieel verval op van minstens 0.3 á 0.4 m, wat over de afstand van ruim 25 km een gemiddeld verhang van 1.0 á 1.5 cm/km betekent. De vervallen tussen Zeebrugge en Vlissingen worden hoofdzakelijk bepaald door het faseverschil tussen de relatief gelijkvormige getijkrommen. Het wordt in bepaalde fasen licht versterkt door de grotere amplitude in Vlissingen en een plaatselijk steiler verloop van een van beide

krommen.

De fase van het verticaal getij in Vlissingen ten opzichte van het Noordzeegetij wordt o.a. bepaald door de getijvoortplantingssnelheid over het traject Oostende-Zeebrugge-Vlissingen door Scheur/Wielingen. Langs de zeerand van het mondingsgebied tussen Oostende en Westkapelle loopt het getij op dieper water sneller en gaat in fase voorlopen op overeenkomstige punten langs het traject Oostende-Vlissingen.

- **Vlissingen-zeerand:**

Het faseverschil en de daaruit voortkomende vervallen tussen de zeerand en Vlissingen nemen in de richting van Westkapelle af. Ook de afstand neemt echter af. Het verhang, het quotient van verval en afstand en bepalend voor de watersnelheden, heeft waarschijnlijk getijgemiddeld haar maximale waarde ongeveer volgens de richting van Scheur/Wielingen. Langs de zeerand neemt in de richting van Westkapelle kennelijk het verval t.o.v. Vlissingen uit het faseverschil sneller af dan de afstand, waardoor de verhangen afnemen. Met de afnemende verhangen worden in die richting ook de ontstaans- en bestaanskansen van geulen tussen zeerand en Vlissingen kleiner, althans voorzover ze afhankelijk zijn van faseverschillen. In het noordoostelijke deel van het mondingsgebied worden voor bestaan en omvang van geulen tussen zeerand en Vlissingen vervallen door amplitudeverschillen en vervormingen belangrijker.

- **Vlissingen-Westkapelle:**

Voor het Oostgat/Deurloo-geulencomplex zijn de vervallen tussen Westkapelle en Vlissingen maatgevend. Vergelijking van de getijkrommes laat zien dat de vervallen veel sterker worden bepaald door de amplitudeverschillen en de vormverschillen van de getijkromme, dan door het faseverschil zoals in de Wielingen. Ook hebben de amplitudeveranderingen en vervormingen van elk van de getijkrommen in Westkapelle en Vlissingen, die de vervallen tussen deze lokaties bepalen, in sterkere mate een verschillende oorsprong dan die van Oostende/Zeebrugge en Vlissingen. Het getij in Vlissingen wordt bepaald door de voortplanting door de Wielingen/Scheur van het Noordzeegetij en de interactie hiervan met het Westerscheldegetij. Het getij in Westkapelle komt voort uit het langs de zeerand lopende Noordzeegetij en wordt waarschijnlijk ook sterk beïnvloed door het getij in de Oosterscheldemondding.

Deze beide sterk samenhangende factoren, de kleinere invloed van het faseverschil en de verschillende oorsprong van amplitudeverschillen en vervormingen, zijn de oorzaken van de grotere complexiteit en de lagere stabiliteit van het Oostgat/Deurloogebied ten opzichte van het Wielingen/Scheurgebied.

Conclusies

Omdat in deze historische getij-analyse, vanwege de gegevensbeschikbaarheid bijna uitsluitend aandacht kan worden besteed aan het verticale getij is uitgegaan van het gedragsmodel van Van Veen (1936). Dit gedragsmodel dient echter voor de Westerschelde genuanceerd te worden. Naast verschillen in fase spelen ook verschillen in amplitude en vervorming over dit uitgestrekte gebied een rol. Verder zal aandacht moeten worden besteed aan de manier waarop de vervallen het horizontale getij (en vervolgens de sedimenttransporten en morfologie) beïnvloeden. De invloed van windgolven is voor de Westerschelde van ondergeschikt belang in vergelijking met andere ebgetijdodelta's (Sha en van de Berg, 1993). Een verwaarlozing van de vervallen in een gedragsmodel van de Westerscheldemondd lijkt gezien de uitgestrektheid van het gebied niet juist.

3. Samenhang getijbeweging en structuur mondingsgebied

3.1 ALGEMEEN

Gebaseerd op de inzichten van Van Veen (1936) is in hoofdstuk 2 een algemene beschrijving van het geulensysteem in relatie tot het verticale getij gegeven. In dit hoofdstuk wordt de getijbeweging uitgebreider beschreven. Hierbij wordt met name aandacht besteed aan de historische interactie tussen getijbeweging en morfologische structuur. Na een beschrijving van de grootschalige getijbeweging (3.1) wordt de invloed van een aantal historische ontwikkelingen op de getijbeweging (3.2) beschreven, vervolgens de invloed van het getij op morfologische veranderingen (3.3) en de invloed van ingrepen op het getij (3.4). In 3.5 worden deze verbanden geconcretiseerd, zodat het mogelijk is om ze te vergelijken met de beschikbare getijwaarnemingen (hoofdstuk 4).

De vanuit het zuidwesten aankomende Noordzeegetijgolf plant zich zowel voort naar het noordoosten langs de buitenrand van de mondingsgebieden van Westerschelde en Oosterschelde als naar de hals van het estuarium naar het oosten door de geulen en over de Vlake van de Raan. Langs de buitenrand bedragen de waterdiepten bij ongeveer gemiddelde zeestand rond 20 m. Langs deze rand neemt de getijamplitude naar het noorden geleidelijk af. Dit hangt samen met de rondgaande getijbeweging in het Zuidelijk deel van de Noordzee (figuur 3.1.1 en 3.1.2). De waterdiepten in het mondingsgebied zijn in het grootste deel van de geulen rond 15 m en op de ondiepten zoals de Vlake van de Raan 5 á 10 m. Door de kleinere waterdiepten, de grotere verschillen in diepten en bodemhellingen en het relatief grillige verloop van de kustlijn ontstaan ruimtelijke verschillen in voortplantingssnelheden, vervormingen, opslingeringen en dempingen ten opzichte van het minder gestoorde Noordzeegetij. Deze verschillen bepalen de ruimtelijke verdeling en variatie over het gebied van de vervallen en verhangen en de erdoor opgewekte stromingen, die omgekeerd in ruimte en tijd deze verhangen weer in bepaalde mate vereffen.

Om de invloed van 'externe' ontwikkelingen (Westerschelde, Oosterschelde en Noordzee) op het getij in het studiegebied te beschrijven worden opnieuw verschillende getijrandvoorwaarden afzonderlijk beschouwd. Voor het mondingsgebied van de Westerschelde is er echter eigenlijk één echte getijrandvoorwaarde en dat is het Noordzeegetij op een afstand waar het getij niet meer wordt beïnvloed door het mondingsgebied zelf. De in dit hoofdstuk vooral vanwege gegevensbeschikbaarheid gehanteerde getijrandvoorwaarden zijn (fig. 3.1.3):

- het door de relatief ondiepe Vlaamse Banken vervormde Noordzeegetij aan de inloop van Scheur/Wielingen voor de Belgische kust ter hoogte van Oostende op een diepte van rond 15 m tov. NAP; voor deze studie zijn als indicaties van dit getij beschikbaar de registraties van de kustlocaties Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge en die van de Belgische meetpaal 7, gelegen in het verlengde van Scheur/Wielingen, maar 40 km westelijker; deze randvoorwaarde is vergelijkbaar met locatie A in het model van Van Veen (fig. 2.1.2).
- het Noordzeegetij langs de noordwestelijke rand van de Vlake van de Raan, ook op een waterdiepte tov. NAP van rond 15 m; van het getij in dit gebied zijn redelijk representatieve registraties van de meetpaal Vlake van de Raan; verder noordelijk is beschikbaar de OS11 in de buitenmonding van de Oosterschelde op een diepte van ruim 10 m; deze randvoorwaarde is vergelijkbaar met locaties tussen A en B in het model van Van Veen.
- het getij in de inloop van het Oostgat bij Westkapelle; het getij hier is complex van

samenstelling; het vervormde Noordzeegetij wordt verder beïnvloed door het Westerscheldegetij en mogelijk ook het getij in de Oosterscheldemonding; registraties zijn beschikbaar van Westkapelle en iets verder noordelijk van de OS15 bij de Domburger Rassen; deze randvoorwaarde is vergelijkbaar met locatie B in het model van Van Veen.

- het getij in de hals van het estuarium bij Vlissingen en in het westelijke deel van de Westerschelde; het getij hier bestaat uit de resultante van het door de geometrie van het mondingsgebied vervormde Noordzeegetij en het getij op het Westerscheldebekken; voor dit getij representatieve registraties zijn beschikbaar van de lokaties Vlissingen, Breskens en Terneuzen; deze randvoorwaarde is vergelijkbaar met locatie C in het model van Van Veen.

Als belangrijkste getijrandvoorwaarden voor het mondingsgebied op systeemniveau kunnen het getij langs de buitenrand op rond 20 m waterdiepte en het getij in de hals van de Westerschelde worden beschouwd. Van het getij langs de zeerand gaat het dan in eerste instantie om het verticale getij. Van het getij in de hals is naast het waterstandsverloop ook het vloedvolume van ruim 1 miljard m³ een belangrijke en relevante parameter.

3.2 INVLOED ONTWIKKELINGEN EN INGEPEN IN OMGEVING OP GETIJBEWEGING MONDINGSGBIED

Westerschelde

Na het ontstaan van ongeveer de huidige configuratie van de Westerschelde, in de tweede helft van de twaalfde eeuw, toen de rivier de Schelde en de zeearm de Honte een substantiële verbinding kregen, is de kombergende oppervlakte en vrijwel zeker ook het getijvolume toegenomen tot een maximale omvang in het begin van de 17e eeuw. Deze maximale omvang werd bereikt na verlies van grote oppervlakten land na overstromingen, die waren bevorderd door maaiveldverlagingen door drainage en veenaftgravingen, slecht dijkonderhoud en oorlogshandelingen. In de eeuwen hierna kregen inpolderingen de overhand en nam de kombergende oppervlakte doorlopend af. Van de 45000 ha aan oppervlakte van de Westerschelde in 1800 werd nadien rond 15000 ha ingepolderd, waarvan nog 2000 ha na het midden van deze eeuw (Mol, 1995). Rond 1870 werd de verbinding tussen Westerschelde en Oosterschelde verbroken door de afdammingen van Kreekrak en Sloe.

In de veertiger en vijftiger jaren traden de omvangrijkste natuurlijke veranderingen van deze eeuw op. In het middengebied brak de vloeddelta van het Gat van Ossensisse, ten zuiden van Hansweert, door. De tot dan hydraulisch belangrijkste geul, het Middelgat, verondiepte sterk, ten gunste van de parallelgeul Gat van Ossensisse, die echter relatief veel minder verruimde. Het sediment voor de verondieping van het Middelgat werd grotendeels geleverd door de Everingen, die sterk verruimde.

Vanaf de zestiger jaren vormen de bagger- en stortwerken in het kader van de vaargeulverdiepingen de belangrijkste ingrepen (circa 10 Mm³/jaar, zie deel 1). Met name de geulen in het oostelijke deel van de Westerschelde en in de Beneden-Zeeschelde zeewaarts van Antwerpen zijn sterk verruimd.

Voor de richting van de geconcentreerde ebstroom in de hals van het estuarium, zijn de ontwikkelingen in het westelijke deel van de Westerschelde van belang. In de eerste helft van de vorige eeuw boog de Pas van Terneuzen, de toen dominante ebgeul in het westelijke deel, veel oostelijker naar het noorden en voegde zich ten oosten van Borssele bij de toenmalige Everingen tegen de Zuid-Bevelandse oever. Vandaar kreeg de ebstroom een enigszins noordelijker dan west gerichte oriëntatie, die zich doorzette tot buiten de

hals. Met de betekenisafname van de Braakman kon de Pas van Terneuzen steeds verder westelijk uitbochten. Als de samenvoeging ervan met de Everingen westelijk van de "kop" van Borssele komt te liggen zet de ebstroom uit de Pas van Terneuzen verder naar het noorden door en wordt ook de ebstroom van de Everingen naar het noorden afgebogen. Samen met de betekenisafname en afdamming heeft dit tot gevolg dat de Honte zich naar het noorden verlegt en kan uitbochten in de kom van de Sloemondding tussen Zuid-Beveland en Walcheren. Hierdoor krijgt de ebstroom in de hals een meer westelijke tot zuidwestelijke richting, overeenkomstig de oriëntatie van de zuid-oostkust van Walcheren. Het is zeer waarschijnlijk dat deze ontwikkeling te maken heeft met de afname van de ebschaar die zich in de eerste helft van de vorige eeuw sterk had ontwikkeld net buiten de hals van het estuarium ten noorden van de toenmalige Sluissche Hompels. In eerste instantie ten koste van de westelijker in het verlengde van deze ebschaar gelegen vloedschaar de Spleet heeft sindsdien de Wielingen zich doorgaand ontwikkeld tot de meest dominante geul in het gebied nu (van Cauwenberge, 1966).

De uitbochting naar het westen van de Pas van Terneuzen is verder doorgegaan. Een belangrijk gevolg daarvan is, dat met de kortere afstand tot de hals, de verhangen over de Schaar van Spijkerplaat tussen hals en Pas van Terneuzen toenemen en daarmee de snelheden en debieten. Momenteel neemt de Schaar van Spijkerplaat sterk in betekenis toe, ten koste van de Honte, wat tot gevolg heeft dat uitstroomrichting van de geconcentreerde ebstroom (impuls richting mondingsgebied) nu weer wat meer westelijk wordt.

Door Langendoen (1987) is m.b.v. een mathematisch model de invloed van een aantal ontwikkelingen in en rond de Westerschelde op het getij onderzocht (zie figuur 3.2.1). Hieruit is gebleken dat het getij bij Vlissingen hierdoor significant beïnvloed wordt. De meest voor de hand liggende parameters voor het bepalen van deze invloed zijn getijverschil en vloedvolume:

- Zowel de inpolderingen (afname bergend oppervlakte) als de verdieping (afname van de weerstand) lijken een toename van de resonantie te hebben veroorzaakt (toename voortplantingssnelheid, golflengte en getijslag). Omdat het meetstation Vlissingen binnen de hals (estuariumzijde van de 'knoop') ligt is het waarschijnlijk dat dit ook in het getij bij dit station zichtbaar is (toename getijverschil).
- Een toename van het getijvolume in de hals veroorzaakt een grotere demping van de getijgolf (hogere snelheden, meer demping, kleinere getijslag). Een afname heeft uiteraard het tegengestelde effect.

Oosterschelde

Relevant voor deze studie zijn de eventuele effecten van veranderingen in en rond de Oosterschelde op het getij in de Westerscheldemondding. Als het Oostgat een functie heeft als kortsluitgeul tussen de Westerschelde- en Oosterscheldemondding moeten de aanzienlijke veranderingen van het getijvolume van de Oosterschelde invloed hebben gehad op het Oostgat.

Het getijvolume van de Oosterschelde neemt al vanaf de Romeinse tijd significant toe. Sinds de Middeleeuwen kunnen menselijke beïnvloedingen als de belangrijkste oorzaken daarvan worden onderkend (Berg, 1986). Verlies van grote oppervlakten land door overstromingen, sterk bevorderd door slecht dijkonderhoud en maaiveldverlagingen door drainage en veenafravingen, deden het getijvolume in de 15^e en 16^e eeuw met ongeveer 50 % toenemen. Hoewel inpolderingen in de volgende eeuwen weer de overhand kregen bleef het getijvolume van de Oosterschelde toenemen door verdiepingen en uitbreidingen van het bekken naar het noorden.

Rond 1870 werden de verbindingen naar de Westerschelde in het zuiden verbroken door de afdammingen van Sloe en Kreekrak. Beiden hadden bij de afsluitingen vloedvolumes van ongeveer 30 Mm³ en ebvolumes van ongeveer 10 Mm³ (Van Veen, 1944). Met name de afsluiting van het Sloe kan geresulteerd hebben in een toename van de kortsluitfunctie van het Oostgat (eb- en vloedvolumes van circa 100 Mm³). Een samenhang met de ontwikkelingen van de Deurloo en de Geul van de Walvischstaart rond 1880, beschreven in 3.3 is zeer goed mogelijk.

Uit reconstructies volgt dat na de afdammingen van Sloe en Kreekrak, tussen 1872 en 1972 het getijvolume van de Oosterschelde moet zijn toegenomen met 25 %, inclusief de toename door de afdamming van het Volkerak (10 tot 15%, zie deel 1). De getijvolumeveranderingen betekenen dat de getijgemiddelde snelheden in de geulen naar de Oosterscheldemonding evenredig zijn veranderd. Met de snelheden veranderen ook weerstand en demping over het traject tussen minder gestoord noordzeegetij en de hals van de Oosterschelde. Een toename van getijvolume en snelheden veroorzaken in principe een toename van demping en vergroting van het faseverschil, ofwel een amplitudeverkleining en vertraging van het getij in de hals van de Oosterschelde. Beide veranderingen vergroten de vervallen tussen Oosterschelde- en Westerscheldemonding. Tot 1960 verliep uitbreiding van het kombergingsoppervlakte en de resulterende toename van het getijvolume van de Oosterschelde heel geleidelijk. Hierdoor pasten ook de mondingsgeulen zich geleidelijk aan, waardoor snelheids- en weerstandstoename beperkt bleven. Omdat de getijvolumetoename en de geulaanpassing geleidelijk verliepen waren deze geulen wel relatief nauw.

Tussen 1984 en 1987 zijn t.g.v. de aanleg van de Stormvloedkering de eb- en vloedvolumes in de Oosterscheldemond met ongeveer 25% weer afgenomen. Een afname van het getijvolume heeft uiteraard het tegenovergestelde effect van een volumetoename.

Eventuele effecten zouden in eerste instantie tot uitdrukking moeten komen in het getij in Westkapelle, aan het noordwestelijke einde van het Oostgat.

Noordzee

Ook de belangrijkste getijrandvoorwaarde, het Noordzeegetij kan in de loop der tijd veranderd zijn. De toename van het gemiddeld getijverschil en het gemiddeld zeeniveau lijken veroorzaakt te worden door de globale zeespiegelrijzing. Omdat dit verschillend doorwerkt kunnen ook vervallen en stromingen beïnvloed worden. Zeespiegelrijzing en andere veranderingen in het oceaangegetij zouden ook een effect kunnen hebben op de ligging van de amfidromische punten in de Noordzee. M.b.v. een hydrodynamisch model is aangetoond dat bij bijvoorbeeld windopzet de amfidromische punten noordwaarts verschuiven (Voogt, 1985). Als de amfidromische punten verschuiven worden ook de voortplantingssnelheid van de getijgolf langs de kust (fase) en de amplitude van het getij beïnvloed. M.n. de amplitude van de hoofdcomponenten in het mondingsgebied van de Westerschelde lijken gevoelig voor veranderingen in het Noordzeegetij. Een aanwijzing voor deze gevoeligheid is het feit dat de invloed van de 18,6 jarige cyclus t.g.v. de wenteling van het maansbaanvlak op het getij in de Westerscheldemond minder sterk is dan op het getij op de oceaan. Een verschijnsel dat in minder sterke mate ook langs de Engelse en Hollandse kust optreedt (Lantsheer, 1985).

