

Kustvorm en materiaaltransport.
=====§ 1. Inleiding.

Vormveranderingen, welke aan een kust optreden, gaan altijd gepaard met verplaatsing van materiaal. Deze verplaatsing van materiaal wordt veroorzaakt door de zee en door de luchtstromen (transport door wind). Zien we af van het windtransport, dan kan worden gesteld, dat de vormveranderingen van een kust in hoofdzaak worden veroorzaakt door het materiaaltransport in het water.

Het mechanisme van dit materiaaltransport is in vele opzichten voor ons nog tamelijk raadselachtig. De onderzoekingen van de afgelopen decennia hebben echter in deze, voorheen vrijwel geheel duistere materie wel enig licht gebracht. Er bestaan thans verschillende formuleringen, opvattingen en theorieën, waarover de meeste onderzoekers het wel eens zijn.

In het navolgende zal getracht worden om, uitgaande van hetgeen thans vrij algemeen als juist wordt aanvaard, enkele globale regels af te leiden omtrent het verband tussen het regiem van de zee en het gedrag van de kust. De aandacht zij gevestigd op het globale karakter van deze beschouwingen; bij onze huidige gebrekkige kennis van de betrokken materie kan een dergelijke beschouwing overigens niet anders dan globaal zijn. Enerzijds beperkt dit helaas de geldigheid en de toepasbaarheid van dergelijke beschouwingen; men kan er bijvoorbeeld geen detailproblemen mee oplossen. Anderzijds echter mogen (en moeten) verschillende minder belangrijke factoren in de beschouwingen worden verwaarloosd. Dit brengt ongetwijfeld een subjectief element met zich mede. Wat is ten aanzien van het materiaaltransport belangrijk? Wat zijn hoofdfactoren en wat zijn bijzaken? Wat mag in eerste instantie worden verwaarloosd?

Er zal hier een bepaalde keuze moeten worden gedaan, en deze keuze is min of meer subjectief. Dit is onvermijdelijk. De schrijver kan slechts hopen, dat in de door hem gekozen grondslagen voor zijn betoog een zekere "opinio communis" is vervat en dat zijn schematiseringen niet te grof zijn.

§ 2. Grondslagen.

1. Er worden slechts twee hoofdfactoren beschouwd, welke het materiaaltransport beheersen, namelijk golfwerking en stroomwerking; alle andere werkingen worden verwaarloosd.

2. Door golven wordt slechts materiaal verplaatst in de voortplantingsrichting van de golf.

3. De door golven getransporteerde hoeveelheid materiaal is een functie van de intensiteit (energie) van de golf.

4. De door golven getransporteerde hoeveelheid materiaal is een functie van de waterdiepte, waarbij voor ieder golftype een bepaalde kritieke waterdiepte D_k bestaat, zodanig, dat het transport nul is als D groter is dan D_k .

5. De richting van de stroom (getijstroom) is steeds evenwijdig aan de kust. Stroomcomponenten haaks op de kust worden verwaarloosd.

6. De resulterende hoeveelheid materiaal, welke in één getijperiode wordt verplaatst, is een functie van het tijverschil en beweegt zich in de richting van de vloedstroom. (Vat men het getij op als een golf, dan is deze aanname dus in overeenstemming met de aannamen 2 en 3 over golfwerking).

§ 3. Assenstelsel.

De x-as ligt evenwijdig aan de kustlijn; x is positief in de richting van het langstransport.

De y-as ligt haaks op de kustlijn met de positieve zijde landwaarts.

De z-as ligt verticaal, met de positieve zijde naar beneden.

§ 4. Langstransport.

De kritieke waterdiepte D_k ligt op een afstand B van de kustlijn. In verband met de punten 4, 5 en 6 van § 2 beweegt er door een verticaal vlak evenwijdig aan de kust en op afstand B daarvan, geen materiaal. Door de kustlijn beweegt eveneens geen materiaal (bewegingen van de kustlijn worden ten aanzien van de materiaalbalans in rekening gebracht als hoogteverandering van de bodem), zodat het totale materiaaltransport door water zich als langstransport afspeelt in een strook ter breedte B.

