



WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM

FLANDERS HYDRAULICS
RESEARCH

NATUURRESERVAAT HET ZWIN

EVALUATIE AANVULLENDE MAATREGELEN
(STREKDAM, HERLOKALISATIE GEUL)



Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
Departement Leefmilieu en Infrastructuur
Administratie Waterwegen en Zeewezen

Model 474-5

NATUURRESERVAAT HET ZWIN EVALUATIE AANVULLENDE MAATREGELEN (STREK DAM, HERLOKALISATIE GEUL)

Maart 2004

INHOUDSOPGAVE

INHOUDSOPGAVE	i
LIJST VAN DE TABELLEN.....	ii
LIJST VAN DE FIGUREN.....	iii
1 INLEIDING.....	1
2 SITUATIESCHETS.....	4
2.1 Algemeen	4
2.2 Strandhoofd kh22.....	5
3 KUSTMORFODYNAMICA.....	8
3.1 Rol van golven en stroming.....	8
3.2 Langtransport in de branding	8
3.3 Dwarstransport.....	9
3.4 Getijgedreven transport.....	10
3.5 Zandtransport en slibtransport	11
3.6 Zandgolven.....	11
3.7 Kustmorfologische evolutie	12
3.7.1 Analyse op basis van gemiddelde aangroei- of afslagcijfers.....	14
3.7.2 Analyse voor de periode najaar 1992-najaar 1993.....	16
3.8 Morfologische evolutie van de Zwinvlakte	18
3.9 Relatie tussen de morfologische evoluties van kust en Zwin.....	18
4 EFFECT VAN CONSTRUCTIES DWARS OP DE KUST	20
4.1 Beperken van het langtransport in de branding	20
4.2 Stabiliseren van getijgeulen	21
4.3 Afbuiging en verlamming van de getijstroming	22
4.4 Interferentie met zandgolven.....	25
4.5 Numerieke modellering	25
5 VOORLOPIGE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	29
5.1 Voorlopige conclusies	29
5.2 Aanbevelingen.....	31
6 REFERENTIES	33
6.1 Kaarten & plannen.....	33
6.2 Rapporten.....	33
DANKWOORD	34

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 : Overzicht van relevante kustsecties Belgische oostkust.....	5
Tabel 2 : Gegevens strandhoofd kh22	5
Tabel 3 : Definitie van kustdelen ten oosten van de haven van Zeebrugge	12
Tabel 4 : Overzicht van suppleties langs Vlaamse kant.....	12
Tabel 5 : Overzicht van suppleties langs Nederlandse kant	13
Tabel 6 : Gehanteerde scheidingsvlakken tussen morfologische eenheden in [R21,R22,R23]	13
Tabel 7 : Gehanteerde definitie van morfologische eenheden in [R21,R22,R23]	13
Tabel 8 : Gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes voor enkele kustdelen.....	16
Tabel 9 : Aangroei- of afslagvolumes voor enkele kustdelen over de periode najaar 1992-najaar 1993	18

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1.1 : Schematische voorstelling van voorgestelde ingrepen voor een structurele oplossing van de verzanding van het Zwin	1
Figuur 2.1 : Overzicht natuurreservaat Zwin	4
Figuur 2.2 : Overzicht strandhoofdnummering Belgische Oostkust	5
Figuur 2.3 : Lengteprofiel strandhoofd kh22.....	6
Figuur 2.4 : Ligging kruinhoogte strandhoofd kh22 t.o.v. strand westwaarts van strandhoofd	7
Figuur 2.5 : Vergelijking strandligging ca. 100m westwaarts en oostwaarts van strandhoofd kh22	7
Figuur 3.1 : Denkschema van RIKZ [R10] omtrent hydrodynamica vóór Belgische oostkust.....	9
Figuur 3.2 : Netto zandtransport voorspeld door B.M.M. [R28].....	11
Figuur 3.3: Gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes per kustsectie (bron: [R23] en [R22]) ..	15
Figuur 3.4 : Vergelijking tussen gemiddelde afslagcijfers betrokken op een verschillende periode	16
Figuur 3.5 : Aangroei- of afslagvolumes per kustsectie over periode najaar 1992-najaar 1993 (bron: [R23] en [R22])	17
Figuur 4.1 : Ontwerp uit 1978 van strekdam voor oostkust [R17]	22
Figuur 4.2 : Ontwerp strekdam 1978 als mogelijke verlenging van kh22.....	22
Figuur 4.3 : Invloed van een strekdam ter hoogte van kh17 op de maximum vloedstroom.....	23
Figuur 4.4 : Invloed van een strekdam ter hoogte van kh17 op de maximum ebstroom	23
Figuur 4.5 : Overzicht van onderzochte strekdammen langs de oostkust	24
Figuur 4.6 : Rekenrooster van beschikbaar numeriek model.....	25
Figuur 4.7 : Inbouwen van een strekdam ter hoogte van kh22 in de bathymetrie van het beschikbare numerieke model	26
Figuur 4.8 : Resultaat van een springtij berekening met het bestaande numerieke model (zwart = zonder strekdam ; rood = met strekdam ter hoogte van kh22)	27

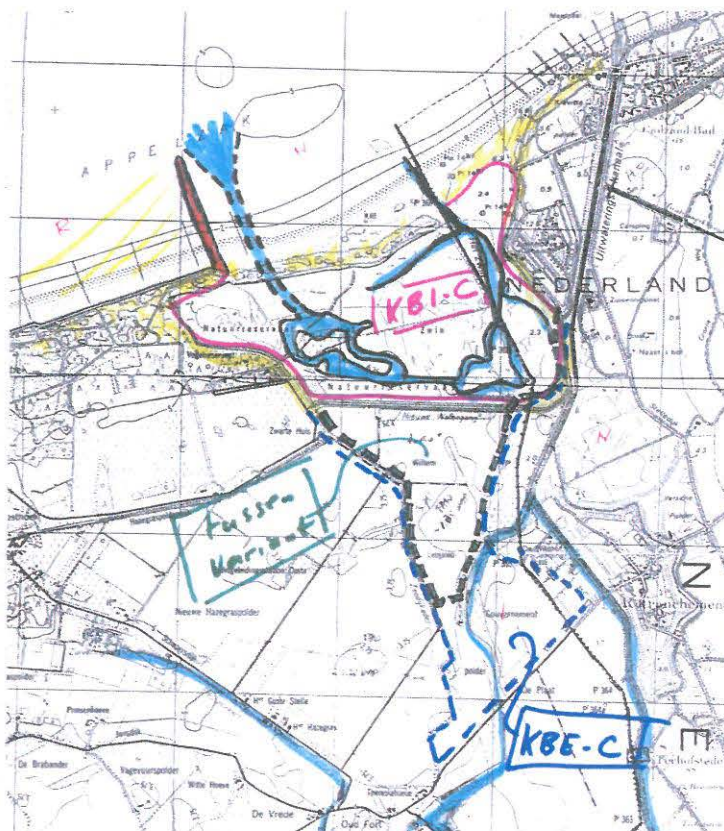
1 INLEIDING

Om de aanzandingsproblemen van het Zwin structureel aan te pakken werd door de Internationale Zwincommissie, op voorstel van haar Technische Werkgroep, gekozen voor een combinatie van grootschalige maatregelen die vooral de komberging vergroten en de afvoer van sedimenten naar zee bevorderen [R6].

Tevens wordt gedacht aan aanvullende maatregelen:

- A. het uitbouwen van een strekdam ter hoogte van het laatste strandhoofd van de Belgische oostkust (het zogenaamde strandhoofd nr. 22 van Knokke-Heist, verder afgekort als kh22),
- B. een meer westelijke herlokalisatie van de Zwinmond, met name in de richting van het (uitgebouwde) strandhoofd kh22.

De Technische Werkgroep heeft het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout verzocht om advies te verlenen omtrent het nut van deze aanvullende maatregelen.



Figuur 1.1 : Schematische voorstelling van voorgestelde ingrepen voor een structurele oplossing van de verzanding van het Zwin

Aanvullende maatregel A is voorgesteld met het oog op een beperking van de laterale aanvoer van sedimenten (langtransport) naar de Zwingeul, wat ten goede zou komen aan de stabiliteit van de Zwin getij-inlaat [R3,R5].

Aanvullende maatregel B is voorgesteld uit oogpunt van een dynamisch kustbeheer waarbij de Zwinmonding vrij spel wordt gelaten, de Zwinmonding niet regelmatig meer naar het westen moet worden teruggedregd of met vreemde materialen moet worden vastgelegd. (NB: Zowel de Vlaamse als de Nederlandse kustbeheerder passen reeds geruime tijd een dynamisch kustbeheer toe op de zeeoep ter

hoogte van de Zwinmond: elke vorm van zeewering wordt achterwege gelaten en grootschalige verzandings- en verstuivingsprocessen krijgen vrij spel.)

Van een eventuele combinatie van de aanvullende maatregelen A en B – met name een herlokalisatie van de Zwinggeul in de onmiddellijke nabijheid van strandhoofd kh22 - wordt verhoopt dat de individuele doeleinden zich samen zouden verwezenlijken, met name een stabiele geul waarlangs minder sedimenten het natuurreservaat binnen komen en die minder de neiging heeft om oostelijk af te buigen en/of te migreren.

Rekening houdend met de complexe kustmorfologische processen die zich afspelen op de aanpalende zeebodem, de vooroever, het nat strand, het droogstrand en het duin in de omgeving van het Zwin, en (voortuitlopend op de analyse van dit rapport) de beperkt beschikbare (en vaak fragmentaire of hypothetische of tegenstrijdige) informatie uit vorige studies en meetcampagnes, is het bij voorbaat niet duidelijk:

- of en hoeveel strandhoofd kh22 moet opgehoogd en/of verlengd worden,
- of en hoeveel de Zwinggeul zou moeten opgeschoven worden in de richting van kh22.

Bijgevolg dient de adviesvraag dan ook idealiter als volgt verruimd en verfijnd te worden:

A. Dragen de volgende constructieve ingrepen mogelijkerwijze bij tot de beperking van de aanvoer van sedimenten (langs- én dwarstransport) naar en de stabiliteit van de Zwinggeul ? :

- ophoging van strandhoofd kh 22:
 - beperkte ophoging (met behoud van karakter als overstroombare dam)
 - ophoging tot niet-overstroombare dam
 - tussenoplossing
- verlenging van strandhoofd kh22:
 - beperkte verlenging
 - significante verlenging (bijv. tot noordflank getijgeul Appelzak)
 - tussenoplossing
- combinatie met (één of meerdere) andere strekdam(men)
 - langs Belgische kant (bijv. ten westen van kh22)
 - langs Nederlandse kant (bijv. ten oosten van de Zwinggeul)

B. Welke lokalisatie van de Zwinggeul ten opzichte van de hierboven opgesomde constructieve ingrepen is te verkiezen ?:

- geen herlokalisatie (hoogstens een rechte trekking van de geulmond)
- herlokalisatie onmiddellijk oostelijk van het bestaande strandhoofd kh22 (dus enkel herlokalisatie ; geen uitbouw strekdam ter hoogte van kh22)
- herlokalisatie onmiddellijk oostelijk van het verhoogd en/of verlengd strandhoofd kh22 (al dan niet in combinatie met een tweede strekdam langs Belgische of Nederlandse kant)
- beperkte herlokalisatie (tussenoplossing tussen huidige ligging Zwinggeul en onmiddellijke omgeving van kh22).

In deze vraagstelling mogen tevens neveneffecten (bedreigingen en kansen) voor de Belgische oostkust en de kust van Zeeuws-Vlaanderen niet uit het oog worden verloren.

Voorliggend rapport vormt de neerslag van de studie die werd uitgevoerd om een eerste advies omtrent de (veelheid van potentiële) aanvullende maatregelen voor het Zwin te kunnen geven. Hierbij werd vooral gesteund op:

- ◆ een analyse van de literatuur
- ◆ een analyse van een aantal relevante vroegere studies op fysische modellen

♦ een – voorlopig - **beperkte numeriek modelleerinspanning**

♦ een **kwantitatieve bepaling** van de **zandbalans van enkele kustdelen**

De bedoeling van dit rapport is dan ook zoveel mogelijk relevante gegevens te verzamelen en aan te reiken aan de Nederlandse en Vlaamse morfologen voor een verdere onderlinge discussie, al zullen hier wel reeds voorafgaand aan een dergelijke discussie enkele voorlopige conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek worden geponeerd.

De structuur van dit rapport is als volgt:

- hoofdstuk 2 : situering van het Zwin reserveaat in het algemeen en van het strandhoofd nr. 22 in het bijzonder,
- hoofdstuk 3: relevante feiten inzake de hydrodynamica, het sedimenttransport en de morfodynamica in de omgeving van het Zwin,
- hoofdstuk 4: relevante effecten van constructies dwars op de kust op de hydrodynamica, het sedimenttransport en de morfodynamica
- hoofdstuk 5: voorlopige conclusies en aanbevelingen.

Het
Zwin
Zwin
Ter
origi
Binn
Weste
kustde
geul
Het Z
delen
gense
Kuste
gense

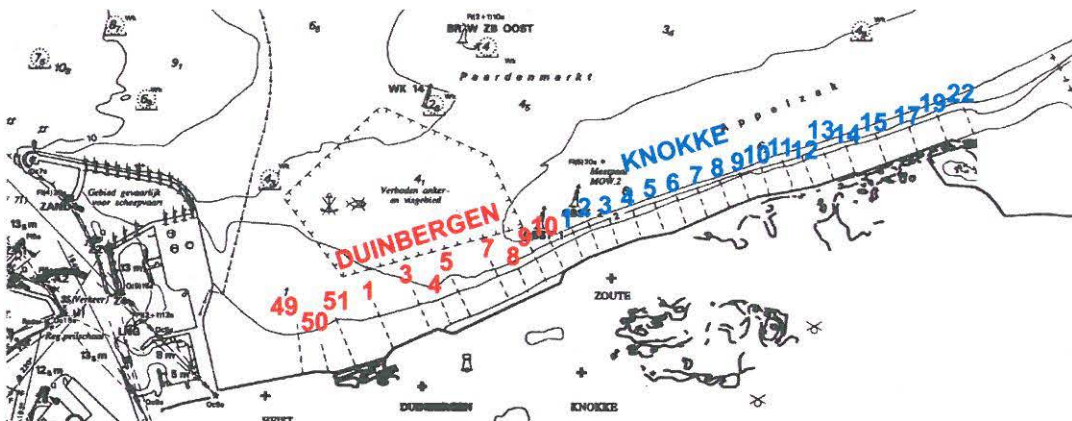
Een slufteer zoals het Zwin is gekarakteriseerd door zijn vergankelijkheid. Zonder menselijk ingrijpen zal het Zwin op langere termijn onvermijdelijk volledig afgesnoerd worden door de ontwikkeling van een zeereep ter plaatse van de huidige bres.

2.2 Strandhoofd kh22

De Belgische kust ten oosten van Zeebrugge is verdedigd met strandhoofden. Het meest nabije strandhoofd - het zogenaamde strandhoofd nr. 22 te Knokke-Heist (kh22) - bevindt zich ongeveer 1200m westelijk van de Belgisch-Nederlandse grens. Ook de kust van Cadzand is verdedigd met strandhoofden. Het meest nabije strandhoofd bevindt zich ongeveer 750 m oostelijk van de grens.

Vermits een eventuele strekdam zich zou (kunnen) situeren ter hoogte van het actuele strandhoofd kh22, wordt hieronder even nader ingegaan op de kenmerken ervan:

- ◆ ligging ten opzichte van de andere strandhoofden (zie Figuur 2.2 en Tabel 1),
- ◆ het lengteprofiel (zie Tabel 2 en Figuur 2.3),
- ◆ het kruinpeil ten opzichte van het (ca. 100m) westelijk gelegen strandpeil (zie Figuur 2.5),
- ◆ vergelijking van het westelijk en oostelijk gelegen strandpeil (zie Figuur 2.5).