De effecten van veranderingen in het Noordzeegetij zouden bij alle meetstations merkbaar moeten zijn. Een complicerende factor is echter dat het getij bij de kuststations door de lokale geometrie beïnvloed is en veranderingen voor elk station verschillend door zullen werken. Van de meetpalen zijn echter slechts recente waterstandsregistraties beschikbaar. Gezien de geometrie van het gebied en de beschikbaarheid van gegevens is Oostende

waarschijnlijk het meest bruikbare kuststation om ontwikkelingen in het Noordzeegetij te kunnen traceren. Daarnaast is het waarschijnlijk dat ontwikkelingen die bij alle meetstations optreden voortkomen uit het Noordzeegetij.

3.3 INVLOED GETIJBEWEGING OP MORFOLOGISCHE VERANDERINGEN

Algemeen

De hoofdstructuur van het gebied is al lang aanwezig en de veranderingen ervan en de ontwikkelingen erin vertonen over een lange periode een opmerkelijke geleidelijkheid en consistentie. Het is heel waarschijnlijk dat deze ontwikkelingen worden aangedreven door geleidelijke verloopende veranderingen in de randvoorwaarden voor de getijbeweging in het mondingsgebied. Gedacht moet worden aan zeespiegelstijging, veranderingen van het getij in de Oosterscheldemonding en op het Westerscheldebekken en fase-, amplitude en getijverloopveranderingen door bodemveranderingen in de kustzone en het mondingsgebied.

Ondiepe gebieden

Opmerkelijk is de relatieve stabiliteit bij alle veranderingen van met name enkele ondiepe gebieden zoals bijvoorbeeld de Rassen, Raan, het Bankje van Zoutelande en een aantal kleinere ondiepten rond de Wielingen. Deze stabiliteit kan voortkomen uit de morfodynamische structuur van het gebied, namelijk dat van alle kanten sediment wordt aangevoerd door de ronddraaiende stroom en de golfwerking. Ook een resistente geologische structuur van de bodem ter plaatse kan invloed hebben. Verder geldt dat als de vervallen over het gebied veranderen zal er niet zo snel een "nieuwe" geul door een significant ondieper gebied ontstaan. Vanwege de kleinere diepte zijn om voldoende grote (sedimenttransporterende) snelheden te laten optreden namelijk grotere vervallen nodig dan in de al bestaande diepere geulen. Het is daarom waarschijnlijker dat een bestaande geul in de omgeving van orientatie zal veranderen.

Scheur/Wielingen

Rond 1800 is de Wielingen al de meest belangrijke geul in het mondingsgebied. Bij Cadzand wordt echter een rechtstreekse verbinding met de geulen bij Vlissingen door de aanwezigheid van een aantal banken verhinderd. Ten noorden van de Wielingen is de aanzandende geul Spleet nog duidelijk aanwezig.

De geulen Wielingen en Scheur zijn sinds 1850 doorgaand verdiept. Ten noorden van de Wielingen is de oriëntatie van de geulen en platen geleidelijk veranderd van oost-west naar noord-zuid. De banken in het midden van de geul zijn opgeschoven naar de oevers of zijn verdwenen. Het belangrijkste obstakel voor de scheepvaart vormde de ondiepte tussen de Bol van Heist en de Bol van Knokke. Deze is in 1960 doorgebaggerd, waardoor de Scheur en de Wielingen met elkaar werden verbonden.

Geul van de Walvischstaart

Zeer opmerkelijk is het feit dat rond 1880 in het zuiden van de Walvischstaart een geul tot ontwikkeling begon te komen. De oriëntatie van deze geul, de Geul van de Walvischstaart was NNW-ZZO. De getijfase waarin er voldoende grote vervallen staan over de ondiepte Walvischstaart, Vlake van de Raan en Bankje van Zoutelande én er voldoende diepte is om hoge snelheden te ontwikkelen in de richtingen van Geul van de Walvischstaart en Geul van de Rassen is rond hoogwater Vlissingen aan het begin van de ebfase. In deze fase zijn ook de kortsluitmogelijkheden met de Oosterschelde het grootst. De Looft (1986)

constateert een opmerkelijke verschuiving in oostelijke richting van het midden- en noordelijke deel van de Geul van de Walvischstaart tussen 1964 en 1982. Dit is de periode dat het getijvolume van de Oosterschelde weer sterker toenam door de Deltawerken (afdamming Volkerak).

Oostgat/Deurloo

Ondanks de grotere complexiteit en lagere stabiliteit vertoont de ontwikkeling van het Oostgat/Deurloo-gebied een heel duidelijke consistentie. De meest markante en waarschijnlijk meest ingrijpende verandering sinds de eerste helft van de vorige eeuw is het verdwijnen in haar oorspronkelijke vorm en betekenis van de geul de Deurloo.

De Deurloo vormde heel lang de kern van het na Wielingen/Scheur belangrijkste geulensysteem in het mondingsgebied. De geul verdeelde het ondiepere gebied tussen Oostgat/Sardijngeul en Wielingen/Scheur in twee delen: ten zuidwesten ervan lag de oorspronkelijke Vlake van de Raan, met de Nolleplaat als meest oostelijke deel, en aan de noordoostkant lagen de nog min of meer in elkaar overgaande Rassen en Bankje van Zoutelande. Vanaf de zuidelijke inloop, gevormd door ongeveer de huidige Sardijngeul en Galgeput, liep de geul in noordwestelijke richting naar een inloop vanuit het diepere water ten westen van de Rassen. De Deurloo vormde zo een korte directe verbinding tussen zeerand en de hals van het estuarium.

Het faseverschil tussen zeerand en Vlissingen was in die tijd waarschijnlijk aanmerkelijk groter door de langzamer voortplanting van het Noordzeegetij door de toen minder ruime Scheur en Wielingen. Het beschikbare faseverschil leverde gecombineerd met de relatief kleine afstand kennelijk getij- en profielgemiddeld voldoende grote verhangen om over dit traject een geul in stand te houden. De oriëntatie van de sterkste verhangen tussen zeerand en hals van het estuarium in dit deel van het mondingsgebied in westnoordwestelijke richting langs de Deurloo, lijkt heel geleidelijk veranderd te zijn in een meer noordelijke oriëntatie, gericht naar de Kop van Walcheren. Vooral de ebverhangen lijken daarin de hoofdrol te hebben gespeeld.

Heel geleidelijk maar heel consistent wordt vanaf het eind van de vorige eeuw de Deurloo in tweeën gedeeld. Het middendeel wordt opgevuld en de functie van het noordelijke en zuidelijke deel worden gedeeltelijk overgenomen door andere geulen, resp. Geul van de Rassen en de Geul van de Walvischstaart.

De Geul van de Rassen breekt verder door naar de inloop van het Oostgat en vormt nu met het oorspronkelijke zuidelijke deel van de Deurloo een sterk ebgedomineerde parallelgeul ten zuidwesten van het Bankje van Zoutelande. Een vloedschaar heeft een verbinding tot stand gebracht tussen de oude inloop van de Deurloo aan de zeerand ten westen van de Rassen en de Geul van de Walvischstaart die een iets meer noordwestelijke oriëntatie heeft aangenomen.

3.4 INVLOED INGEPEN IN MONDINGSGBIED OP GETIJBEWEGING

Sinds het begin van de 18^e eeuw is kusterosie bestreden door een groot aantal verschillende maatregelen, strandhoofden, duinvoetverdedigingen, strandmuren en strandsuppleties. Het belangrijkste resultaat hiervan is dat de kustlijn gefixeerd is, waardoor natuurlijke geulmigraties richting de kust worden tegengegaan. Hierdoor kunnen langs de kust 'te smalle' geulen ontstaan. Het gevolg hiervan is hogere snelheden en grotere vervallen. Dit kan resulteren in verdieping van de betreffende geul en/of belangrijker worden van andere geulen.

Na 1960 zijn bagger- en stortwerkzaamheden uitgevoerd (zie deel 1, circa 20 Mm³/jaar). Rond 1980 heeft de maximale baggeromvang plaatsgevonden (zie deel 1, circa 40 Mm³/jaar). Deze activiteiten resulteren in een verdere verdieping van de Scheur/Wielingen. De verwachting is dat dit evenals de natuurlijke verruiming heeft geresulteerd in een snellere voortplanting van de getijgolf en een vervroeging van het getij bij Vlissingen.

Het onderhoud van de toegangsgeul naar Zeebrugge, de Pas van 't Zand zal evenals de aanleg en uitbouw van de havendammen bij Zeebrugge (1906 en 1980) waarschijnlijk slechts lokale effecten op het getij hebben.

Door stortactiviteiten vindt een onnatuurlijke toevoer van sediment naar de stortlocaties (vooral de droogte van Schooneveld) plaats. Slechts een gering gedeelte van dit sediment wordt op deze plaats teruggevonden. Het is voorsnog onbekend waar dit sediment blijft. Ook de effecten op de getijbeweging zijn daarom onduidelijk. In combinatie met de golfwerking en ronddraaiende stroom zal dit wel geulvorming in het platengebied vertragen.

3.5 UITWERKING HYPOTHESEN

Uitgaande van het algemene model beschreven in hoofdstuk 2 en de historische ontwikkelingen en relaties beschreven in dit hoofdstuk zijn de volgende (met de beschikbare data toetsbare) stellingen geformuleerd:

- 1 De vervallen over de geulen in het mondingsgebied zijn over langere perioden van de getijfase voldoende groot om een geul in stand te houden. Als drempelwaarde is een getijgemiddeld verhang van 10 mm/km te hanteren.
- 2 Het maximale getijgemiddelde verhang treedt op in de richting van Scheur/Wielingen. Gezien de geulontwikkelingen (Spleet en Deurloo) lag in het verleden dit maximum waarschijnlijk noordelijker.
- 3 Veranderingen in het getij bij Vlissingen kunnen veroorzaakt zijn door veranderde voortplanting van de getijgolf in de Scheur/Wielingen en de interactie met het veranderende Westerscheldegetij. Door de natuurlijke en kunstmatige verdieping van de Scheur/Wielingen zal het getij bij Vlissingen vanaf 1800 vervroegd zijn. De invloed van het Westerscheldebekken op het getij bij Vlissingen is zeer complex. De volgende ontwikkelingen zouden wel effect kunnen hebben gehad:
 - inpolderingen (rond 1900: 2700 ha, rond 1950: 2000 ha en rond 1975: 900 ha).
 - verdieping vanaf 1900, maar m.n. vanaf de zestiger jaren.Hoe deze ontwikkelingen doorwerken hangt sterk af van de geometrie van het bekken en de resonantiekenmerken. Het is waarschijnlijk dat de toegenomen opslinging van het getij in het bekken ook bij Vlissingen merkbaar is.
- 4 Veranderingen in het getijvolume van de Oosterschelde (25% toename tussen 1870 en 1970 en 25% afname tussen 1970 en 1990) kunnen het getij bij Westkapelle beïnvloed hebben: amplitude-afname, minder vervorming en vertraging.

Verder zijn er aanwijzingen dat ook het Noordzeegetij in de loop der tijd veranderd is (kan zijn). Aan de beschikbare data toetsbare hypothesen m.b.t. deze eventuele veranderingen kunnen helaas (nog) niet geformuleerd worden. Wel verdient het aanbeveling verder onderzoek naar ontwikkelingen in het Noordzeegetij en de invloed hiervan op het mondingsgebied van de Westerschelde te doen.

4. Interpretatie getijwaarnemingen

Tijdens de huidige studie zijn de beschikbare getijwaarnemingen van de stations in en rond de Westerscheldemondd verzameld (deel 1). Voor een analyse van het verticale getij kan de schematisatie van van Veen (A, B, C en drie onderlinge relaties) uitgebreid worden tot een netwerk met 14 lokaties, waarvan 6 binnen het studiegebied (zie figuur 3.1.3). Van dit verticale getij worden achtereenvolgens de gegevens m.b.t. hoog- en laagwaters (4.1), harmonische componenten (4.2) en vervallen (4.3) geïnterpreteerd. Verder worden de stroomgegevens besproken (4.4). Tenslotte worden de in 3.5 geformuleerde hypothesen aan de data getoetst (4.5).

4.1 VERLOOP HOOG EN LAAG WATERS

De eerste, meest voor de hand liggende analyse betreft de vergelijking van niveau's en tijdstippen van hoog en laag waters van de diverse stations. Bovendien is van de meeste stations voor 1970 geen volledige meetreeks beschikbaar, doch uitsluitend informatie over HW en LW. Een beschrijving van de deze data is reeds gegeven in deel 1. De belangrijkste resultaten zijn ook gepresenteerd in de figuren 4.1.1 t/m 4.1.6:

Rekening houdend met de mogelijke onnauwkeurigheden als gevolg van de gehanteerde meetmethode in het verleden (zoals verschillen peilschrijver-peilschaal) kunnen uit deze figuren de volgende conclusies getrokken worden:

- Niveau HW: dit neemt zoals bekend in de loop van de tijd toe. Bij Westkapelle lijkt sprake te zijn van een geleidelijke toename over de hele periode vanaf 1880, terwijl Vlissingen een meer constant verloop lijkt te kennen over de periode tot ca. 1940, waarna een duidelijke stijging optreedt. Opvallend is dat er in het midden van de 60-er jaren een verschil gaat ontstaan tussen HW Vlissingen en HW Cadzand (Vlissingen hoger). Ook het verschil in HW niveau tussen Vlissingen en Westkapelle lijkt in de loop van de tijd toe te nemen. Westkapelle-Cadzand blijft daarentegen nagenoeg konstant.
- Niveau LW: er is sprake van een geringe stijging van het LW-niveau bij alle stations. In de vorige eeuw is zowel Cadzand als Vlissingen nogal afwijkend (hoger) dan op basis van een lineaire trend verwacht zou mogen worden. De oorzaak hiervan is onduidelijk, maar een meetafwijking lijkt waarschijnlijk (zie bijlage 1, deel 1).
- Getijverschil: bij alle stations is sprake van een stijgende trend, waarbij de invloed van de 18,6 jarige cyclus duidelijk aanwezig is. Het tijverschil in Vlissingen is sterker toegenomen dan in Westkapelle, in elk geval als men de vorige eeuw buiten beschouwing laat. Hetzelfde geldt voor Vlissingen t.a.v. Cadzand.
- Tijdsverschillen HW en LW: de tijdsverschillen blijken erg gevoelig te zijn voor het type registratie: peilschrijver of peilschaal. Dit maakt het bij de meeste stations moeilijk om duidelijke conclusies te trekken. Voor de laatste decaden (vanaf 1960 à 1970) zijn de trends in tabel 4.1.1 gegeven (ten opzichte van Vlissingen): Het blijkt dat de tijdsverschillen van optreden van HW in het algemeen sterker veranderen dan de LW-tijdsverschillen. Vooral het HW-tijdsverschil met Terneuzen is heel duidelijk afnemend. De afname-snelheid bedraagt gemiddeld ca. 13 sec. per jaar ofwel ca. 2 minuten per 10 jaar. Op een totaal tijdsverschil van ca. 20 minuten betekent dit ca. 10% in 10 jaar. Van Oostende zijn helaas geen tijdstippen van HW en LW beschikbaar.

	tijdsverschil HW	tijdsverschil LW
Westkapelle	licht afnemend tot midden 80-er jaren daarna licht toenemend	vrijwel constant
Cadzand	licht toenemend (ca. 5 sec. per jaar)	vrijwel constant of licht afnemend (ca. 2 sec. per jaar)
Terneuzen	duidelijk afnemend (ca. 13 sec. per jaar)	licht afnemend (ca. 4 sec. per jaar)

Tabel 4.1.1 Tijdsverschillen hoog- en laagwater

4.2 HARMONISCHE COMPONENTEN

De resultaten van de harmonische analyse van de verschillende stations zijn gegeven in deel 1. De lange termijn analyse resultaten voor M2 en M4 te Vlissingen zijn ook opgenomen in de figuren 4.2.1 en 4.2.2. Uit deze figuren blijken de volgende ontwikkelingen in de tijd:

- amplitude M2: na uitfiltering van de effecten van de 18,6-jarige cyclus (de toegepaste correctie bedraagt slechts 50% van de theoretische waarde) blijkt dat de amplitude van M2 sinds 1910 toegenomen is met ca. 5 cm tot ca. 175 cm in 1996. De toename lijkt met name in de tweede helft van de eeuw te zijn ontstaan (vanaf ca. 1950);
- fase M2: in afwijking van de amplitude-correctie bedraagt de fase-correctie in verband met de 18,6-jarige cyclus 100% van de theoretische waarde. Met deze waarde wordt het meest vloeiende verloop van de fase verkregen. De fase vertoont een tendens tot vervroeging van ongeveer 0,2 graad per 10 jaar. Uitgedrukt in tijd is dit ca. 25 seconden per 10 jaar. Er is geen duidelijk verschil tussen de eerste en de tweede helft van de eeuw;
- amplitude M4: na correctie voor de 18,6-jarige cyclus (100%) resulteert een stijgende trend met 2 à 3 cm over de afgelopen 85 jaar. Gezien de totale amplitude (13 à 14 cm in 1996) is deze toename aanzienlijk;
- fase M4: het verloop hiervan is ook na correctie erg warrig. Mogelijk heeft in de eerste helft van de eeuw een verlating plaatsgevonden met ca. 5 graden. In de tweede helft van deze eeuw is de beste schatting in de tijd een constante fase van ca. 120°.

In figuur 4.2.3 is een schatting gegeven van het verloop van de amplitude en de fase van M2 over het mondingsgebied:

- ruimtelijke verdeling amplitude M2: in de ontwikkeling van de amplitude spelen 2 factoren door elkaar: de afnemende tendens van het Noordzeegetij in noordelijke richting en het effect van de resonantie van de getijgolf op de Westerschelde; bij Vlissingen en Terneuzen is het effect van de resonantie van de getijgolf duidelijk zichtbaar; naar buiten toe lijkt de opslingering door te werken tot Cadzand en Westkapelle; in de monding van de Oosterschelde is de reactie van de amplitude van M2 op de aanwezigheid van het bekken minder groot dan in de Westerschelde: M2 is bij Roompot buiten even groot als bij OS11;

- ruimtelijke verdeling fase M2: het verloop van de fase over het gebied zoals gepresenteerd in figuur 4.2.3 is een schatting; het werkelijke verloop van de fase zal ongetwijfeld meer genuanceerd zijn, mede gerelateerd aan het diepteverloop; het globale verloop van de fase geeft de indruk van een lopende golf die in het zeegebied enigszins sneller loopt dan in het mondingsgebied en in de Westerschelde zelf.

