

Samenvatting

De Nederlandse kust bestaat voor een groot gedeelte uit zand. Zij wordt continu belaagd door water en wind en op een aantal plaatsen verliest het land terrein op het water: de kust erodeert. Vanwege met name sociale en economische belangen wil men de kust graag in de huidige vorm behouden. Om het strand en de duinen, maar ook de havens en waterwegen op een goede en efficiënte manier te beheren, is het belangrijk om te weten hoe zand wordt getransporteerd door water en wind. Dat is het onderwerp van dit proefschrift.

Er wordt en is veel onderzoek gedaan naar het hoe en waarom van zandtransport. Het 'bijzondere' van deze studie is dat het zandtransport wordt bestudeerd door gebruik te maken van de natuurlijke radioactiviteit van zand. Door deze radioactiviteit te meten op verschillende plaatsen en tijdstippen kun je de beweging van het zand in kaart brengen. Het meten van straling is eenvoudig in vergelijking tot de gangbare meetmethodes voor het bestuderen van zandtransport en de metingen kunnen relatief snel worden uitgevoerd.

Zand 'Zand' is een ruim begrip. Per definitie bestaat het uit mineraalkorrels met een afmeting tussen 0.063 en 2 millimeter. De korrels zijn ontstaan als gevolg van de verwerking van gesteenten door water en wind. De mineralen kunnen worden onderverdeeld in zogenaamde lichte en zware mineralen, die van elkaar gescheiden kunnen worden door een zware vloeistof, zoals bromoform: lichte mineralen blijven drijven, zware zakken naar de bodem. Deze laatste groep mineralen heeft dus een hogere dichtheid. Ter vergelijking: een liter licht zand weegt, gecorrigeerd voor de lucht tussen de korrels, zo'n 2,65 kilo, een liter van een zwaar mineraal mengsel zoals dat hier aan de kust wordt gevonden, weegt 3,5 tot 5,0 kg.

Het zand aan de Nederlandse kust bestaat voor het merendeel uit de lichte mineralen kwarts en veldspaat. Over het algemeen bestaat slechts 0,5 - 1% van het zand uit zware mineralen (o.a. granaat, zirkoon en epidoot). Desondanks spelen zware mineralen in dit onderzoek een belangrijke rol. Ze

hebben namelijk twee eigenschappen die ze aantrekkelijk maken voor de studie naar zandtransport:

1. Ze hebben een duidelijk afwijkende kleur, waardoor ze gemakkelijk te zien en te volgen zijn.
2. Ze zijn van nature zo'n 200 keer radioactiever dan lichte mineralen, zodat je ze kunt 'waarnemen' door de radioactiviteit te meten.

Radioactiviteit Als iets radioactief is, wil dat zeggen dat het straling uitzendt. In dit proefschrift wordt gebruik gemaakt van zogenaamde gammastraling. Deze gaat gemakkelijk door van alles heen en het is mogelijk onderscheid te maken tussen verschillende radionucliden (radioactieve stoffen). Men kan in de natuur drie belangrijke radionucliden onderscheiden: uranium, thorium en kalium. Zware mineralen worden gekenmerkt door een hoge concentratie uranium en thorium, terwijl de lichte mineralen met name kalium bevatten. Zware mineralen onderling zijn van elkaar te onderscheiden door de mate waarin uranium en thorium voorkomen. Dit betekent dat je de samenstelling van zand kunt bepalen door de concentraties van radionucliden te meten.

Korrelgrootte Naast het verschil in radioactiviteit en dichtheid, onderscheiden zware mineraalkorrels zich nog op een derde manier van lichte mineraalkorrels: ze zijn gemiddeld kleiner. Het is niet zo dat er geen grote zware mineraalkorrels zijn, alleen zullen gemiddeld genomen de lichte mineraalkorrels in een zandmonster groter zijn. Dit komt omdat de grootte van de korrels niet bepaald wordt door het materiaal waarvan ze gemaakt zijn, maar door de manier waarop ze op het strand terecht zijn gekomen. Tijdens het transport vanuit het gebergte waar de korrels zijn ontstaan naar het strand, worden de korrels gesorteerd. Het gewicht en de afmeting van de korrel spelen hierbij een grote rol. Omdat de dichtheid van zware mineralen hoger is, zal in water een klein zwaar mineraalkorreltje ongeveer net zo snel bezinken als een grotere, lichte mineraalkorrel en zullen beide op ongeveer dezelfde plaats terecht komen.