Figuur 2.2 : Overzicht strandhoofdnummering Belgische Oostkust

kustsectie	situering	kustlengte
nr. 251	onmiddellijk oostwaarts van strandhoofd kh22	220 m
nr. 250	tussen strandhoofden kh19 en kh22	310 m
nr. 249	tussen strandhoofden kh17 en kh19	350 m

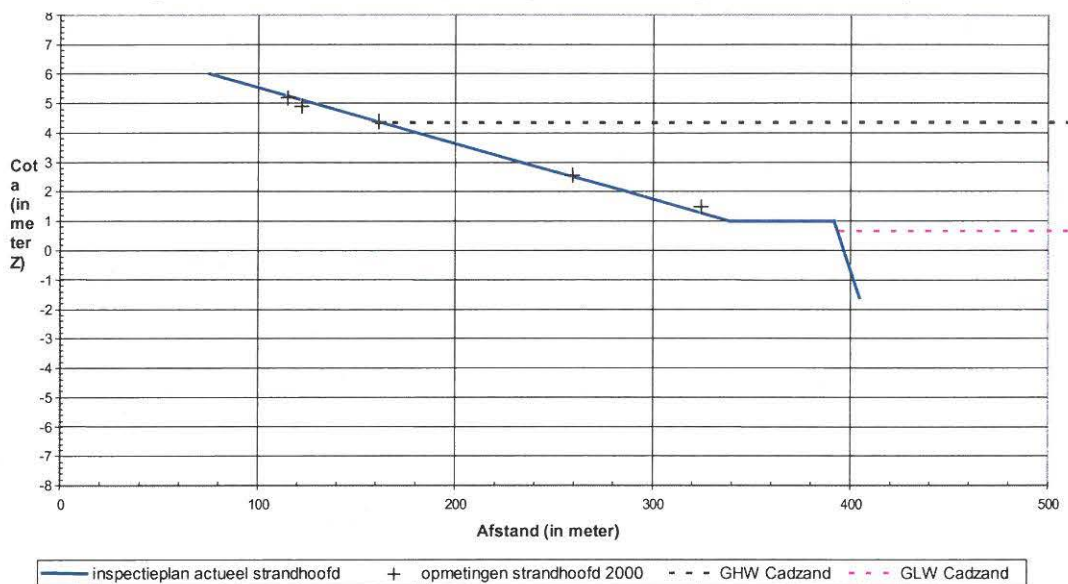
Tabel 1 : Overzicht van relevante kustsecties Belgische oostkust

strandhoofd	kh22
bouwjaar	1954
lengte	ca. 370 m
kruinhoogte wortel	Z + 6 m
Kruinhoogte teen	Z + 1 m

Tabel 2 : Gegevens strandhoofd kh22

Opmerking: Z is het gebruikte referentievlak voor cota (=peilen). Z ligt 0,108m onder T.A.W. ; T.A.W. ligt 2,303m onder N.A.P. (gegevens Afdeling Waterwegen Kust, 1998).

Opmerking: In [R1] wordt vermeld dat in het najaar 1989 en 1990 bunkerresten verwerkt zijn in het strandhoofd kh22. Het is niet duidelijk of de kruinpeilen weergegeven in Figuur 2.3 en Tabel 2 hier reeds mee rekening houden. Een nieuwe opmeting in situ is desgevallend wenselijk.



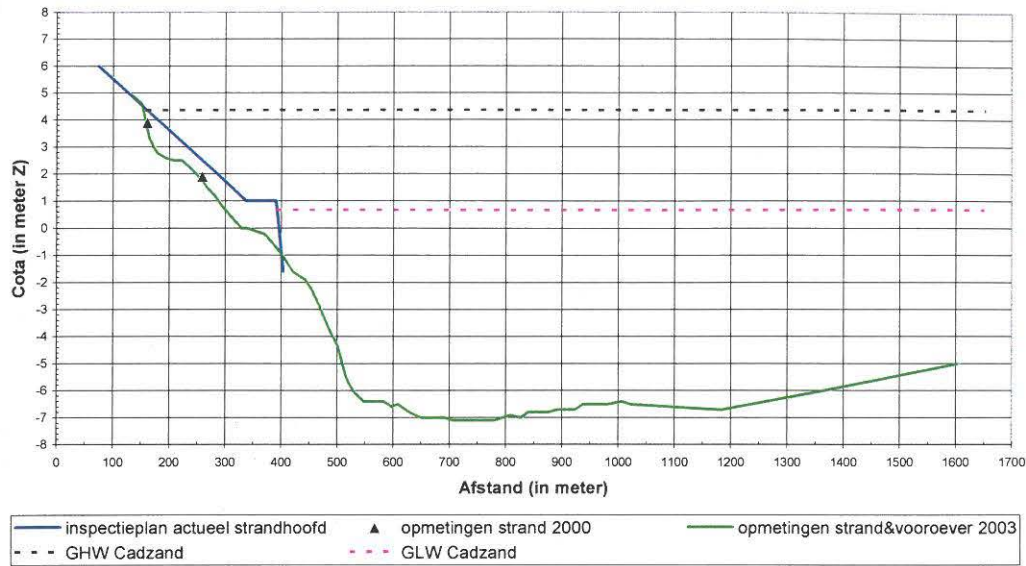
Figuur 2.3 : Lengteprofiel strandhoofd kh22

Voor de opmaak van Figuur 2.3 werd gebruik gemaakt van:

- lengteprofiel volgens inspectieplan actueel strandhoofd [K1, 1999],
- de opgemeten punten op kruin strandhoofd, afgelezen van kaart [K2, 2000] (ter controle),
- het gemiddeld hoogwater te Cadzand bij gemiddeld tij = $Z + 4.36m$ = slotgemiddelde 1991.0 [R10],
- het gemiddeld laagwater te Cadzand bij gemiddeld tij = $Z + 0.67m$ = slotgemiddelde 1991.0 [R10].

Merk op dat:

- de in 2000 opgemeten punten op de kruin van het strandhoofd goed overeenkomen met het lengteprofiel volgens het inspectieplan,
- de kruin van de kop van kh 22 iets hoger ligt dan GLW.



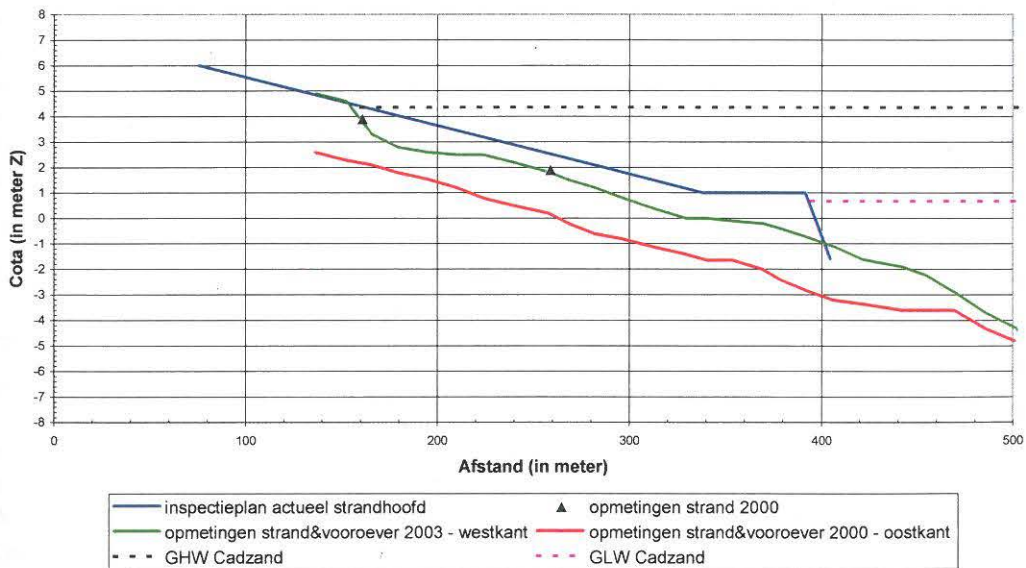
Figuur 2.4 : Ligging kruinhoogte strandhoofd kh22 t.o.v. strand westwaarts van strandhoofd

Voor de opmaak van Figuur 2.4 is gebruik gemaakt van:

- opmetingen strand, afgelezen van kaart [K2, 2000],
- opmetingen strand en vooroever (westelijke raai evenwijdig aan strandhoofd op afstand van ca. 100m), afgelezen van kaart [K3, 2003]¹.

Merk op in Figuur 2.4 dat :

- (het nat strand en) de vooroever steil afloopt naar en de zuidelijke flank vormt van de getijgeul Appelzak,
- de kruin van strandhoofd kh22 nog $\geq 0,5$ m uitsteekt boven het natstrand westwaarts ervan.



Figuur 2.5 : Vergelijking strandligging ca. 100m westwaarts en oostwaarts van strandhoofd kh22

¹ Er moet wel rekening gehouden worden met een aanpassing van coördinaatsystemen (bijv. datum ED50 bij K2 naar datum WGS84 bij K3). Zelfs rekening houdend hiermee lijkt er zich toch nog een verschuiving in de positionering van strandhoofd kh22 voor te doen indien men K2 vergelijkt met K3. Dit zou nader moeten onderzocht worden. Voor een deel heeft dat te maken met de beperktheden van de coördinaattransformatieformules.

3 KUSTMORFODYNAMICA

Er wordt hier niet uitvoerig ingegaan op dit complexe onderwerp. Er zullen enkel een aantal aspecten worden aangehaald, die relevant zijn met het oog op de verdere analyse in dit rapport.

3.1 Rol van golven en stroming

Golven (oscillerende schuifspanning over de bodem) zijn vooral efficiënt om het bodemsediment los te woelen. Een netto stroming (golfgedreven, getijgedreven en/of windgedreven) is nodig om het sediment ook te transporteren. Bij gematigde golven (en stroming) treedt er vooral bodemtransport op, terwijl bij hogere golven (en stroming) suspensietransport domineert.

3.2 Langtransport in de branding

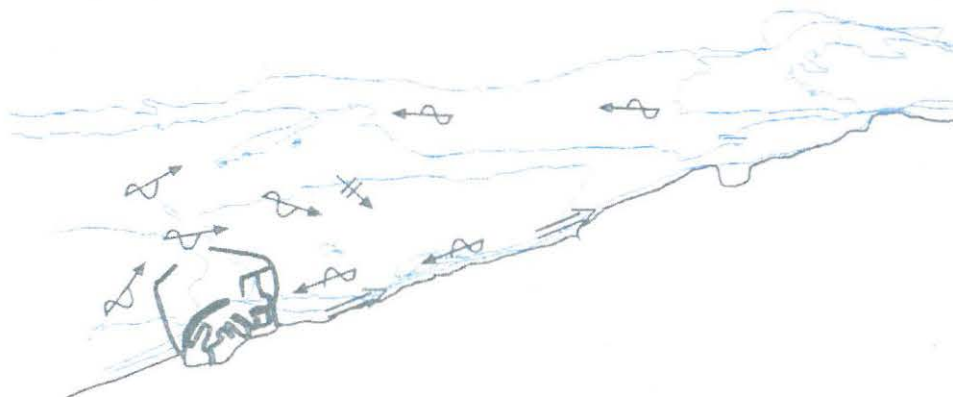
In de brekerzone veroorzaken schuin invallende golven een golfgedreven langsstroming en dus langtransport van sediment. Vermits de golfinvalsrichting variabel is in de tijd, varieert dus ook de langstransportrichting in de brandingszone in de tijd.

Rekening houdend met het wind- en golfklimaat voor de Belgische kust (overheersende zuidwest- tot noordwestwinden) wordt algemeen aangenomen dat het golfgedreven langtransport in de branding netto (=jaargemiddeld) van WZW naar ONO verloopt langsheen de kust. Dit neemt - zoals gezegd - niet weg dat op sommige tijdstippen het bruto transport ook de andere kant (van ONO naar WZW) opgaat.

Rekening houdend met datzelfde windklimaat voor de kust, kan tevens worden aangenomen dat het netto windgedreven langtransport in ondiep water ook van WZW naar ONO gaat (idem dito voor het netto eolisch langtransport op het strand).

Empirische argumenten in het voordeel van deze hypothesen:

- Merk op in Figuur 2.5 dat het strand onmiddellijk oostwaarts van het strandhoofd kh22 (oostelijke raai evenwijdig aan strandhoofd op afstand van ca. 100m ; afgelezen op kaart [K3, 2003]) beduidend lager ligt dan het strand onmiddellijk westwaarts ervan. Dit is typisch voor het laatste strandhoofd - gezien in de richting van het netto langtransport voor sedimenten - van een reeks [R14], tenminste indien men mag aannemen dat het netto langtransport in de brandingszone rondom kh22 van WZW naar ONO gaat.
- De monding van de Zvingeul heeft de neiging om oostwaarts om te buigen en/of te migreren.
- Het oostwaarts uitgroeien in de periode 1979-1989 van een 'spits' of zandtong op het strand langs de Belgische zijde van de Zvingeul, wat volgens [R21] voor een groot gedeelte op gang is gebracht door strandsuppleties te Knokke-Heist (1977-1979) en te Knokke-Zoute (1986).
- Een eerste analyse van de eindresultaten (opname 2002, maar ook opnames van 2000 en 2001) van het proefproject 'Kwantitatieve bepaling van het zandtransport langsheen de Vlaamse Kust d.m.v. hyperspectrale data' [R4] tonen aan dat er materiaal van het (suppletie)strand vóór Knokkebad op het strand vóór het Zwin belandt. Verdere analyse zou de hoeveelheden kunnen begroten (ook al is daarmee nog geen uitsluitsel te geven over de hiervoor verantwoordelijke transportmodi: langtransport in branding ? dwarse afslag naar en langtransport in Appelzak gevolgd door opbouw strand Zwin via dwarstransport ? bijdrage eolisch transport ?).
- Aanvullend kan worden gesteld dat deze hypothese ook in overeenstemming is met het denkschema (zie Figuur 3.1) dat RIKZ in [R10] heeft gehanteerd voor de studie van de morfologische ontwikkeling van de Westerscheldemond.



De sedimenttransporten voor de kust van België worden bepaald door verschillende hydraulische condities, namelijk;

- windgedreven stroming 
- reststroming van het getij 
- brandingsstroming 

Figuur 3.1 : Denkschema van RIKZ [R10] omtrent hydrodynamica vóór Belgische oostkust

Empirische argumenten die in tegenspraak zijn met de hypothesen of die minstens nopen de hypothese te nuanceren:

- In [R12] wordt gerapporteerd dat na suppleties in de Nederlandse kustdelen 'Zwingeel' en 'Cadzand-West' (secties 259 tot en met 266, 1997) tenminste een gedeelte van het gesuppleerde zand door de natuurlijke morfologische transportprocessen terugkeert in de richting van de Zwingeel en de zandvang ; dit was zichtbaar door (plaats en materiaal van) ontstaan en westelijke aangroei van een zandtong, verbonden met het droogstrand aan de Nederlandse zijde van de Zwingeel ;
- De kustlijnoriëntatie van de Nederlandse kustdelen 'Zwingeel' en 'Cadzand-West' is natuurlijk ook anders dan de Belgische kustdelen 'Zwin', 'Lekkerbek' of 'Knokke-Zoute'. Indien men aanneemt dat het golfklimaat langs beide zijden van de grens niet fundamenteel anders is, volgt uit een andere kustlijnoriëntatie ook een andere golfinvalsrichting, wat kan leiden tot een andere (netto) langstransportrichting van sedimenten.
- In [R2] wordt melding gemaakt van een aangroeizone (in 1994) in een kustparallele strook ter hoogte van de vooroevervoet (vanaf monding uitwateringskanaal tot Zwin) die zich westwaarts uitbreidt. Dit feit, gecombineerd met de ligging tegenover de gesuppleerde zone van Cadzand-West, wordt toegeschreven aan een voeding van die zone vanaf Cadzand-West, m.a.w. op een lokaal netto westwaarts transport.

3.3 Dwarstransport

Door golfrefractie draaien schuin invallende golven bij naarmate ze op ondieper water komen (t.t.z. naarmate de golven de bodem beter voelen), en wel zodanig dat de golfkammen meer parallel verlopen met de kust. Hoge golven (bij storm) vallen dus zo goed als loodrecht in op de kust, waardoor het dwarstransport gepromoot wordt ten nadele van het golfgedreven langstransport.

De aanwezigheid van de getijgeul Appelzak, wiens zuidelijke flank zich situeert aan de koppen van de strandhoofden van Knokke, maakt dat (afgeslagen) sedimentmateriaal dat door dwarstransport zee-

waarts verplaatst wordt geen laagwaterbrekerrug vormt, maar in de Appenzak belandt en vandaar in langse zin wordt afgevoerd. (Dit vormt een belangrijk element in het structureel erosieprobleem van de stranden te Knokke-Zoute [R8,R7].)

Bij relatief kalm weer bevestigt de meetcampagne [R2] op de vooroever in de omgeving van kh22 dat het dwarstransport klein is ten opzichte van het langstransport en dat het dwarstransport dan nog (meestal) zeewaarts gericht is. In [R2] durft men hieruit meteen de conclusie trekken dat de rol van de vooroever in het verzandingsproces van het Zwin beperkt is. Deze laatste conclusie is wellicht iets te voorbarig, zonder verdere aanvullende meetgegevens in andere locaties op de vooroever van het Zwin en zonder (gelijktijdige) metingen op het natstrand.