Is het totale transport (transportcapaciteit) in deze strook Q dan volgt uit de continuïteitsvoorwaarde dat

$$B \frac{\delta z}{\delta t} = \frac{1}{1-n} \frac{\delta Q}{\delta x}$$

waarin n = het poriënpercentage van de bodem.

De grootte $\frac{\delta z}{\delta t}$ stelt de snelheid voor, waarmee de hoogteligging van de bodem verandert. Is $\frac{\delta z}{\delta t}$ positief dan treedt erosie op; is $\frac{\delta z}{\delta t}$ negatief dan treedt aanzanding op.

Is $\frac{\delta z}{\delta t} = 0$, dan is de kust in evenwicht.

De voorwaarde voor het evenwicht van een kust is derhalve:

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = 0$$

hetgeen betekent dat Q onafhankelijk van x is, of met andere woorden, dat in iedere punt (dwarsdoorsnede) van de kust dezelfde hoeveelheid materiaal wordt getransporteerd (dezelfde transportcapaciteit aanwezig is).

Treedt erosie op, dan neemt Q toe in x -richting; bij aanzanding neemt Q af in x -richting.

In het algemeen blijkt hieruit, dat het gedrag van een kust (erosie, evenwicht of aanzanding) afhangt van de veranderingen, welke Q langs de kust ondergaat.

Evenwicht van een kust(lijn) is alleen mogelijk als de transportcapaciteit overal langs de kust even groot is.

De transportcapaciteit hangt af van de golfwerking en van de stroomsterkte. Stel het transport door stroom = Q_s en het transport door golfwerking = Q_g dan geldt

$$Q = Q_s + Q_g$$

Ingevolge § 2, punt 6, wordt Q_s evenredig gesteld met het tijverschil. Neemt dus het tijverschil in vloedrichting langs de kust af, dan wordt $\frac{\delta Q_s}{\delta x}$ negatief en veroorzaakt de (getij)stroom langs de kust aanzanding en een regressie van de kustlijn. Neemt het tijverschil in de vloedrichting toe, dan veroorzaakt de getijstroom erosie van de kust en transgressie van de kustlijn.

Langs de Nederlandse kust neemt het tijverschil af van Cadzand tot Den Helder, zodat de getijstroom dit kustgedeelte zou moeten doen aangroeien. Voor de kust langs de Waddeneilanden geldt het omgekeerde.

De transportcapaciteit Q_g ingevolge golfwerking zal afhangen van de golfintensiteit alsmede van de hoek α , welke de voortplantingsrichting van de golven maakt met de normaal op de kustlijn. Wat dit laatste betreft zou men het langstransport langs de kust evenredig kunnen stellen met $\sin \alpha$. Bij een rechte kust is de transportcapaciteit uit dien hoofde dus overal gelijk. Is de kustlijn echter gebogen dan verandert $\sin \alpha$ met x en dus is Q_g ook een functie van x .

als alle
golven
evenredig
zijn

Het blijkt, dat de invloed van de invalshoek voldoet aan een eenvoudige regel, een holle kust groeit aan, een bolle kust erodeert onder invloed van golfwerking, indien de gemiddelde golfintensiteit langs de kust niet verandert (zie figuur 1).