Soortgelijke figuren zijn ook opgezet voor M4 en M6. Het blijkt echter dat het verloop van (vooral) de fase van deze componenten dusdanig springerig is dat het niet mogelijk is een enigszins consistent beeld te produceren.

4.3 ANALYSE VERVALLEN

Voor diverse combinaties van stations is op basis van de uurlijkse waarnemingen een analyse gemaakt van de opgetreden vervallen tussen deze stations. Per jaar zijn de gemiddelde positieve en negatieve vervallen bepaald, terwijl tevens met stappen van 5 jaar (voor zover gegevens beschikbaar zijn) de frequentie-verdeling van de vervallen is bepaald. De resultaten zijn gegeven in bijlage 5 van deel 1. Tevens is in deze bijlage het verloop van de uursregistraties van het werkelijke getij en het verval tussen de betreffende stations voor bepaalde dagen gegeven, waarmee een indruk wordt verkregen van de wijze hoe het verval is opgebouwd gedurende het getij. Bij deze tijdreeksen moet wel worden opgemerkt dat voor de Nederlandse kuststations de tijdstippen van het geregistreerde waterstanden t.g.v. niet eenduidige middeling 5 minuten verschillen van de andere stations.

Bij de frequentie-verdelingen kan in het algemeen onderscheid gemaakt worden in een 3-tal vormen:

- a. enkeltoppige frequentie-verdeling met de top dicht bij het nulpunt
- b. dubbeltoppige frequentie-verdeling met zowel een top in de negatieve als in de positieve vervallen
- c. vlakke frequentie-verdeling, waarbij over een brede band van vervallen de frequentie van voorkomen nagenoeg gelijk is, zonder duidelijke piek.

Deze vormen worden bepaald door de verschillen tussen de waterstandscurves van beide stations. In figuur 4.3.1 is voor verschillen in fase, amplitude en vervorming een principeschets van de vervallen en bijbehorende frequentieverdeling gegeven. De werkelijke frequentieverdeling wordt uiteraard bepaald door de combinatie van verschillen in fase, amplitude en vervorming.

- a. De enkeltoppige verdeling, met als duidelijk voorbeeld Vlake van de Raan-Zeebrugge, treedt op als er sprake is van slechts geringe fase-verschillen. De breedte van de top wordt hoofdzakelijk bepaald door verschillen in amplitude tussen beide stations. De standaardafwijking van het gemiddelde verval is in het algemeen groot.
- b. De dubbeltoppige verdeling, bijvoorbeeld Cadzand-Vlissingen, ontstaat als gevolg van fase-verschillen tussen beide stations. Amplitude-verschillen en vormveranderingen van de kromme beïnvloeden de mate van gepiektheid, en dus de standaardafwijking van het gemiddelde verval.
- c. Een vlakke verdeling treedt op als de verschillen tussen beide beschouwde stations zeer groot worden, bijvoorbeeld Oostende-OSII. Deze grote verschillen zijn vooral het gevolg van de grote afstand tussen deze stations. De standaardafwijking van de gemiddelde vervallen is groot.

Het is duidelijk dat de vervallen (of beter: de verhangen) binnen een uitgebreid gebied als de Westerschelde een belangrijke aandrijvende kracht vormen voor de stromingstoestand en de resulterende sedimenttransporten en geulvorming. In hoofdstuk 2 is een schatting gemaakt van de vervallen die nodig zijn om een dusdanige stroming te initiëren dat geulvorming ontstaat, cq. in stand gehouden wordt. Deze schatting bedraagt 10 à 15 mm per km en is gebaseerd op de evenwichtsrelaties die bij geulen in de Westerschelde

gevonden zijn (gemiddelde stroomsnelheid ca. 0,7 m/s in de dominante getijfase).

meetstations	afstand (km)	Gemiddelde verval (cm)		Gemiddelde verhang (mm/km)	
		positief	negatief	positief	negatief
<i>Zeerland</i>					
1 Nieuwpoort-Oostende	16.5	15.4	10.0	9	6
2 Oostende-Vlakte v.d. R.	34.7	22.4	38.7	6	11
3 Vlakte v.d. Raan-OS11	26.2	19.0	24.0	7	9
4 Oostende-OS11	59.8	44.1	60.5	7	10
<i>Zuidelijke oever</i>					
1 Nieuwpoort-Oostende	16.5	15.4	10.0	9	6
5 Oostende-Zeebrugge	23.0	26.5	17.1	11	7
6 Zeebrugge-Cadzand	12.8	16.5	10.3	13	8
7 Cadzand-Breskens	13.2	17.2	22.8	13	17
8 Cadzand-Vlissingen	16.8	23.0	23.8	14	14
9 Vlissingen-Terneuzen	19.5	19.9	29.6	10	15
10 Oostende-Vlissingen	52.3	62.0	49.4	12	9
<i>Noordelijke oever</i>					
11 Westkapelle-Vlissingen	14.0	16.7	23.1	12	17
12 Westkapelle-OS11	13.8	15.5	16.9	11	12
13 Westkapelle-Rmp. Buit.	20.5	24.2	21.4	12	10
14 OS11-Roompot Buiten	14.0	16.7	14.5	12	10
15 OS11-Vlissingen	23.7	28.2	25.9	12	11
<i>Dwarsverbanden</i>					
16 Vlakte v.d. R-Zeebrugge	17.3	14.9	9.1	9	5
17 Vlakte v.d. R-Cadzand	19.4	17.4	11.8	9	6
18 Vlakte v.d. R-Vlissingen	29.8	29.7	38.1	10	13
19 Vlakte v.d. R-Westkap.	18.3	16.2	14.7	9	8
20 Westkapelle-Cadzand	16.4	11.9	12.6	7	8

Tabel 4.3.1 Gemiddelde vervallen en verhangen (laatst beschikbare jaar)

In tabel 4.3.1 zijn voor alle beschouwde stations de onderlinge afstanden, de gemiddelde vervallen in het laatst beschikbare jaar en de bijbehorende gemiddelde verhangen (in mm/km) gegeven. De nummering van de koppels verwijst naar de opbouw van bijlage 5 van deel 1. De verdeling van de gemiddelde positieve en negatieve vervallen over de

beschikbare jaren per beschouwd koppel van stations is gegeven in genoemde bijlage. In deze grafieken is tevens de lijn gegeven die correspondeert met een verhang van 10 mm/km. Uit de in tabel 4.3.1 en bijlage 5 van deel 1 gepresenteerde gegevens kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

Zeerland (Nieuwpoort-Oostende-Vlakte van de Raan-OSII):

1 t/m 4 • Er is nauwelijks sprake van overschrijding van een gemiddeld verhang van 10 mm/km. De gemiddelde negatieve verhangen zijn in het algemeen het grootst. Deze verhangen treden in het algemeen op bij vallend water en op LW (als gevolg van het afnemende tijverskil in noordelijke richting en de faseverschuiving). Dat er wel een duidelijke stroming langs de zeerand optreedt is mogelijk omdat de zeestroming zich niet laat beschrijven door relaties en criteria die zijn afgeleid in het estuarium zelf. In de ontwikkeling zijn geen duidelijke trends te ontdekken.

Zuidelijke oever (Nieuwpoort-Oostende-Zeebrugge-Cadzand-(Breskens)-Vlissingen-Terneuzen):

Er is in het algemeen sprake van overschrijding van het 10 mm/km criterium. In het westen (rond Zeebrugge) domineren de positieve vervallen tijdens stijgend water, terwijl rond Vlissingen de negatieve vervallen domineren bij vallend water.

Langs de zuidelijke oever is sprake van een geleidelijk verlopende fase van buiten naar binnen, terwijl de amplitude vanaf Nieuwpoort geleidelijk afneemt, in de regio Zeebrugge/Cadzand een minimum bereikt en vervolgens in de richting van Vlissingen en Terneuzen weer toeneemt. Langs de zuidelijke oever zijn de volgende trends te signaleren:

- 1 • Nieuwpoort-Oostende: in de periode 1981-1996 blijft het positieve verval vrijwel constant en neemt het negatieve verval in lichte mate af.
- 5 • Oostende-Zeebrugge: in de periode 1981-1996 tendeert zowel het gemiddelde positieve als het gemiddelde negatieve verval tot toename.
- 6 • Zeebrugge-Cadzand: slechts de jaren 1981-1986 en 1994-1996 zijn beschikbaar. Het verloop is nogal grillig, waardoor het moeilijk is een trend aan te geven.
Het grillige verloop kan samenhangen met de locatie van het meetpunt in Cadzand (sterk ondiep water effect) of met niet nader bekende andere meetafwijkingen.
- 7 • Cadzand-Breskens: beschikbaar is de periode 1974-1986. Opvallend is de plotselinge toename van het negatieve verval in 1980 (van ca. 16 tot ca. 24 cm). Eenzelfde sprong, maar dan omgekeerd, treedt op bij het positieve verval in 1983. Dit verval daalt dit jaar van 22 à 23 cm tot ca. 16 cm. Zowel voor als na deze sprongen is het verloop van de vervallen min of meer constant. Hoewel er geen directe aanwijzingen zijn, lijkt het waarschijnlijk dat de gesignaleerde veranderingen te maken hebben met meetnauwkeurigheden.
- 8 • Cadzand-Vlissingen: over de periode 1971-1983 is sprake van een nogal grillig verloop; na 1983 zijn de veranderingen veel vloeiender met een tendens tot lichte toename van de gemiddelde verhangen. In het algemeen is het negatieve verval iets groter dan het positieve verval; beide liggen ca. 50% boven de referentielijn van 10 mm/km verhang.
- 9 • Vlissingen-Terneuzen: opvallend is het vrijwel constante verloop over de volledige periode van 1971 tot 1996, terwijl juist op dit traject belangrijke verschuivingen zijn opgetreden in het tijdsverschil van hoogwater en laagwater. De beperkte veranderingen hangen waarschijnlijk samen met de tegelijkertijd opgetreden toename

van de getij amplitude, die de fase-afname compenseert.

Overigens is het opvallend dat het dominante (negatieve) verval tussen Vlissingen en Terneuzen ca. 50% boven de referentielijn van 10 mm/km ligt, ofwel op ca. 15 mm/km. Dit is kennelijk onafhankelijk van de processen in Schaar van Spijkerplaat en Honte. De negatieve dominantie (waterstand Terneuzen groter dan Vlissingen) treedt op tijdens vallend water (HW-kentering en eb). Het ligt voor de hand een verband te leggen met de ebdominantie van de Pas van Terneuzen, maar gezien de complexe situatie in de Schaar van Spijkerplaat moet men hier toch mee oppassen.

- 10 • Overall beeld (Oostende-Vlissingen): dit beeld weerspiegelt de som van de hierboven gegeven deeltrajecten. Het positieve verval is duidelijk hoger dan het negatieve. Beiden vertonen in de eerste beschikbare periode van 1978-1986 een afnemende tendens. In de jaren 1994-1996 liggen beide vervallen echter weer ongeveer op het gemiddelde van de periode 1978-1986.

Noordelijke oever (Vlissingen-Westkapelle-OSII(-Roompot buiten)):

In het algemeen wordt het criterium van 10 mm/km verhang ruimschoots overschreden. Vooral op het traject Vlissingen-Westkapelle is dit evident. Het fase- en amplitude-verloop langs de noordelijke oever van de Westerscheldemond en de inloop naar de Oosterschelde is gecompliceerder dan langs de zuidelijke oever, omdat langs de noordelijke oever de Oosterschelde het getij beïnvloedt.

Van de stations in dit gebied kan bovendien slechts een beperkt aantal jaren vergeleken worden, vanwege verschillen in meetmethode van de uurwaarnemingen. Deze jaren zijn niet voor alle stations gelijk, hetgeen de situatie extra compliceert. Er zijn de volgende trends te signaleren:

- 11 • Westkapelle-Vlissingen: in de periode 1971-1980 neemt het gemiddelde negatieve verval (Vlissingen hoger dan Westkapelle) toe van ca. 20 naar ca. 25 cm. Na 1980 is het verloop vrijwel constant. Het negatieve verval is beduidend hoger dan het positieve verval. Het negatieve verval is het grootst rond/even na HW Vlissingen en wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door het verschil in amplitude (Vlissingen hoger dan Westkapelle).
- 12 • Westkapelle-OSII: er is slechts 4 jaar vergeleken (1983-1986). In deze periode zijn de negatieve vervallen groter, doch afnemend en de positieve vervallen kleiner doch toenemend. De verschillen tussen negatief en positief verval worden dus kleiner. Positieve vervallen treden vooral op rond HW en negatieve vervallen rond LW, hoofdzakelijk als gevolg van het kleinere tijverskil bij OSII dan in Westkapelle. In de periode 1984-1986 zijn forse profielvernauwingen tot stand gebracht bij de Oosterscheldekering. Gezien de beperkte tijdreeks is het echter moeilijk een duidelijk verband te leggen.
- 13 • Westkapelle-Roompot buiten: hier is alleen 1994-1996 beschikbaar; de positieve vervallen zijn enigszins groter dan de negatieve vervallen.
- 14 • OSII-Roompot buiten: hier is beschikbaar 1987-1991, met grotere positieve vervallen dan negatieve. Het positieve verval neemt in deze (korte) periode toe.
- 15 • OSII-Vlissingen: beschikbaar is 1983-1986 (net als bij Westkapelle-OSII). Het positieve verval is groter dan het negatieve verval. De tendensen zijn hetzelfde als tussen Westkapelle en OSII, zij het dat ze minder duidelijk zijn.

Dwarsverbanden Raan (vergelijking Vlake van de Raan met Zeebrugge, Cadzand, Vlissingen en Westkapelle en Westkapelle met Cadzand):

De optredende vervallen over de Vlake van de Raan zijn in het algemeen lager dan het referentieniveau van 10 mm/km. De enige uitzondering is Vlake van de Raan-Vlissingen, waar het negatieve verval boven dit niveau ligt. Per geval kunnen de volgende bijzonderheden worden waargenomen:

- 16 • Vlake van de Raan-Zeebrugge: beschikbaar is 1984-1996. In 1984 zijn de negatieve en positieve vervallen vrijwel gelijk (ca. 13 cm). In de loop van de tijd neemt het positieve verval toe tot ca. 15 cm en het negatieve verval af tot ca. 9 cm in 1996. Positieve vervallen treden op bij vallend water en rond LW en negatieve vervallen bij stijgend water/HW.
- 17 • Vlake van de Raan-Cadzand: er zijn slechts enkele jaren rond 1985 en rond 1995 beschikbaar. Het negatieve verval lijkt min of meer constant te zijn, terwijl het positieve verval toeneemt van ca. 14 naar ca. 18 cm.
- 18 • Vlake van de Raan-Vlissingen: ook hier zijn slechts enkele jaren rond 1985 en 1995 beschikbaar. Het positieve verval lijkt constant te blijven, terwijl het negatieve verval mogelijk enigszins toeneemt.
- 19 • Vlake van de Raan-Westkapelle: over dezelfde jaren lijkt het negatieve verval constant te blijven en het positieve verval toe te nemen.
- 20 • Westkapelle-Cadzand: de verschillen zijn beschikbaar vanaf 1971. Er is sprake van een nogal grillig verloop, vooral in de eerste decade, maar ook in de jaren daarna is regelmatig sprake van uitschieters. In het algemeen zijn de positieve vervallen enigszins groter dan de negatieve; een trend is niet waar te nemen.

4.4 STROMINGEN

Het algemene stromingsbeeld in het mondingsgebied wordt overzichtelijk gepresenteerd in stroomatlassen. Door A.P. de Looft (1986) is op basis van de Stroomatlas van het Zuidelijk Deltagebied van 1985 het stromingsbeeld geanalyseerd. De conclusies van zijn studie kunnen als volgt worden samengevat. Het Westerscheldebekken wordt in hoofdzaak gevuld en geleegd via de Wielingen, waarin de getijgolf, komende van de Noordzee zich met afnemende loopsnelheid voortplant. Hierdoor vertoont het waterstandsverloop te Vlissingen-Breskens een faseverschil met het waterstandsverloop op de Noordzee. Het hierdoor veroorzaakte waterstandsverschil tussen beide gebieden is verantwoordelijk voor het stroombeeld in Oostgat/Galgeput/Sardijngeul. Rond HW en LW te Vlissingen valt de kentering in het gebied van het Oostgat en wordt de route Deurloo/Galgeput/Sardijngeul stroomvoerend. Het stroombeeld over het uitgestrekte bankengebied van de Raan wordt bepaald door de waterstanden en het stroomgedrag t.p.v. de Noordzee en de Wielingen. Opvallend aan het stroombeeld over de Raan is het rondgaande karakter. Gedurende één getijperiode verlegt de stroom zich geleidelijk van richting over ca. 360°.

Uit vergelijking van stroomatlassen uit verschillende perioden (1950, 1976 en 1992) blijkt dat vanaf 1950 geen significante grootschalige veranderingen in het stroombeeld zijn opgetreden. Alleen de stromingsrichting over het platengebied is soms verschillend. Dit is m.n. met het oog op de ontwikkelingen van de Deurloo en Geul van de Walvischstaart interessant.

Zoals reeds aangegeven in deel 1, is een gedetailleerde analyse van de ontwikkelingen in

de stromingstoestand van het mondingsgebied op basis van de beschikbare stroommetingen niet zinvol. Dit wordt veroorzaakt door enerzijds de zeer beperkte stroominformatie over ontwikkelingen in de tijd en anderzijds door het feit dat de locatie van de meetpunten in de verschillende jaargangen nogal varieert. Hierdoor is het niet mogelijk om een betrouwbare analyse te maken van ontwikkelingen en trends in de stromingspatronen in het mondingsgebied.

Vanwege de grote onzekerheden m.b.t. de stroommeetgegevens wordt aanbevolen om de ontwikkeling van de stromingspatronen te analyseren m.b.v. mathematische modellen (getijreconstructie). De beschikbare meetgegevens kunnen bij dat onderzoek een nuttige rol vervullen.

