

Is het de natuur of de mens die een bedreiging vormt voor kusten en polders ? *

door

Cécile BAETEMAN **

TREFWOORDEN. — Kustdynamiek ; Kustlijn ; Polders ; Kusterosie ; Subsidentie ; Kustbeheer ; Economische en toeristische ontwikkeling.

SAMENVATTING. — Ongeveer 50 % van de wereldbevolking woont in kustgebieden, één van de meest fragiele, maar dynamische gebieden op aarde. Kustgebieden zijn onderhevig aan invloeden veroorzaakt door een grote verscheidenheid van natuurlijke risico's, maar sommige van deze risico's zijn echter nauw verbonden met de menselijke aanwezigheid en haar acties. De nadruk zal gelegd worden op de risico's veroorzaakt door de mens zelf, risico's die een socio-economisch systeem kunnen destabiliseren en waarvan de gevolgen tragisch en kostelijk kunnen zijn. De uitgebreide lage kustgebieden langsheen de grote rivieren die behoren tot de dichtstbevolkte gebieden van de wereld vanwege hun gunstige geografische ligging, worden voortdurend bedreigd door kusterosie, stormen, indringen van zoutwater, verstoring van de natuurlijke drainage, en bovenal, door overstromingen. Deze overstromingen, in feite eigen aan de natuurlijke ontwikkeling van dergelijke vlaktes, zouden niet zo gevaarlijk zijn indien er niet zoveel mensenlevens mee gemoeid zouden zijn. De gevolgen van menselijke tussenkomsten in dergelijke kustvlaktes zullen geïllustreerd worden, evenals het conflict tussen de versnelde toeristische en economische ontwikkeling langs de stranden en de gevaren inherent aan het wonen met zicht op zee, een situatie die eigenlijk niets anders is dan een beleidsdilemma. De kwetsbare situatie van de zinkende steden enerzijds, en van kusterosie anderzijds, zal beschouwd worden in het licht van de natuurlijke processen actief in het zeer dynamische kustgebied. De noodzaak van een degelijk beleid zal eveneens besproken worden.

MOTS-CLES. — Dynamique côtière ; Littoral ; Polders ; Erosion côtière ; Subsidence ; Gestion de la zone côtière ; Développement économique et touristique.

RESUME. — *Est-ce la nature ou l'homme qui constitue une menace pour les côtes et les polders ?* — Près de 50 % de la population mondiale vit le long de la frange côtière, l'un des environnements les plus fragiles et les plus dynamiques de la planète. Les zones côtières sont soumises à une grande variété de catastrophes naturelles, mais cependant certaines sont étroitement associées à l'occupation humaine et ses effets inadéquats. L'accent sera mis sur les risques engendrés par l'homme capables de

* Lezing gehouden tijdens de zitting van de Klasse voor Technische Wetenschappen van 28 februari 1997. Tekst ontvangen op 28 april 1998.

** Quartairgeoloog ; Geologische Dienst van België, Jennerstraat 13, B-1000 Brussel (België).

déstabiliser les systèmes socio-économiques dont les conséquences peuvent être tragiques et coûteuses. Les vastes plaines adjacentes aux grands fleuves, souvent parmi les plus densément peuplées du monde en raison de leur localisation favorable, sont continuellement soumises aux risques d'érosion côtière, tempêtes, intrusion d'eau salée, dérégulation du drainage naturel et, surtout, inondations. Ces inondations, en fait inhérentes au développement de la plaine côtière, ne seraient pas catastrophiques si tant de vies humaines n'étaient pas impliquées. Les conséquences de l'intervention humaine dans les plaines côtières seront illustrées, ainsi que le conflit entre le développement en front de mer et la précarité liée à la présence de la mer même. La situation vulnérable des zones urbanisées soumises à la subsidence et à l'érosion côtière sera considérée en mettant l'accent sur les processus naturels de l'environnement côtier très dynamique et la nécessité d'un système propre de gestion de la zone côtière.

KEYWORDS. — Coastal Dynamics ; Shoreline ; Polders ; Coastal Erosion ; Land Subsidence ; Coastal Management ; Economic and Tourism Development.

SUMMARY. — *Is it Nature or Man which is Threatening Coasts and Polders ?* — About 50 % of the world population lives along the coastal fringe, one of the most fragile, but dynamic environments on earth. Coastal areas are subject to impacts resulting from a great variety of natural hazards. However, some hazards are closely associated with human settlements and the inappropriate actions of men. The emphasis will be put on coastal hazards involved by human activities which can destabilize socio-economic systems, the consequences of which can be tragic and painful. The vast flat plains along major rivers, which belong to the most densely populated areas in the world because of their favourable geographical location, are continuously threatened with coastal erosion, storms, salt-water intrusion, disturbance of the natural drainage, and above all, flooding. These floods, in fact inherent to the development of coastal lowlands, would not be hazardous if so many lives were not involved. The consequences of human intervention in such coastal plains will be illustrated, as well as the conflict between accelerating seafront development and the hazards inherent to water's edge building which is nothing but a policy dilemma. The vulnerable situation of sinking cities and shoreline erosion will be considered focusing on the natural processes in dynamic coastal environments and the need for a proper coastal zone management system.

1. Inleiding

Kustvlaktes behoren tot de meest kwetsbare gebieden in de wereld. De reliëfloze vlaktes die zich tot 100 km kunnen uitstrekken daar waar grote rivieren in zee uitmonden, liggen zelden hoger dan gemiddeld zeeniveau en zijn bijgevolg zeer gevoelig voor de kleinste veranderingen die zich in het kustgebied voordoen. Kustvlaktes worden zoals zoveel andere gebieden geteisterd door natuurlijke risico's, zoals o.a. aardbevingen en vulkaanuitbarstingen. Er zijn echter een hele reeks risico's die specifiek zijn voor deze gebieden. Zo zijn er de occasionele, maar zeker niet minder catastrofale risico's

zoals vloedgolven of tropische stormen. Maar die gebieden worden ook gekenmerkt door een voortdurende bedreiging zoals opslibben van estuaria, indringen van zout water, verzuren van landbouwgrond, bodemdaling, overstromingen — en dit zowel vanuit zee als vanuit land — en kusterosie.