Zandtransport Het begrijpen van zandbewegingen is moeilijker dan het zo in eerste instantie lijkt. We hebben namelijk te maken met een complex systeem waarin alles met elkaar samenhangt. Golven en stromen, aangedreven door wind en getij bewegen het zand op de bodem en vormen het tot ribbels, zandbanken en eilanden. De bodem op haar beurt beïnvloedt weer de golven

en de stromen. Zulke processen spelen zich af in periodes die variëren van seconden tot maanden, jaren of nog langer. Door de complexiteit is het nabootsen van deze processen in een laboratorium niet altijd mogelijk en zullen er dus ook metingen moeten worden gedaan in het veld. Maar ook dat is niet eenvoudig want wat, waar en hoe lang moet je meten om de juiste gegevens te krijgen? Een extra moeilijkheid daarbij is dat meetapparatuur moet functioneren onder 'onvriendelijke' omstandigheden: in golvend zout water, gedurende stormen en/of in het zand.

Selectief transport Zware mineralen vormen, zoals gezegd, meestal maar een klein gedeelte van het zand voor onze kust, slechts 0,5 á 1 % van het gewicht. Echter op sommige plaatsen worden hoge concentraties in grote hoeveelheden gevonden. Op het Noordzeestrand van Ameland bijvoorbeeld, is in de buurt van paal 18, na een storm in de winter van 1992, 25.000 kubieke meter aan zware mineralen gevonden, waarbij de concentratie op enkele plaatsen 80 % of meer bedroeg. Hoe kan dit?

In het algemeen wordt aangenomen dat zo'n hoge concentratie zware mineralen ontstaat omdat ze moeilijker zijn te transporteren. Tijdens een storm wordt licht zand weggeslagen van het strand maar blijven de zware mineralen liggen. Aangezien zand voor het merendeel uit lichte mineralen bestaat vind je zware mineralen daarom vooral op plekken die eroderen. Dit kan echter in het geval van Ameland zeker niet de enige reden zijn; de totale hoeveelheid aan zware mineralen die er is gevonden, was namelijk vele malen groter dan de hoeveelheid in het weggeslagen zand van het strand en de duinen. Het is daarom waarschijnlijk dat er zware mineralen bijgekomen zijn vanuit zee. De grote hoeveelheid die na de storm op het strand is aangetroffen doet vermoeden dat een zeer grote hoeveelheid zware mineralen in een geconcentreerde vorm aanwezig is op de zeebodem. Omdat er normaal niet zulke grote hoeveelheden op het strand worden gevonden zijn er blijkbaar speciale omstandigheden nodig, zoals een storm, om ze op de kust te brengen. Zware en lichte mineraalkorrels worden dus op verschillende manieren vervoerd: het transport is selectief.

Om na te gaan of en onder welke omstandigheden dergelijke concentraties op de zeebodem voorkomen, werd in 1992 een experiment uitgevoerd in de golfgoot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft.

Metingen in een golfgoot In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica wordt onderzoek gedaan naar golven, stromingen en sedimenttransport met

behulp van verschillende opstellingen. Dit experiment vond plaats in de zogenaamde kleine golfgoot bestaande uit een smalle glazen bak van ongeveer 15 meter lang. Een schematische afbeelding staat op bladzijde 41. Aan één uiteinde van de goot zit een heen en weer bewegende plaat die golven maakt.