Van de ontwikkeling van het getijvolume in de Westerschelde zijn wel redelijk veel metingen beschikbaar. Hieruit zijn t.b.v. het drempelonderzoek Westerschelde de volgende schattingen gegeven (Svašek, 1994):

- trend: toename van 0.5 % per 10 jaar
- cyclus: amplitude 1,5%; periode 18,6 jaar
- inpolderingen: afname 3% in de periode 1950-1960
- verdieping: toename 3% in de periode 1970-1975

4.5 TOETSING HYPOTHESEN

Uitgaande van de in dit hoofdstuk gegeven interpretatie van de meetgegevens is over de in 3.5 geformuleerde stellingen het volgende te zeggen:

- 1 Over de belangrijkste geulen in het mondingsgebied (langs de zuidelijke en noordelijke oever) zijn de vervallen inderdaad groter dan de drempelwaarde (10 mm/km). Ook in de richting Vlake v.d. Raan-Vlissingen zijn de vervallen m.n. tijdens eb groter dan deze drempelwaarde. Verder valt op dat de vervallen langs de noordelijke oever ongeveer even groot zijn als langs de zuidelijke oever, waar de hoofdgeul Scheur/Wielingen is gelegen. Dit geeft aan dat er geen simpele directe relatie tussen vervallen en geulvorming bestaat. M.n. is ook van belang tijdens welk deel van de getijfase de grootste vervallen optreden (resultierend in een toename of juist afname van de stroming). Daarnaast speelt ook de geometrie en bodemgesteldheid een rol.
- 2 Omdat er tussen Zeebrugge en Westkapelle van slechts één meetpunt betrouwbare data beschikbaar zijn kan over de richting van de maximale vervallen geen uitsluitel worden gegeven. Het is mogelijk dat tussen de richtingen Zeebrugge-Vlissingen en Vlake v.d. Raan-Vlissingen de richting met grootste vervallen bestaat. Wel geldt ook hierbij de onder 1 gemaakte nuancering dat de ontwikkeling van de vervallen tijdens de getijfase (in relatie tot de stroming) een belangrijke rol speelt.
- 3 Bij Vlissingen zijn de volgende getij-ontwikkelingen opgetreden:
 - vervroeging van 25 seconden per 10 jaar, waarschijnlijk ten gevolge van de verdieping van Scheur/Wielingen;
 - toename van de amplitude van de hoofdcomponent 5 cm (3 %) tussen 1910 en 1996, waarschijnlijk t.g.v. de opslingering van het getij in het bekken.Deze ontwikkelingen zijn bij de overige stations (Cadzand en Westkapelle) niet of minder sterk aan te wijzen. Het lijkt erop dat de effecten van de inpolderingen en de verdiepingen elkaar voor wat betreft het getijvolume ongeveer hebben gecompenseerd en dat de invloed op het getij bij Vlissingen voornamelijk bestaat uit een toename van de resonantie (resultierend in een toename van het getijverschil bij Vlissingen).
- 4 De invloed van de bouw van de Oosterscheldekering op het getij bij Westkapelle is te klein om op basis van de beschikbare meetgegevens te worden getraceerd.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 BESCHIKBARE MEETGEGEVENS

Bij de huidige studie is veel aandacht besteed aan de inventarisering en verzameling van beschikbare meetgegevens van de Westerscheldemondding en omgeving. Het traceren van ontwikkelingen in het getij wordt echter sterk beïnvloed door de volgende beperkingen: *waterstanden (verticaal getij)*

- Van slechts een beperkt aantal locaties zijn waterstandsregistraties beschikbaar (14, waarvan 6 in het studiegebied). De meeste gegevens zijn beschikbaar van kuststations in havens en zijn daarom relatief sterk beïnvloed door lokale omstandigheden.
- De oudere gegevens bestaan bijna uitsluitend uit hoog- en laagwaterregistraties, die geen informatie over de vorm van de getijkromme bevatten. Een uitzondering vormt Vlissingen, waarvan vanaf 1910 drie-uursregistraties beschikbaar zijn.
- De verzamelde data bevatten een aantal onvolkomenheden. Voor bepaalde onvolkomenheden (niet eenduidige middeling t.b.v. uursregistraties) kunnen de analyse resultaten worden gecorrigeerd (zie deel 1). De oorzaak van een aantal andere onvolkomenheden is echter onbekend, hiervoor kan niet worden gecorrigeerd.

stroming (horizontaal getij)

- Van een groot aantal locaties zijn stroommeetgegevens beschikbaar. Deze gegevens zijn echter incidenteel opgenomen (maximaal 30 dagen achtereen) en zelden meerdere malen op dezelfde lokatie. Gezien het karakter van stroomgegevens (sterk beïnvloed door lokale omstandigheden) is gedetailleerde onderlinge vergelijking van deze gegevens zonder gebruik van hydraulische modellen onmogelijk.

5.2 GROOTSCHALIG GEDRAG

Het ebgetijdedelta-model lijkt een goed uitgangspunt voor een gedragsmodel van de Westerscheldemondd. Door de ligging en uitgestrektheid van het mondingsgebied van de Westerschelde moeten de bestaande benaderingen van dit model wel worden genuanceerd. Binnen de benadering van Sha en van de Berg (1993) zal meer aandacht moeten worden besteed aan de invloed van het verticale getij (vervallen). In aanvulling op de benadering van Van Veen (1936) moet bij de uitwerking van een gedragsmodel aandacht worden besteed aan de verschillen in amplitude en vervorming van het verticale getij in het studiegebied.

Verder zal meer aandacht moeten worden besteed aan de getijvoortplanting in de Noordzee en het Westerscheldebekken. Het mondingsgebied vormt de overgang tussen deze gebieden en maakt tevens van beide getijsystemen deel uit. Ook zal het mondingsgebied van de Westerschelde het getijsysteem van het bekken beïnvloeden. Bij Vlissingen zijn volgende getij-ontwikkelingen gesignaleerd:

- vervroeging van 25 seconden per 10 jaar, waarschijnlijk ten gevolge van de verdieping van Scheur/Wielingen;
- toename van de amplitude van de hoofdcomponent 5 cm (3 %) tussen 1910 en 1996, waarschijnlijk t.g.v. de opslingering van het getij (toename resonantie) in het bekken. Deze ontwikkelingen zijn bij Westkapelle niet of minder sterk aan te wijzen. De fase- en amplitudeverschillen tussen deze stations zijn dus veranderd. De ontwikkelingen hiervan op de getijgemiddelde vervallen hebben echter een tegengesteld effect. Wel kan het verloop van de vervallen over de getijfase en de resulterende stroming door het Oostgat veranderd zijn. Vanwege het ontbreken van voldoende stroommeetgegevens kunnen de stromingscondities en de eventuele veranderingen van de stromingscondities in de tijd

alleen met modellen worden aangetoond.

Een voorlopige prognose van het grootschalige gedrag is dat t.g.v. de doorgaande verdieping van Scheur/Wielingen en de Westerschelde de fase- en amplitudeveranderingen bij Vlissingen zullen doorzetten. De gevolgen daarvan voor de stromingen in het Oostgat zullen dan ook steeds duidelijker merkbaar worden.

5.3 VERVOLGSTUDIES

De verzamelde meetgegevens kunnen op de volgende manier bij vervolgonderzoek (m.n. de getijreconstructie) worden betrokken:

- samenstellen en beoordelen van getijrandvoorwaarden
- calibratie en validatie

Daarnaast kunnen ook verder te ontwikkelen inzichten in de historie van de getijbeweging direct getoetst worden, rekening houdend met de beschreven beperkingen van de meetgegevens.

Om de voorlopige prognose van de ontwikkeling van het Oostgat uit te werken zal bij de reconstructie van het getij m.b.v. een mathematisch model aandacht moeten worden besteed aan een duidelijke omschrijving van de huidige en historische functies van de geulen in het systeem. M.n. de samenhang van horizontaal en verticaal getij dient in het mondingsgebied van de Westerschelde ruimtelijk (2DH) te worden beschreven om de verschillende (historische) meetgegevens in samenhang verder te analyseren.

Op basis van de verder ontwikkelde inzichten in de relaties tussen getijbeweging en structuur van het mondingsgebied kunnen verder de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek worden gedaan:

- literatuuronderzoek naar de werking en ontwikkeling van het Noordzeegetij en het effect daarvan op de zeewaartse getijrandvoorwaarde van het mondingsgebied
- literatuuronderzoek naar de invloed van ontwikkelingen van het Westerscheldebekken (m.n. de resonantiekenmerken) op de getijrandvoorwaarde bij Vlissingen.
- Beide onderzoeken dienen vooraf te gaan aan de tweede fase van de getijreconstructie of de grenzen van het te gebruiken model moeten zo worden gekozen dat de invloed van deze effecten in het model zelf bepaald kunnen worden.
- De resultaten van de verschillende onderzoeken binnen K2000*KOP betreffende de Westerscheldemondd naar morfologie, getij, zandbalans en geologie dienen met elkaar in verband te worden gebracht. Een workshop met de betrokkenen lijkt hiervoor een geschikte vorm.

Verklarende woordenlijst

amplitude:	zie getijcomponent
debiet:	geïntegreerde snelheid (over de diepte ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$) dus per eenheid van breedte of over de diepte en de breedte (m^3/s))
dominantie:	het verschijnsel dat tijdens de ene getijfase (eb of vloed) meer water of zand door een geul getransporteerd wordt dan tijdens de andere getijfase; de getijfase waarin meer wordt getransporteerd wordt de dominante getijfase voor die geul genoemd.
DONAR:	Data Opslag NAtte Rijkswaterstaat
ebschaar/ebgeul:	een getijgeul waar tijdens eb meer water doorheen stroomt dan tijdens vloed
ebvolume:	de hoeveelheid water die tijdens de ebfase van een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd
erosie:	ontgroning, verdieping
estuarium:	riviermonding met sterke getij-indringing
fase:	zie getijcomponent
getij component:	Een cyclische bijdrage aan de waterstandsvariatie t.g.v. de invloed van de zon en de maan, die gekenmerkt wordt door een bepaalde frequentie, fase en amplitude.
getijverschil:	verschil tussen hoog- en laagwaterstand
getijvolume:	de hoeveelheid water die tijdens een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd (eb en vloedvolume)
komberging:	de hoeveelheid water die stroomopwaarts van een zekere doorsnede wordt geborgen
maansverloop:	tijdstip van optreden t.o.v. evenwichtsgetij
NAP:	Nieuw Amsterdams peil (referentie niveau in Nederland)
peilschaal:	meetinstrument dat wordt gebruikt voor visuele waterstandswaarnemingen
peilschrijver:	meetinstrument dat wordt gebruikt voor mechanische waterstandswaarnemingen
sedimentatie:	aanzanding, verondieping
TAW:	Tweede Algemene Waterpassing (referentie niveau in België)
vloedschaar:	een getijgeul waar tijdens vloed meer water doorheen stroomt dan tijdens eb
vloedvolume/ vloedgeul:	de hoeveelheid water die tijdens de vloedfase van een getij door een bepaalde doorsnede wordt getransporteerd

Lijst van figuren

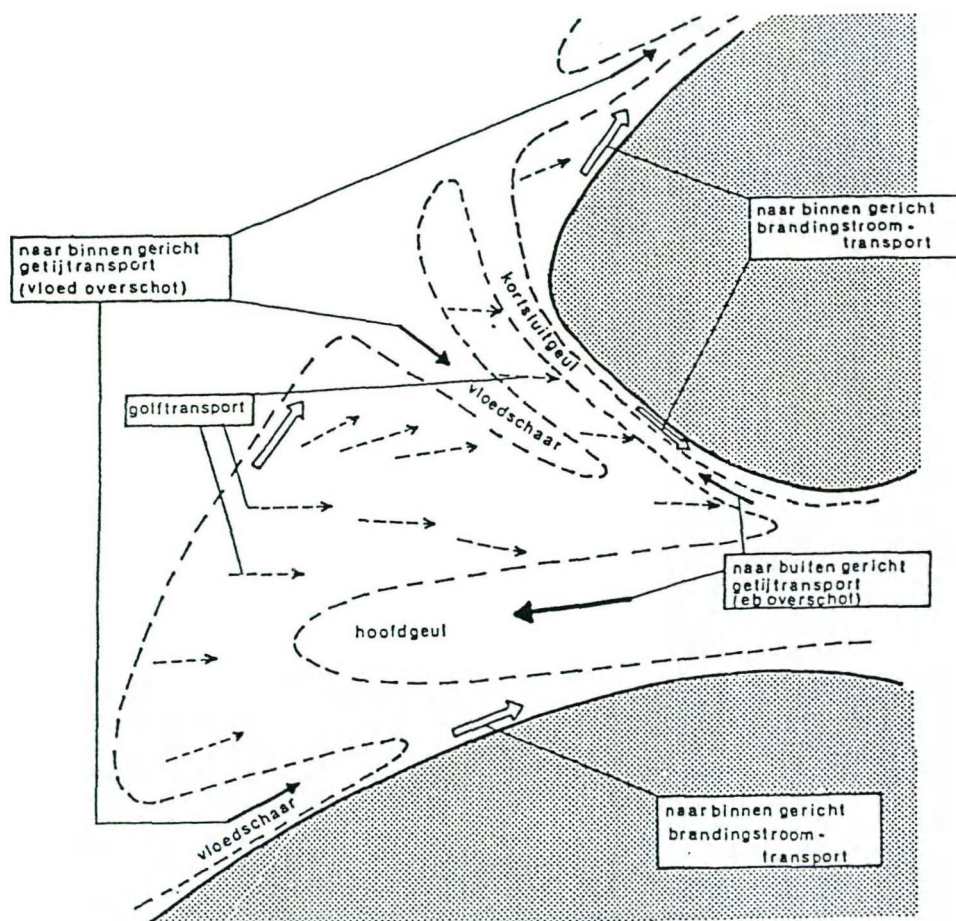
- 1.2.1 Studiegebied Westerscheldemond
- 2.1.1 Principe schets zandtransport in het mondingsgebied van een getijestuarium (bron: RWS, 1988)
- 2.1.2 Principe schets van de getijvoortplanting in een dubbelen mond (bron: Van Veen, 1936)
- 2.2.1 Getijvoortplanting Westerscheldemond
- 3.1.1 Hoog- en laagwatertijdstip Zuidelijke Noordzee (bron: zeekaart 5059)
- 3.1.2 Getijverschillen springtij en doottij Zuidelijke Noordzee (bron: zeekaart 5059)
- 3.1.3 Getijrandvoorwaarden in relatie tot de getijmeetstations
- 3.2.1 Beïnvloeding verticale getij door ontwikkelingen Westerschelde (bron: Langendoen, 1987)
- 4.1.1 Hoogwaterstanden 1860 - 1996
- 4.1.2 Laagwaterstanden 1860 - 1996
- 4.1.3 Getijverschillen 1860 - 1996
- 4.1.4 Hoog- en laagwatertijdstippen Vlissingen en Westkapelle
- 4.1.5 Hoog- en laagwatertijdstippen Vlissingen en Cadzand
- 4.1.6 Hoog- en laagwatertijdstippen Vlissingen en Terneuzen
- 4.2.1 M2 component Vlissingen 1910-1996
- 4.2.2 M4 component Vlissingen 1910-1996
- 4.2.3 Ruimtelijke verdeling M2 component
- 4.2.3 Ruimtelijke verdeling M4 component
- 4.2.3 Ruimtelijke verdeling M6 component
- 4.3.1 Principeschets herkomst vervallen