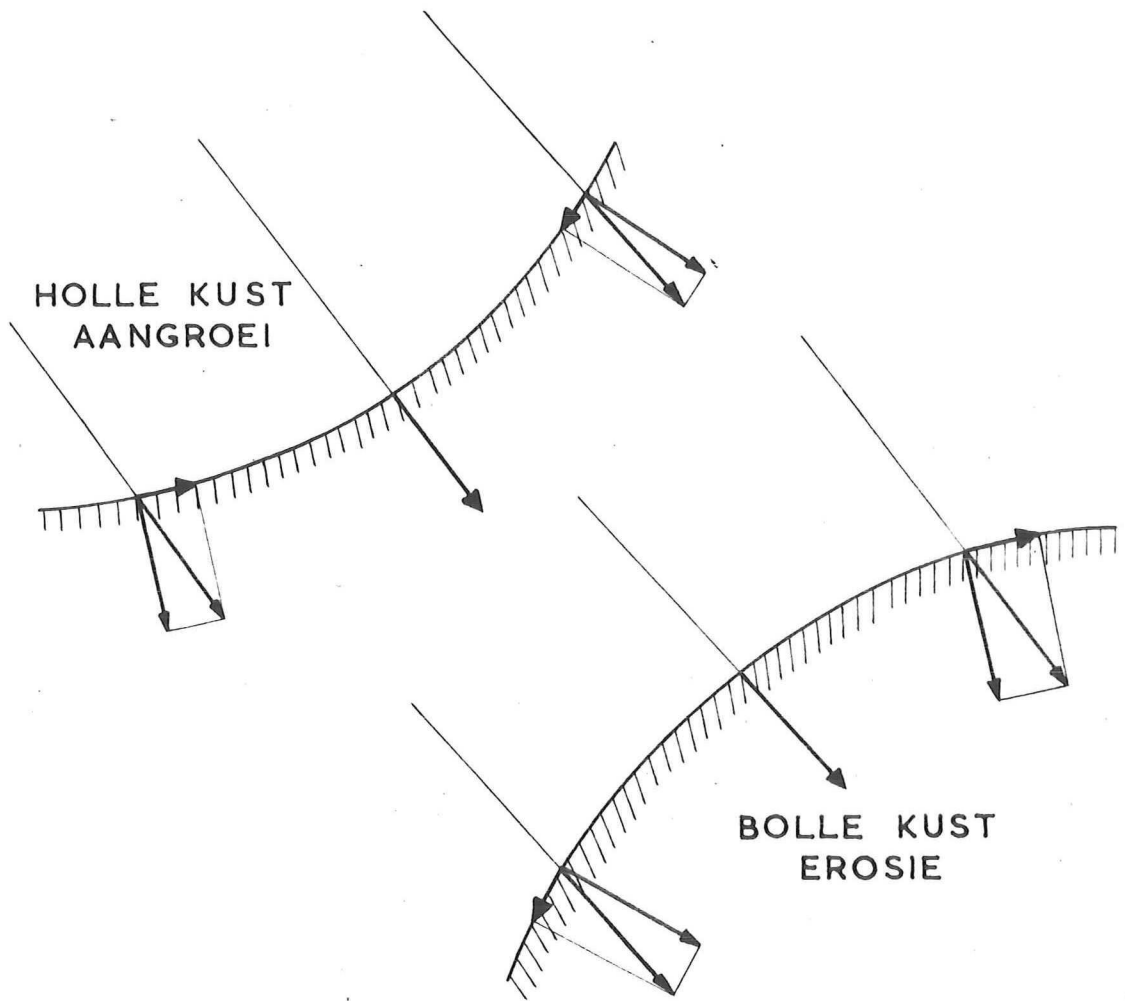
Voor de Nederlandse kust betekent dit, dat, afgezien van veranderingen in de golfintensiteit, het kustvak Cadzand-Den Helder (holle kust) door de golfwerking zou moeten aangroeien en de kust der Waddeneilanden zou moeten eroderen.

In het voorgaande werd gesteld, dat het langstransport door golfwerking evenredig zou zijn met $\sin \alpha$. Het schijnt echter, dat dit langstransport ongeveer evenredig is met $\sin 2\alpha$. Het maximum ligt dan bij $\alpha = 45^\circ$.