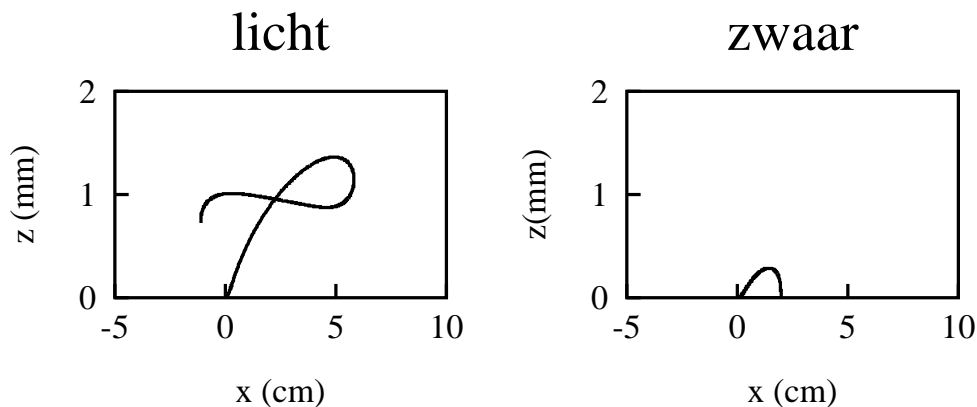
De proeven waren tamelijk eenvoudig en gingen als volgt: aan het begin van elke proef brachten we in het midden van de goot een dunne laag zand aan van ongeveer 30 cm lang, met daarin veel zware mineralen. Daarna lieten we de golfgenerator enige tijd lopen (variërende van 5 minuten tot een hele nacht). Hoe het zand door de waterbeweging getransporteerd en verspreid werd over de bodem kon je goed volgen door de glazen wanden van de goot. Op het moment van dit experiment hadden we nog niet de beschikking over een detector die de radioactiviteit van het zand in het water kon meten, maar door de afwijkende kleur was het niet moeilijk om de zware mineralen te volgen. Aan het einde van elke proef werd de verdeling van het zand over de bodem van de goot gemeten en zijn op verschillende plaatsen monsters genomen. Om het gehalte aan zware mineralen te bepalen is van alle monsters de dichtheid, de concentratie van radionucliden en de korrelgrootte gemeten.

De uitkomst van dit experiment was verrassend: onder alle door ons gekozen omstandigheden ontstonden er concentraties van zware mineralen! De analyse van de zandmonsters liet bovendien zien dat in de richting van de golf het zand voor een steeds groter gedeelte uit zware mineralen bestond. Het meest verrassende was echter dat de lichte mineralen op de beginpositie bleven of zelfs tegen de golfrichting in werden vervoerd! Om dit te kunnen verklaren moeten we allereerst weten welke krachten de korrels in beweging brengen en vervolgens hoe groot deze zijn. Daarom werd een sterk vereenvoudigd model ontwikkeld.

Korrelbaan model In dit model wordt de beweging van een korrel bepaald door drie krachten: een liftkracht, een wrijvingskracht en de zwaartekracht. De zwaartekracht wordt bepaald door het gewicht van de korrel. De grootte van de eerste twee krachten wordt bepaald door de snelheid van het water en de afmetingen van de korrel.

De snelheid van het water speelt dus een grote rol. Onder golven maakt het water op de bodem een heen en weer gaande beweging; onder de top van de golf gaat het heen en onder het dal gaat het weer terug. Dit betekent dat de snelheid van het water steeds verandert, denk bijvoorbeeld aan een schommelbeweging. In ondiep water, zoals in de buurt van de kust, is de top van de golf hoger dan het dal (de golf is asymmetrisch). De snelheid is hierdoor groter onder de top dan onder het dal van de golf.

Hoe verder je van de bodem komt hoe harder het water stroomt omdat het minder 'last' heeft van de wrijving van de bodem. Aan de onderkant van een korrel stroomt het water dus minder snel dan aan de bovenkant. Het gevolg hiervan is dat de druk die het water uitoefent aan de onderkant van een korrel hoger is dan aan de bovenkant. Resultaat: de korrel stijgt. Hoe groter het snelheidsverschil tussen onder en boven, des te groter de liftkracht is (dit is o.a. het principe waardoor vliegtuigen vliegen.). Grote lichte korrels worden dus gemakkelijker opgetild dan kleine zware. De wrijvingskracht is afhankelijk van de snelheid en de grootte van de korrel.