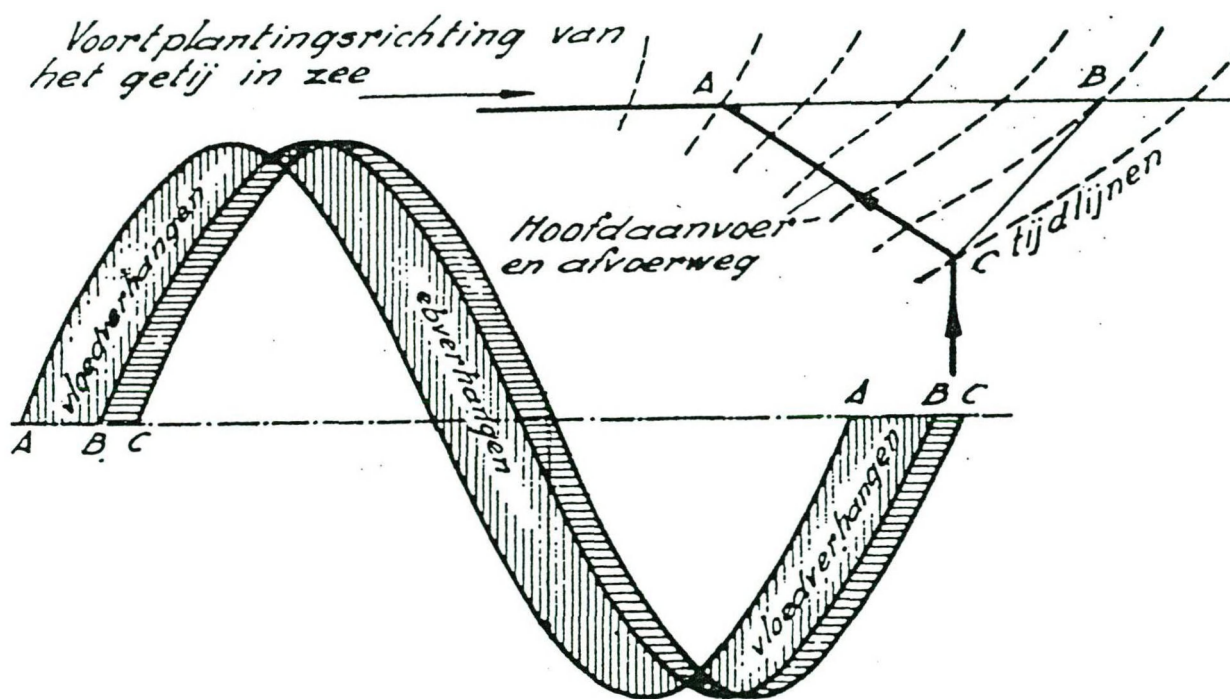
Lijst van tabellen

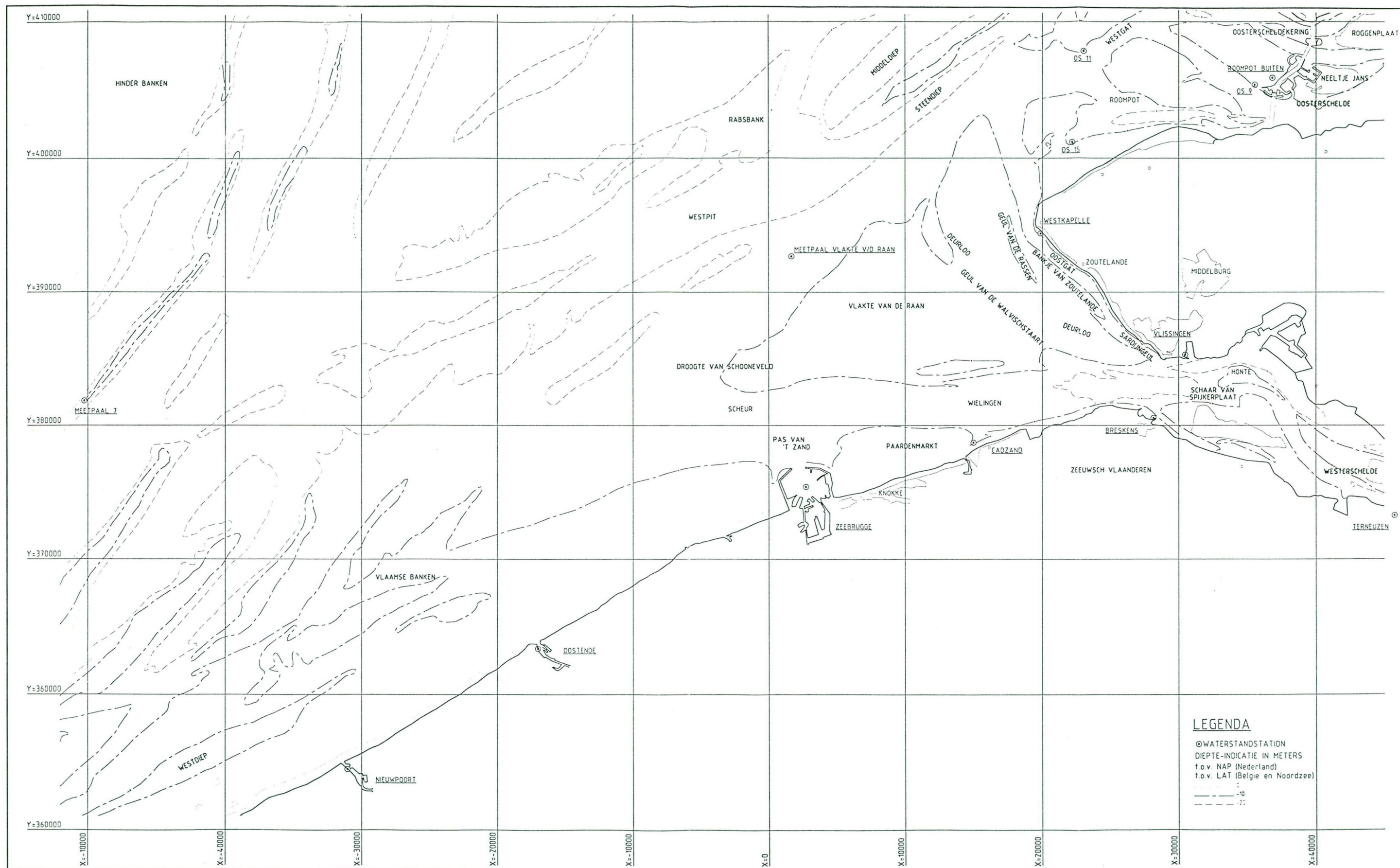
- 4.1.1 Tijdsverschillen hoog- en laagwater
- 4.3.1 Gemiddelde vervallen en verhangen (laatst beschikbare jaar)

Literatuurlijst

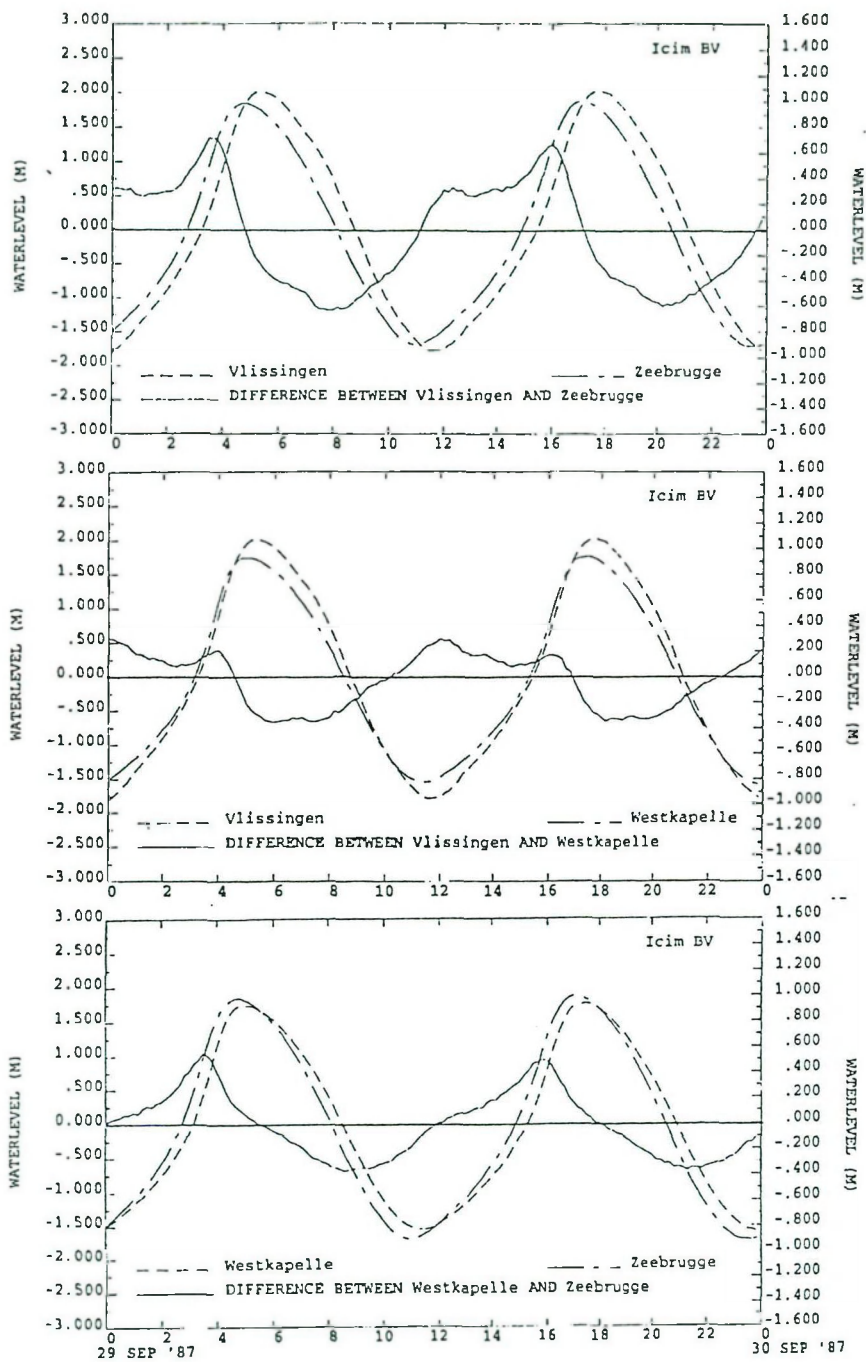
- Anonymous, 1996 Co-tidal and co-range chart 5059, Southern North Sea, Touton, United Kingdom
- Berg, J.H. van den, 1986 Aspects of sediment- and morphodynamics of subtidal deposits of the Oosterschelde. RWS-communication no. 43, The Hague.
- Van Cauwenberghe, 1966 Hydrografische analyse van de Scheldemondding, Het Ingenieursblad, 35, 17, 565-576, Oostende.
- Langendoen, E.J., 1987 Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen. TU-Delft, rapport nr. 5-87, Delft.
- Lantsheer, C, 1985 Invloed knopencyclus op de getijvoorspelling, Rijkswaterstaat, nota GWIO-85.008.
- Looff, A.P. de, 1986 Mondingsgebied van de Westerschelde, getijstromingen, golfklimaatgegevens, bodemligging en morfologische processen, RWS Nota GWWS-86.404.
- Mol, G., 1995 De Westerschelde: een resultaat van menselijke ingrepen. rapport RIKZ-95.030, Middelburg.
- Sha en van den Berg, 1993 Sha, L.P. en Berg, J.H. van den, 1993, Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of the Netherlands and the German Bight, Journal of Coastal Research, 9, 3, 730-746
- Svašek, 1995 Definitiestudie Westerscheldemondd, RWS nota RKZ-256, Rotterdam
- Veen, J. van, 1936 Onderzoekingen in den hoofden
- Veen, J. van, 1944 Schelderegion en Schelderegion. Rijkswaterstaat, R 677, Den Haag.
- Voogt, L, 1985 Een getijmodel van de Noordzee gebaseerd op de Jonsdap-1976 meting, Rijkswaterstaat WWKZ-84G.006