Bij storm blijkt in ieder geval uit de waarnemingen van de zandvangen [R21] dat een snelle opvulling van de (noordelijke) zandvang optreedt, zonder dat daarmee meteen duidelijk is op welke wijze (dwars- en/of langstransport ; vanaf vooroever en/of branding) dit sediment daar hoofdzakelijk terecht komt.

3.4 Getijgedreven transport

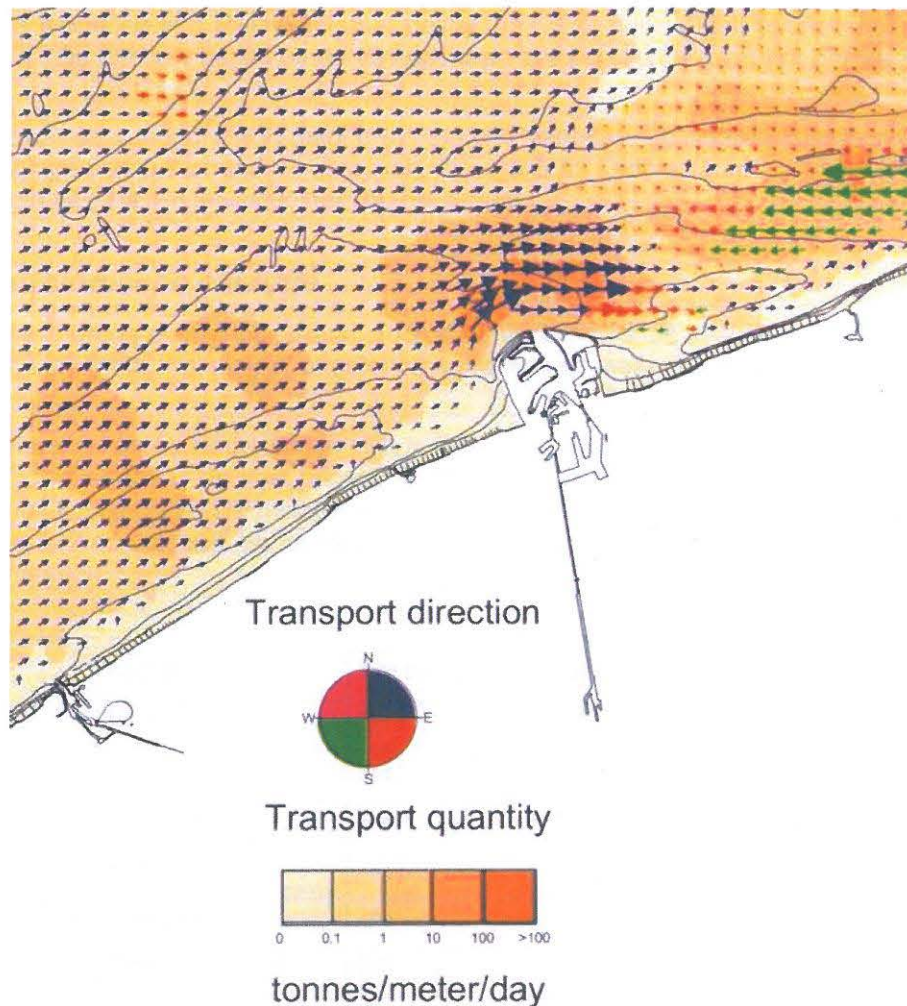
De getijstroming (in de Appenzak geul) bestaat uit een stroming die quasi parallel is aan de kust (platte tijellips) : bij vloed van WZW naar ONO en bij eb van ONO naar WZW. Het (bruto) langstransport van sediment onder invloed van het getij wisselt dus ook van richting. Volgens het denkschema van RIKZ (zie Figuur 3.1 uit [R10]) is de Appenzak tegenwoordig een ebschaar, d.w.z. dat de reststroming van het getij (=netto verplaatsing van water, niet noodzakelijk van sedimenten !) in de Appenzak in de ebrichting is. Figuur 3.1 doet strikt gezien echter geen uitspraak over de netto richting van het getijgedreven langstransport van sedimenten.

In [R9] wordt geponeerd dat het netto getijgedreven langstransport van WZW naar ONO is, gelet op de 'dominantie van de vloedstroom t.o.v. de ebstroom'.

Uit de meetcampagne [R2] op de vooroever in de omgeving van kh22, blijkt echter dat bij kalm weer het resulterend transport van ONO naar WZW is, m.a.w. het ebtransport domineert (zie ook Figuur 3.1). Slechts in die periodes binnen de meetcampagne waarin een westenwind heerste (met bijhorende golfwerking), was het vloedtransport dominant.

In Figuur 3.2 worden resultaten getoond van het netto-zandtransport (bodem- en suspensietransport) zoals berekend door de B.M.M. met een tweedimensionaal model op een grid met een resolutie van 750 m x 750 m. Merk op dat de resolutie nogal grof is om de netto transportpaden op de vooroever en aanpalende zeebodem (bijv. Appenzakgeul) nauwkeurig te kunnen beschrijven. Bijgevolg is een interpretatie van de verschillen ter hoogte van de Appenzakgeul die worden gesuggereerd door vergelijking van Figuur 3.2 met Figuur 3.1 niet eenvoudig. Bovendien is ons (momenteel) noch van de berekeningen die ten grondslag liggen aan het denkschema in Figuur 3.1, noch van de rekenresultaten in Figuur 3.2 voldoende details bekend over de wijze waarop ze werden bekomen en gevalideerd, waardoor elke vergelijking moeilijk ligt.

Verder uit de kust (Pas van het Zand, Scheur, Wielingen) lijkt er echter wel een goede overeenstemming te zijn tussen Figuur 3.2 en Figuur 3.1.



Figuur 3.2 : Netto zandtransport voorspeld door B.M.M. [R28]

3.5 Zandtransport en slibtransport

Uit de meetcampagne [R2] op de vooroever in de omgeving van kh22 blijkt dat het overgrote deel van het sedimenttransport uit slib bestaat, ook al neemt het aandeel zandtransport iets toe naarmate de golfwerking belangrijker wordt.

Hieruit zou men op het eerste gezicht een argument kunnen halen voor de hypothese dat de rol van de vooroever beperkt is in het verzandingsproces (tenzij bij stormcondities).

Tijdens de meetcampagne [R25] in de Zwinvlakte zelf, werden gedurende een springtij (bij kalm weer) het sedimenttransport doorheen enkele raaien opgemeten. Doorheen de zogenaamde raai Zuid (= een dwarse raai in de Zwingeel) stroomde netto 9.5 ton sediment per getij in landwaartse richting, waarvan 34% zand.

3.6 Zandgolven

De observatie van de duinvoet en van het strand sinds 1820 door Rijkswaterstaat [R12,R13] heeft geleid tot de identificatie van grootschalige autonome kustprocessen, de zogenaamde 'zandgolven', ondermeer op het kustgedeelte Zeeuws-Vlaanderen (periode=60 à 140 jaar ; golfengte langs kust=1 à 2 km ; migratiesnelheid=ca. 100m/jaar, kustlijnverandering=100 à 200 m). Ook langs de Vlaamse kust wordt dit fenomeen waargenomen [R13,R7].

Uitgaande van de prognose van Rijkswaterstaat gesteld in 1988, zal de kust rondom het Zwin zich uitbouwen tot 2050. De uitbouw begint bij de vooroever en zal zich verder over het gehele profiel uitbouwen [R13].

Volgens [R7] kunnen de zandgolven in theorie (afhankelijk van strandhelling en kustlijnverandering), verticale peilwijzigingen op het strand veroorzaken van 1 à 8 m. Veelal wordt, volgens [R7], echter een zandgolfhoogte van 1 à 1,5 m vastgesteld op het terrein.

3.7 Kustmorfologische evolutie

De bodem van duin², droog strand, nat strand, vooroever en aanpalende zeebodem varieert in de tijd onder invloed van een aantal 'natuurlijke' of autonome processen, maar ook als gevolg van menselijke ingrepen.

Zowel langs de Vlaamse als de Nederlandse kust is tijdens de afgelopen decennia de kustlijn- en profielevolutie gevolgd. Daartoe is de kust opgedeeld in een aantal kustdelen (zie Tabel 3) die elk bestaan uit een aantal kustsecties. De huidige sectienummering langs Vlaamse kant loopt bijvoorbeeld van sectienummer 217 onmiddellijk ten oosten van de oostdam van Zeebrugge tot het sectienummer 277 ('Cadzand-Oost').

Kustdeel	Van sectie	Tot sectie
Heist	217	221
Duinbergen	222	226
Albertstrand	227	232
Knokke-Zoute	233	241
Lekkerbek	242	249
Zwin	250	255
Zwingeel	256	259
Cadzand-West	260	266
Cadzand-Oost	267	277

Tabel 3 : Definitie van kustdelen ten oosten van de haven van Zeebrugge

Wat betreft menselijke ingrepen, wordt een overzicht gegeven van enkele suppleties langs Vlaamse en langs Nederlandse kant in resp. Tabel 4 en

Tabel 5.

jaartal	van sectie	tot sectie	lengte [m]	volume in beun [Mm ³]
1977-1979	217	250	8914	8.4
1986	232	243	2963	0.9
1986	217	219(?)	<500	0.5
1994	217(?)	218(?)	<500	0.1
1999	233	243	2728	0.5

Tabel 4 : Overzicht van suppleties langs Vlaamse kant

Opmerking: om de in Tabel 4 vermelde volumes in beun om te rekenen naar volumeverschillen in situ (=volumeverschil voor en na suppleren in de desbetreffende secties), kan ruwweg een factor 0.8 ge-

² De evolutie van de zogenaamde zeereep (gelegen boven het morfologisch onderdeel 'duin') wordt in dit rapport niet meegenomen.

hanteerd worden [R8]. Wat betreft de suppletie van 1986, werden van de 910286 m³ in beun, 761700m³ aangetroffen in situ.

Opmerking: de suppletie van 1994 (10-20 oktober) betreft een opspuiting met baggerspecie (70% zand) uit de haven van Zeebrugge via een persleiding op het laagste deel van het strand [R23]

jaartal	kustdeel	volume [Mm3]
1988	Cadzand-Oost	0.9
1990	Tienhonderdpolder	0.6
1990	Cadzand-West	0.3
1994	Cadzand-Oost	0.6
1994	Cadzand-West	0.1
1998	Tienhonderdpolder	0.3
2001	Tienhonderdpolder	0.1
2001	Cadzand	0.3

Tabel 5 : Overzicht van suppleties langs Nederlandse kant

Een veelheid van kaarten, grafieken, tabellen en rapporten is beschikbaar, waarin de evolutie (van bepaalde morfologische eenheden) per kustsectie wordt bepaald aan de hand van een (beperkt) aantal opnames per jaar.

[Opmerking: Het WLB heeft ter aanvulling op deze informatiebronnen, luchtfoto's van het Nationaal Geografisch Instituut opgevraagd die betrekking hebben op het Zwin (jaartallen: 1948, 1967, 1969, 1980, 1988, 1998).]

Uit de beschikbare rapporten omtrent de kustmorfologische evolutie kan men aangroei- of afslagvolumes afleiden per kustsectie. In bedoelde rapporten [R21,R22,R23] wordt gebruik gemaakt van een aantal morfologische eenheden, die praktisch gedefinieerd worden aan de hand van bepaalde horizontale vlakken. Zie Tabel 6 en Tabel 7. (Voor meer details omtrent de gehanteerde definities en werkwijze wordt in deze rapporten verwezen naar [R24]. Voor het onderdeel teledetectie behandelt ook [R27] de algemene definities.)

horizontaal vlak	situering t.o.v. referentievlak Z
duinvoet	Z+7.0m
hoogwaterlijn	Z+4.5m
laagwaterlijn	Z+1.5m
vooroeervoet	Z-4.0m

Tabel 6 : Gehanteerde scheidingsvlakken tussen morfologische eenheden in [R21,R22,R23]

onderdeel	situering t.o.v. referentievlak Z
duin	boven Z+7.0m
droog strand	van Z+4.5m tot Z+7.0m
nat strand	van Z+1.5m tot Z+4.5m
vooroever	van Z-4.0m tot Z+1.5m
aanpalende zeebodem	onder Z-4.0m, tot ca. 1500m uit de kust*

Tabel 7 : Gehanteerde definitie van morfologische eenheden in [R21,R22,R23]

Opmerking: om de gehanteerde scheidingsvlakken enigszins te kunnen relateren aan andere betekenisvolle peilen, kan in herinnering worden gebracht dat het gemiddeld getij te Cadzand gekenmerkt

wordt door $HW=Z+4.36m$ en $LW=Z+0.67m$, en dat de kruinpeilen van strandhoofd kh22 zich situeren op $Z+6.0m$ (wortel) tot $Z+1.0m$ (teen).

Wat betreft de beschikbare rapporten die de kustmorfologische evolutie beschrijven, zijn er enerzijds de rapporten aangaande de evolutie van duin, droog strand en nat strand (op basis van DTM uit teledetectie) en anderzijds de rapporten aangaande de evolutie van vooroever en aanpalende zeebodem (op basis van koppeling DTM uit lodingen en DTM uit teledetectie). Beide reeksen rapporten bevatten ondermeer:

- getabelleerde volumeverschillen tussen opéénvolgende (opmetings)data voor de beschouwde morfologische eenheden,
- gemiddelde aangroei- of afslagcijfers (voor de som van de beschouwde morfologische eenheden) per sectie over de beschouwde monitoringsperiode (=bijv. vanaf 1979 of 1986 tot het tijdstip van de meest recente opnamedatum)

De reeks rapporten met betrekking tot duin, droog strand en nat strand bevatten tevens een:

- grafische voorstelling van de tijdsevolutie van de (getabelleerde) volumeverschillen (voor de som van de beschouwde morfologische eenheden) per sectie (en dit voor de meeste, doch niet steeds alle secties); deze figuren vermelden vaak ook een gemiddeld aangroei- of afslagcijfer over de beschouwde monitoringsperiode in de grafieken (die niet noodzakelijk dezelfde is als deze in de tabellen, waardoor ook de gemiddelde aangroei- of afslagcijfers beduidend kunnen verschillen !).

Idealiter zouden uit voornoemde rapporten syntheses kunnen gemaakt worden, zodanig dat per sectie de tijdsevolutie van de het sedimentvolume in een zone tot ca. 1500m uit de kust kan bepaald worden, met name door somming van de volumeverschillen voor duin+droog strand+nat strand uit de ene reeks rapporten en de volumeverschillen voor vooroever+aanpalende zeebodem uit de andere reeks rapporten. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de gehanteerde 'tijdstippen' in beide reeksen rapporten terminologisch verschillen (om redenen eigen aan de gehanteerde methodologie), waardoor het samenvoegen van volumeverschillen uit beide reeksen rapporten met enige omzichtigheid dient te gebeuren.

Indien een tijdsevolutie van de totale volumeverschillen per sectie bekend zou zijn, kan men een globale zandbalans van kustdelen (tot ca. 1500m uit de kust) maken. Zo zou een balans van de de totale aangroei of afslag uit de zone van de oostdam van Zeebrugge tot het strandhoofd kh22 (sectienummers 217 tot en met 250) mogelijks (voor de beperkingen hieromtrent, cf. infra) enig licht kunnen werpen omtrent de rol die het actuele strandhoofd speelt en/of gespeeld heeft (en dan ook omtrent het nut van een eventueel verlengd/verhoogd strandhoofd of strekdam in de toekomst).

De gedetailleerde tijdsevolutie bepalen van de totale volumeverschillen per sectie is echter niet mogelijk met een beperkte inspanning, tenzij men over de digitale gegevens beschikt (wat voorlopig niet het geval is voor het WLB).