Op basis van bovenstaande kun je uitrekenen en voorspellen wat er met een zandkorreltje gebeurt tijdens het voorbijgaan van een golf. De uitkomst van zo'n modelberekening voor zowel een licht als een zwaar mineraalkorreltje is te zien in de figuur. Het verschil is duidelijk: de kleine zware mineraalkorrel blijft dicht bij de bodem en maakt kleine sprongetjes vooruit. Het wat grotere lichte mineraalkorreltje daarentegen komt veel hoger en zinkt niet terug naar de bodem. Het gevolg hiervan is dat de afgelegde afstand in teruggaande richting groter is dan in heengaande richting. Netto wordt het korreltje dus tegen de golfrichting in verplaatst.

Metingen in de golftunnel In een kleine golfgoot kun je niet echt grote golven produceren. In de golftunnel van het Waterloopkundig Laboratorium in de Noordoostpolder kan dat wel. Een golftunnel is een langwerpige glazen bak die, in tegenstelling tot een goot, dicht is van boven. Door het water in de tunnel heen en weer te bewegen kan de situatie dicht bij de zeebodem op ware grootte worden nagebootst. Een schematische tekening van de tunnel is te vinden op bladzijde 73. In de tunnel hebben we de proeven zoals hiervoor beschreven herhaald, maar dan met langere golven en hogere snelheden, wat beter overeenkomt met de situatie voor de Nederlandse kust.

In tegenstelling tot het experiment in de golfgoot werden in de golftunnel de lichte mineraalkorrels in de richting van de golf vervoerd, terwijl de kleine zware mineraalkorrels veel minder ver of zelfs helemaal niet werden vervoerd. Er was dit keer geen transport tegen de golfrichting in. Dit is precies wat het model voorspelde, zoals te zien is in de figuur op bladzijde 93. Ondanks deze goede resultaten moeten we echter niet vergeten dat een model altijd een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid is. Maar juist door de eenvoud geeft het inzicht in mogelijk belangrijke effecten.

Hoeveel zand? De experimenten tot dusver hadden tot doel te bestuderen *hoe* zand wordt getransporteerd door golven. In de golftunnel hebben we een tweede experiment gedaan met als doel te onderzoeken *hoeveel* zand er wordt getransporteerd door golven. Hiervoor hebben we over de volledige lengte van de tunnel een dikke laag zand met veel zware mineralen erin aangebracht. Aan het einde van iedere proef werd gemeten hoeveel zand er was verdwenen uit de tunnel en terecht was gekomen in de zogenaamde zandvangen die aan beide uiteinden zaten. Om informatie te krijgen over het zware mineralengehalte van het zand in de tunnel werd gemeten hoe de radioactiviteit in de loop van een proef veranderde. Daarnaast werden er zandmonsters genomen, waarvan weer de dichtheid, de korrelgrootte en de radionuclide concentraties zijn bepaald. De uitkomsten van dit experiment konden worden vergeleken met de resultaten van eenzelfde, al eerder uitgevoerd experiment waarbij ‘gewoon’ zand, zonder zware mineralen, is gebruikt. Het bleek dat onder stormachtige omstandigheden bij het experiment met ‘zwaar’ zand, de hoeveelheid zand die werd getransporteerd ongeveer twee keer zo laag was als bij het experiment met ‘gewoon’ zand! Verrassend genoeg was het netto transport onder rustiger omstandigheden ongeveer gelijk. Door gebruik te maken van de gegevens van de radioactiviteitsmetingen en de analyse van de zandmonsters, konden we uitrekenen dat er voornamelijk lichte mineralen werden getransporteerd.