Deze fenomenen vormen eigenlijk geen bedreiging voor het gebied als zodanig, maar het is de mens die er woont en werkt, samen met de industriële en economische infrastructuur die erdoor bedreigd worden. Deze uitgestrekte kustvlaktes zijn immers gekenmerkt door een zeer hoge bevolkingsdichtheid. Er wordt geschat dat minstens 50 % van de wereldbevolking in dergelijke gebieden woont waarbij daarenboven de grootste concentratie zich in Zuid-Oost-Azië (SURYADI 1996) bevindt. Het is trouwens heel waarschijnlijk dat deze tendens zal verhogen tot 75 % in de volgende eeuw (FINKL 1994). De meeste van 's werelds grootste steden zijn in kustvlaktes gelokaliseerd. Deze steden zijn in de loop der tijd uitgegroeid tot megasteden met 's werelds belangrijkste havens en industrie centra. De uitgestrekte vlaktes vormen eveneens de landbouwgebieden die de voedselproductie voor een groot deel van de wereldbevolking moet garanderen.

Al van oudsher behoren de kustvlaktes tot de meest uitverkoren gebieden voor menselijke nederzetting vanwege de gunstige geografische situatie zoals vruchtbare landbouwgrond, beschikbaarheid van zoetwater van de rivieren, gemakkelijke toegankelijkheid vanwege het zeer vlakke reliëf en de aanwezigheid van zee en rivier als eersterangshandelsroutes. Deze gunstige geografische situatie betekende een waardevolle economische rijkdom. Thans is de geografische situatie niet meer zo gunstig. De druk vanwege de hoge bevolkingsdichtheid heeft de kustvlaktes omgevormd tot risicogebieden.

De natuurlijke risico's die dergelijke gebieden thans voortdurend bedreigen, zijn in feite niets anders dan de natuurlijke geologische processen die werkzaam zijn om het gebied van nature uit in stand te houden. De natuurlijke processen worden echter als risico ervaren van zodra de mens interfereert.

Tijdens de laatste decennia zijn de exotische stranden van de derdewereld-landen uitverkoren gebieden voor toerisme geworden. Het toerisme vormt er dan ook een belangrijke bron van inkomsten. De kustgebieden zijn daarom een zeer interessant oord voor recreatie-ondernemers en project-ontwikkelaars, in die mate zelfs dat vele kusten thans gekenmerkt zijn door overontwikkeling van toeristische infrastructuur.

Het is de bedoeling in dit artikel aan te tonen in welke mate de bedreiging door natuurlijke risico's mee bepaald wordt door menselijke activiteiten en op die manier het belang van de kennis van de geologische gesteldheid in de maatschappij te illustreren.

2. De grootschalige kustdynamiek

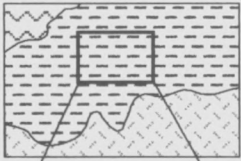
Kustlijn en vlakte vormen samen met het continentaal plat één enkele geologische entiteit en de geologische processen die de vorming en evolutie ervan bepalen, worden samengebracht in wat „grootschalige kustdynamiek” wordt genoemd. Om de werking van de geologische processen te kunnen inschatten in wat als natuurlijke risico's wordt ervaren, zal de grootschalige kustdynamiek tijdens het Holocene (laatste 10 000 jaar) in het kort worden geschetst. Ieder kustgebied heeft weliswaar zijn eigen typische ontstaansgeschiedenis en evolutie, maar het algemeen sturend mechanisme is zeer gelijklopend en wordt in hoofdzaak bepaald door een dynamisch evenwicht tussen de relatieve zeespiegelstijging, sedimentaanvoer, tektoniek en sedimentcompactie.

2.1. ZEESPIEGELSTIJGING ALS STUREND MECHANISME IN DE OPVULLINGSGESCHIEDENIS

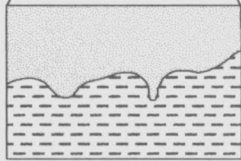
Eén van de belangrijkste sturende mechanismen in de opvullingsgeschiedenis van de kustvlaktes is de verandering in snelheid van de relatieve zeespiegelstijging (RZS). Uit de compilatie van zeespiegelcurves uit verschillende delen van de wereld (o.a. BELKNAP & KRAFT 1977) blijkt een zeer snelle stijging van het zeeniveau in de periode vóór 7 000 BP (meer dan gemiddeld 75 cm/100 jaar) en een eerste belangrijke vertraging rond 6 000 à 7 000 BP (tot gemiddeld 30 à 40 cm/100 jaar). In sommige gebieden blijft het niveau nagenoeg stabiel vanaf ongeveer 6 000 BP, terwijl in andere gebieden een tweede vertraging optreedt vanaf ongeveer 5 000 BP (tot gemiddeld 10 à 15 cm/100 jaar).

Door de RZS werden de Laat Pleistocene fluviatiele vlaktes omgevormd tot estuaria of getijdebekkens (fig. 1). Die vlaktes met zwak reliëf die zich uitstrekten over het huidige continentaal plat, waren tijdens de periode van lage zeespiegelstand gekenmerkt door fluviatiele afzetting van grofkorrelig sediment in de geulen en fijnkorrelig sediment in de komgrond. Het zijn de afzettingen van de geulen opgevuld tijdens perioden van lage zeespiegelstand die in de huidige kustvlaktes de belangrijkste zoetwatervoerende lagen vormen in de Kwartaire afzettingen. De enkele meters dikke alluviale klei vertoont eveneens een belangrijk economisch aspect. Door het feit dat ze in terrestrische omstandigheden werd afgezet, en dus niet verzadigd is met water, vormt ze een compacte, nagenoeg ondoorlaatbare laag. Het is de enige laag die, wat betreft het geotechnisch aspect, een betekenisvolle draagkracht heeft in de hele Boven Pleistocene en Holocene sequentie (BAETEMAN 1994).