Daarom zal hier volstaan worden met een tweetal partiële analyses:

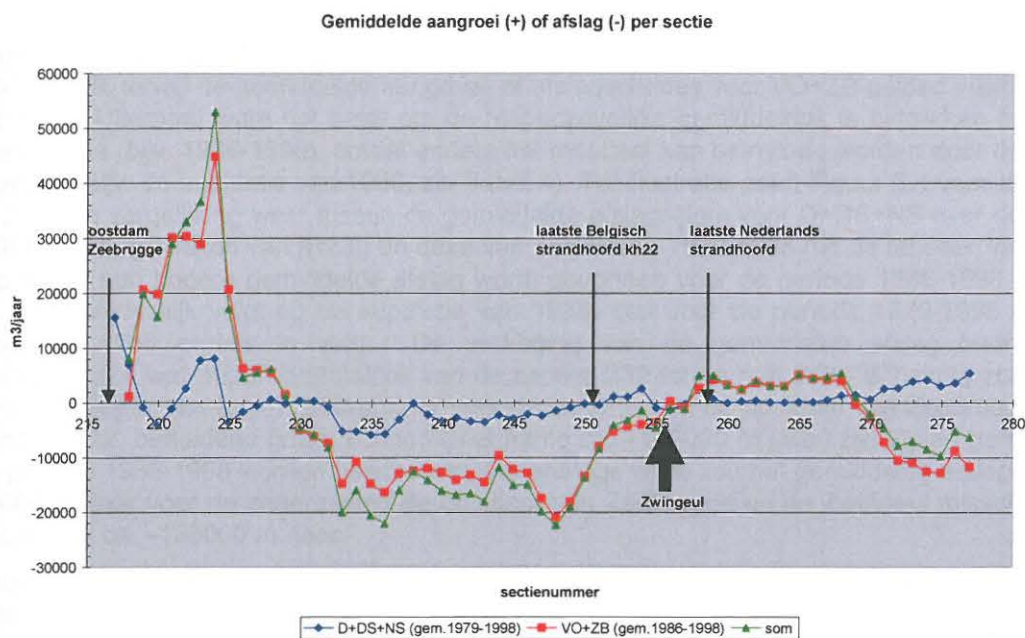
- ♦ een analyse op basis van de gemiddelde aangroei- of afslagcijfers die vermeld staan in beide reeksen rapporten (en die dus niet werden berekend door het WLB)
- ♦ een analyse voor de periode van najaar 1992 tot najaar 1993 ; deze periode werd uitgekozen omwille van de beschikbaarheid van gegevens omtrent de sedimentatie in het Zwin (met name op basis van de evolutie van de noordelijke zandvang tijdens deze periode, zie 3.8) en omdat binnen deze periode geen suppleties zijn uitgevoerd langs Vlaamse kant (zie Tabel 4)

3.7.1 Analyse op basis van gemiddelde aangroei- of afslagcijfers

Voor de kustsecties gelegen tussen de oostdam van Zeebrugge en het kustdeel Cadzand-Oost (sectienummers 217 tot en met 277) kan men de gemiddelde aangroei- of afslagvolumes afleiden:

- van duin (D) + droogstrand (DS) + natstrand (NS) uit de grafieken van [R23] ; het betreft hier gemiddeldes over de periode 1979-najaar 1998,
- van vooroever (VO) + aanpalende zeebodem (ZB) uit de tabellen in [R22] ; het betreft hier gemiddeldes over de periode 1986-najaar 1998.

Beide deelresultaten, evenals hun som (=D+DS+NS+VO+ZB) worden per sectie voorgesteld in Figuur 3.3.



Figuur 3.3: Gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes per kustsectie (bron: [R23] en [R22])

In Tabel 8 worden voor enkele kustdelen de volgende grootheden voorgesteld:

- de sectienummers waaruit de beschouwde kustdelen bestaan,
- de totale kustlengte van het kustdeel,
- de resulterende (=sommatie over vermelde sectienummers) gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes van duin+droog strand+nat strand [R23],
- de resulterende (=sommatie over vermelde sectienummers) gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes van vooroever+aanpalende zeebodem [R22],
- de som van de twee voorgaande volumes
- de cumulatieve som van de afgeleide aangroei- of afslagvolumes vanaf de oostdam van Zeebrugge tot en met het beschouwde kustdeel.

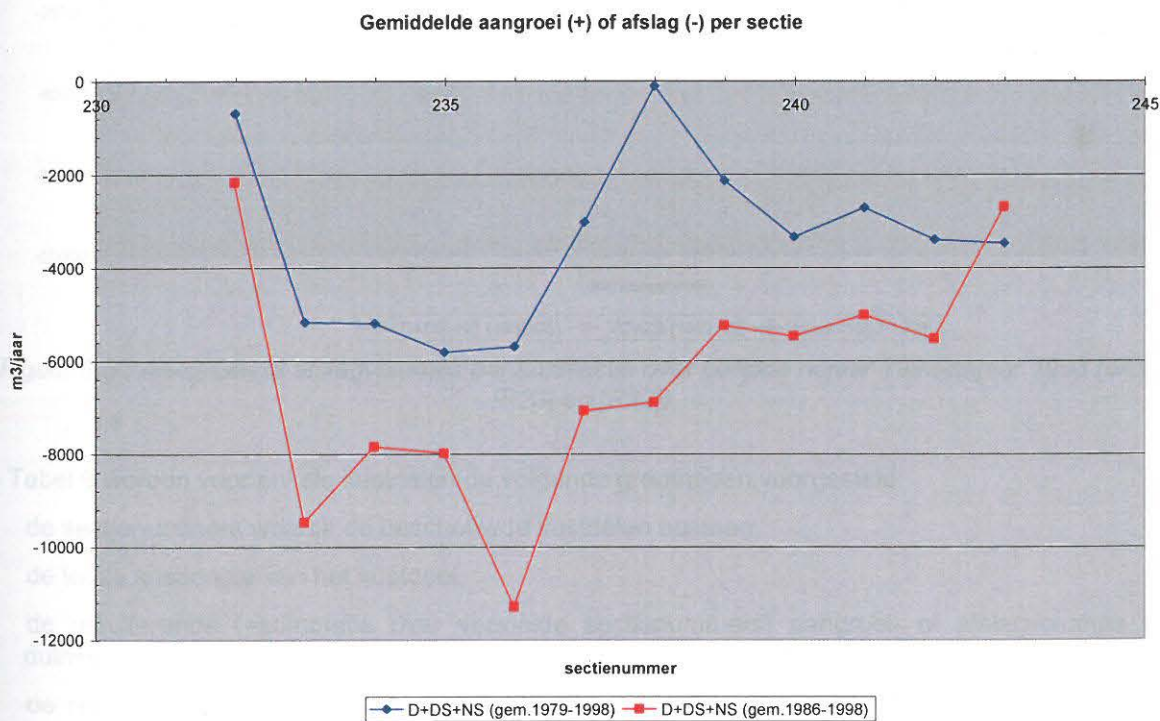
	van	tot	totale lengte	aangroei(+) of afslag(-) D+DS+NS (1979-1998)	aangroei(+) of afslag(-) VO+ZB (1986-1998)	totale aangroei(+) of afslag(-)	cumulatief
	[nr.]	[nr.]	[m]	[m³/jaar]	[m³/jaar]	[m³/jaar]	[m³/jaar]
Sectie direct ten oosten van oostdam Zeebrugge	217	217	182	15601	---	15601	15601
Overige secties ten westen van strandhoofd kh22	218	250	8732	-37521	-55383	-92903	-77302
Kustdeel 'Zwin'	251	255	1278	3518	-24891	-21372	-98675
Kustdeel 'Zwingeul'	256	259	768	1604	6280	7884	-90791
Kustdeel 'Cadzand-West'	260	266	679	1115	24853	25968	-64823

Kustdeel 'Cad-zand-Oost'	267	277	2629	29476	-69372	-39896	-104719
--------------------------	-----	-----	------	-------	--------	--------	---------

Tabel 8 : Gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes voor enkele kustdelen

Opmerking: De gemiddelde aangroei- of afslagvolumes voor D+DS+NS hebben betrekking op de periode 1979-1998, terwijl de gemiddelde aangroei- of afslagvolumes voor VO+ZB gelden voor de periode 1986-1998. Uiteraard ware het beter om de respectievelijke gemiddeldes te betrekken op één en dezelfde periode (bijv. 1986-1998), omdat anders het resultaat kan beïnvloed worden door de menselijke ingrepen (bijv. de suppletie van 1986, zie Tabel 4). Ter illustratie geeft Figuur 3.4 voor de secties 232 tot 243 een vergelijking weer tussen de gemiddelde afslagcijfers voor D+DS+NS over de periode 1986-1998 (uit de grafieken van [R23]) en deze van de periode 1979-1998 (uit de tabellen van [R23]). Merk op dat er een hogere gemiddelde afslag wordt gevonden voor de periode 1986-1998 (dit is de periode die onmiddellijk volgt op de suppletie van 1986) dan voor de periode 1979-1998 (waar de suppletie van 1986 ergens in valt). De verhoging van de gemiddelde afslag bedraagt ca. 36000 m³/jaar, voor wat betreft de totaliteit van de secties 232 tot en met 243. Bijgevolg zou het gemiddelde afslagcijfer van ca. -77000 m³/jaar voor de zone tussen de oostdam van Zeebrugge en het strandhoofd kh22, beduidend groter kunnen (met name ca. -113000 m³/jaar) zijn indien gemiddeldes over de periode 1986-1998 worden beschouwd. Op analoge wijze zou het gemiddelde afslagcijfer van ca. -99000 m³/jaar voor de zone tussen de oostdam van Zeebrugge en de Zwingeul misschien kunnen oplopen tot ca. -135000 m³/jaar.

In het algemeen (dit wil zeggen voor andere secties dan 232 tot 243) vermeldt [R23] echter geen gemiddelde afslagcijfers voor de periode 1986-1998, zodat ze bij gemis aan de digitale gegevens voorlopig niet berekend worden.



Figuur 3.4 : Vergelijking tussen gemiddelde afslagcijfers betrokken op een verschillende periode

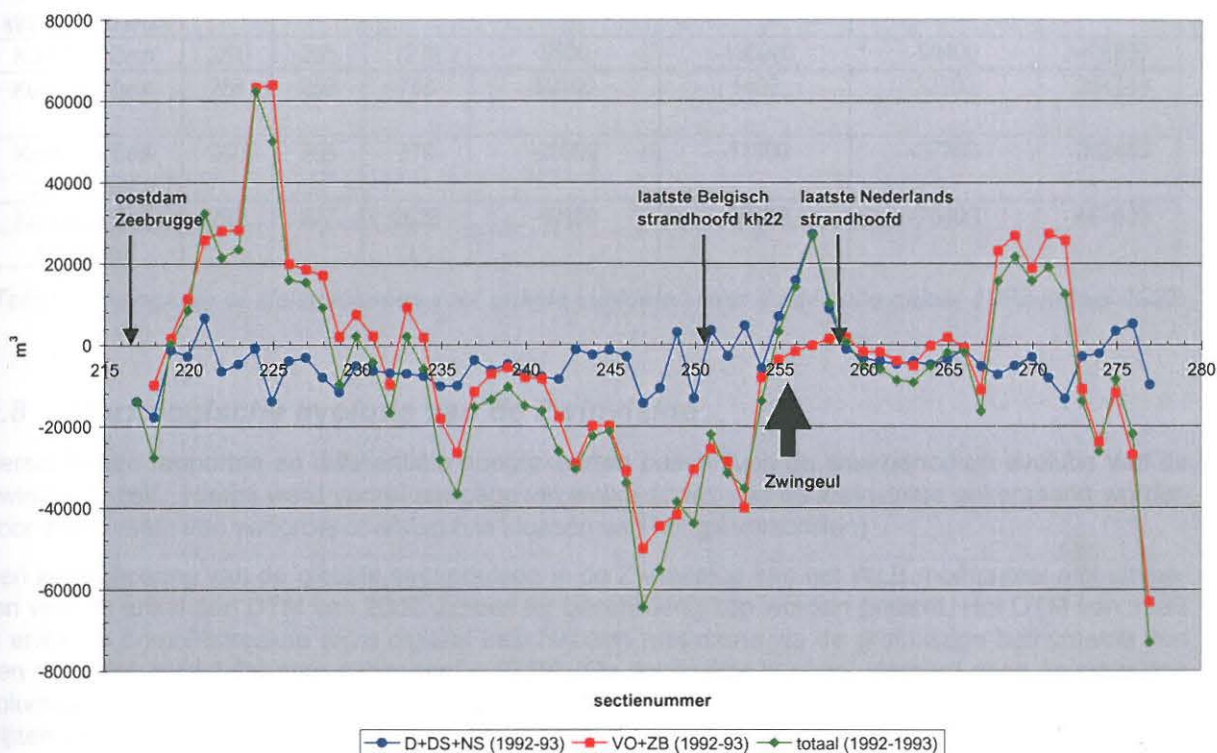
Merk tevens op in Tabel 8 dat het kustdeel 'Cadzand-West' weliswaar een netto aangroei kent, maar dat 'Cadzand-Oost' terug een significante netto afslag te zien geeft.

3.7.2 Analyse voor de periode najaar 1992-najaar 1993

Voor de kustsecties gelegen tussen de oostdam van Zeebrugge en het kustdeel Cadzand-Oost (sectienummers 217 tot en met 277) kan men de aangroei- of afslagvolumes over ca. de periode najaar 1992-najaar 1993 (≈ 1 jaar) afleiden:

- van duin (D) + droogstrand (DS) + natstrand (NS) uit de tabellen van [R23] ; het betreft hier het verschil tussen de getabelleerde waardes bij vlucht 41 (dd. 07/01/94) en deze bij vlucht 39 (dd. 04/11/92),
- van vooroever (VO) + aanpalende zeebodem (ZB) uit de tabellen in [R22] ; het betreft hier het verschil tussen de getabelleerde waardes bij koppeling 16 (dd. najaar 1993 ; voor sommige secties is koppeling 16 niet beschikbaar en wordt daarom beroep gedaan op koppeling 17 dd. voorjaar 1994) en deze van koppeling 14 (dd. najaar 1992).

Beide deelresultaten, evenals hun som (=D+DS+NS+VO+ZB) worden per sectie voorgesteld in Figuur 3.5.



Figuur 3.5 : Aangroei- of afslagvolumes per kustsectie over periode najaar 1992-najaar 1993 (bron: [R23] en [R22])

In Tabel 9 worden voor enkele kustdelen de volgende grootheden voorgesteld:

- de sectienummers waaruit de beschouwde kustdelen bestaan,
- de totale kustlengte van het kustdeel,
- de resulterende (=sommatie over vermelde sectienummers) aangroei- of afslagvolumes van duin+droog strand+nat strand over de beschouwde periode van ca. 1 jaar [R23],
- de resulterende (=sommatie over vermelde sectienummers) gemiddelde jaarlijkse aangroei- of afslagvolumes van vooroever+aanpalende zeebodem over de beschouwde periode van ca. 1 jaar [R22],
- de som van de twee voorgaande volumes,
- de cumulatieve som van de afgeleide aangroei- of afslagvolumes vanaf de oostdam van Zeebrugge tot en met het beschouwde kustdeel.

	van	tot	totale lengte	aangroei(+) of afslag(-) D+DS+NS (1992-1993)	aangroei(+) of afslag(-) VO+ZB (1992-1993)	totale aangroei(+) of afslag(-)	cumulatief
	[nr.]	[nr.]	[m]	[m ³ /jaar]	[m ³ /jaar]	[m ³ /jaar]	[m ³ /jaar]
Sectie direct ten oosten van oostdam Zeebrugge	217	217	182	-14000	---	-14000	-14000
Overige secties ten westen van strandhoofd kh22	218	250	8732	-203900	-89500	-293400	-307400
Kustdeel 'Zwin'	251	255	1278	6500	-105900	-99400	-406800
Kustdeel 'Zwinggeul'	256	259	768	50700	1400	52100	-354700
Kustdeel 'Cadzand-West'	260	266	679	-25900	-11800	-37700	-392400
Kustdeel 'Cadzand-Oost'	267	277	2629	-49100	-26300	-75400	-467800

Tabel 9 : Aangroei- of afslagvolumes voor enkele kustdelen over de periode najaar 1992-najaar 1993

3.8 Morfologische evolutie van de Zwinvlakte

Vershillende rapporten en differentiële hoogtekaarten beschrijven de waargenomen evolutie van de Zwinvlakte zelf. Hierbij werd vooral aangegeven welke zones van de Zwinvlakte gekenmerkt worden door welke mate van aangroei of afslag (via klassen van hoogteverschillen).

Een kwantificering van de globale sedimentatie in de Zwinvlakte kan het WLB momenteel niet uitvoeren vermits enkel een DTM van 2002 digitaal ter beschikking kon worden gesteld. Het DTM van 1995 is enkel op onrechtstreekse wijze digitaal beschikbaar, met name via de grofmazige bathymetrie van een numeriek model dat erop gebaseerd is [R19]. Op deze wijze kunnen uiteraard geen nauwkeurige volumeverschillen bepaald worden. Vandaar dat de globale sedimentatie in de Zwinvlakte op andere wijzen zal afgeschat worden.

Een ondergrens van de sedimentatie vindt men uit de meetcampagne van [R25], waarbij tijdens een volledig springtij (bij mooi weer en kalme zee) het sedimenttransport doorheen een aantal raaien in de Zwinvlakte werd bepaald. Voor de zogenaamde raai Zuid (dwars over de Zwinggeul) bedroeg het netto sedimenttransport 9.5 ton per getij in landwaartse richting (aandeel zand=34%). Uit dit sedimenttransport zou volgens [R25] een jaarlijkse sedimentatie van 4320 m³/jaar volgen. Dit cijfer is uiteraard een onderschatting van de globale sedimentatie omdat het enkel gebaseerd is op waarnemingen bij mooi weer en kalme zee.