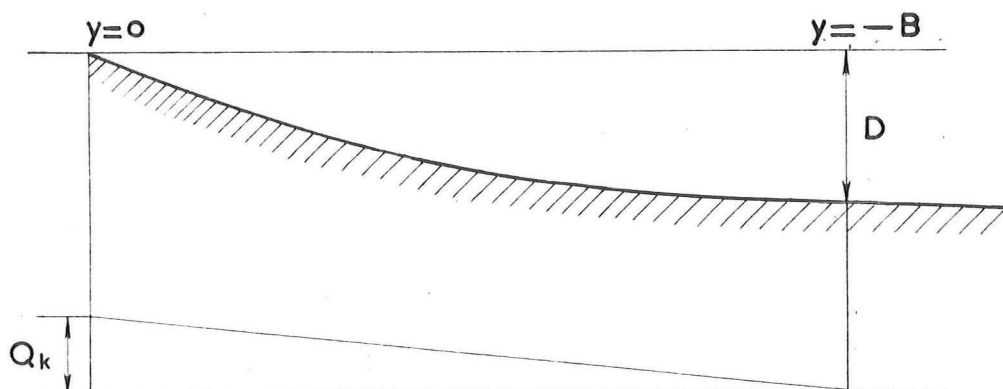
Voor richtingen tussen $\alpha = 0$ en $\alpha = 45^\circ$ geldt dan de bovenstaande regel. Voor richtingen tussen $\alpha = 45^\circ$ en $\alpha = 90^\circ$ is het echter juist omgekeerd. Voor het kustvak van Cadzand tot Den Helder zou dit betekenen, dat dit kustvak uit dezen hoofde zou aangroeien indien de gemiddelde, maatgevende golfrichting zou liggen tussen W. en N.W., terwijl deze kust zou eroderen als deze golfrichting zou liggen tussen Z.W. en W of tussen N.W. en N. De Waddenkust, welke over bijna 90° draait, zou dan, afhankelijk van de gemiddelde maatgevende golfrichting een eroderend en een aangroeiend kustvak moeten bezitten.

Het is wellicht overbodig om op te merken, dat de gemiddelde, maatgevende golfrichting zeer zeker niet identiek is met de z.g. heersende windrichting of iets dergelijks.

FIGUUR 1



FIGUUR 2



Het is wellicht niet overbodig om even aandacht te vragen voor een ander aspect van deze golfrichting. Het is namelijk niet onmogelijk dat de controverse " $\sin \alpha$ contra $\sin 2\alpha$ ", op een misverstand berust. Men pleegt bij dergelijke beschouwingen de refractie te verwaarlozen en dit lijkt, vooral bij flauw hellende kusten, toch niet geoorloofd. In het algemeen wordt door de refractie de hoek α verkleind, hoe dichter men de kust nadert. Het zou wel eens kunnen zijn, dat de voor de kust maatgevende golfrichting door de invloed van de refractie nooit een grotere hoek dan 45° met de normaal op de kustlijn kan maken. Ik kan hier niet meer doen dan een vermoeden uitspreken. Deze zaak zou eens nader moeten worden onderzocht, waarbij het wel nodig zal zijn, dat verschillende begrippen (zoals bijvoorbeeld het begrip: gemiddelde, maatgevende golfrichting) op nauwkeuriger wijze worden gedefinieerd.

Veranderingen in de gemiddelde golfintensiteit (ook zo'n begrip, dat bij een minder globaal onderzoek dan het onderhavige nader moet worden gepreciseerd) langs de kust veroorzaken eveneens veranderingen in het beloop van de kust. Neemt de golfintensiteit in x-richting toe, dan treedt erosie op, neemt hij af dan groeit de kust aan.

Voor de Nederlandse kust lijkt het erop, dat de golfintensiteit toeneemt van Cadzand naar Den Helder, hetgeen dus erosie voor dit kustvak zou betekenen, als de ontbondene langs de kust van de gemiddelde maatgevende golfrichting eveneens naar het noorden gericht is. Langs de Waddenkust zullen de verschillen in golfintensiteit vermoedelijk niet groot zijn.

§ 5. Dwarsprofiel.

Voor het vak, dat begrensd wordt door een verticaal vlak door de kustlijn en een daaraan evenwijdig lopend vlak op afstand B van de kustlijn (diepte D) en verder begrensd door twee ^{verticale} vlakken op afstand $2x$ loodrecht op de beide vorige, kan, indien de kust als geheel in evenwicht is, vastgesteld worden, dat geen materiaal passeert door de beide eerstgenoemde vlakken en dat door beide laatstgenoemde vlakken, dezelfde hoeveelheid materiaal passeert. Hetgeen door het ene vlak binnenkomt, gaat er door het andere weer uit, ofwel korter uitgedrukt: $\frac{\delta Q}{\delta x} = 0$.