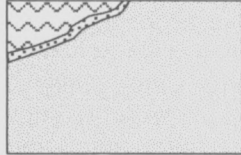
ca 18 000 jaar geleden SL -100 m



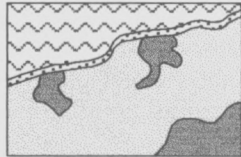
ca 9 000 jaar geleden SL -20 m



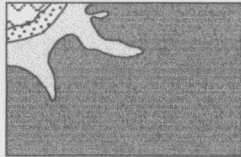
ca 8 000 jaar geleden SL -14 m



ca 7 000 jaar geleden SL -8 m



ca 5 000 jaar geleden SL -2 m



ca 3 000 jaar geleden

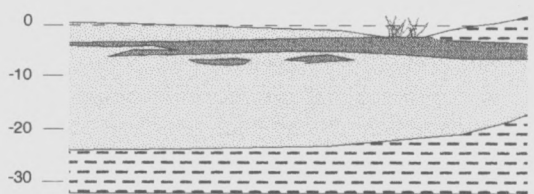
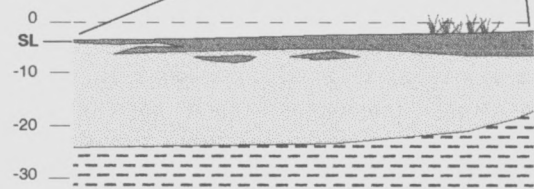
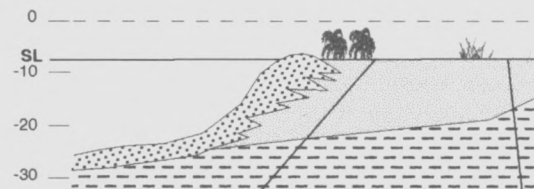
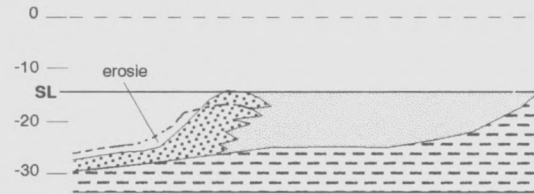
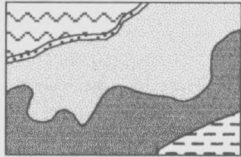


Fig. 1. — Schematische weergave van de opvulling van kustvlaktes tijdens het Holocene.

2.2. DE LANDWAARTSE VERSCHUIVING VAN GETIJDEBEKKEN EN KUSTLIJN

Met de stijging van de zeespiegel werd aanvankelijk fluviaal materiaal afgezet aan de monding van de rivier (ZAITLIN *et al.* 1994), maar vanwege de snelle zeespiegelstijging kende de zee een laterale uitbreiding en drong binnen via de laagst gelegen delen van de riviervlaktes die veranderden in estuaria of getijdebekkens die, naarmate de zeespiegel steeg, landwaarts migreerden. De fluviaale sedimenten werden bijgevolg afgezet in het estuarium zelf zodat nagenoeg geen materiaal meer werd aangevoerd naar zee om de aangrenzende kustlijnen te voeden (ALLEN & POSAMENTIER 1994). Daarenboven vereist een laterale uitbreiding van een getijdebekken sedimentaanvoer ter compensatie, maar vanwege de grote snelheid van zeespiegelstijging was de aanvoer vanuit zee onvoldoende om de stijging, en de op die manier nieuw gecreëerde verticale ruimte, te compenseren (BEETS *et al.* 1994). Daardoor werd de onderwateroever geërodeerd door golf- en getijde-actie om het nodige zand aan te voeren. Dit resulteerde in erosie van de kustbarrière waardoor ook de kustlijn landwaarts migreerde. Kustbarrières, opgebouwd uit verschillende soorten zandafzettingen (zoals vloed- en ebdelta's, zeegaten, onderwateroever, strand en duinen), zijn tijdelijke vormen die zichzelf handhaven in dynamisch evenwicht met de stijgende zeespiegel door het landwaarts verplaatsen van zand (SCOR Working Group 89, 1991; ROY *et al.* 1995; ROY & BOYD 1996). Het mechanisme dat voor de opvulling van de vlakte zorgt, veroorzaakt tegelijkertijd erosie in het zeewaarts gebied.

Deze landwaartse verschuiving van getijdebekkens en kustlijn duurde voort tot de snelheid van de RZS aanzienlijk verminderde rond ongeveer 7 000 BP. Daardoor kon de sedimentaanvoer de RZS bijhouden met als gevolg dat de getijdebekkens geheel opvulden (BEETS *et al.* 1994). Door die opvulling verminderde de komberging van de getijdegeulen waardoor die, samen met de zeegaten, opslibden. Vanaf deze periode migreerde de kustbarrière niet meer landwaarts, maar bleef haar positie stabiel. Het is ook vanaf deze periode dat de eerste veenlagen zich ontwikkelden, voornamelijk rietveen in de vochtige gematigde klimaatgebieden en mangroveveen in de tropische gebieden (ELLISON & STODDART 1991). Die veenaccumulaties waren aanvankelijk van korte duur — enkele honderden jaren — en kenden een lokaal verspreidingspatroon omwille van het feit dat de zeespiegel nog steeds bleef stijgen, zij het dan met een verminderde snelheid. Daardoor bleef er zich verder sediment accumuleren in de getijdegeulen en in hun onmiddellijke omgeving. De laterale migratie van de getijdegeulen via het mechanisme van meanderdoorbraken of als doorbraakgeul doorheen de oeverwal leidde tot het overnemen van de drainage van de ene geul door een andere waardoor de eerste geul, of een deel ervan, verlaten werd door de eb- en vloedstroom en bijgevolg ging toeslibben (OOST & DE BOER 1994). Als dergelijk gebied lang genoeg buiten de dagelijkse invloed van de getijden bleef zodat er zich een zoetwaterzak

handhaafde, kon er zich veen accumuleren. De veelvuldige laterale verplaatsingen van de geulen in de opvullingsgeschiedenis resulteerden op die manier in laterale verschuivingen van de verschillende sedimentaire afzettingmilieus van het wad over mekaar en verklaren eveneens de lokale verspreiding van de vroegste verlandingsvenen. Het accumuleren van veen in een bepaald subgebied gebeurde dus gelijktijdig met de accumulatie van zand en klei in een ander subgebied; de lokatie van de getijdegeulen was daarbij de belangrijkste bepalende factor. Zolang er voldoende sediment voorradig was en de RZS, zij het vertraagd, nog voldoende bergingsruimte voor sediment op het wad creëerde, bleef dit mechanisme van laterale verschuiving van de verschillende afzettingmilieus en moerassen over mekaar heen, zich herhalen. Vanwege dit typische opvullingsproces is de sedimentaire sequentie afgezet in de periode tussen ongeveer 7 000 en 5 000 BP gekenmerkt door een zeer sterke variatie in lithologie en dit zowel lateraal als verticaal.

De estuaria of getijdebekkens die gekenmerkt waren door onvoldoende sedimentaanvoer om de RZS te compenseren, veranderden in lagunes die zich ontwikkelden achter de kustbarrière.