Uit de evolutie van de door de mens gegraven noordelijke zandvang [R26] blijkt dat reeds een half jaar na uitgraving van de zandvang (inhoud=90000 m³) reeds de helft was opgevuld, en dit voornamelijk als gevolg van stormachtige perioden. De zandvang werd dan ook gemiddeld om de 2 jaar heruitgegraven. Uit deze informatie kan men een sedimentatiecijfer van 45000 m³/jaar afleiden. De werkelijke bovengrens voor de globale sedimentatie in de Zwinvlakte ligt uiteraard nog hoger, vermits voornoemd cijfer enkel rekening houdt met de sedimentatie in de noordelijke zandvang en niet in de rest van de Zwinvlakte.

3.9 Relatie tussen de morfologische evoluties van kust en Zwin

Ten opzichte van het gemiddeld afslagvolume van 77000 tot 113000 m³/jaar in het kustgedeelte tussen de oostdam van Zeebrugge en strandhoofd kh22 (zie paragraaf 3.7.1 en Tabel 8) bedraagt het sedimentatiecijfer van 45000 m³/jaar (zie paragraaf 3.8) voor de Zwinvlakte ongeveer 40 à 58 %. Relatief ten opzichte van het gemiddeld afslagvolume van 99000 tot 135000 m³/jaar in het kustgedeelte tussen de oostdam van Zeebrugge en de Zwinggeul, geeft dit 33 à 45 %.

Ten opzichte van de afslagvolume van 307000 m³ (over ca. 1 jaar, met name) in de periode najaar 1992-najaar 1993 in het kustgedeelte tussen de oostdam van Zeebrugge en strandhoofd kh22 (zie paragraaf 3.7.2 en Tabel 9) bedraagt het sedimentatiecijfer van 45000 m³/jaar voor de Zwinvlakte ongeveer 15 %. Relatief ten opzichte van het afslagvolume van 407000 m³ (over ca. 1 jaar) in het kustgedeelte tussen de oostdam van Zeebrugge en de Zwinggeul, geeft dit 11 %.

De vraag die zich nu stelt is naar waar de netto afslag in de zone tussen de oostdam van Zeebrugge tot strandhoofd kh22 (of zelfs tot de Zwinggeul) naar toe gaat, kortom de vraag naar de netto transportrichtingen en -paden.

In principe kan er materiaal verdwijnen uit de beschouwde zone via de 4 randvlakken:

1. Landwaartse rand.
2. Dwarsrand ter hoogte van de oostdam van Zeebrugge
3. Zeewaartse rand (op ongeveer 1500m uit de kust, zie Tabel 7)
4. Dwarsrand ter hoogte van strandhoofd kh22 (of analoog ter hoogte van Zwinggeul)

Het (eolisch) transport doorheen de landwaartse rand van de zone wordt hier verwaarloosbaar geacht.

De dwarsrand ter hoogte van de oostdam van Zeebrugge is een barrière voor sedimenten.

Bijgevolg moet (residueel) het materiaal uit de beschouwde zone verdwijnen via de zeewaartse rand en/of via de dwarsrand ter hoogte van kh22. De onderlinge verhouding van de fluxen doorheen deze 2 randen is niet meteen duidelijk. Het denkschema van RIKZ in Figuur 3.1 suggereert dat het brandingstransport door de dwarsrand gaat, terwijl het getijgedreven transport richting Zeebrugge zou migreren en de beschouwde zone verlaat via de zeewaartse rand. Wat er vervolgens met dit materiaal zou gebeuren is niet volledig duidelijk op basis van Figuur 3.1. In ieder geval lijkt een verdere westelijke migratie rondom de haven van Zeebrugge quasi uitgesloten (gelet op de richting van de getijgedreven reststroming in de Pas van het Zand voor Zeebrugge). Dit laatste wordt ook bevestigd door Figuur 3.2. Op basis van deze laatste figuur, lijkt het meer plausibel dat (offshore van de in de sedimentbalans beschouwde zone van ca. 1500m uit de kust) er toch weer een oostelijke migratie optreedt. In welke mate en op welke wijze (=transportpaden) dit residuele getijgedreven zandtransport dan in de nabijheid van het Zwin belandt is niet duidelijk.

Samengevat, is er duidelijk behoefte aan meer gedetailleerde kennis van de residuele transportpaden in de ruime omgeving van Zeebrugge en verdient een verdere afstemming en onderbouwing van Nederlandse en Belgische inzichten hieromtrent aanbeveling.

Uitgaande van de onzekerheden in de kennis omtrent residuele transportpaden, kan men louter op basis van de bovenstaande sedimentbalansen dan ook niet met zekerheid bepalen of en hoe (lang/hog) strandhoofd kh22 moet uitgebouwd worden om de aanzanding van het Zwin tegen te gaan.

[Opmerking: Dit ware anders geweest indien de totale afslag in de zone van oostdam Zeebrugge tot kh22 een (gemiddeld jaarlijks) afslagvolume te zien zou geven dat slechts een fractie bedraagt van het sedimentatievolume in het Zwin. In dat geval zou men dan met zekerheid kunnen stellen dat een grootschalige verlenging en/of verhoging van kh22 weinig zinvol is.]

Hoe groot de bijdrage is aan de sedimentatie in de Zwinvlakte door import vanuit de Nederlandse kant, is niet duidelijk. Men kan niet uitsluiten dat de beduidende (gemiddelde) afslagcijfers van de kustdelen 'Cadzand-West' (zie Tabel 9) 'Cadzand-Oost' (zie Tabel 8 en Tabel 9) hiertoe bijdragen. Het ware wellicht interessant om de in paragrafen 3.7.1 en 3.7.2 afgeleide aangroei- of afslagvolumes langs Nederlandse kant uit te breiden met de kustdelen oostelijk van Cadzand-Oost, al gelden hier ook dezelfde beperkingen als bij de interpretatie van de sedimentbalans tussen Zeebrugge en kh22, met name dat men enkel zicht krijgt op de resulterende afslag- of aangroei van sedimenten in een bepaalde periode, doch niet over de resulterende transportrichtingen.

4 EFFECT VAN CONSTRUCTIES DWARS OP DE KUST

Er zullen hier enkel een aantal resultaten uit de literatuur of uit onderzoek op het WLB worden aangehaald, die relevant zijn met het oog op de verdere analyse in dit rapport.

4.1 Beperken van het langtransport in de branding

Strandhoofden (E. beach groynes) zijn vooral bedoeld om het langse brandingstransport te reduceren en om het (natuurlijk of gesuppleerd) zand gelegen in de compartimenten tussen opéénvolgende strandhoofden te stabiliseren [R14]. De strandhoofden van de Belgische oostkust zijn inderdaad mede hiervoor bedoeld. (Een aanvullende bedoeling, met name het stabiliseren van een getijgeul, wordt besproken in paragraaf 4.2).

Uit een compilatie [R14] van de recente literatuur over strandhoofden, kan men het volgende leren.

De kruin aan de kop van het strandhoofd, ligt best iets (0,5 m) hoger dan GLW. In het geval van kh22 is hier min of meer aan voldaan (0,33 m boven GLW, zie Figuur 2.4).

Tussen wortel en kop van het strandhoofd ligt de kruin ruwweg 1m boven het lokaal strandpeil, om het (golfgedreven) langtransport bij gematigde golven (hoofdzakelijk bodemtransport) te blokkeren. Bij hoge golven (suspensietransport) passeert dan nog veel sediment over de kruin.

Uit Figuur 2.4 blijkt dat de kruin van kh22 0,5 à 1m boven het westelijk strandpeil ligt, wat dus (iets) minder is dan de bovenvermelde ontwerpregel uit [R14].

Rekening houdend met de veronderstelde netto langtransportrichting in de branding (van WZW naar ONO), zou men dus meer sedimenten kunnen vangen 'opwaarts' (=westelijk) van kh22 door de kruin van het strandhoofd beperkt te verhogen.

Omtrent de aanbevolen kruinligging van strandhoofden in [R14] passen nog de volgende opmerkingen:

- hoe hoger de kruin van een strandhoofd, hoe groter de constructiekost
- hoe hoger de kruin van een strandhoofd, hoe groter het erosiegevaar 'afwaarts' in de richting van het netto langtransport.

Vermits men in het algemeen de erosieproblematiek afwaarts (in de niet met strandhoofden verdedigde kustlijn) wil beperken (evenals de constructiekosten) pleit de vuistregel dus voor een beperkte overhoogte (ca. 1m) van de kruin van het strandhoofd ten opzichte van het nabijgelegen strandpeil.

In het geval van kh22, zou men (abstractie makend van constructiekosten) zelfs een grotere overhoogte kunnen overwegen (in de limiet zelfs een niet-overstroombare dam, hoewel de wenselijkheid hiervan ook landschappelijk bekeken moet worden), vermits:

- dan in principe nog meer sedimenten gevangen zouden kunnen worden 'opwaarts' van kh22 (namelijk door afblokken van een groter deel van het suspensietransport)
- de vergrote neiging tot erosie afwaarts van kh22 wellicht toelaatbaar is in het kader van de dynamisch kustbeheer van de Zwinmond (tenzij de erosieve tendenzen zich zouden uitstrekken tot de Zeeuwse kust of indien de toegenomen erosie de sedimentaanvoer naar de Zwingeul nog zou verhogen).

Té grote verhoging van kruinpeilen van overstroombare dammen (zoals strandhoofd kh22) heeft dan ook weer mogelijke nadelen [R12]:

- hoe hoger het kruinpeil van een overstroombare dam, hoe groter de productie van turbulentie (wervelstraten) bij hoog water ; dit kan enerzijds zorgen voor erosie aan de lijzijde van de dam en

anderzijds zorgt de toegenomen turbulentie-intensiteit voor een toename van de capaciteit om sedimenten in suspensie te transporteren,

- hoe hoger het kruinpeil van een overstroombare dam, hoe minder 'doorlaatbaar' de dam wordt, en hoe groter de kans op het ontstaan van ripstromen (en de ermee geassocieerde erosie) binnen de compartimenten.

Strandhoofden met een (relatief) lage kruin hebben verder dan hun teen geen impact meer op (de blockage van) het langstransport.

Bovendien wordt het sediment dat wordt geblokkeerd in de compartimenten tussen opéénvolgende strandhoofden verloren bij storm door dwarstransport,

De lengte van strandhoofden wordt in principe beperkt tot de breedte van de brekerzone. In praktijk [R14] wordt voor getijgebieden aanbevolen om de lengte ruwweg te bepalen aan de hand van de gemiddelde laagwaterlijn bij springtij (voor Cadzand is $GLWS=Z+0.42m$; dus deze vuistregel wordt min of meer gerespecteerd door kh22, zie Figuur 2.3).

Omtrent de aanbevolen lengte voor het laatste strandhoofd van een reeks stelt [R14] het volgende:

- bij een gesuppleerd strand wordt het laatste strandhoofd meestal relatief lang en hoog uitgevoerd (wat momenteel niet het geval is voor kh22),
- tenzij een te grote erosie gevreesd wordt in de (niet door strandhoofden verdedigde) afwaartse stranden, want dan is het laatste strandhoofd beter korter en lager.

De vergrote neiging tot erosie afwaarts van een verlengd (en/of verhoogd) strandhoofd kh22 is – zoals reeds gezegd - wellicht toelaatbaar in het kader van het dynamisch kustbeheer van de Zwinmondning (tenzij de erosieve tendenzen zich zouden uitstrekken tot de Zeeuwse kust of indien de erosie zorgt voor extra aanvoer van materiaal naar het reservaat).

Bij verlenging van kh22 moet men wel opletten voor de stromingscontractie rond de kop van het strandhoofd (idem voor strekdam). Dit gaat gepaard met een snelheidstoename en dus lokale uitschuiving van de bodem, een fenomeen dat meer uitgesproken is bij langere strandhoofden.

Een (gecombineerde) verlenging/verhoging van een strandhoofd creëert wellicht een grotere 'schaduwzone' voor invallende golven (idem voor een lange strekdam). In deze schaduwzone is de golfwerking gereduceerd (al is door diffractie de golfwerking niet afwezig in de lijzijde van een obstakel) waardoor het lokale sedimenttransport in grootte afneemt. Door een complex spel van variabele golfspanningen (E. radiation stresses) is het (netto) effect op de morfologische evolutie van de kustlijn in deze schaduwzone niet zo eenvoudig in te schatten. Zelfs transport in de richting van de constructie is mogelijk in de onmiddellijke lijzijde ervan.

Bij de overweging van een verhoging/verlenging van een strandhoofd met het oog op het blokkeren van een groter deel van het netto langstransport (in de branding), mag men niet uit het oog verliezen dat de (eventueel door een verhoging/verlenging vergrote) bergingscapaciteit 'opwaarts' van het strandhoofd nog steeds eindig is, waardoor het effect van een dergelijke ingreep steeds tijdelijk is. Van zodra het opwaarts gelegen, aangroeiende strandpeil hoog genoeg (ten opzichte van de kruin van het strandhoofd) of ver genoeg (ten opzichte van de kop van het strandhoofd) komt, verliest het strandhoofd zijn buffercapaciteit.

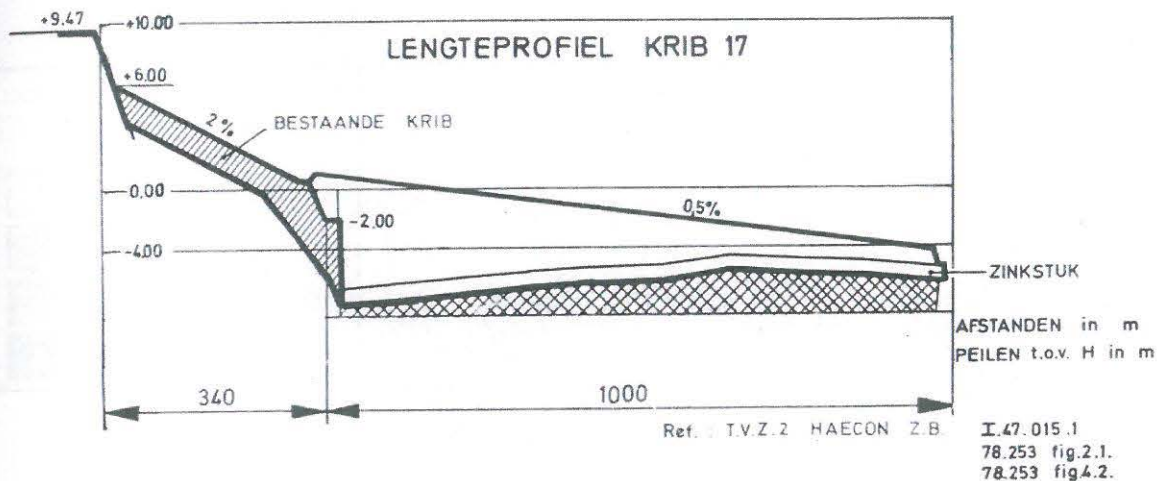
4.2 Stabiliseren van getijgeulen

Naast strandhoofden (E. beach groynes) ter stabilisatie van stranden, bestaan er ook kribben (E. current groynes) die tot doel hebben om relatief diep gelegen getijgeulen te stabiliseren op een meer zeewaartse positie [R14]. Deze kribben of strekdammen zijn dan ook meestal langer dan 'pure' strandhoofden (waarvan de lengte beperkt is tot de breedte van de brekerzone).

De strandhoofden van de Belgische oostkust – waaronder kh22 - zijn inderdaad mede bedoeld (en slagen erin) om de zuidwaartse (=kustwaartse) migratie van de getijgeul Appelzak te stabiliseren [R6,R7]. Zie ook Figuur 2.4.