Modelberekeningen Bij de analyse van de meetgegevens hebben we gebruik gemaakt van een aantal bestaande modellen waarmee je kunt uitrekenen hoeveel zand er wordt getransporteerd onder golven. Het doel was enerzijds te bekijken of we begrijpen wat we meten, maar, omdat dit de eerste keer is dat dergelijke metingen zijn uitgevoerd met zand verrijkt met zware mineralen, was het ook een test voor de betrouwbaarheid van de modellen in deze situatie. Van de drie modellen gaf slechts één, ontwikkeld in 1992 door Dibajnia en Watanabe, een uitkomst die redelijk overeenkwam met de gemeten waarden onder alle omstandigheden. De twee andere modellen gaven veel

te hoge uitkomsten. Het model van Dibajnia en Watanabe houdt als enige rekening met het feit dat zand ook in de tegengestelde richting kan worden getransporteerd. Daardoor wordt de netto hoeveelheid zand die in de voorwaartse richting gaat, lager. Toch geeft ook dit model uitkomsten die niet helemaal overeenkomen met onze waarnemingen. Het berekende zware mineralengehalte in het getransporteerde zand ligt namelijk veel hoger dan de gemeten waarde.

Afdekking door zware mineralen Een mogelijke verklaring voor zowel het lage netto transport als het lage gehalte aan zware mineralen in het getransporteerde zand zou kunnen zijn dat in de loop van een proef de zware mineralen het zand als het ware gaan afdekken. Hierdoor kan het onderliggende lichte zand niet meer in beweging komen en wordt het transport lager. Dit verklaart tevens waarom bij lage snelheden het transport in beide experimenten gelijk is: doordat de hoeveelheid zand die wordt getransporteerd veel lager is, zal er langer voldoende licht zand beschikbaar zijn. Als afdekking met zware mineralen inderdaad de reden is voor het lage transport dan heeft dit mogelijk interessante toepassingen in het kader van kustbeheer.

Metingen op het strand We weten nu dat zware en lichte mineralen op verschillende manieren worden getransporteerd door water. Wat is het effect hiervan op onze stranden? Om dit te onderzoeken hebben we op het strand van Ameland drie en een half jaar lang, regelmatig en op vaste plaatsen, zowel de radioactiviteit als de hoogte van het zand gemeten. Door beide gegevens te combineren kun je zien of er licht of zwaar zand van het strand verdwijnt of bijkomt. Er zijn vier mogelijkheden:

1. het strand wordt hoger en de straling neemt toe: er zijn vooral zware mineralen bijgekomen.
2. het strand wordt hoger en de straling neemt af: er zijn vooral lichte mineralen bijgekomen.
3. het strand wordt lager en de straling neemt toe: er zijn vooral lichte mineralen verdwenen.
4. het strand wordt lager en de straling neemt af: er zijn vooral zware mineralen verdwenen.

Uit de metingen blijkt dat er regelmatig zware mineralen op het strand worden afgezet in kleine hoeveelheden zonder dat het strand lager wordt (optie

1). Dit is dus in tegenspraak met de meer algemene opvatting dat je alleen maar veel zware mineralen zult vinden op plaatsen die eroderen. Echt grote hoeveelheden komen slechts na een storm op het strand terecht.

Conclusies De laboratoriumproeven hebben aangetoond dat het mogelijk is dat zware mineralen worden geconcentreerd op de zeebodem voor de kust. Deze conclusie wordt bevestigd door metingen op zee die zijn uitgevoerd voor Ameland en Terschelling in 1993-1995 door de groep 'Toegepaste kernfysica' van het KVI in samenwerking met Rijkswaterstaat. De resultaten laten zien dat er voor de kust van beide eilanden hogere concentraties zware mineralen zijn te vinden dan elders het geval is.

Van de metingen op het strand weten we dat zware mineralen slechts onder de juiste omstandigheden, een storm, in grote hoeveelheden op het strand terecht komen. Dit hoeft echter niet noodzakelijkerwijs samen te gaan met erosie. Het is natuurlijk wel zo dat als zware mineralen worden afgezet terwijl lichte worden weggeslagen het effect extra sterk is.

Als eindconclusie kunnen we stellen dat de natuurlijke activiteit in zandkorrels ons in staat stelt om op relatief eenvoudige wijze een waardevolle bijdrage te leveren aan de studie naar zandtransport.