De vorm van het dwarsprofiel wordt derhalve slechts beheerst door verplaatsingen van materiaal haaks op de kust, dus door krachten, welke haaks op de kustlijn (richting van de y-as) werken. Deze krachten zijn tweërlei, namelijk de zwaartekracht, welke de deeltjes van de kust af tracht te verplaatsen en de ontbondene van de golfactie haaks op de kust, welke de deeltjes naar de kust toe tracht te verplaatsen.

Tengevolge van de golfwerking is de bodemstroom afwisselend in de richting van golfvoortplanting en in de richting, welke daaraan tegengesteld is. Noemen wij het materiaaltransport in de richting van golfvoortplanting q_0 , en in de tegenovergestelde richting q_n . Noemen wij het materiaaltransport tengevolge van de zwaartekracht q_z , dan geldt voor ieder punt van de bodem, dat in de periode, dat de bodemstroom landwaarts is gericht, het totale transport haaks op de kust gelijk is aan $q_0 \cos \alpha - q_{z0}$ terwijl in de periode van tegengestelde bodemstroom het transport gelijk is aan $q_n \cos \alpha + q_{zn}$

Wil het dwarsprofiel niet van vorm veranderen, dan moet voor ieder punt gelden:

$$q_0 \cos \alpha - q_{z0} = q_n \cos \alpha + q_{zn}$$

ofwel
$$q_z = q_{z0} + q_{zn} = (q_0 - q_n) \cos \alpha$$

De factor $q_0 - q_n$ is het totale resulterende transport door de golfwerking, zodat geldt

$$q_z = q_g \cos \alpha$$

Men zou Q_z evenredig kunnen stellen met de sinus van de hellingshoek van de bodem. Aangezien deze hellingen klein zijn, mag de sinus bij benadering vervangen worden door de tangens. Wij mogen dus schrijven: $Q_z = c_z \frac{dz}{dy}$

In § 2 stelden wij (punt 4) dat Q_g een functie is van de diepte z. Wij schrijven dus

$$Q_g = f(z).$$

De evenwichtsvergelijking geeft dan:

$$c_z \frac{dz}{dy} = f(z) \cos \alpha$$

waaruit

$$y = c_z \int \frac{dz}{f(z) \cos \alpha}$$

Nemen wij geen refractie in aanmerking, dan is $\cos \alpha$ een constante, waardoor de profielvergelijking overgaat in:

$$y = \frac{c_z}{\cos \alpha} \int \frac{dz}{f(z)}$$

Men kan trachten, op grond van hydrodynamische overwegingen, om $f(z)$ theoretisch af te leiden (dus Q_g als functie van z).

Lukt dit (het lijkt verre van eenvoudig), dan kan door integratie de vorm van het evenwichtsprofiel worden gevonden als functie van de golfkarakteristieken en de invalshoek.

Omgekeerd kan men echter ook proberen om voor een bepaalde golf (en invalshoek) de vorm van het evenwichtsprofiel te vinden. Door differentiatie kan daaruit $f(z)$ worden bepaald. De vorm van het evenwichtsprofiel kan nauwelijks door metingen in de natuur worden bepaald omdat de zeebodem nabij de kust aan zo snelle veranderingen onderhevig is, dat een evenwichtsprofiel uiterst zelden aanwezig zal zijn. Modelproeven in een laboratorium lijken hiervoor aangewezen, waarbij het beste $\alpha = 0$ kan worden gekozen, teneinde vertroebelingen door refractie te ontgaan. ^{x)}