2.3. HET ZEEWAARTS UITBOUWEN VAN DE KUST

Door het relatief stabiele zeeniveau vanaf ongeveer 5 000 BP, kreeg de sedimentaanvoer de overhand op de RZS. Gezien het grootste gedeelte van de getijdebekkens opgevuld was tot op hoogwaterniveau, was er op de vlakte geen bergingsruimte voor sediment meer, althans niet voor sedimentaccumulatie door kust en mariene processen. Deze laatste zetten immers geen sedimenten af op een niveau hoger dan hoogwaterniveau bij springtij, behalve bij extreme toestanden zoals hevige stormen. De zeegaten en getijdegeulen slibden toe, de kustbarrières progradeerden en de kust kon zeewaarts uitbouwen. De monding van de rivieren die tot nu toe estuaria waren waarin zowel marien als fluviatiel sediment bezonk, vormden vanaf deze periode een bron van sediment waardoor delta's en deltavlaktes werden opgebouwd (NIEDORODA *et al.* 1985). Rivieren die echter onvoldoende fluviatiel sediment aanvoerden, bereikten dit stadium niet.

Tijdens deze periode van stabiele en zelfs uitbouwende kust in het Laat Holocene waren grote delen van de uitgestrekte vlaktes waar geen sedimentatie meer plaatsvond, gekenmerkt door intense groei van veenvormende planten. De van het grondwater afhankelijke veenaccumulaties konden gelijke tred houden met de zwakke RZS waardoor ze in sommige gebieden onafgebroken accumuleerden gedurende 2 000 à 3 000 jaar. Dit resulteerde in metersdikke veenpakketten in de landwaartse gebieden. In de meer zeewaarts gelegen gebieden werd de veengroei nog geregeld onderbroken door sedimentatie, zodanig dat de sequentie aldaar bestaat uit meerdere en dunnere veenlagen.

Vanwege de vermindering van de RZS en de opgeslibde toestand van de vlakte kon in het landwaarde gedeelte ervan fluviale sedimentatie plaatsvinden op voorwaarde dat er voldoende fluviale sedimentaanvoer was (DALRYMPLE *et al.* 1994). Op die manier kwam een nieuwe alluviale vlakte tot stand, en dit boven gemiddeld zeeniveau (fig. 1). Die alluviale vlakte kon geleidelijk zeewaarts uitbreiden, bovenop de kustafzettingen, zolang de nodige sedimenten aangebracht werden.

2.4. EROSIE VAN DE KUSTBARRIERE EN KUSTINBRAKEN

Door de algemene opslibbing van de vlakte die het sluiten van de zeegaten in het zeewaartse gebied veroorzaakte, kwam een verandering in mechanisme van sedimentaanvoer vanaf het continentaal plat tot stand zodanig dat de onderwateroever geleidelijk aan steiler werd en onderhevig was aan erosie door golven (BEETS *et al.* 1992). Daarenboven waren de sedimentbronnen, gebruikt voor de uitbouw van de kust, uitgeput geraakt zodanig dat om de steeds blijvende RZS te compenseren, nieuwe bronnen moesten gecreëerd worden. Dit gebeurde door erosie van de kustbarrière wat een terugschrijven van de kust tot gevolg had (BEETS *et al.* 1994). De erosie van de kustbarrière leidde tot kustinbraken waardoor getijdegeulen zich gingen ontwikkelen en het getijdebekken weer landwaarts migreerde waardoor de veengroei aldaar geleidelijk aan tot een einde kwam. In deze laatste gebieden had ook geen sedimentaccumulatie meer plaatsgevonden voor een lange periode. Dergelijke gebieden zijn daarenboven ook onderhevig aan bodemdaling door compactie onder hun eigen gewicht en door tektonische subsidentie (o.a. KAYE & BARGHOORN 1964, RIEKE & CHILINGARIAN 1974, EINSELE 1992). De meeste van de grote rivieren zijn immers gelokaliseerd in tektonische subsidentiebekkens (AUDLEY-CHARLES *et al.* 1977). Vanwege deze — zij het geringe — bodemdaling waren grote delen van de vlakte niet meer in evenwicht met het zeeniveau waardoor een nieuwe bergingsruimte voor de getijdegeulen tot stand kwam. Om zich aan deze nieuwe toestand aan te passen, schuurden deze laatste diepe erosiegeulen uit in de oudere afzettingen (fig. 2) (ALLEN & POSAMENTIER 1994, OOST & DE BOER 1994, BAETEMAN *et al.* 1992). De verticale erosie veroorzaakte echter ook een ontwatering van de waterverzadigde kustafzettingen en venen met compactie en bodemdaling tot gevolg, wat aanleiding gaf tot het versnellen van het mechanisme van uitbreiding van bergingsruimte. Dit mechanisme, dat resulteerde in de jongste afzettingen van de vlakte, was werkzaam tot de vlakte een niveau bereikte dat weer in evenwicht was met het zeeniveau.

2.5. DE BEDREIGING VAN HET DYNAMISCH EVENWICHT

Dit algemeen overzicht van de ontstaansgeschiedenis van de lage kustgebieden toont aan dat hun vorming en bijgevolg ook hun voortbestaan bepaald

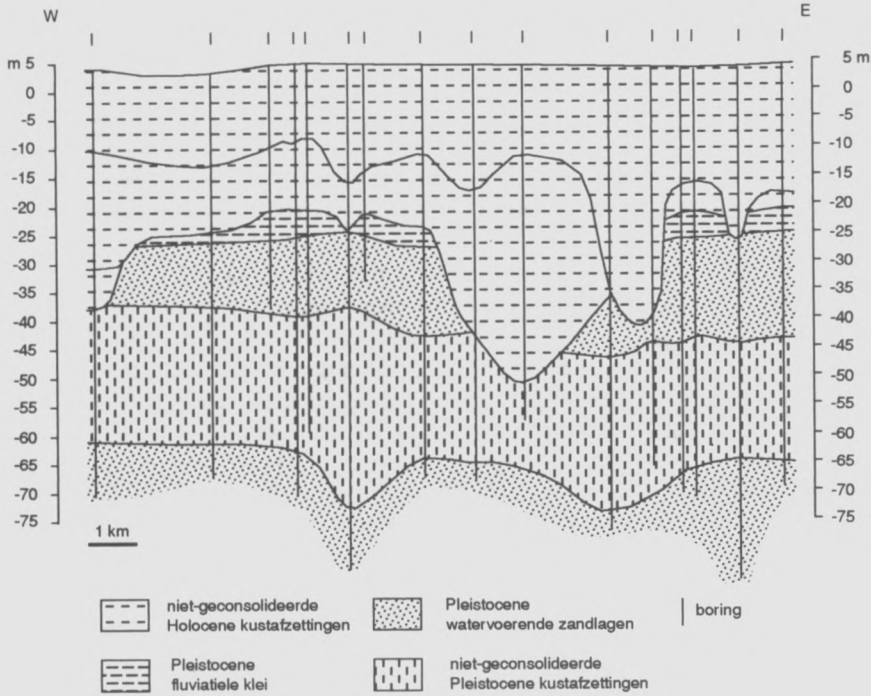


Fig. 2. — Dwarsdoorsnede door de Boven Pleistocene en Holocene afzettingen van Shanghai (China) waar op verschillende plaatsen de Pleistocene afzettingen tot een aanzienlijke diepte geërodeerd zijn door de verticale insnijding van de Holocene getijdegeulen. Het is vooral het ontbreken van de ondoordringbare compacte Pleistocene fluviatile kleilaag, waardoor de watervoerende lagen niet meer afgedekt zijn van de niet-geconsolideerde afzettingen, die bij het pompen van grondwater een bodemdaling van bijna 3 m veroorzaakt heeft (naar BAETEMAN *et al.* 1992).