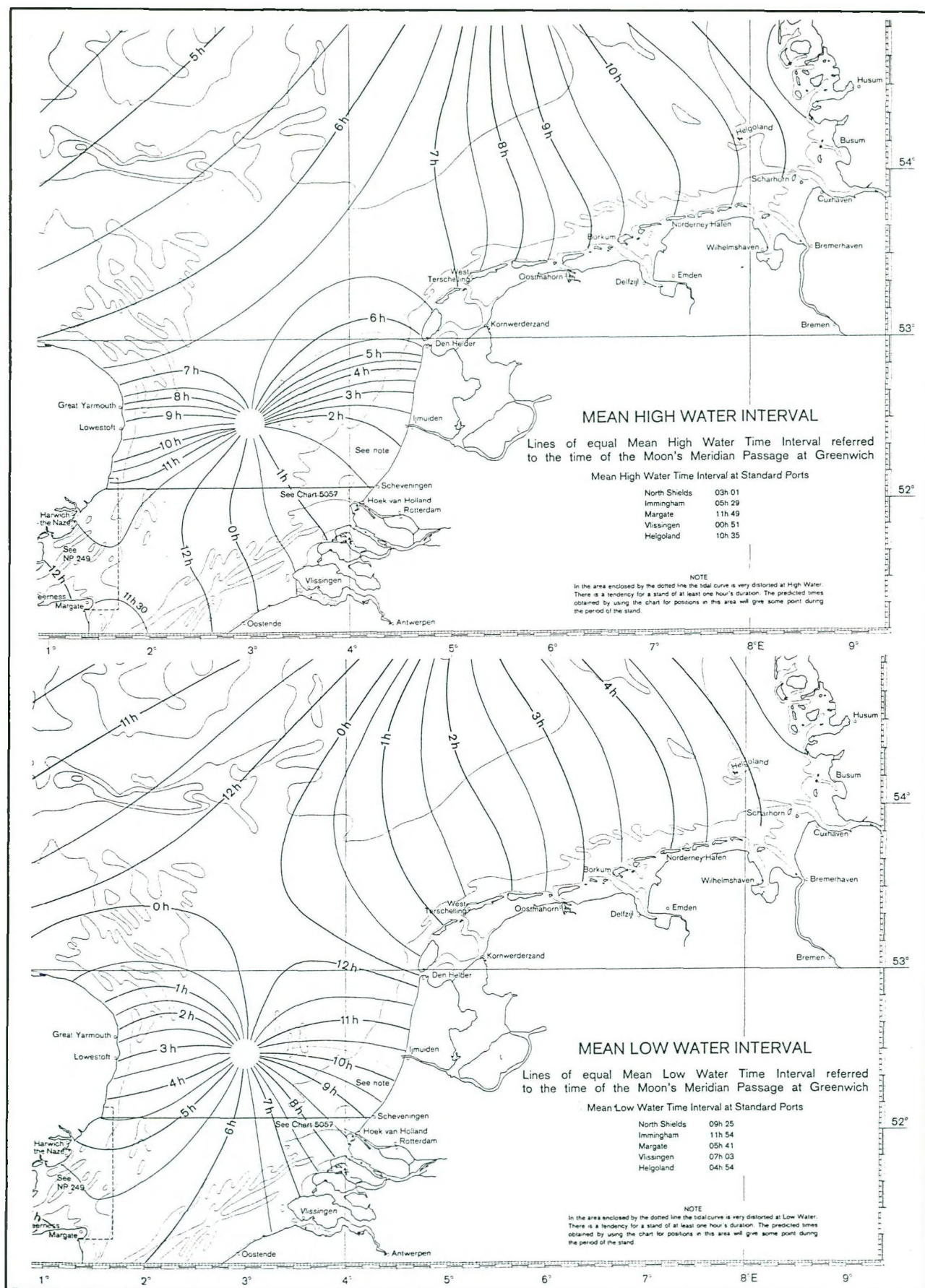


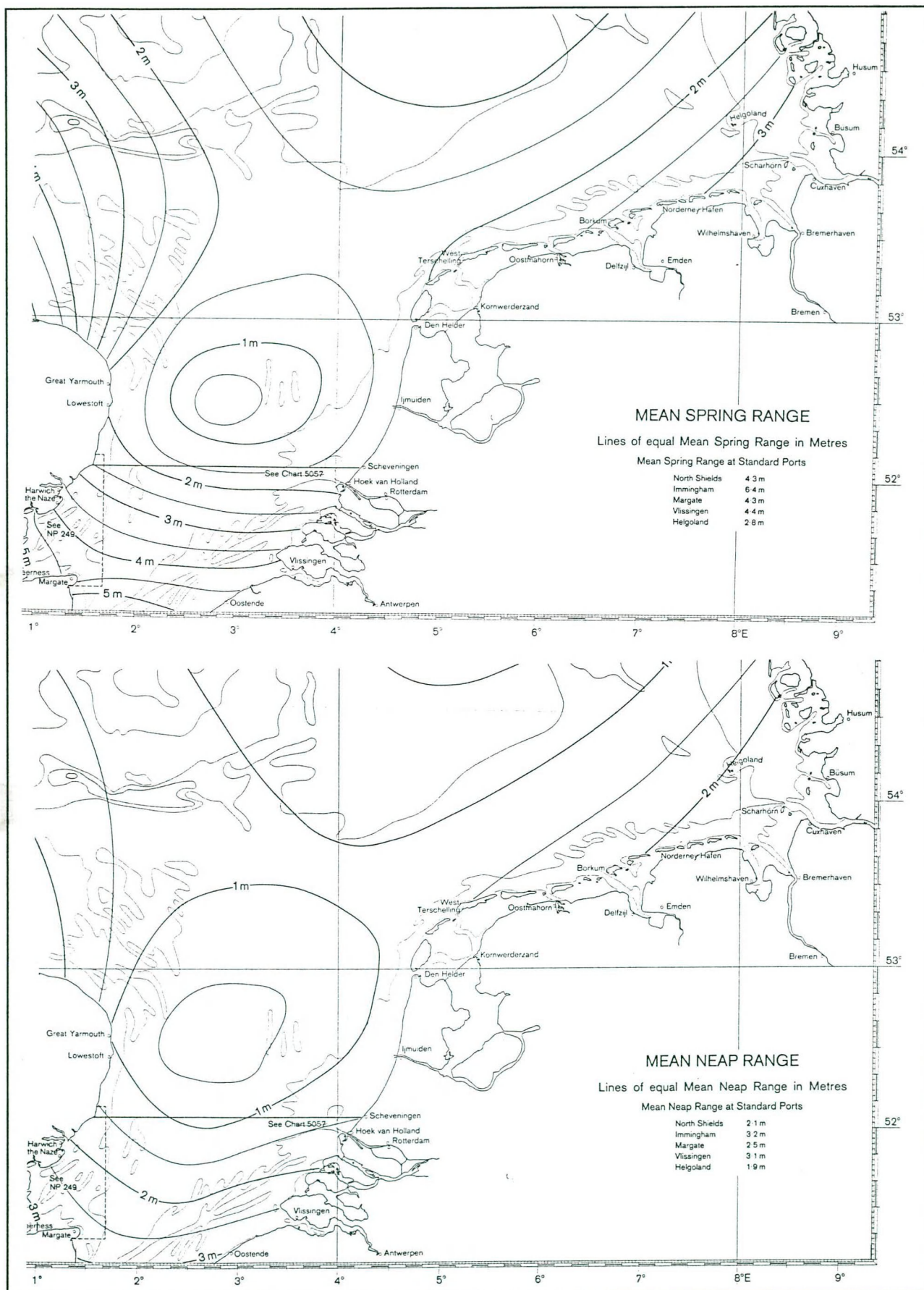


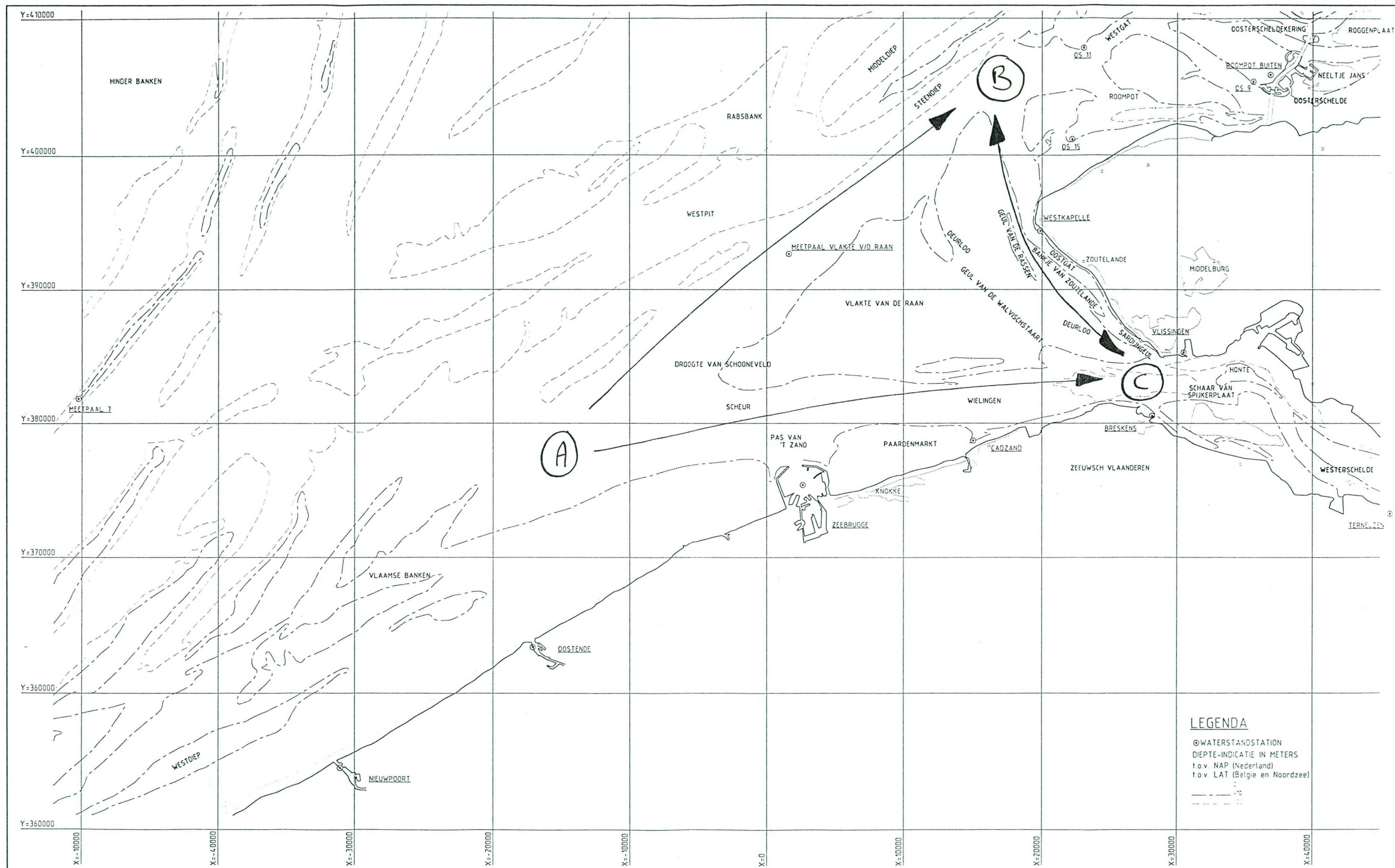


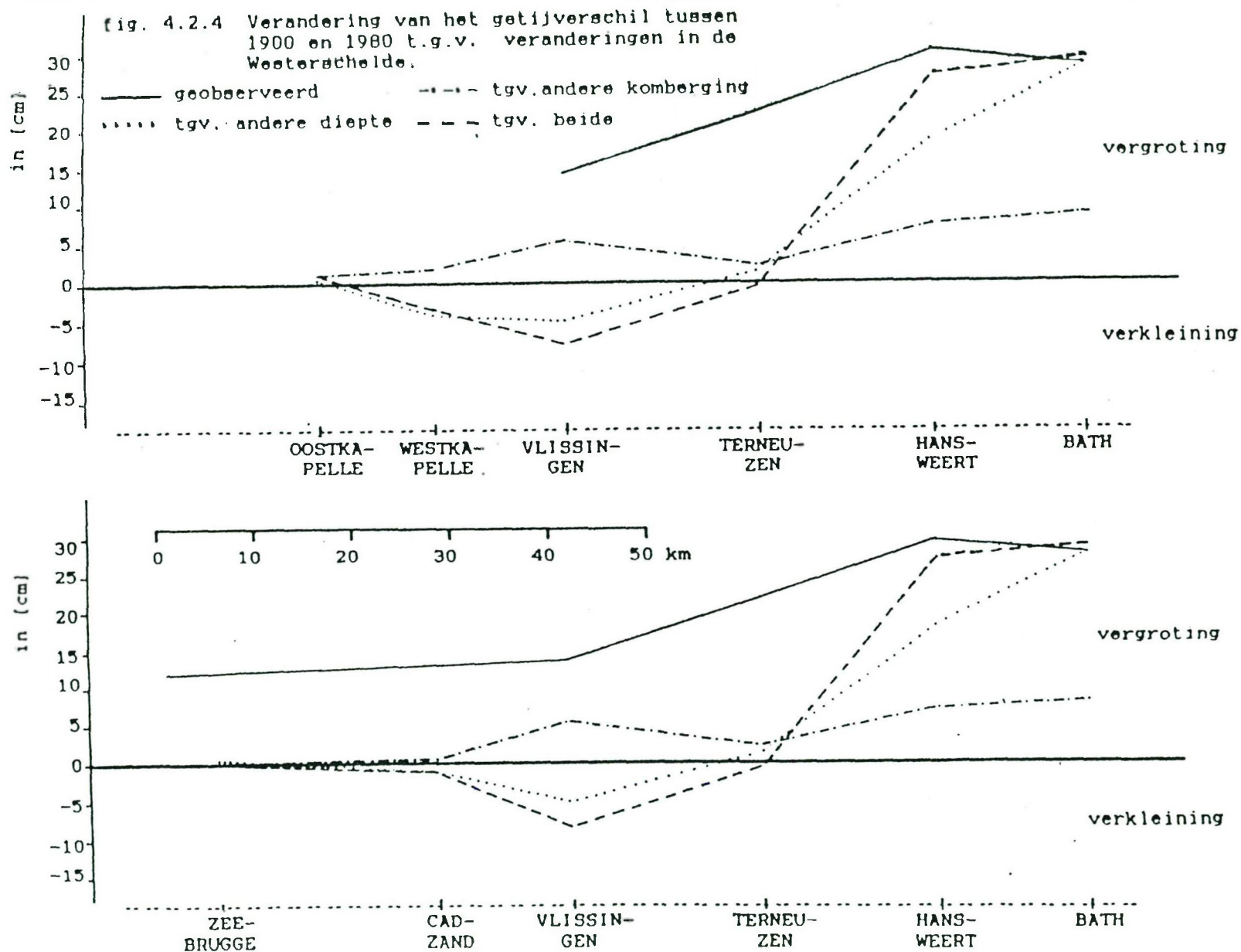
 waterbouwkundig adviesbureau	Studiegebied Westerscheldemonde en omgeving		datum : 28-11-1997
			project : 1029
			figuur : 1.2.1

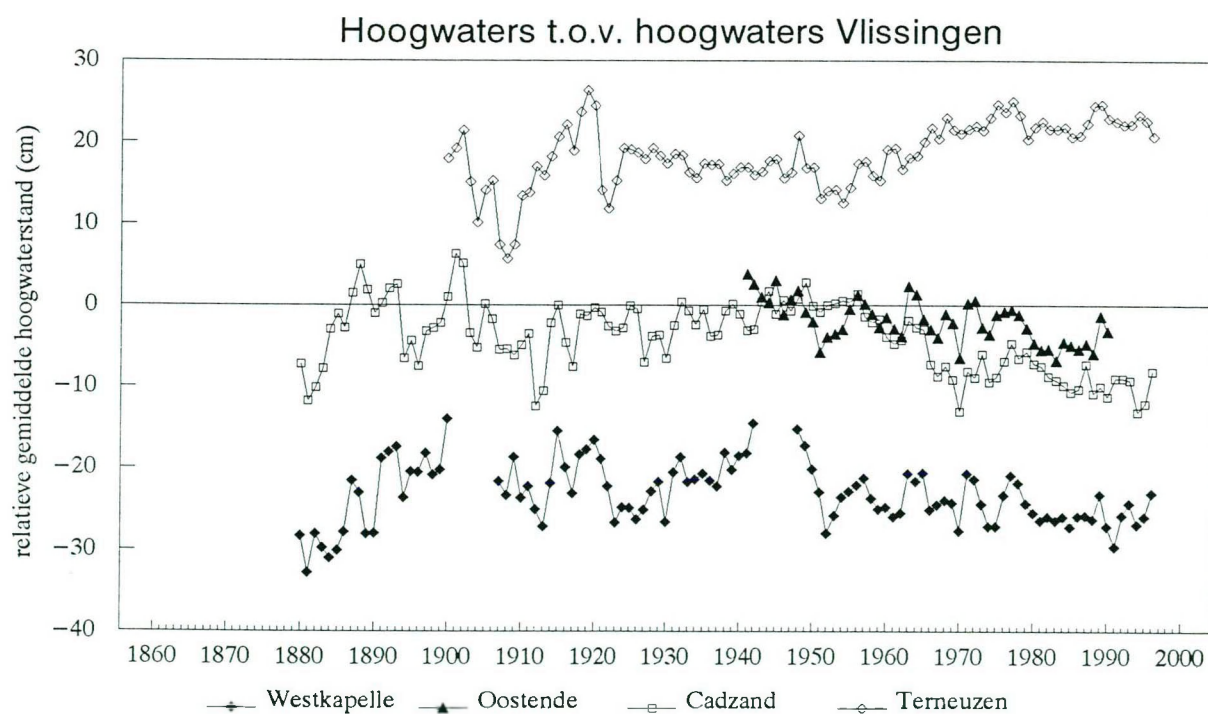
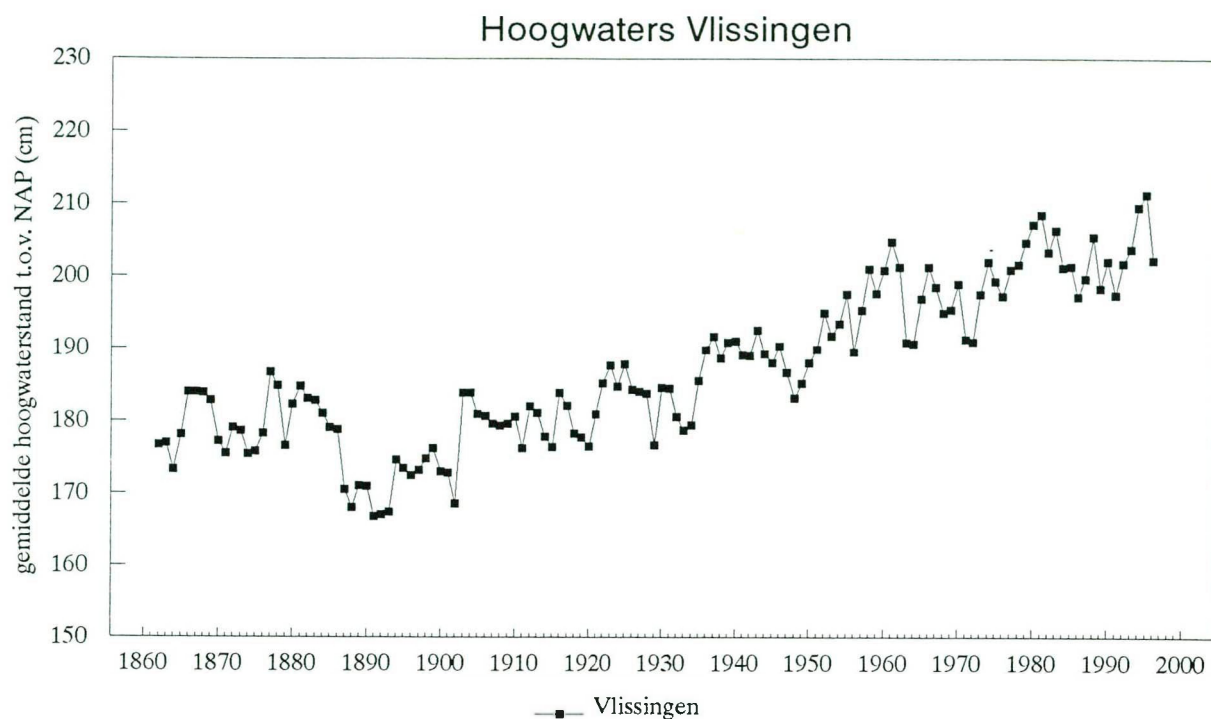


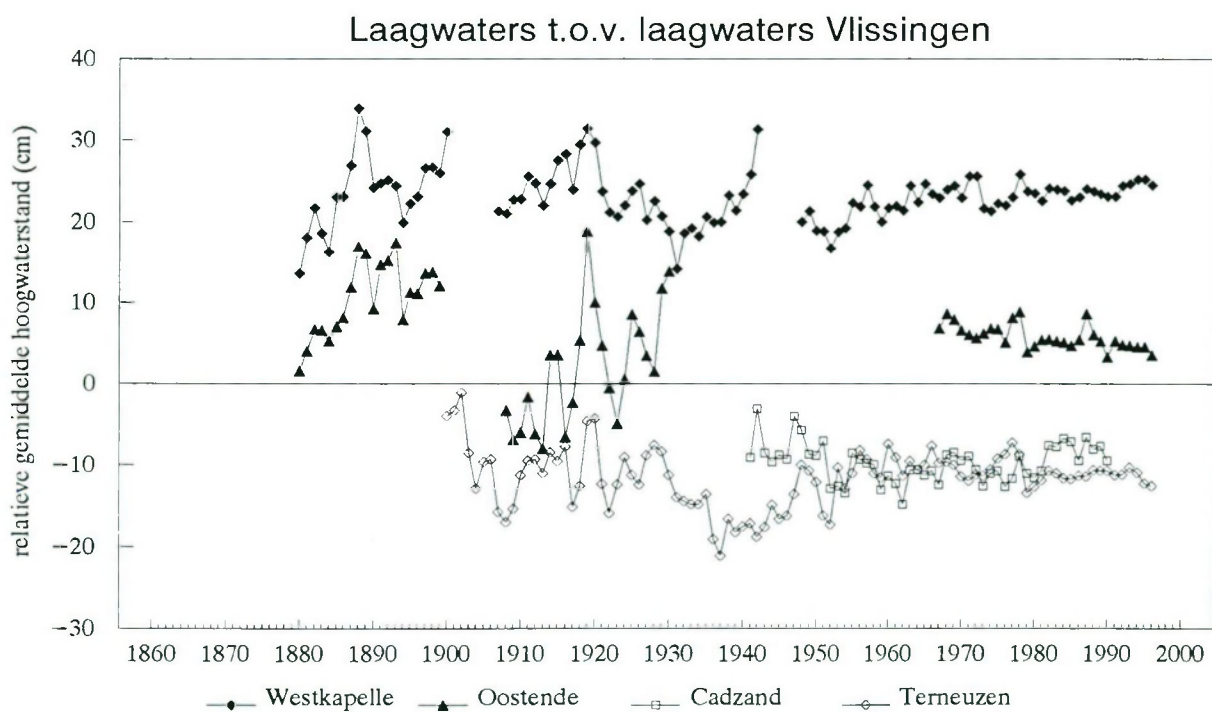
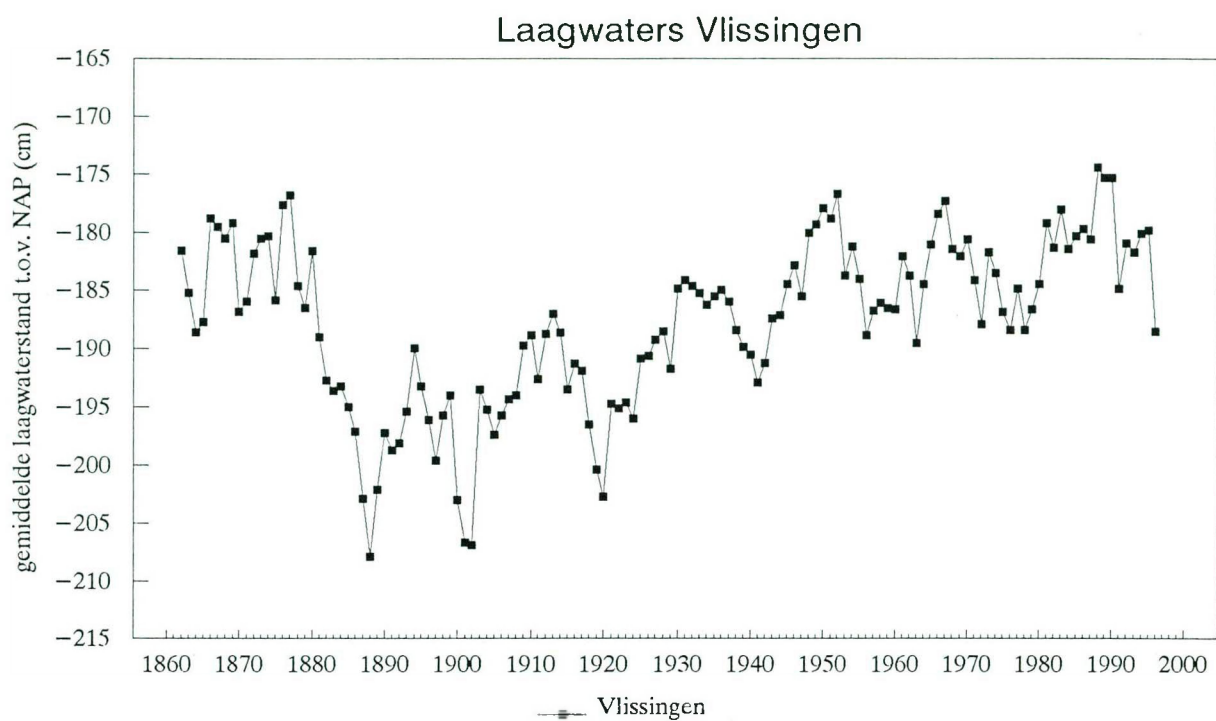