In werkelijkheid zal refractie invloed hebben op het evenwichtsprofiel. De factor $\cos \alpha$ is dan een bepaalde functie van y en dus van z . Het totale langstransport door golven in de strook ter breedte B zal zijn:

$$Q_{el} = \int_{y=0}^{y=B} f(z) \sin \alpha \, dy$$

Uit de evenwichtsvergelijking van het profiel volgt, dat:

$$dy = c_z \frac{dz}{\cos \alpha \cdot f(z)}$$

^{x)} Indien men aanneemt:

$$Q_g = Q_K \sqrt{1 - \frac{z}{D}}$$

dan is de vergelijking van het evenwichtsprofiel

$$y = -\frac{B}{D} (1 - \sqrt{1 - \frac{z}{D}})$$

Hieruit volgt: $\sqrt{1 - \frac{z}{D}} = \frac{y + B}{B}$, zodat dan wordt: $Q_g = (\frac{y}{B} + 1) Q_K$

De bodemdiepte verloopt dan parabolisch met de afstand uit de kustlijn, terwijl het golftransport lineair met deze afstand verandert (zie fig. 2).

Ingevuld in de transportvergelijking levert dit:

$$Q_e = c_z \int_{y=0}^{y=-B} t_g \alpha \cdot dz = c_z \int_{z=0}^{z=D} t_g \alpha \cdot dz$$

Hierin is $t_g \alpha$ een onbekende functie van z . Wij kunnen deze functie niet bepalen door het tekenen van refractiefiguren, daar wij het profiel niet kennen (y als functie van z). Indien echter de formule

$$Q_e = A \sin 2\alpha_0$$

juist is (waarin α_0 de waarde van α van de nog niet gerefracteerde golf is), kan gesteld worden

$$c_z \int_{z=0}^{z=D} t_g \alpha \cdot dz = A \sin 2\alpha_0$$

voor $z = D$ is $\alpha = \alpha_0$; zij $\alpha = \alpha_K$ voor $z = 0$
dan is

$$c_z \int_{\alpha=\alpha_K}^{\alpha=\alpha_0} t_g \alpha \cdot dz = A \sin 2\alpha_0$$

Indien $\alpha_K = 0$ wordt dit:

$$c_z \int_{\alpha=0}^{\alpha=\alpha_0} t_g \alpha \cdot dz = A \sin 2\alpha_0$$

Hieraan wordt voldaan indien

$$c_z \int t_g \alpha \cdot dz = A \sin 2\alpha$$

dus als $c_z \int t_g \alpha \cdot dz = 2A \cos 2\alpha \cdot d\alpha$ waaruit volgt:

$$z - D = -P \left\{ \cos 2\alpha - \cos 2\alpha_0 - \lg \frac{1 - \cos 2\alpha}{1 - \cos 2\alpha_0} \right\}$$

Op een dergelijke wijze zou de invloed van de refractie op het evenwichtsprofiel in rekening kunnen worden gebracht. Er zal hier echter op deze kwestie niet dieper worden ingegaan.

§ 6. Samenvatting.

Uitgaande van enkele globale en geschematiseerde hoofdfactoren werden enkele algemene betrekkingen afgeleid ten aanzien van de vervormingen van de kustlijn en ten aanzien van het evenwichtsprofiel.

1. Het is niet de absolute grootte van de transportcapaciteit, doch het is de verandering van deze grootte in langsrichting van de kust, waardoor ligging en vorm van de kustlijn veranderen.

2. Indien het tijverschil of de intensiteit van de golf afneemt in de richting van de vloedstroom, resp. de richting van de golfontbondene evenwijdig aan de kust, dan zal de kust aangroeien. Nemen zij toe, dan erodeert de kust.

3. Is de intensiteit van de golf langs de kustlijn constant, dan groeien holle kusten door de golfwerking aan, terwijl bolle kusten eroderen.

4. Het evenwichtsprofiel ontstaat als de werking van de golfontbondene haaks op de kust in ieder punt van het profiel wordt opgeheven door de werking van de zwaartekracht (helling). Over het gehele profiel slingeren dan, in periode met de golf, materiaaldeeltjes heen en weer. Proeven in het laboratorium bevestigen dit.

5. Aan flauw hellende kusten mag de invloed van de refractie van de golven op de vorm van het evenwichtsprofiel niet worden verwaarloosd.

6. Het feit, dat het langstransport door golfslag ongeveer evenredig schijnt te zijn met $\sin^2 \alpha$ kan mogelijk verklaard worden door de refractie in aanmerking te nemen.