worden door een dynamisch evenwicht tussen hoofdzakelijk relatief zeeniveau, sedimentaanvoer, tektoniek en compactie. Deze elementen worden op hun beurt beïnvloed door een hele reeks factoren, zoals o.a. klimaat en vegetatie. Dit dynamisch evenwicht bepaalt echter de kwetsbaarheid van dergelijke gebieden. Thans vormt de tussenkomst van de mens ook een zeer bepalende factor in dit dynamisch evenwicht wat de kwetsbaarheid van het gebied nog vergroot. De natuurlijke processen reageren op de door de mens aangebrachte veranderingen door aanpassing, en het zijn die aanpassingen die als bedreigingen of natuurlijke risico's worden ervaren.

De natuurlijke risico's zijn niet alleen het gevolg van de interferentie van de mens in het dynamisch evenwicht, maar ze zijn ook het direct gevolg van de opvullingsgeschiedenis waardoor de afzettingen zeer specifieke kenmerken

hebben, wat aanleiding geeft tot problemen van zodra de mens dergelijke gebieden gaat ontginnen. Enkele aspecten van de meest voorkomende problemen in kustgebieden zullen hieronder toegelicht worden.

3. Problemen ten gevolge van de specifieke kenmerken van de afzettingen : bodemdaling, overstroming en zure gronden

Door het feit dat de opvulling van de kustvlakte gebeurde als gevolg van de stijgende zeespiegel, zijn de Holocene sedimenten er nooit op natuurlijke wijze ontwaterd geweest. Het grondwaterniveau heeft steeds gelijke tred gehouden met het stijgende zeeniveau, zodanig dat de sedimenten sterk verzadigd zijn met water. Dit is er de oorzaak van dat de sedimenten niet geconsolideerd zijn, een zeer geringe draagkracht hebben en bovenal zeer samendrukbaar zijn (EINSELE 1992). Ontwatering heeft onherroepelijk en nagenoeg onmiddellijk compactie van het sediment en bodemdaling tot gevolg.

3.1. BODEMDALING EN OVERSTROMINGEN

Bodemdaling is een zeer frequent en onvermijdelijk verschijnsel bij inpoldering van getijdegebieden. Omdat de drainage niet meer op natuurlijke wijze kan gebeuren, worden grachten en kanalen gegraven waardoor de bovenste sedimenten gaan ontwateren. Zelfs een ondiepe drainage van één tot twee decimeter veroorzaakt reeds een bodemdaling van bijna een centimeter per jaar (STEPHENS *et al.* 1984). Dergelijke bodemdaling, die aanvankelijk niet zichtbaar blijkt, maakt het gebied vooral kwetsbaar voor overstromingen vanuit land omdat door de verlaging van het maaiveld ten opzichte van het zeeniveau, overvloedige neerslag niet meer op voldoende wijze kan geëvacueerd worden. Gebieden gekenmerkt door moessonregens worden op die manier jaarlijks geteisterd door dergelijke overstromingen.

Inpolderen veroorzaakt ook overstromingen vanuit zee en dit vooral bij hevige stormen. Inpolderen impliceert het bouwen van dijken langsheen geulen waardoor in feite de komberging van de getijdegeulen op kunstmatige manier verkleind wordt. Bij hoge vloed kan het water zich dan niet meer spreiden over het supratidaal gebied waardoor het stormvloedniveau in de geulen verhoogt wat een verhoogde druk op de dijken teweegbrengt. Wanneer de dijk langsheen de geul uiteindelijk doorbreekt, zal de massa opgestapeld water met volle kracht in de lager gelegen polders stromen met catastrofale gevolgen (VOS & VAN HEERINGEN 1997).

3.2. ZINKENDE STEDEN

Veel belangrijkere bodemdalingen komen voor wanneer in kustvlaktes grondwater gepompt wordt. Bodemdaling van enkele meters is een alom

gekend fenomeen in en rondom grote steden (BAETEMAN 1994). Vanwege de zeer hoge bevolkingsdichtheid en de industrie is de vraag naar zuiver water groot en gezien de rivieren thans dermate verontreinigd zijn, vormt grondwater het enige alternatief.

De subsidentie van de grote steden is een fenomeen waarvan men thans zeer goed de oorzaken kent, evenals de geotechnische methodes om het te controleren (o.a. POLAND 1984, JOHNSON 1991). Het blijft echter nog steeds een alarmerend fenomeen, want in de praktijk is het pompen van grondwater en bijgevolg de bodemdaling niet zo gemakkelijk te controleren. De veelvuldige lithologische variaties in de ondergrond worden genegeerd of zijn niet gekend en veel te vaak wordt de Quartairgeologische gesteldheid veralgemeend en bij wijze van inleiding op postzegelformaat weergegeven. Daarenboven hebben het merendeel van de grote hotels in de megasteden van de Derde Wereld een eigen put om grondwater te pompen om zo onder meer het comfort voor de massa toeristen te kunnen garanderen. In steden zoals Jakarta, Hanoi, Haiphong, Rangoon en delen van Metro-Manila is de mate van subsidentie echter nog steeds niet goed gekend, laat staan onder controle (BAETEMAN 1994). Financiële implicaties liggen hier heel dikwijls aan de basis.