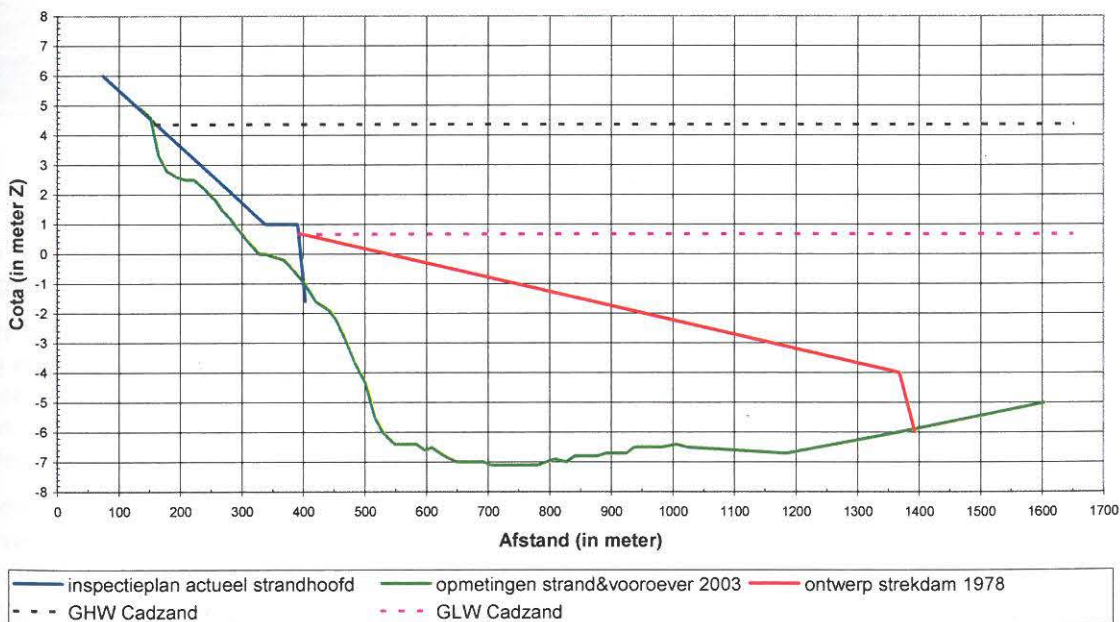
4.3 Afbuiging en verlamming van de getijstroming

In de studie van de uitbouw van de Haven van Zeebrugge eind jaren '70 is reeds een lange strekdam bestudeerd op een schaalmodel in het WLB [R15,R16,R17]. Het lengteprofiel van het ontwerp uit 1978 is te zien in Figuur 4.1. Het betreft een verlenging van het bestaande strandhoofd met een krib van een duizendtal meter, tot op de noordelijke flank van de getijgeul Appelzak.



Figuur 4.1 : Ontwerp uit 1978 van strekdam voor oostkust [R17]

Hierbij dient volledigheidshalve opgemerkt te worden dat het ontwerp van de strekdam zich niet situeerde ter hoogte van het strandhoofd kh22, maar ter hoogte van het strandhoofd kh17 (=660 m westelijker dan kh22, zie Figuur 2.2 en Tabel 1). Indien men een gelijkaardige strekdam zou aanbrengen ter hoogte van kh22, dan levert dit de situatie zoals voorgesteld in Figuur 4.2.



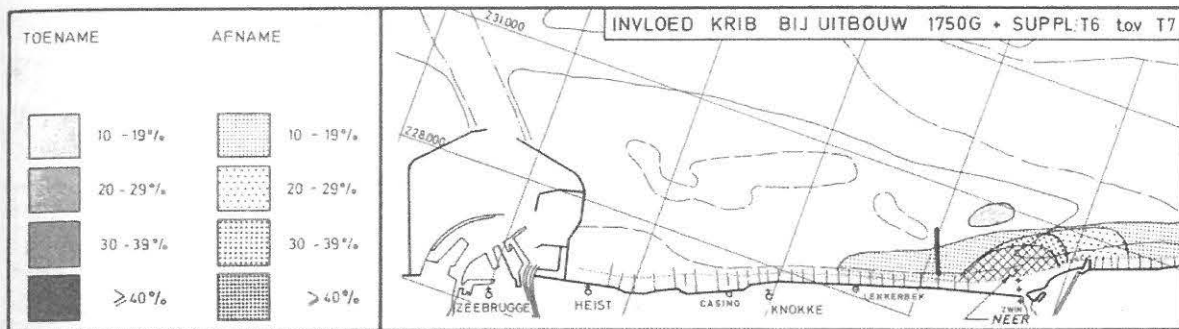
Figuur 4.2 : Ontwerp strekdam 1978 als mogelijke verlenging van kh22

De strekdam werd eind jaren '70 onderzocht als een middel om:

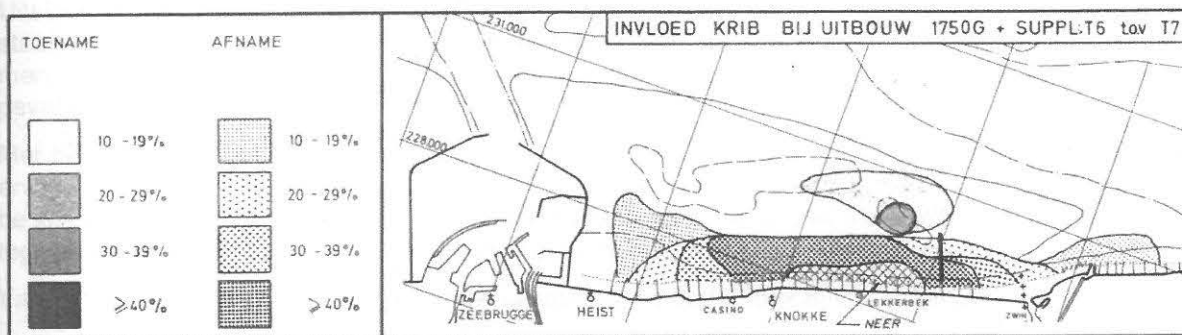
- de levensduur van de voorgestelde (en nadien daadwerkelijk gerealiseerde) suppletie langs de Belgische oostkust (ca. 9 Mm³) te verlengen

- de (toenmalige ; okt. 1971-okt. 1976) stortingen van baggerspecie (afkomstig van de verdieping van het Scheur en uit de Voorhaven) in de getijgeul Appelzak te stabiliseren; deze stortingen waren namelijk bedoeld om het ontgrondend vermogen aan de zuidelijke flank van de Appelzak te reduceren.

De invloed van een strekdam ter hoogte van kh17 op de snelheids grootte bij maximum vloedstroom en maximum ebstroom wordt weergegeven in Figuur 4.3 resp. Figuur 4.4.



Figuur 4.3 : Invloed van een strekdam ter hoogte van kh17 op de maximum vloedstroom



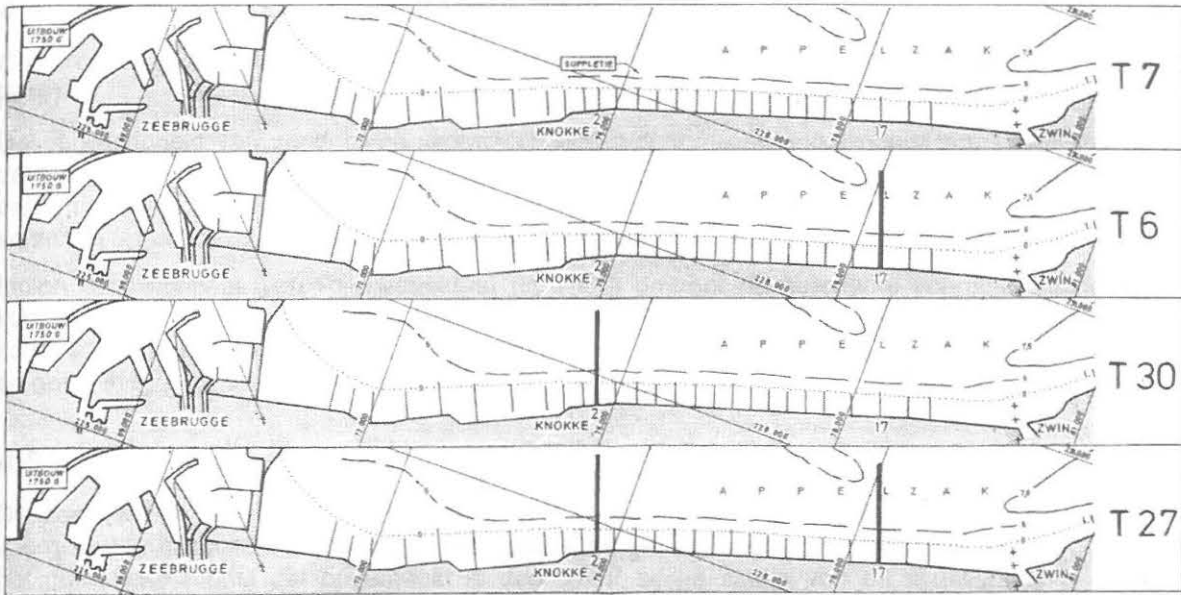
Figuur 4.4 : Invloed van een strekdam ter hoogte van kh17 op de maximum ebstroom

Ten gevolge van de strekdam wordt de getijstroom dus duidelijk afgebogen van de kuststrook weg. Dit gaat gepaard met een stromingscontractie en snelheidstoename.

Dichter bij de kust wordt een gevoelige snelheidsreductie (10-40%, afhankelijk van de fase van het getij en de locatie) waargenomen in de proeven op het schaalmodel. Bij vloed wordt de snelheid gereduceerd tot ter hoogte van Cadzand. Ook bij eb treedt er een snelheidsreductie op ter hoogte van het Zwin. Voor sommige fases van het getij worden neren westelijk of oostelijk van strekdam 17 aange troffen in het schaalmodel.

Er dient op gewezen te worden dat het (toenmalige) schaalmodel een sterk vertrokken (distortie=verhouding van verticale en horizontale lengteschalen=8) tijmodel is, waardoor de in het model gevonden snelheidsreducties te groot kunnen zijn t.o.v. de werkelijkheid.

Tijdens het onderzoek bleek dat een combinatie van de strekdam ter hoogte van kh17 met één of meerdere gelijkaardige strekdammen ten westen van kh17 voordelen had voor wat betreft de lokale stranderosie vóór Knokke. In Figuur 4.5 worden een aantal onderzochte scenario's afgebeeld.



Figuur 4.5 : Overzicht van onderzochte strekdammen langs de oostkust

Uiteindelijk bleek een optimale combinatie (vanuit het oogpunt van de Belgische oostkust) erin te bestaan een tweede strekdam uit te bouwen ter hoogte van het strandhoofd kh2. Tussen de strekdammen 2 en 17 werden dan nog grotere snelheidsreducties waargenomen in het schaalmodel dan in geval van één strekdam 17.

Met betrekking tot het effect van strekdammen (E. jetties) op de kustlijnverandering in de omgeving ervan, kan ook nog verwezen worden naar [R14]. In de onmiddellijke nabijheid van de strekdam wordt de kustlijnverandering bepaald door het bruto langtransport (= de som van het langtransport uit de 2 tegengestelde richtingen), terwijl verderweg het netto langtransport determinerend is.

Vanuit het oogpunt van het Zwin, kan men uit voorgaand onderzoek dus afleiden dat:

- uitbouw van een strekdam ter hoogte van kh22, die loopt tot de noordelijke flank van de Appelzak getijgeul, een gevoelige snelheidsreductie vóór het Zwin tot gevolg heeft,
- dat deze snelheidsreductie wellicht gepaard gaat met lagere sedimenttransporten vóór het Zwin ; of dit leidt tot minder aanvoer van sedimenten naar de Zwingeul is vooralsnog de vraag,
- dat in de zones met neervorming (tijdens bepaalde fases van het getij) rondom de strekdam er wellicht op termijn aanzanding/aanslibbing zal optreden,
- dat een eventuele sedimentatie vóór het Zwin misschien nadelig interageert met de Zwingeulmond (versnelde afbuiging of dichtslibbing ?) maar dat een regelmatig wegbaggeren van de sedimenten buiten het natuurreservaat toch eenvoudiger (en natuurvriendelijker ?) is dan in het reservaat zelf,
- dat uitbouw van 2 strekdammen (bijvoorbeeld één ter hoogte van kh17 en één langs Nederlandse kant) wellicht een ietwat grotere snelheidsreductie geeft in de tussenliggende zone (al moet dit verder onderzocht worden).

Bovendien moet bij de keuze van een strekdammen nader onderzocht worden of de zones met snelheidstoename niet negatief interfereren met bijvoorbeeld de munitiestortplaats op de Paardemarkt, de stortplaatsen, de vaargeulen, de naburige stranden enz.

Uiteraard heeft de uitbouw van één of meerdere strekdammen serieuze financiële implicaties. In [R7] wordt (anno 1999) een ruwe schatting gemaakt van de constructiekost (met name ca. 6200 EUR per meter strekdam). Het spreekt voor zich dat mogelijke synergie met andere Vlaamse of Nederlandse projecten/problemen (structureel erosieprobleem oostkust, plannen voor Paardemarkt, kustverdediging Zeeuws-Vlaanderen, vernieuwing gemaal Cadzand, project Sluis-aan-zee,...) dan nadere aandacht verdient.

4.4 Interferentie met zandgolven

Constructies dwars op de kust (strandhoofden) kunnen de migratiesnelheid van zandgolven reduceren [R14].

De aanwezigheid van zandgolven (=grootschalige autonome ontwikkelingen) langs een kust maakt dat het netto effect van strandhoofden (en menselijke ingrepen in het algemeen) niet altijd meer te determineren is. Zo wordt het vooruitschrijden van de kustlijn (na de bouw van een strandhoofd) soms ten onrechte volledig toegeschreven aan de constructie van het strandhoofd [R14].

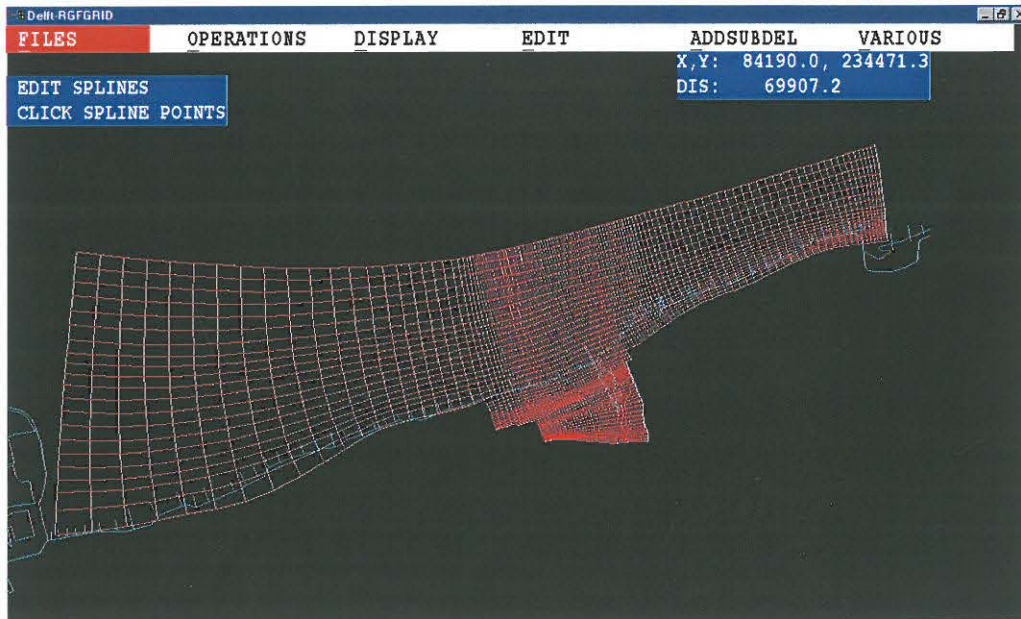
Indien de prognoses van Rijkswaterstaat (in 1988) omtrent de autonome vooruitschrijding van de kustlijn ter hoogte vóór het Zwin tot 2050 (zie sectie 3.6) nog altijd gelden (wat best eens nader onderzocht zou worden), dan moet elk advies omtrent het nut van de aanvullende maatregelen (strekdam en geulverlegging) daar rekening mee houden.

4.5 Numerieke modellering

De idee werd geopperd vanuit de Technische Werkgroep van de Zwincommissie om het effect van de voorgestelde aanvullende maatregelen(strekdam en geulverlegging) te onderzoeken met behulp van het numerieke model dat opgemaakt is door DHV bij de studie van de spuiwerking in het Zwin [R19,R20] en dat inmiddels beschikbaar is op het WLB. Het betreft een model dat is opgemaakt met behulp van de Delft3D software van WLDelft die eveneens beschikbaar is op het WLB.

Het beschikbare model heeft volgende kenmerken:

- het rekendomein loopt langs de kust vanaf de oostdam te Zeebrugge tot voorbij de haven van Cadzand (ca. 15,7km); in zeewaartse richting beslaat het rekendomein ca. 5km ter hoogte van Zeebrugge, ca. 2,4km ter hoogte van kh22 en ca. 1,7 km ter hoogte van Cadzand,
- het is een tweedimensionaal diepte-gemiddeld model,
- het rekenrooster is relatief grofmazig (135 cellen langs kust, 36 cellen dwars op kust) met variabele roosterwijdtes ; in de buurt van kh22 is de resolutie ca. 40m langs de kust en 100m dwars op kust.