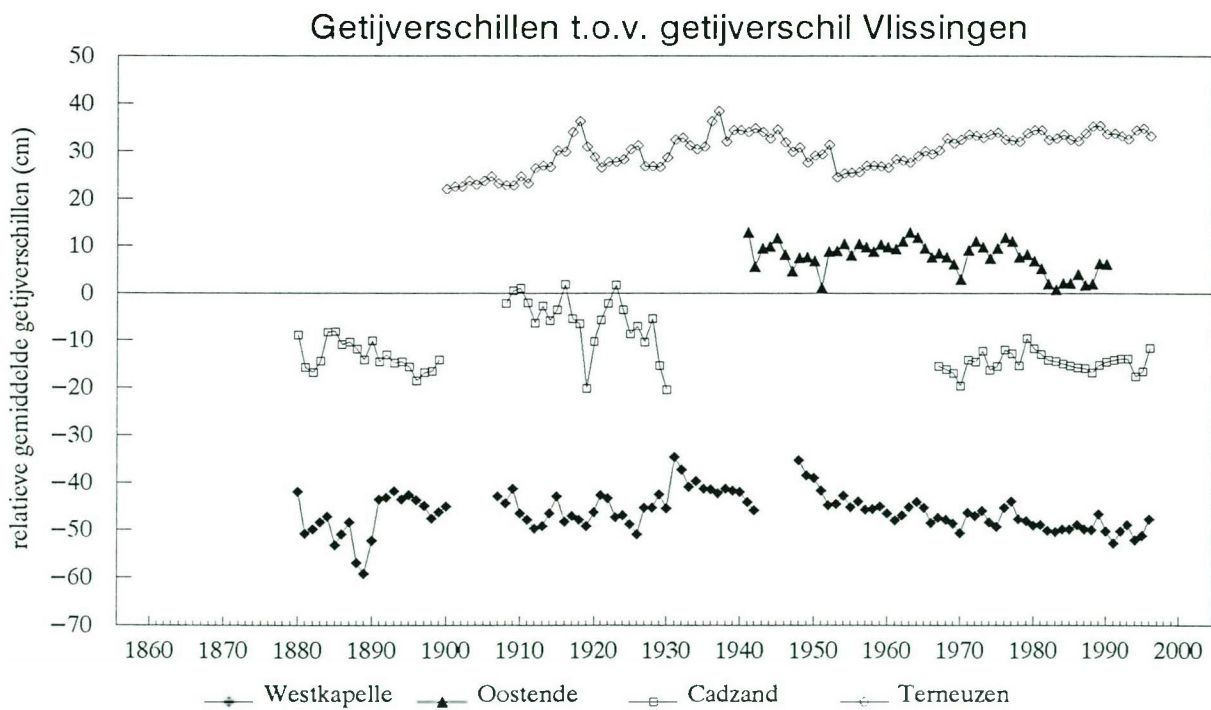
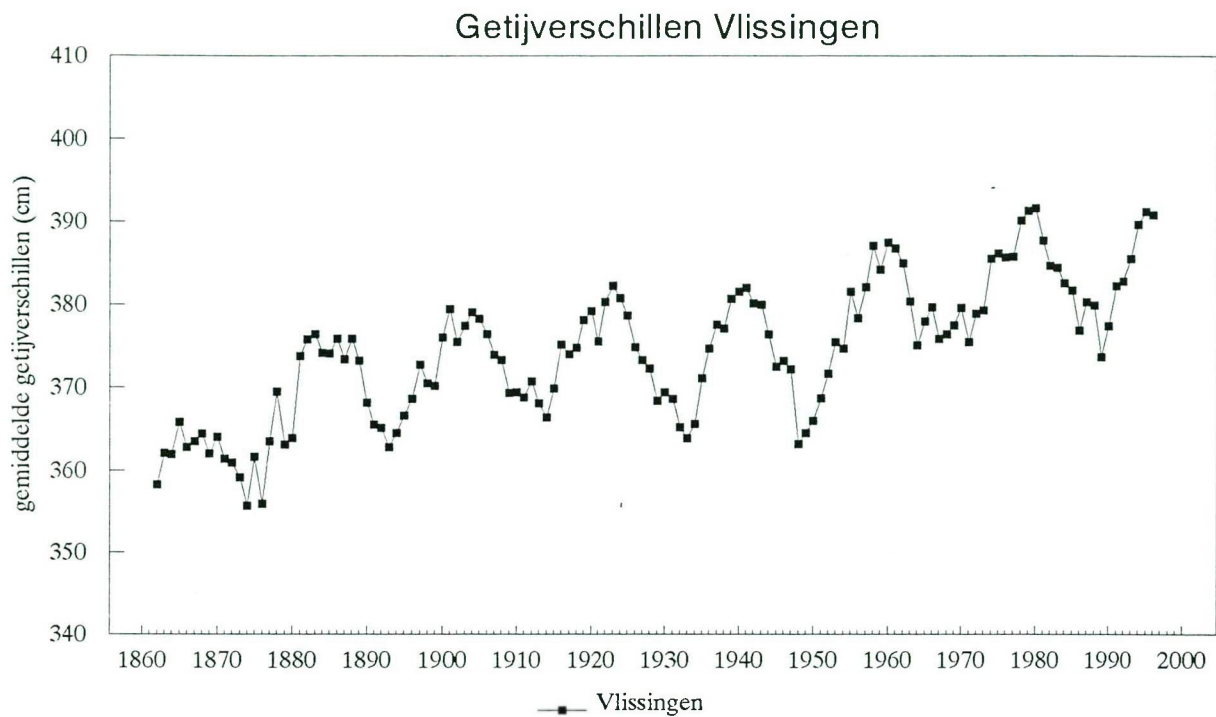




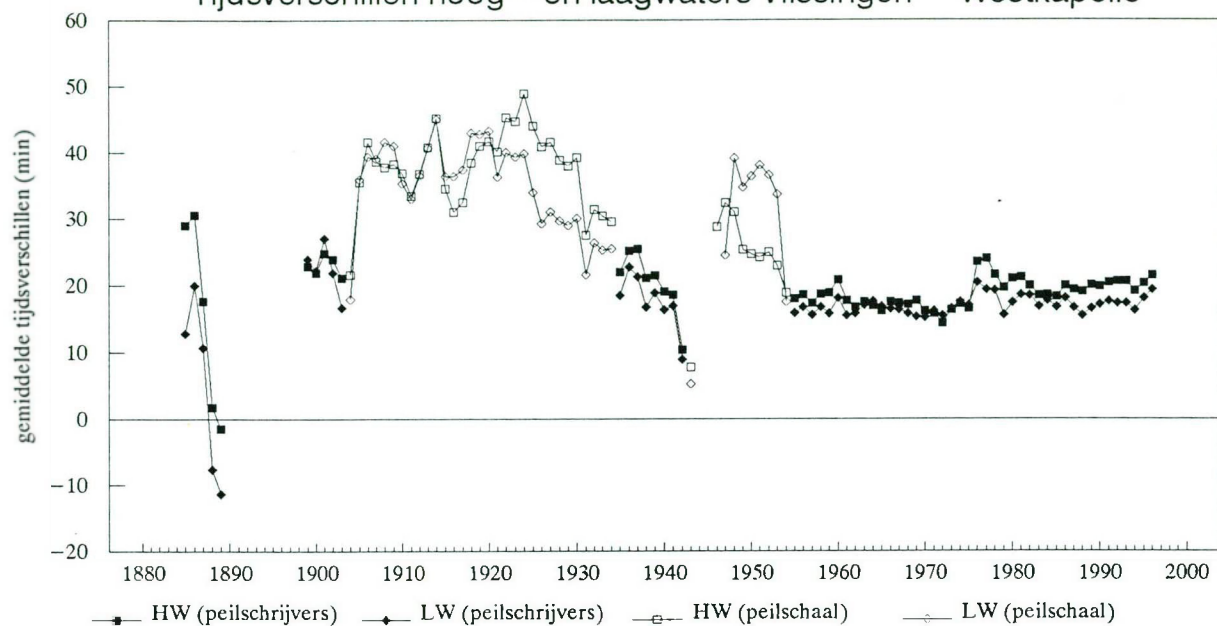


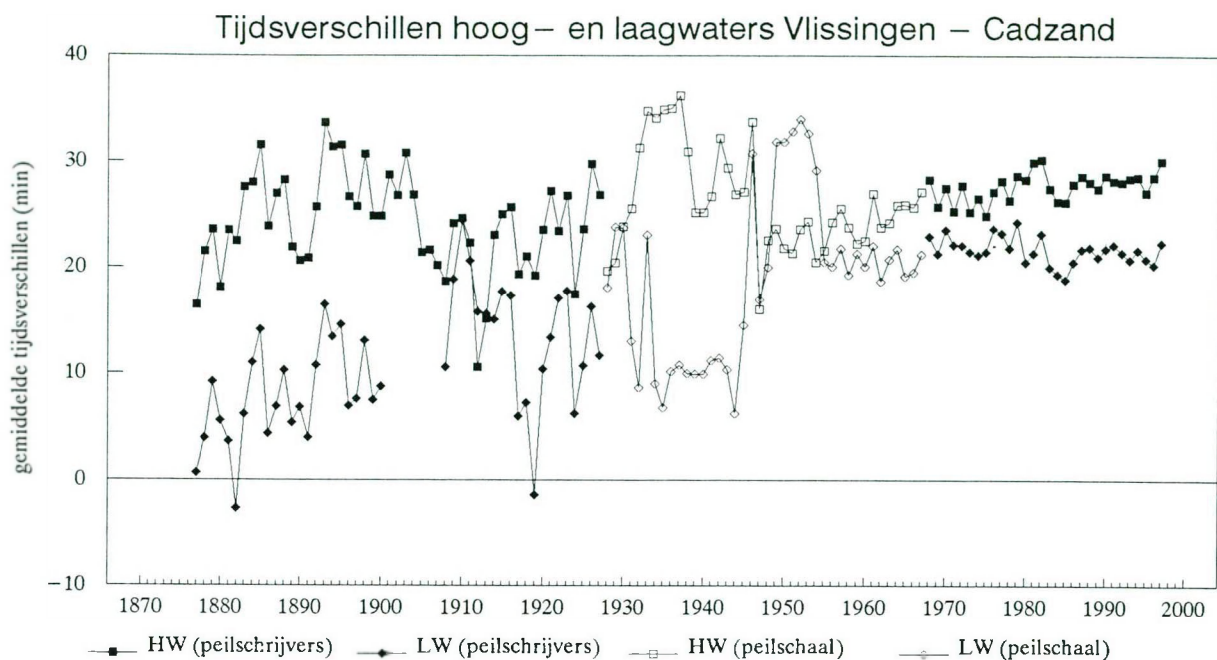


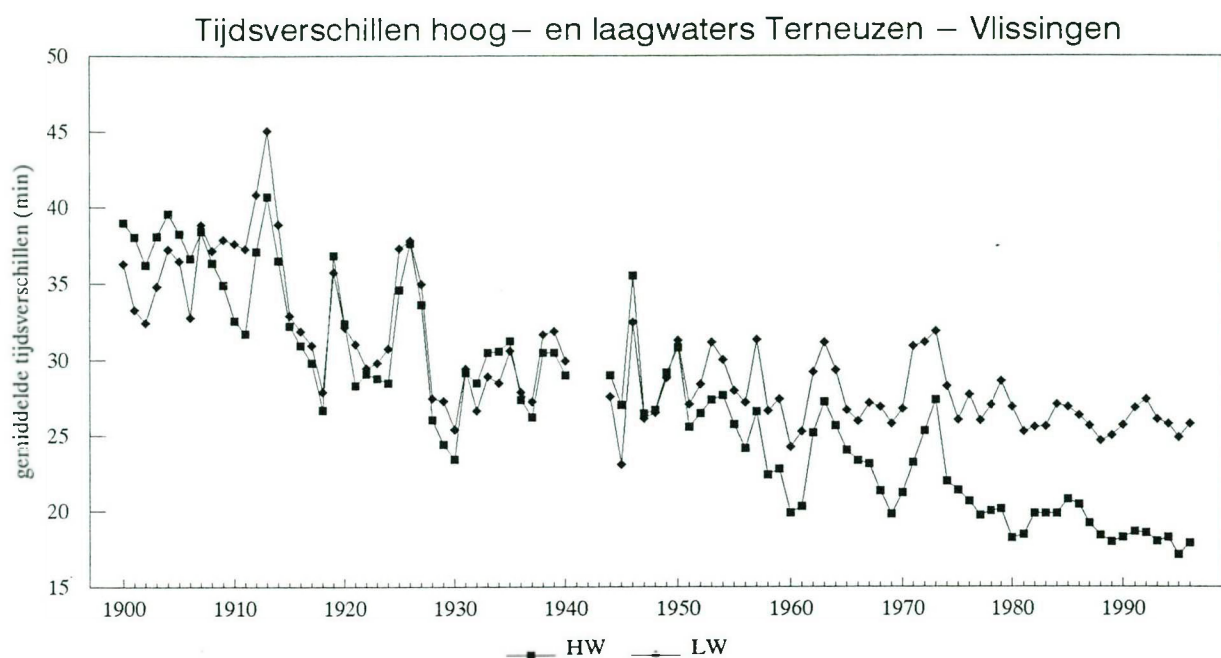


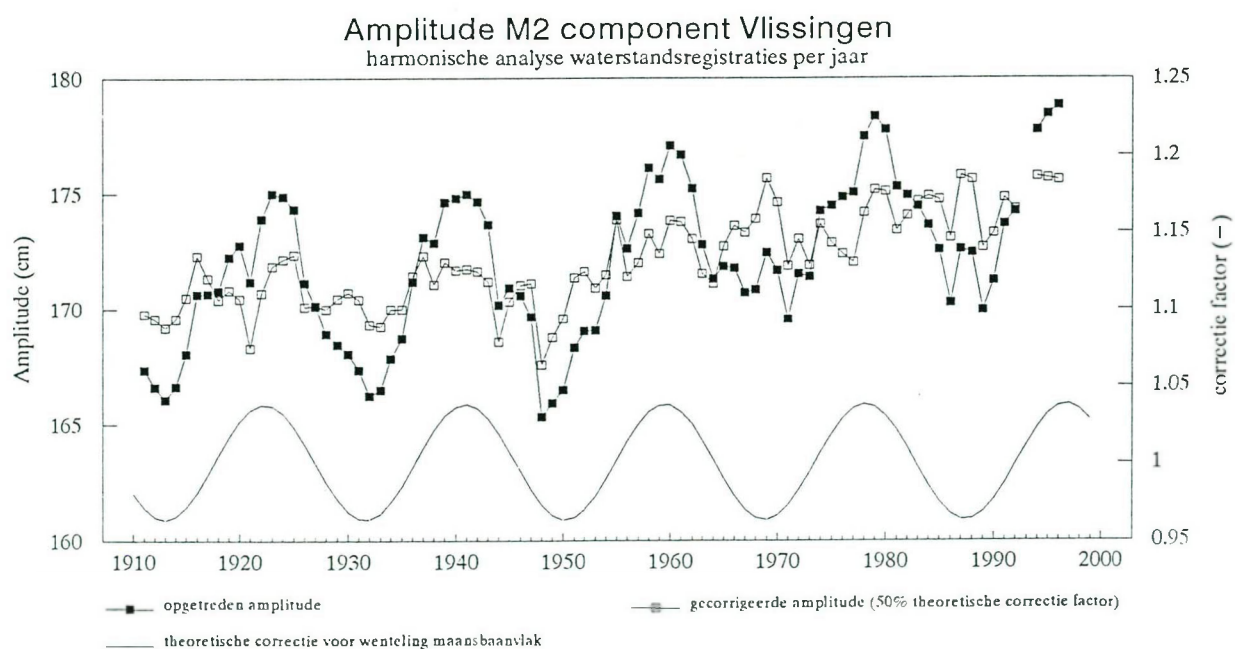
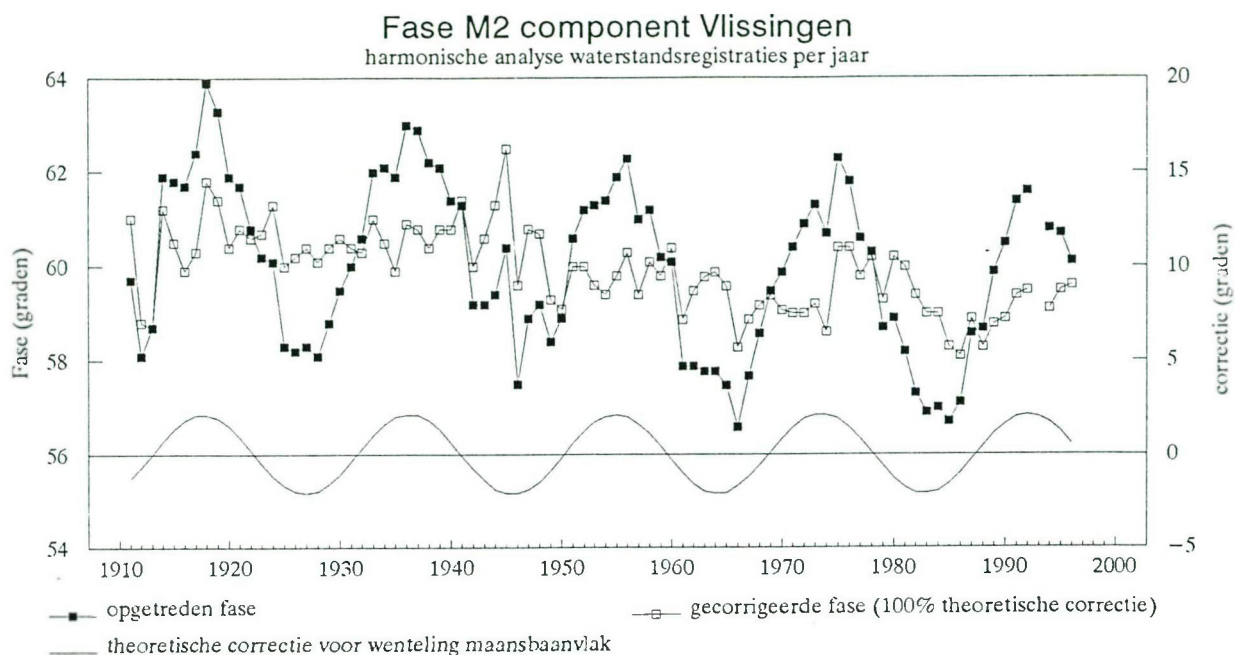


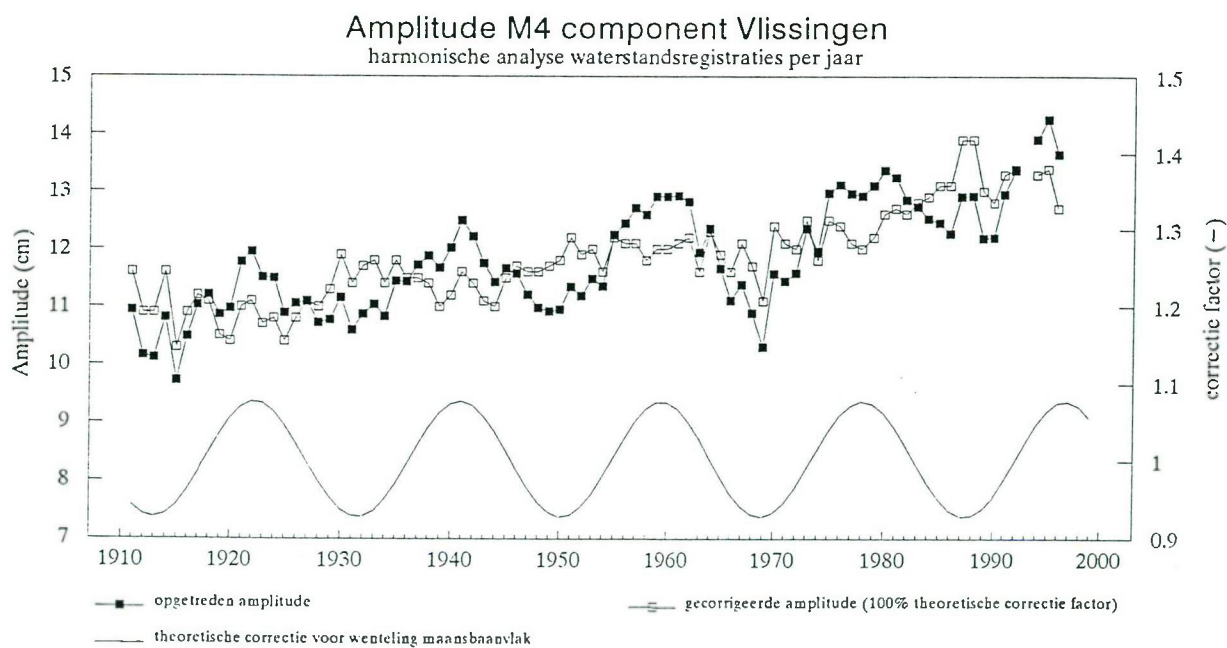
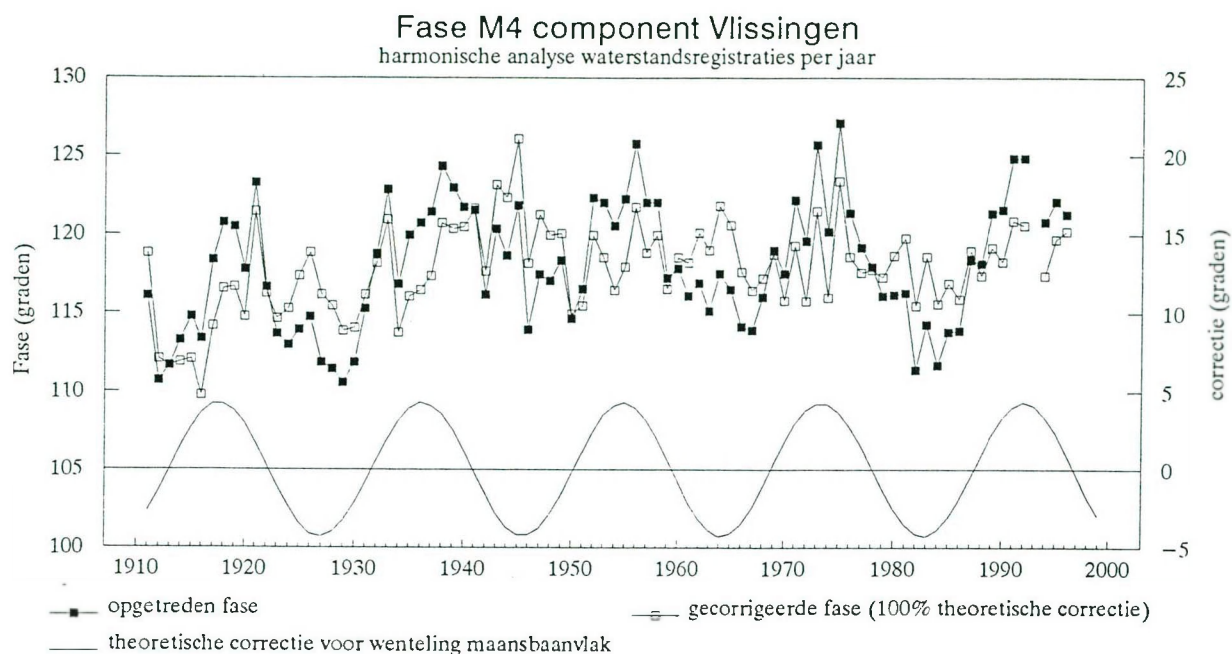
Tijdsverschillen hoog- en laagwaters Vlissingen – Westkapelle