3.3. ZURE LANDBOUWGRONDEN

De alluviale vlaktes die zich ontwikkelden bovenop de sequentie van kustafzettingen zijn uitverkoren gebieden voor de landbouw (fig. 1). Alhoewel die gebieden op een iets hoger niveau liggen dan de rest van de kustvlakte en dus minder kwetsbaar zijn voor overstromingen, is de ontginning ervan voor de landbouw toch problematisch. Dergelijke ontginning impliceert meestal de aanleg van een irrigatie- en afwateringssysteem waarbij grachten en kanalen worden gegraven. De alluviale klei wordt ook veelvuldig uitgegraven voor de productie van bakstenen. Door deze menselijke activiteiten wordt de grondwatertafel verlaagd en het pyriet dat in de onderliggende kustafzettingen aanwezig is, zal oxideren tot zwavelzuur (ROY & BOYD 1996, SURYADI 1996). Dit resulteert in het ontstaan van zure sulfaatgronden die nefast zijn voor de landbouwgewassen. Het vrijkomen van zwavelzuur zal daarenboven de waterwegen verzuren en heeft een ernstige invloed op de veelzijdige aquaculturen. Heel dikwijls zijn die gebieden ook nog gekenmerkt door bodemdaling ten gevolge van compactie en oxidatie van het veen.

4. Problemen ten gevolge van het verstoren van het dynamisch evenwicht : kusterosie

Sinds de laatste decennia hebben de meeste kustlijnen van de hele wereld te kampen met erosie. Als één van de belangrijkste oorzaken werd begin van

de jaren tachtig een zeespiegelstijging ten gevolge van het broeikas-effect aangehaald (o.a. TITUS 1986, LEATHERMAN 1987, PILKEY *et al.* 1983, VELLINGA & LEATHERMAN 1989). Op basis van getijmetingen vanaf ongeveer 1700 AD heeft men achterhaald dat de zeespiegel gestegen is met een gemiddelde variërend van 10 tot 20 cm per 100 jaar (PIRAZZOLI 1986, GORNITZ & LEBEDEFF 1987). Diverse scenario's werden uitgewerkt met schattingen dat in het jaar 2000 de zeespiegel 5 tot 17 cm hoger zou liggen. Schattingen door HOFFMAN (1984) voor de meest waarschijnlijke stijging variëren van een gemiddelde snelheid per 100 jaar van 63 cm tot 95 cm tegen het jaar 2025, 79 cm tot 120 cm tegen 2050, en 130 tot 190 cm tegen 2100. Andere bronnen geven een veel kleinere schatting zoals ongeveer 50 cm per 100 jaar tegen het jaar 2050 (MEIER 1990) en een stijging van ongeveer 48 cm tegen het jaar 2100 (WIGLEY & RAPER 1992). De verschillende scenario's lopen sterk uiteen omdat de voorspelling van de algemene zeespiegelstijging heel wat extrapolatie en speculatie inhoudt vanwege de lacunes in de kennis van de dynamiek van de oceanen en ijskappen enerzijds (TOOLEY & JELGERSMA 1992) en vanwege het feit dat men de lokale veranderingen in landniveau, veroorzaakt door isostasie en neotektoniek, nog onvoldoende kent (SCOR Working Group 89, 1991) anderzijds.

Thans blijkt dat de realiteit deze voorspellingen niet als zodanig volgt en werd nog geen versnelling van de zeespiegelstijging genoteerd in het laatste decennium (SCOR Working Group 89, 1991; WRAY *et al.* 1995). De veranderingen in zeespiegel achterhaald door getijwaarnemingen tonen echter wel een aanzienlijke variabiliteit die in tijdsspanne kan variëren van dagen tot jaren met veranderingen van zeeniveau van gemiddeld 10 tot 30 cm en soms 100 cm kunnen overschrijden (KOMAR & ENFIELD 1987). Deze veranderingen op korte termijn worden onder meer veroorzaakt door veranderingen in atmosferische druk, veranderingen in windkracht en -sterkte, watertemperatuur en kuststromingen.

Naar het einde van de jaren tachtig toe beschouwde men de zeespiegelstijging niet meer als de voornaamste oorzaak van de sterke kustafslag, maar werden de overontwikkeling en slechte ruimtelijke ordening in de kuststreken, alsmede de destructieve invloed van vaste structuren door de mens in de litorale zone ingeplant (zoals zeeweringsdijken, pieren, zeehoofden of uitbaggeren van geulen, afsnijden van longitudinaal zandtransport), als belangrijkste oorzaken aangezien (DEVOY 1987, KRAUS & PILKEY 1988, O'HARA 1989).

De gecombineerde actie van de hierboven vermelde factoren zal ongetwijfeld een aanzienlijke rol spelen bij de kusterosie. De dominerende factor is echter het sedimentbudget. Zoals hierboven beschreven in de grootschalige kustdynamiek, behoren strand en duin tot de kustbarrière die in dynamisch evenwicht is met de stijgende zeespiegel. Het evenwicht wordt bereikt door het landwaarts verplaatsen van zandmassa's die vrijkomen door erosie van de onderwateroever met als gevolg een landwaarts verplaatsing van de kustbarrière en een

zichtbare erosie van de kust. Dit is een natuurlijk dynamisch proces van herverdeling van zand wat leidt tot periodieke afslag en aanwas van strand en duin, een proces dat tegelijkertijd het voortbestaan van strand en duin garandeert, weliswaar niet op dezelfde plaats (BAETEMAN 1995). Dit proces wordt een natuurlijk risico alleen wanneer immobiliën en infrastructuur te dicht bij de kustlijn werden aangebracht. De huidige kusterosie is in werkelijkheid méér dan een incidentele kustafslag door een storm. De algemene tendens van kusterosie bevestigt dat er een tekort is aan sediment, een verschijnsel dat alleen kan opgelost worden wanneer voldoende ruimte gegeven wordt aan de kustbarrière, en dus aan strand en duin, om landwaarts te migreren als respons op het tekort aan sedimentaanbod om de zeespiegelstijging te compenseren (LEATHERMAN 1987). Het hoeft geen betoog dat het ontginnen van zand en grint in de bovenloop van rivieren of het bouwen van dammen de uiteindelijke sedimentaanvoer naar zee eveneens sterk verminderen. De erosie van de kustlijn van de Nijldelta is daar een trieste bevestiging van.