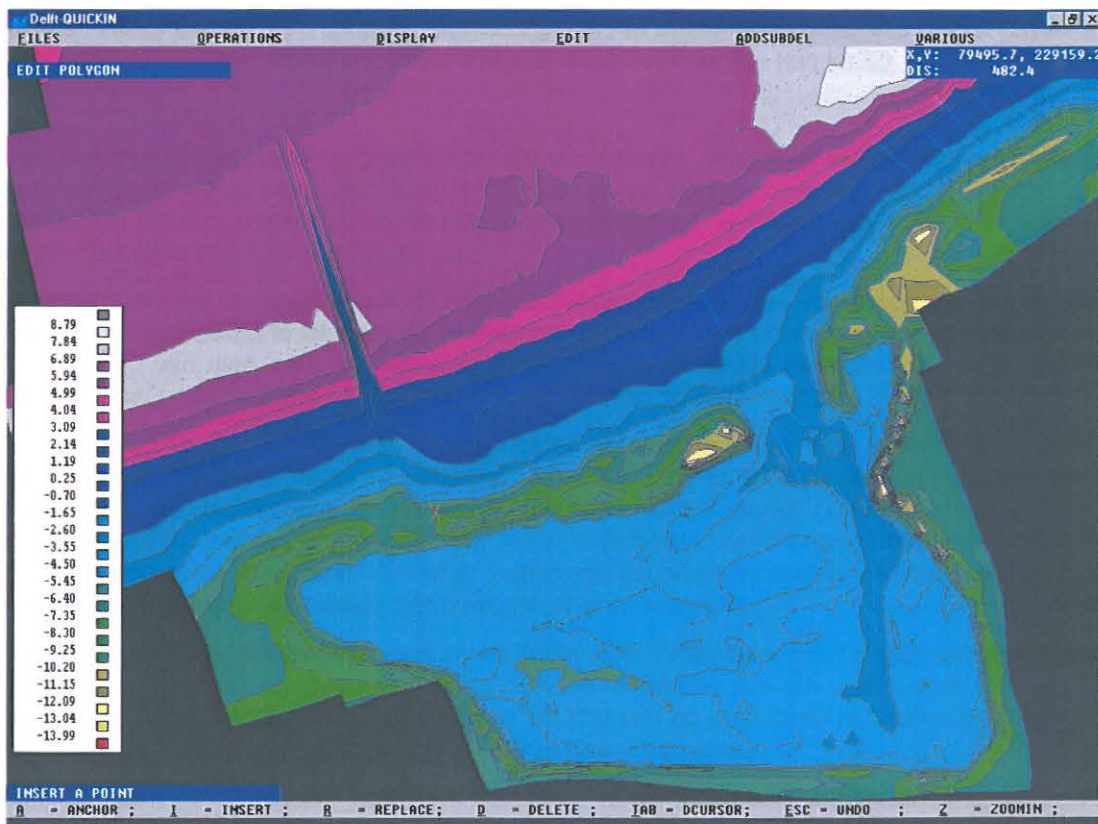
Figuur 4.6 : Rekenrooster van beschikbaar numeriek model

Voor een goede studie van het effect van de aanvullende maatregelen, heeft het beschikbare model volgende nadelen:

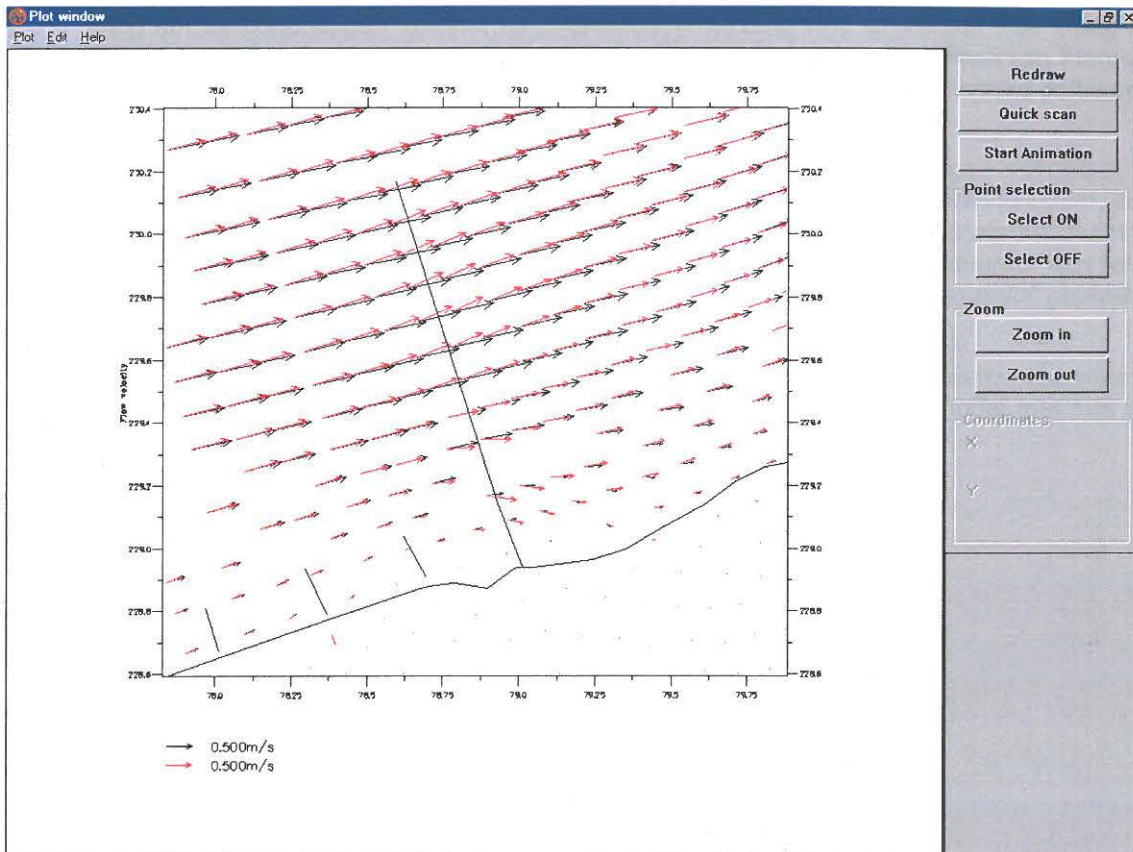
- de bestaande strandhoofden werden niet meegenomen in het model (noch in de bathymetrie, noch in de ruwheden) ; nu inbouwen in de bathymetrie is mogelijk doch enkel op een ruwe wijze (te wijten aan grofmazig rooster met cellen 40m x 100m),
- bij uitbouw van een strekdam ter hoogte van kh22 maakt de beperkte uitgestrektheid van het rekindomein dwars op de kust (met name ca. 2,4 km ter hoogte van kh22 ; te vergelijken met bijv. een uitbouw lengte strekdam van ca. 1,4 km in Figuur 4.2) dat (afhankelijk van de te onderzoeken uitbouw lengtes van een strekdam) de zones met stromingscontractie niet nauwkeurig kunnen gemodelleerd worden (omdat de opgelegde randvoorwaarden aan de zeewaartse rand van het beschikbare model uiteraard nog geen effect van een strekdam bevatten)
- bij uitbouw van een strekdam ter hoogte van kh22 maakt de beperkte uitgestrektheid van het rekindomein langs de kust (met name tot haven Cadzand) dat de zones met snelheidsreductie niet nauwkeurig kunnen gemodelleerd worden (omdat de opgelegde randvoorwaarden aan de randen van het beschikbare model uiteraard nog geen effect van een strekdam bevatten),
- de resolutie van het model ter hoogte van de actuele Zwingeel is beperkt (ca. een negental cellen met maaswijdte van 35 meter over de maximale breedte van de Zwingeel ter hoogte van de monding)

Samengevat: het rekindomein en de resolutie van het beschikbare model (dat enkel bedoeld was om de spuiwerking in het Zwin te bestuderen) zijn te klein voor een goede studie van de aanvullende maatregelen.

Tijdens de opmaak van het voorliggend rapport is – niettegenstaande bovenstaande bemerkingen – toch eens (ter illustratie) een strekdam ingebouwd in de bathymetrie van het bestaande model (zie Figuur 4.7) en is een springtij gesimuleerd met en zonder de nieuwe strekdam (zie Figuur 4.8). Merk op dat de dieptegemiddelde snelheidsvectoren zowel qua grootte als qua richting beïnvloed worden door de inbouw van de strekdam (in de bathymetrie).



Figuur 4.7 : Inbouwen van een strekdam ter hoogte van kh22 in de bathymetrie van het beschikbare numerieke model



Figuur 4.8 : Resultaat van een springtij berekening met het bestaande numerieke model (zwart = zonder strekdam ; rood = met strekdam ter hoogte van kh22)

Opmaak van een nieuw model vergt uiteraard tijd en mensen. Vooraleer eventueel tot een dergelijke opdracht besloten wordt, moet toch eerst ernstig overlegd worden over een aantal bijkomende problemen die zich stellen, ondermeer inzake de mogelijkheden/beperkingen van de Delft3D software die momenteel beschikbaar is op het WLB:

- de fysica van het sedimenttransport in de brandingszone is heel complex en wordt momenteel slechts vereenvoudigd in de numerieke software meegenomen ; de vraag die zich stelt is of deze beperkingen van dien aard zijn dat uitspraken over bijvoorbeeld de stabiliteit van de (eventueel verlegde) geul aan de hand van de rekenresultaten nog betrouwbaar zijn,
- het inbouwen van constructies als strandhoofden en strekdammen in de bathymetrie van het model stelt geen probleem (mits een voldoende resolutie van het rekenrooster) ; onze ervaring terzake is dat dit niet voldoende is om (in een 2D dieptegemiddeld model) het effect van dergelijke constructies mee te nemen ; er moet ook een andere (hogere) ruwheid (bijv. Manning coëfficiënt) opgelegd worden ; de vraag stelt zich of er voldoende calibratiemateriaal en/of ervaring voorhanden is om deze ruwheidscoëfficiënten betrouwbaar af te schatten,
- het standaard turbulentiemodel heeft zijn beperkingen, ondermeer op het vlak van de uitwisseling van impuls en massa ten gevolge van horizontale neren (die wellicht optreden in bepaalde fases van het getij), menglagen (die optreden aan de kop van de strekdam) de wervelaf scheiding (wervelstraten ter hoogte van de kruin van overstroombare dammen)
- WLDelft heeft de afgelopen jaren een verbeterd turbulentiemodel ontwikkeld (het zogenaamde HLES, Horizontal Large Eddy Simulation model) dat pas in de loop van 2004 beschikbaar zal zijn op het WLB ; dit model is door WLDelft reeds uitvoerig getest op strekdammen in rivieren ; de conclusie van juni 2003 [R15] is dat een tweedimensionaal dieptegemiddeld model voorzien van HLES goede resultaten geeft omtrent de complexe stroming (inclusief neervorming en wervelaf scheiding aan de koppen) rond niet-overstroombare dammen (met een relatief steile helling van de kop) ; voor overstroombare dammen echter is er verder onderzoek (veldmetingen, laboproef-

ven) nodig om de beperkingen van het turbulentiemodel terzake weg te werken ; de vraag stelt zich of in een kustmorfologische context (die anders is dan de riviercontext waarvan hierboven sprake) dezelfde conclusies gelden omtrent de huidige beperkingen van de numerieke software op het vlak van de complexe stroming rondom overstroombare strekdammen,

- Naast een tweedimensionaal dieptegemiddeld model, moet ook eens afgewogen worden of een state-of-the-art driedimensionaal procesmodel (met verschillende lagen over de waterkolom, zodat verticale snelheidsvariaties in grootte/richting en de ermee geassocieerde verticale sedimentconcentratieverschillen kunnen meegenomen worden) een betere optie is (zij het duurder qua reken-tijd, wat een belemmering is indien verschillende scenario's van strekdammen en/of geulverleg-ging moeten doorgerekend worden).

Samengevat: er moet met de specialisten van WLDelft overlegd worden onder welke voorwaarden (timing, extra metingen/proeven,...) de opmaak van een betrouwbaar numeriek model met hun soft-ware mogelijk is voor de gestelde doeleinden.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

De aanvoer van sedimenten naar de Zwingeel geschiedt langs verschillende transportpaden, die niet alle even belangrijk zijn op elk moment (of beter: hydro-meteorologische conditie), en waarvan het onderlinge belang voor de morfologische evolutie eigenlijk nog nauwelijks (kwantitatief) gekend is. Deze onzekerheden wegen op elke advies omtrent het nut van de voorgestelde aanvullende maatregelen.

Voorafgaand aan eventueel verder onderzoek (zie o.a. de aanbevelingen in 5.2), kunnen we reeds volgende conclusies trekken uit bovenstaande analyses.

Eén belangrijk mechanisme lijkt de aanvoer van sediment via het langtransport in de branding. De werking van dit mechanisme uit zich vooral na het uitvoeren van suppleties door de aangroei van zandtongen die de Zwingeel dreigen dicht te drukken. Deze zandtongen zijn opgemerkt aan beide zijden van de Zwingeel, tengevolge van suppleties langs Belgische en langs Nederlandse kant van de Zwingeel.

Vermoedelijk zullen er in de toekomst nog af en toe suppleties plaats grijpen:

- langs Belgische zijde, omwille van het structurele erosieprobleem van de stranden van Knokke-Zoute,
- langs Nederlandse zijde, ondermeer omwille van het algemeen beleid dat de kustlijn (tenminste) wil handhaven op de ligging van de kustlijn in 1990.

Bijgevolg heeft men er belang bij om het risico op dichtdrukken van de Zwingeel via zandtongen te reduceren door zowel langs Belgische als langs Nederlandse kant een verbeterde 'dam' aan te brengen voor het gesuppleerd materiaal dat via langtransport in de branding - en ongetwijfeld ook via eolisch transport op het strand - naar de geul zou kunnen getransporteerd worden.

Dit zou reeds kunnen door een beperkte verhoging en/of verlenging van het meest nabije Belgische en Nederlandse strandhoofd (inclusief maatregelen op het strand om eolisch transport tegen te gaan).

Of een meer significante (en dus dure) uitbouw van deze strandhoofden tot (niet-overstroombare en langere) strekdammen echt nuttig/nodig is om de aanvoer van sedimenten naar de Zwingeel drastisch tegen te gaan, is moeilijk met zekerheid te stellen tot zolang het onderlinge belang van de verschillende sedimenttransportmechanismen en de (residuele) transportpaden - in de actuele situatie, maar evenzeer in de toekomstige situatie na uitvoering van de menselijke ingreep - niet voldoende gekend zijn. Uit de gemaakte analyses van de (jaarlijkse) afslagvolumes in de aanpalende kustdelen langs Belgische en Nederlandse kant, blijkt in ieder geval dat de idee van strekdammen om de geërodeerde sedimentvolumes te blokkeren, weerhouden kan worden voor verder onderzoek.

Verder onderzoek is dus nodig vooraleer een gepaste dimensionering van strandhoofden en/of strekdammen kan gegeven worden.

Wat betreft de keuze van de verhoging van de kruinpeilen van de hoofden kan men voorlopig stellen dat:

- ophoging van het bestaande strandhoofd kh22 langs Belgische zijde nuttig kan zijn (de actuele 'overhoogte' ten opzichte van het westelijke strandpeil is volgens onze analyses kleiner dan de richtwaarde ; een nieuwe gedetailleerde opmeting van het strandhoofd en zijn onmiddellijke omgeving is echter wenselijk) ; voor het meest nabije strandhoofd te Cadzand is de 'overhoogte' ons niet bekend en zou dus verder moeten bestudeerd worden

- niet-overstroombare hoofden leveren de grootste blockage van en bergingscapaciteit voor sedimenten op (al bestaat het gevaar dat door ripstromen een deel van het sediment in de compartimenten zeewaarts verdwijnt) ; maar ze betekenen een grotere constructiekost ; daarenboven worden overstroombare dammen misschien verkozen vanuit bekommernissen voor het landschap/zeezicht en de natuurlijkheid.