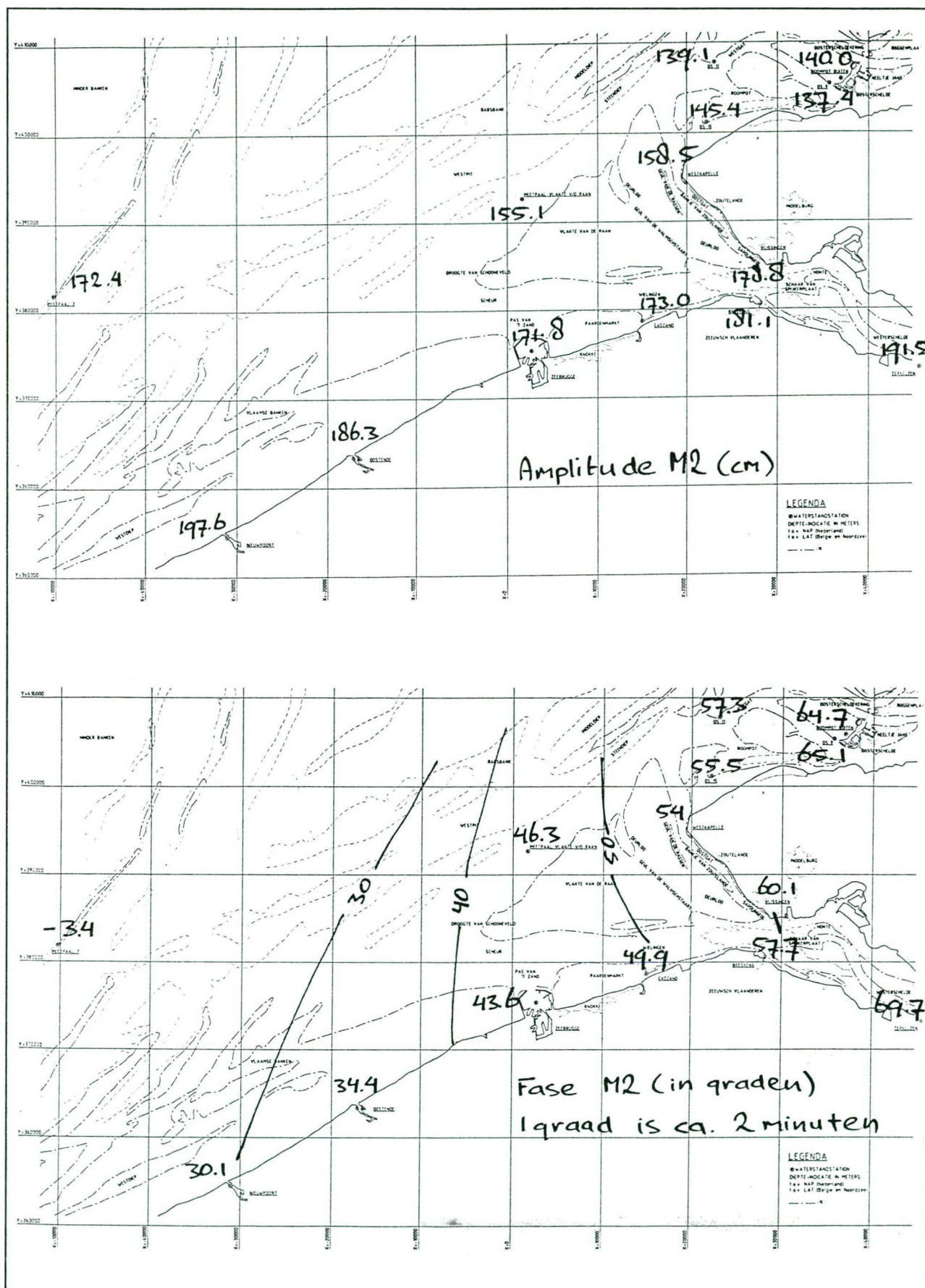


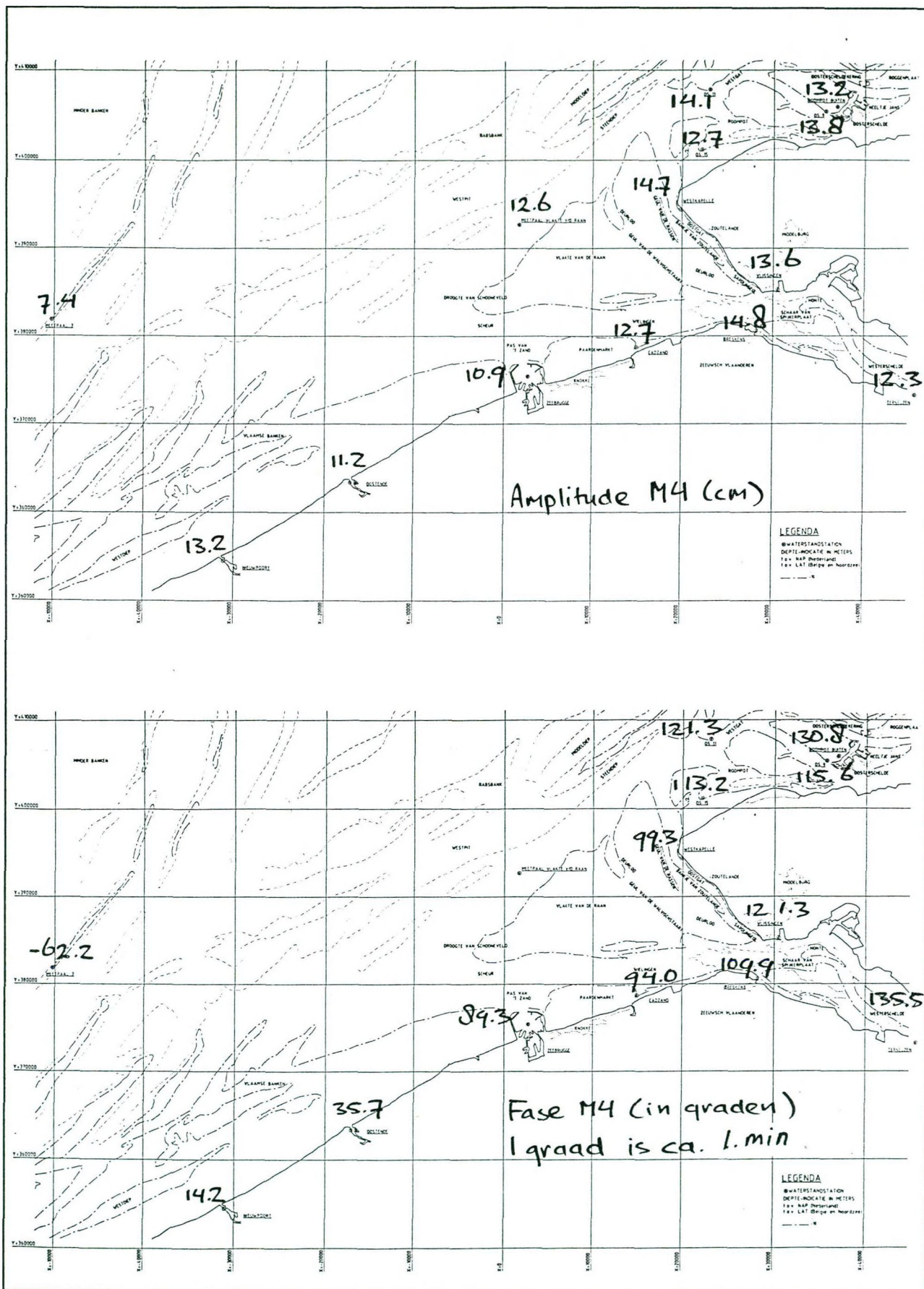


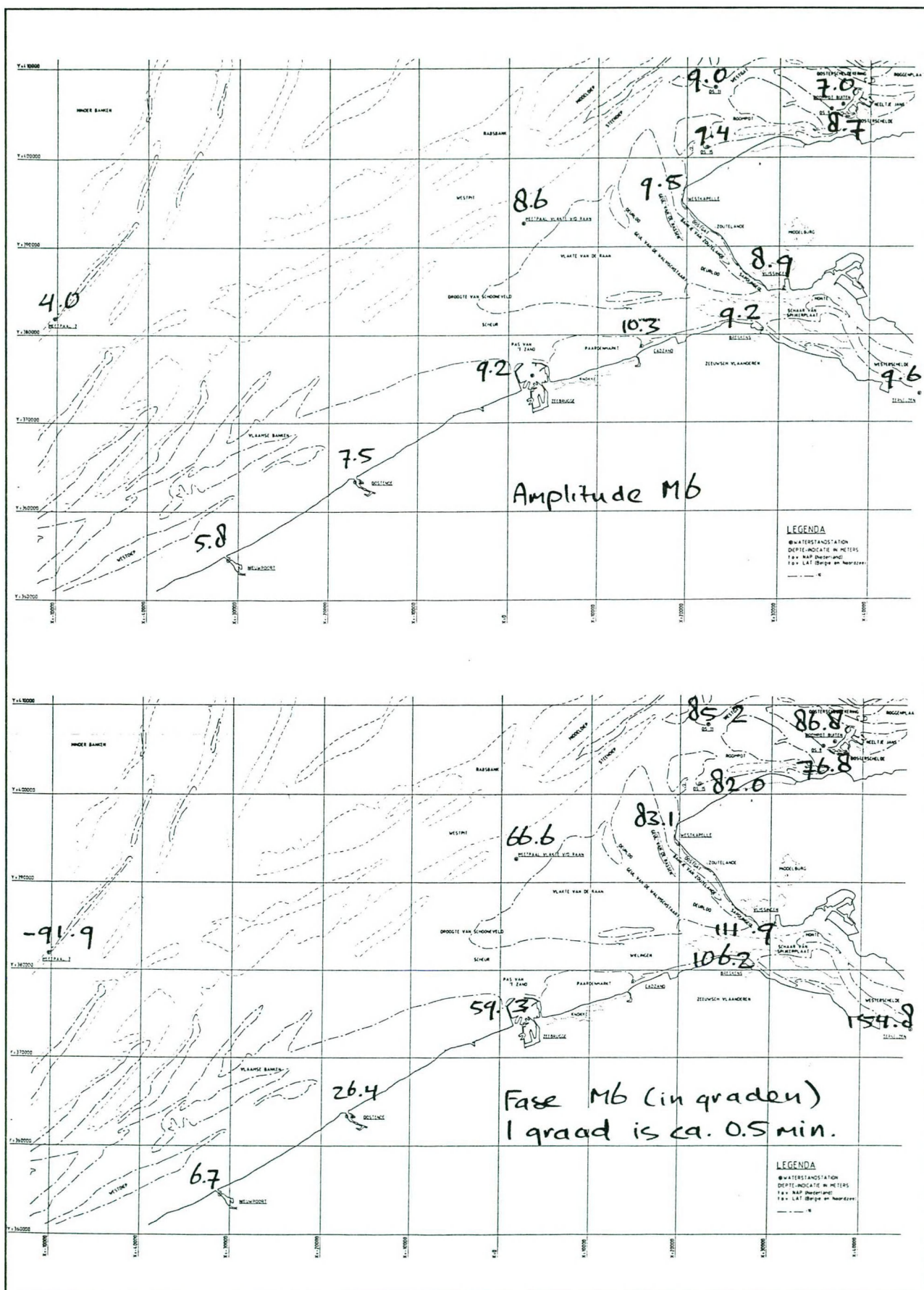




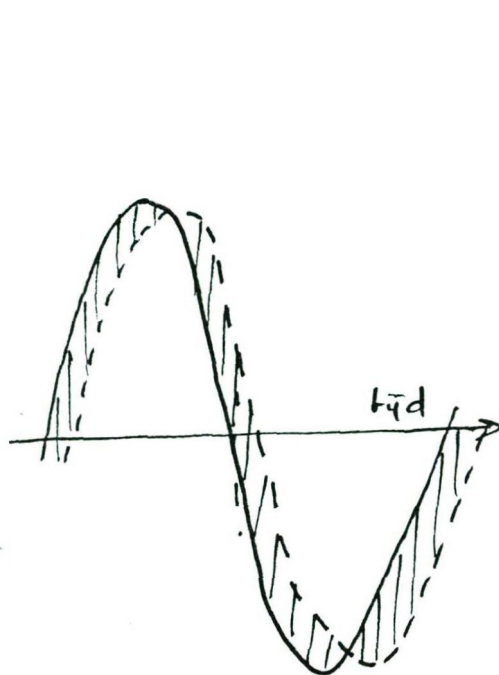




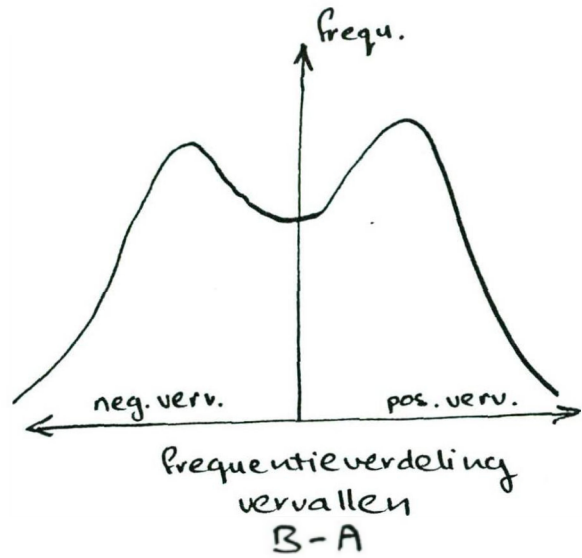




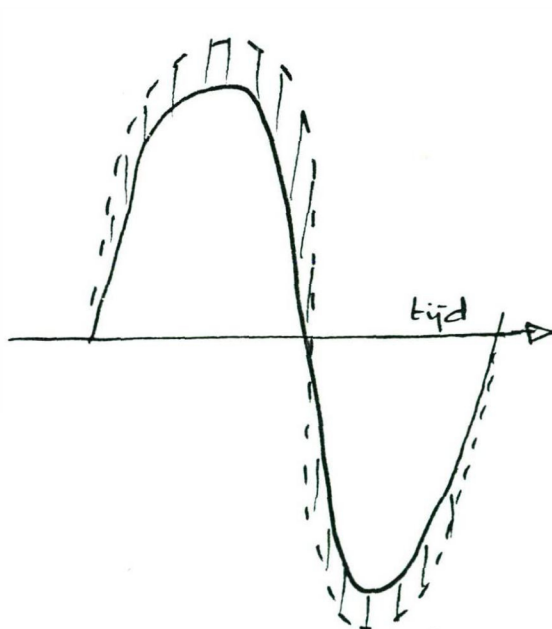
Faseverschillen :



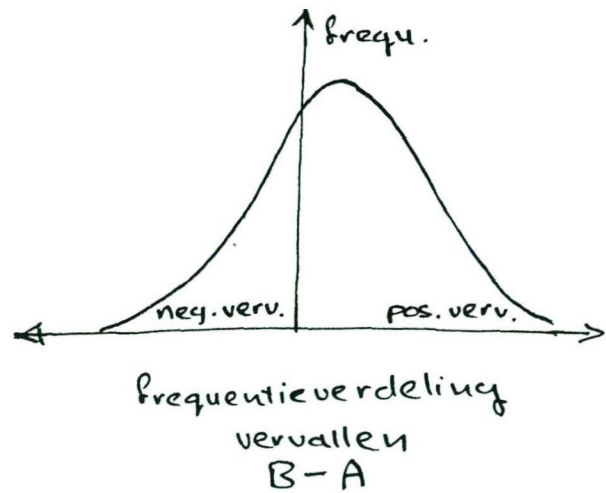
— waterstanden A
 --- waterstanden B



Amplitude en vervormingsverschillen :



— waterstanden A
 --- waterstanden B



 waterbouwkundig adviesbureau	Principeschets herkomst vervallen	datum : 28-11-1997
		project : 1029
		figuur : 4.3.1

Ingenieursbureau Svašek bv
Heer Bokelweg 145
3032 AD Rotterdam
P.O. box 91
3000 AB Rotterdam
the Netherlands
Tel. +31 - 10 - 467 13 61
Fax +31 - 10 - 467 45 59
E-mail: svasek@pi.net.