5. De reactie van de mens op kusterosie

De reactie van de mens op kusterosie is kuststabilisatie ; de kustlijn stabiel en op dezelfde plaats houden om gebouwen en investeringen te vrijwaren van schade of vernietiging. Er zijn twee alternatieven om de kustlijn te stabiliseren : harde en zachte stabilisatie. Harde stabilisatie verwijst naar permanente harde structuren op een vaste plaats. Dit zijn o.a. zeeweringsdijken gebouwd evenwijdig aan de kustlijn, en golfbrekers ingeplant loodrecht op de kustlijn. Zachte stabilisatie verwijst naar zandsuppletie, dit is de kunstmatige aanvoer van vreemd zand naar het strand. Het dynamisch proces om de kustbarrière in stand te houden enerzijds en harde stabilisatie anderzijds zijn opponenten, en hun confrontatie is niet zonder gevaar. Onderzoek betreffende de invloed van harde stabilisatie tijdens de laatste twintig jaar heeft uitgemaakt dat, op enkele uitzonderingen na, zeeweringsdijken een zeer nefaste invloed hebben en op lange termijn strand en duin volledig doen verdwijnen (o.a. KRAUS & PILKEY 1988, PILKEY *et al.* 1983). De gebouwen en infrastructuur zijn weliswaar beschermd, maar het strand — de reden voor de aanwezigheid van de toerist — is verdwenen. Vanwege de nefaste invloed van harde stabilisatie is men de laatste jaren in de meeste landen overgestapt naar zandsuppletie om het strand in stand te houden. Het grote nadeel hierbij is dat het steeds opnieuw moet uitgevoerd worden waarbij enorme volumes zand met welbepaalde kenmerken ergens moeten ontgonnen worden. Deze methode impliceert een voortdurende waakzaamheid en actie en brengt zware financiële lasten met zich mee wat in derdewereldlanden vaak een onmogelijke inspanning is. Zandsuppletie moet steeds opnieuw uitgevoerd worden, omdat een artificieel strand namelijk veel sneller verdwijnt dan zijn natuurlijke voorganger (PILKEY

et al. 1983). Daarom probeert men thans ook de onderwateroever artificieel op te hogen in plaats van alleen maar het strand. Op die manier krijgt de kustbarrière een groter volume zand en kan de natuurlijke tendens van landwaartse migratie enigszins gematigd worden. De financiële lasten worden weliswaar nog zwaarder.

6. Besluit

Kustvlakte en kustlijn zijn vanwege hun dynamisch karakter zeer gevoelig voor de kleinste verandering die zich voordoet op land en in zee. De intense aanwezigheid van de mens heeft dergelijk gebied uiterst kwetsbaar gemaakt voor natuurlijke risico's. De gebieden als zodanig worden niet bedreigd, maar wel de miljoenen mensen die er leven en hun industriële en economische infrastructuur en investeringen. De specifieke natuurlijke risico's die de gebieden voortdurend bedreigen, zijn niets anders dan de natuurlijke geologische processen werkzaam om het gebied van nature uit in stand te houden. Kustvlakte en kustlijn moeten daarom niet verdedigd worden tegen natuurlijke risico's. Ze bezitten van nature uit alle elementen om zichzelf te verdedigen, onder natuurlijke omstandigheden, weliswaar. Het zijn de geologische processen en het dynamisch evenwicht die het gebied in stand houden, die moeten beschermd worden. Die bescherming impliceert echter een degelijk beleid vanwege de overheid. Het is dan ook noodzakelijk dat het beleid de geologische processen erkent en het dynamische aspect ervan aanvaardt. Maar het beleid moet vooral bereid zijn om de belangen en de veiligheid van de gehele kustbevolking af te wegen tegen het winstbejag van enkele projectontwikkelaars.

De geologische processen die de vorming en de evolutie van kustvlakte en kustlijn bepalen alsook de geotechnische kenmerken van de kustafzettingen zijn in het algemeen vrij goed gekend. Ook de diverse invloeden van de menselijke tussenkomsten werden reeds grondig bestudeerd en bekritiseerd in de wetenschappelijke literatuur. De conclusies ervan worden nog steeds niet ten volle benut of geïntegreerd in de beleidsplannen van de overheid; ze worden trouwens moedwillig genegeerd door de projectontwikkelaars die uitsluitend gedreven zijn door winstbejag. De dagelijkse realiteit leert ons dat vaste bebouwing en infrastructuur nog steeds veel te dicht bij de kustlijn worden geplaatst, dat de sedimentaanvoer nog steeds verhinderd wordt door het bouwen van dammen op grote rivieren, dat getijdegebieden die met moeite boven water komen, nog steeds op grote schaal ingepolderd worden, enz.

Vele van de specifieke risico's die miljoenen mensenlevens in de kustvlakte permanent bedreigen zouden in sterke mate kunnen gematigd worden als de geowetenschapper erin zou slagen de resultaten van zijn onderzoek mee te delen aan planners en beleidsmensen opdat ze zouden kunnen geïntegreerd worden in een algemeen kustbeleid waarin mens en natuur minstens even waardevol geschat worden als de financiële en economische normen.

BIBLIOGRAFIE

- ALLEN, P. & POSAMENTIER, H. W. 1994. Transgressive facies and sequence architecture in mixed tide and wave-dominated incised valleys : example from the Gironde Estuary, France. — *In* : DALRYMPLE, R. W., BOYD, R. & ZAITLIN, B. A. (eds.), Incised-valley systems : origin and sedimentary sequences. *Society for Sedimentary Geology* (Special Publication), **51** : 225-240.
- AUDLEY-CHARLES, M., CURRAY, J. & EVANS, G. 1977. Location of major deltas. — *Geology*, **5** : 341-344.
- BAETEMAN, C. 1994. Subsidence in coastal lowlands due to groundwater withdrawal : the geological approach. — *In* : FINKL, C. W. Jnr. (ed.), Coastal Hazards, Perception, Susceptibility and Mitigation. *Journal of Coastal Research* (Special Issue), **12** : 61-75.
- BAETEMAN, C. 1995. De conflictsituatie tussen natuur en toerisme in het kustgebied. — *De Aardrijkskunde*, **3** : 5-20.
- BAETEMAN, C., BOGEMANS, F., GOVAERT, E., HUANZHONG, H. & JINGXIN, L. 1992. The Quaternary deposits of the Changjiang Coastal Plain (Shanghai Area). — *Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol.*, **46** : 7-23.
- BEETS, D. J., VAN DER SPEK, A. J. F. & VAN DER VALK, L. 1994. Holocene ontwikkeling van de Nederlandse kust. — Rijks Geologische Dienst rapport 40 016 - Project Kustgenese, 53 pp.
- BEETS, D. J., VAN DER VALK, L. & STIVE, M. J. F. 1992. Holocene evolution of the coast of Holland. — *Marine Geology*, **103** : 423-443.
- BELKNAP, D. F. & KRAFT, J. C. 1977. Holocene relative sea-level changes and coastal stratigraphic units on the northwest flank of the Baltimore Canyon Trough geosyncline. — *Journal of Sedimentary Petrology*, **47** : 610-629.
- DALRYMPLE, R. W., BOYD, R. & ZAITLIN, B. A. 1994. History of research, valley types and internal organization of incised-valley systems : Introduction to the volume. — *In* : DALRYMPLE, R. W., BOYD, R. & ZAITLIN, B. A. (eds.), Incised-valley systems : origin and sedimentary sequences. *Society for Sedimentary Geology* (Special Publication), **51** : 225-240.
- DEVOY, R. J. N. 1987. Sea-level applications and management. — *Progress in Oceanography*, **18** : 273-286.
- EINSELE, G. 1992. Sedimentary Basins. — Springer-Verlag, Berlin, 628 pp.
- ELLISON, J. C. & STODDART, D. R. 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise : Holocene analogues and implications. — *Journal of Coastal Research*, **7** (1) : 151-165.
- FINKL, C. W. Jnr. (ed.) 1994. Coastal Hazards, Perception, Susceptibility and Mitigation. — *Journal of Coastal Research* (Special Issue), **12** : 372.
- GORNITZ, V. M. & LEBEDEFF, S. 1987. Global sea-level changes during the past century. — *In* : NUMMEDAL, D., PILKEY, O. H. & HOWARD, J. D. (eds.), Sea-level fluctuations and coastal evolution. *S.E.P.M.* (Special Publication), **41** : 3-16.
- HOFFMAN, J. S. 1984. Estimates of future sea-level rise. — *In* : BARTH, M. C. & TITUS, J. G. (eds.), Greenhouse effect and sea-level rise : a challenge for this generation. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 79-104.
- JOHNSON, A. I. (ed.) 1991. Land Subsidence. — Proceedings of the Fourth International