Wat betreft de keuze van de verlenging van de hoofden kan men voorlopig stellen dat:

- hoe langer een strandhoofd (of strekdam), hoe langer zijn 'levensduur' om sedimenten te bufferen
- hoe langer een strandhoofd (of strekdam), hoe groter de schaduwzone bij (schuine) golfinval
- hoe langer een strandhoofd (of strekdam), hoe groter zijn impact op de getijstroming
 - snelheidstoename (stromingscontractie en dus lokale erosie) zeewaarts van de kop
 - snelheidsreductie (invloedslenge langsheen kust is ruwweg 3 à 5 keer de uitbouwlenge van de dam) en/of neervorming in de lijzijde
- hoe langer een strandhoofd (of strekdam), hoe groter de constructiekost
- hoe langer een strandhoofd (of strekdam), hoe groter de neiging tot aanzanding in de onmiddellijke lijzijde ervan, en hoe groter het erosiegevaar meer 'afwaarts' in de richting van het netto sedimenttransport

Indien geopteerd wordt voor significante verlenging van (sommige van de) bestaande strandhoofden, dan kan men (in afwachting van absoluut noodzakelijk verder onderzoek) voorlopig stellen dat:

- 1 strekdam ter hoogte van het laatste Belgische strandhoofd kh22, een snelheidsreductie langs de kust vóór het Zwin veroorzaakt en een snelheidstoename meer zeewaarts
- 2 strekdammen, ter hoogte van bijvoorbeeld kh22 en het eerste strandhoofd te Cadzand, optimaler zijn om een gevoelige snelheidsreductie vóór het Zwin te verkrijgen tijdens de volledige getijcyclus
- snelheidsreductie vóór het Zwin (tengevolge van enigwelke aanleg, verlenging of verhoging van een strandhoofd of strekdam) vergroot het risico op zones met aanzanding in de omgeving van de monding van de Zwingeel ; deze sedimentatie dient wellicht regelmatig weggebaggerd te worden om de stabiliteit van de getij-inlaat op termijn niet in het gedrang te brengen ; het voordeel is wel dat baggerwerkzaamheden buiten het natuurreservaat wellicht eenvoudiger en acceptabeler zijn dan binnen het reservaat

Indien de bereidheid er is om de geul westelijk te verleggen,

- waarbij langs Nederlandse zijde de storende erosieve werking van een oostelijk migrerende geul (evenwel zonder onmiddellijke bedreiging voor de veiligheid) voor langere tijd wordt vermeden,
- waarmee wel een aantasting van de duinen aan Belgische zijde gepaard gaat,
- waarmee wel een ingrijpende herinrichting van het geulen- en merenstelsel in het binnengebied van het reservaat gepaard gaat,

dan kan deze ingreep gebeuren. Of een locatie onmiddellijk oostelijk van een verhoogd/verlengd strandhoofd of strekdam langs Belgische zijde wenselijk is, zal verder onderzoek moeten uitwijzen. Bij voorbaat moet er wel gewezen worden op een neiging tot aanzanding in de onmiddellijke luwte van de dam (ook al is er – gelet op het golfklimaat - verder oostelijk uiteraard een neiging tot erosie te verwachten). De kans is reëel dat de ebstream van een in deze luwte verlegde Zwingeel niet in staat is om de aanzanding 'op te ruimen' (zelfs al zal de ebstream van het Zwin toenemen in de toekomst door de vergrote komberging en/of spuiwerking). Voorlopig is het advies daarom om een westelijk verlegde geul toch niet te dicht bij het laatste strandhoofd kh22 te situeren.

5.2 Aanbevelingen

- Niettegenstaande de veelheid van vergelijkend kaartmateriaal, tabellen, foto's en opvolgingsrapporten (vooral intensief sinds de uitbouw van de voorhaven te Zeebrugge) omtrent de morfologische evolutie (per kustsectie), blijft het niet evident om er het (netto) effect (lees: de effectiviteit voor de vermeende doelstellingen) van de bestaande strandhoofden langs Belgische en Nederlandse kant van de Zvingeul zomaar uit af te leiden, met uitzondering misschien van periodes onmiddellijk na suppleties. Toch ware het interessant om de inspanning daaromtrent die in de voorbereiding van dit rapport gestart is verder te zetten, teneinde bepaalde vigerende hypothesen (die een belangrijke rol spelen bij het advies omtrent de aanvullende maatregelen) te bevestigen of te ontcrachten. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat vergelijking van kaartmateriaal soms gehinderd wordt door omschakeling van coördinaatsystemen (bijv. datum ED50 naar datum WGS84) en referentievlakken.
- Een gedetailleerde peiling van de meest nabije strandhoofden langs Belgische en Nederlandse kant (kruinpeil + peilen van naburige stranden) is wenselijk.
- Evenzeer zou het wenselijk zijn om de volgende beweringen te staven met kaart- of fotomateriaal : (i) vóór de aanleg van de strandhoofden (ca. 1954 ?) de Zvingeul werd dichtgedrukt en (ii) na aanleg van de strandhoofden en voor de suppleties (1954-1977 ?) de Zvingeul op zijn plaats bleef.
- Het ware interessant dat kustmorfologen die gespecialiseerd zijn in getij-inlaten eens in detail kijken naar de (evolutie van) de vorm/positie/oriëntatie van de morfologische subentiteiten die zich voordoen op de binnen- en buitendelta van de Zvingeul (mogelijke 'swash platforms', 'marginal eb/flood channels', 'ebb tidal levees', enz. zie [R5,R14]). Mogelijks kan uit een dergelijke detail-analyse van de morfodynamiek additionele informatie gehaald worden inzake (grootte en richting van) de voornaamste sedimenttransportmechanismen in en rond de Zvingeul.
- Voorafgaand aan een eventuele beslissing om een verbeterd numeriek model op te maken, moet met de specialisten van WLDelft overlegd worden onder welke voorwaarden (timing, extra meet-campagnes/proeven, nieuwe versie software,...) een dergelijk model betrouwbare prognoses kan maken voor de gestelde doeleinden.
- Voor de bepaling van het golfklimaat in en rond het Zwin werd in het verleden steeds gebruik gemaakt van het klimaat zoals bepaald uit de golfmeetboei op de Bol van Heist. Ondertussen zijn er een heleboel verschillende golfcondities doorgerekend op het Waterbouwkundig Laboratorium met behulp van het derde-generatie spectraal golfmodel SWAN (T.U.Delft), zodat er op de vooroever vóór het Zwin nu een heleboel 'numerieke' golfmeetboeien beschikbaar zijn. Het ware interessant om uit deze informatie een verbeterd golfklimaat vóór het Zwin af te leiden.
- In het voorjaar is een vlucht gepland met hyperspectrale opnamen van de Belgische duinengordel (met ondermeer de Zwinbosjes) in het kader van een onderzoeksproject over hyperspectrale vegetatiekartering (DWTC en AWZ-WWK project door VITO, Instituut voor Natuurbehoud en OC-GIS). De opname van het strand vóór het Zwin is niet opgenomen in de huidige planning. Het ware interessant om deze vlucht iets uit te breiden zodat het hele Zwinreservaat én het strand tot de geul van Cadzand wordt opgenomen, o.a. met het oog op verdere studies omtrent de resulterende sedimenttransportrichtingen in en rond het Zwin.
- Verder uitdiepen en afstemmen van de Nederlandse en Belgische inzichten omtrent residuele transporten van water en sedimenten in de ruime zone rond het Zwin (van Zeebrugge tot de Westerscheldemond) ware wenselijk.
- Aanvulling van de hier afgeleide sedimentbalansen met Nederlandse kustdelen ten oosten van Cadzand-Oost ware interessant, mits de kennis omtrent de (residuele) transportpaden toeneemt.
- Tenslotte kan nog een andere mogelijke aanvullende maatregel - al dan niet in combinatie met de hier bestudeerde maatregelen (verhoogd/verlengd strandhoofd of strekdam en herlokalisatie geul) - ter overweging aanbevolen worden: één of meerdere zandvangen (E. 'sand pit') buiten de Zwin-vlakte. Uiteraard vergen dergelijke zandvangen een geregeld onderhoud, maar uitdiepen van een zandvang buiten het eigenlijke Zwin betekent wellicht minder verstoring van het reservaat zelf en levert uiteraard zand op dat kan aangewend worden voor strandsuppleties. Mogelijke locaties zijn

bijvoorbeeld het kribvak tussen de twee meest nabije Belgische strandhoofden en een kribvak langs Nederlandse kant.

Borgerhout, Maart 2004



dr. ir. Tom De Mulder,
de onderzoeker, belast met de studie

Gezien,



dr. Frank Mostaert,
afdelingshoofd Waterbouwkundig Laboratorium
en Hydrologisch Onderzoek

6 REFERENTIES

6.1 Kaarten & plannen

- [K1] Afdeling Waterwegen Kust, Inspectieplan strandhoofd 22, Knokke-Heist, Ident. Nr. 17.4.820.028.0, Inspectie dd. 4/6/99, 1999.
- [K2] Afdeling Waterwegen Kust & Eurosense, Kustmorfologie, Aërolaserhypsometrische opname van het strand en de duinaanzet, Situatieplan nr. 40, Secties 247-251, opnamedatum 16/06/2000.
- [K3] Afdeling Waterwegen Kust & Thales GeoSolutions B.V., Vooroevermetingen langsheen Belgische en Nederlandse Kust, Dieptekaart, Kaart 8 van 8, ref. 733000-WA-P-08, revisie nr. 2, meetperiode 31 maart - 15 juni 2003.

6.2 Rapporten

- [R1] Eurosense, "Natuurreservaat 'Het Zwin', Evolutie tot augustus 1993, Morfologie, hydrodynamica en sedimentologie", rapport OOST 93.401, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1993.
- [R2] Eurosense, "Vooroever Zwin – Sedimentdynamica", rapport KDN 94.005, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1994.
- [R3] Bruun P. & Gerritsen F., "Stability of coastal inlets", North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1960.
- [R4] Deronde B., Houthuys R., Sterckx S., Bertels L., Ruts M., Debruyne W. & Fransaer D., Eindrapport Proefproject "Kwantitatieve bepaling van het zandtransport langsheen de Vlaamse Kust d.m.v. hyperspectrale data", VITO rapport 2003/TAP/068, oktober 2003.
- [R5] De Vriend H.J., Dronkers J., Stive M.J.F., Van Dongeren A. & Wang J.H., "Coastal inlets and tidal basins – part one", dictaat CTwa5303 T.U.Delft, oktober 1998.
- [R6] De Wolf, P., "Naar een oplossing van het verzandingsprobleem ?", in Mees et al. (eds.), 'Feestzitting ter afsluiting van het jubileumjaar 50 jaar Zwin – Het Zwin: van gisteren naar morgen', VLIZ Special Publication, 13, 2003.
- [R7] HAECON, "Vorstudie – Studie Kustverdediging te Knokke-Zoute (bestek WL/97E31), rapport KHB1768/00022, in opdracht van de Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek, juni 1999.
- [R8] Huygens M., "Een geïntegreerd onderzoek van zandsuppleties als kustverdediging – Toepassing voor de Belgische Oostkust", doctoraatsthesis Vakgroep Civiele Techniek, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent, 2001.
- [R9] Kerckaert P., "De aanzandingsmechanismen van het Zwin en de maatregelen om hieraan te verhelpen", Tijdschrift Water nr. 49, pp. 213-220, nov./dec. 1989.
- [R10] RIKZ-Rijkswaterstaat, "Westerscheldemond 1970-2020 – een morfologische blik op de toekomst", rapport RIKZ/2000.030, april 2000.
- [R11] RIKZ-Rijkswaterstaat, "Getijtafels voor Nederland 2002", Sdu Uitgevers, Den Haag, 2001.
- [R12] Roelse P. & Maranus J., "De lange termijn ontwikkeling van de Belgische oostkust en het aangrenzende kustgedeelte van Zeeuwsch Vlaanderen", nota WWKZ-85.V010, RIKZ-Rijkswaterstaat, mei 1985.
- [R13] Termaat R., Roelse P., Hugtenburg J. & Maranus J., "Morfologische kansen en bedreigingen voor scenario KBE-c ter voorkoming van aanzanding van het Zwin", Memo AXL 02-12 RIKZ-Rijkswaterstaat, 14 maart 2002.

- [R14] Van Rijn L.C., "Principles of coastal morphology", Aqua Publications, Amsterdam, 1998.
- [R15] Van Schijndel S.A.H. & Jagers H.R.A., "Complex flow around groynes, computations of Delft3D in combination with HLES", in Proceedings 'Int. Shallow-Flows Symposium', Balkema, 2003.
- [R16] WLB, "Tijoverzichtsmodel van de kust en het Scheldeëstuarium - Onderzoek eindsituatie uitbouw voorhaven Zeebrugge", rapport mod. 265/2-2, 1979
- [R17] WLB, "Tijoverzichtsmodel van de kust en het Scheldeëstuarium - Uitbouw van één of meerdere kribben in de Appelzak", rapport mod. 265-5 (verbeterde versie), 1976.
- [R18] WLB, "Tijoverzichtsmodel van de kust en het Scheldeëstuarium – Aanvullende proefsituaties Oostkust", rapport mod. 265/2-7, 1981.
- [R19] DHV, "Modelstudie Spuiwerking in het Zwin – Fase 1 en 2: Beoordelingskader en instrumentarium", in opdracht van RWS Directie Zeeland, AWZ Afdeling Waterwegen Kust en AMINAL, augustus 1998.
- [R20] DHV, "Modelstudie Spuiwerking in het Zwin – Fase 3 en 4:Optimalisatie spuiregime", in opdracht van RWS Directie Zeeland, AWZ Afdeling Waterwegen Kust en AMINAL, augustus 1998.
- [R21] Eurosense, "Kustmorfologie – Evolutie tot voorjaar 1988 – Deel 2: Secties 132 tot 277 – Teledetektie", rapport KUST 98.112, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1998.
- [R22] Eurosense, "Kustmorfologie – Strand- en vooroeveropmetingen – Gecombineerde resultaten – Deel 2: Secties 132 tot 277 – najaar 1998", rapport KUST 98.222, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1998.
- [R23] Eurosense, "Kustmorfologie – Evolutie tot najaar 1998 – Deel 2: Secties 132 tot 277 – Teledetektie", rapport KUST 98.212, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1998.
- [R24] Eurosense, "Morfologie Oostkust – Strand- en vooroeveropmetingen – Gecombineerde resultaten – Voorjaar 1989", rapport OOST 89.101, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1989.
- [R25] Eurosense, "Natuurreservaat 'Het Zwin', Evolutie tot augustus 1991, Morfologie, hydrodynamica en sedimentologie", rapport OOST 91.403, in opdracht van de Afdeling Waterwegen Kust, 1991.
- [R26] Eurosense, "Natuurreservaat 'Het Zwin', Evolutie van de zandvang, Periode 1989-1996", rapport ZWIN 96.001, in opdracht van de Technische Werkgroep van de Internationale Zwincommissie, 1996.
- [R27] Eurosense, "Teledetektie – Algemene definities", rapport ATD.87.100 in opdracht van de Dienst der Kust, 1987.
- [R28] Lanckneus J., Van Lancker V., Moerkerke G., Van den eynde D., Fettweis M., De Batist M., Jacobs P., "Investigation of natural sand transport on the Belgian continental shelf, BUDGET (Beneficial usage of data and geo-environmental techniques)", final report, Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC/DWTC), 2001.

DANKWOORD

Dank aan :

- ♦ dhr. J. Maranus van Rijkswaterstaat-Directie Zeeland voor het doorspelen van gegevens,
- ♦ ir. T. Verwaest van AWZ-Afdeling Waterwegen Kust voor het doorspelen van gegevens en opmerkingen,
- ♦ Dr.ir. J. van de Graaff van de T.U.Delft voor de opmerkingen en suggesties.



**WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM**

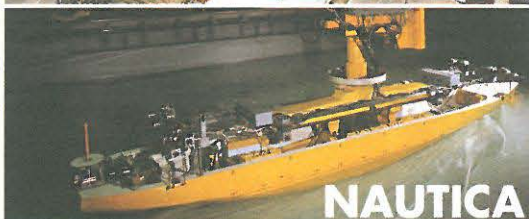
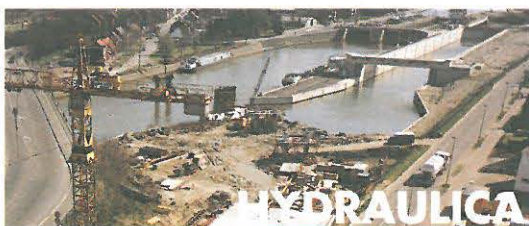
Berchemlei 115
B- 2140 ANTWERPEN
tel. 32(0)3/224 60 35
fax 32(0)3/224 60 36
e-mail: flanders.hydraulics@lin.vlaanderen.be
watlab@lin.vlaanderen.be

<http://watlab.lin.vlaanderen.be>

FLANDERS HYDRAULICS RESEARCH

**WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM**

**FLANDERS
HYDRAULICS**



ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
departement Leefmilieu en Infrastructuur
administratie Waterwegen en Zeewezen
afdeling Waterbouwkundig Laboratorium