- Symposium on Land Subsidence (Houston, May 1991), IAHS Publication, No. 200, 690 pp.
- KAYE, C. A. & BARGHOORN, E. S. 1964. Late Quaternary sea-level and crustal rise at Boston, Massachusetts, with notes on the autocompaction of peat. — *Geol. Soc. Am. Bull.*, **75** : 63-80.
- KOMAR, P. D. & ENFIELD, D. B. 1987. Short-term sea-level changes and coastal erosion. — *In* : NUMMEDAL, D., PILKEY, O. H. & HOWARD, J. D. (eds.), Sea-level fluctuations and coastal evolution. *S.E.P.M.* (Special Publication), **41** : 17-27.
- KRAUS, N. C. & PILKEY, O. H. (eds.) 1988. The effect of seawalls on the beach. — *Journal of Coastal Research* (Special Issue), **4** : 146.
- LEATHERMAN, S. P. 1987. Beach and shoreface response to sea-level rise : Ocean City, Maryland, U.S.A. — *Progress in Oceanography*, **18** : 139-149.
- MEIER, M. F. 1990. Reduced rise in sea level. — *Nature*, **343** : 115-116.
- NIEDORODA, A., SWIFT, D. & HOPKINS, T. 1985. The Shoreface. — *In* : DAVIS, R., Jnr. (ed.), Coastal Sedimentary Environments, Springer-Verlag, New York, pp. 533-624.
- O'HARA, N. W. 1989. Eroding shorelines. — *Geotimes*, April : 3-5.
- OOST, A. P. & DE BOER, P. L. 1994. Sedimentology and development of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and backbarrier areas of the Dutch Wadden Sea. — *Senckenbergiana Maritima*, **24** : 65-115.
- PILKEY, O. H. Sr., PILKEY, W. D., PILKEY, O. H. Jnr. & NEAL, W. J. 1983. Coastal Design. A guide for builders, planners, and home owners. — Van Nostrand Reinhold Company, New York, 224 pp.
- PIRAZZOLI, P. A. 1986. Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. — *Journal of Coastal Research* (Special Issue), **1** : 1-126.
- POLAND, J. F. 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. — Studies and reports in Hydrology, Unesco, No. 40, 305 pp.
- RIEKE, H. & CHILINGARIAN, G. (eds.) 1974. Compaction of argillaceous sediments. — Developments in Sedimentology, Elsevier SCI Publ., Amsterdam, 16, 424 pp.
- ROY, P. S. & BOYD, R. 1996. Quaternary Geology of a Tectonically Stable, Wave-Dominated, Sediment-Deficient Margin, Southeast Australia. — IGCP Project # 367, Field Guide to the Central New South Wales Coast (November 1996). New South Wales Geological Survey, Sydney, 174 pp.
- ROY, P. S., COWELL, P. J., FERLAND, M. A. & THOM, B. G. 1995. Wave-dominated coasts. — *In* : CARTER, R. W. G. & WOODROFFE, C. D. (eds.), Coastal evolution : Late Quaternary shoreline morphodynamics. University Press, Cambridge, pp. 121-186.
- SCOR Working Group 89, 1991. The response of beaches to sea-level changes : a review of predictive models. — *Journal of Coastal Research*, **7** (3) : 895-921.
- STEPHENS, J. C., ALLEN, L. H. Jnr. & CHEN, E. 1984. Organic soil subsidence. — *In* : HOLZER, T. L. (ed.), Man-induced land subsidence. Reviews in Engineering Geology, VI, Geol. Soc. of America, pp. 107-122.
- SURYADI, F. X. 1996. Soil and water management strategies for tidal lowlands in Indonesia. — Balkema, Rotterdam, pp. 1-35.
- TITUS, J. G. 1986. Greenhouse effect, sea-level rise, and coastal zone management. — *Coastal Zone Management Journal*, **14** (3) : 147-171.

- TOOLEY, M. & JELGERSMA, S. (eds.) 1992. Impact of sea-level rise on European coastal lowlands. — Blackwell, Oxford, 265 pp.
- VELLINGA, P. & LEATHERMAN, S. P. 1989. Sea-level rise, consequences and policies. — *Climatic Change*, **15** : 175-189.
- VOS, P. C. & VAN HEERINGEN, R. M. 1997. Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland. — In : FISCHER, M. M. (ed.), Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands). *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*, **59** : 5-109.
- WIGLEY, T. M. L. & RAPER, S. C. B. 1992. Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. — *Nature*, **357** : 293-300.
- WRAY, R. D., LEATHERMAN, S. P. & NICHOLLS, R. J. 1995. Historic and future land loss for upland and marsh islands in the Chesapeake Bay, Maryland, U.S.A. — *Journal of Coastal Research*, **11** (4) : 1195-1203.
- ZAITLIN, B. A., DALRYMPLE, R. W. & BOYD, R. 1994. The stratigraphic organisation of incised-valley systems associated with relative sea-level change. — In : DALRYMPLE, R.W., BOYD, R. & ZAITLIN, B.A. (eds.), Incised-valley systems : origin and sedimentary sequences. *Society for Sedimentary Geology* (Special Publication), **51** : 45-60.