Dankwoord

Behalve ikzelf hebben vele mensen meegewerkt aan de totstandkoming van dit proefschrift. Dit dankwoord geeft mij de gelegenheid al deze mensen te noemen met daarbij een korte toelichting over hun wapenfeiten. Deze toelichting zal niet altijd volledig zijn maar mijn dank betreft natuurlijk ook alles wat ik niet heb genoemd. Er zijn misschien mensen wiens naam niet op deze of de volgende bladzijde voorkomt maar die er wel bij hadden moeten staan. Hiervoor mijn excuses. Aan het einde van dit dankwoord heb ik ruimte open gelaten voor zo'n vergeten naam.

Ik wil Rob de Meijer bedanken voor veel maar bovenal voor al zijn ideeën en zijn niet stuk te krijgen optimisme. Ik wil Huib de Vriend en Adriaan van der Woude bedanken voor hun kritische blik op mijn werk. Ik wil Jan Ribberink bedanken voor alle hulp en tips bij de uitvoering en analyse van de tunnelproeven.

Ik wil de leden van de leescommissie, prof. dr. W. Mook, prof. dr. ir. M. Stive en prof. dr. ir. L. van Rijn bedanken voor het lezen van het proefschrift en alle suggesties ter verbetering.

Ik wil Jan van der Graaff bedanken voor het mogelijk maken van de experimenten in de golfgoot. Ik wil alle medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistof Mechanica van de Technische Universiteit Delft bedanken voor alle hulp en technische ondersteuning. Ik wil in het bijzonder de heer Post bedanken die mij op vele manieren heeft geholpen bij de uitvoering van deze proeven. Ik wil Ilse en Hanneke bedanken voor het geven van een slaapplaats.

Ik wil de mensen van de afdeling Ameland van Rijkswaterstaat bedanken voor het uitvoeren van de hoogtemetingen op het strand van Ameland en alle verdere hulp. Ik wil in het bijzonder de heren Oud en Smit bedanken die me ook nog hebben hebben geleerd wat een nobeltje is. Ik wil Wim, Anka, Karly, Paul, Tom en Gerald bedanken voor het opstaan voor dag en dauw om op een strand te lopen met een detector. Ik wil Rob, Hielke Freerk, Cees en Ron bedanken voor het vele malen vroeg opstaan. Ik wil Ron bedanken voor het meten van de vele kilo's zand van het eiland. Ik wil Peter bedanken voor het

uitlenen van zijn laarzen, 5 jaar lang.

Ik wil Marjolein en Teun bedanken voor het uitvoeren van de proeven in de golftunnel. Ik wil Martje bedanken voor het regelen van van alles en nog wat en voor alle gezelligheid. Ik wil de mensen van het Waterloopkundig Laboratorium 'de Voorst' bedanken voor alle hulp en een plezierige tijd in de polder. Ik wil Cees bedanken voor alle hulp en alle antwoorden op vragen met betrekking tot de detector. Ik wil Tjalling bedanken voor het klaar zijn van de detector. Ik wil de mensen van de mechanische werkplaats van het KVI bedanken voor het niet nat worden van de detector.

Ik wil Nicolette en Rianne bedanken voor allerlei ditjes en datjes. Ik wil de leden van de vakgroep toegepaste kernfysica bedanken voor onder andere alle taarten. Ik wil Marjan en Hilde bedanken voor het leesbaar maken van mijn samenvatting. Ik wil Hans en Paul bedanken voor het maken van de omslagfoto. Ik wil John, Hans, Gerard B. en Gerard M. bedanken voor alle hulp met computerzaken. Ik wil alle mensen op het KVI bedanken voor een prettige 5 jaar. Ik wil John en Ineke bedanken voor de voortreffelijke catering van vele Mah-Jong avonden.

Ik wil Hanneke en Karly bedanken voor het willen zijn van mijn paranimmen.

Ik wil mijn ouders bedanken voor alles.

En voor diegene die ik vergeten ben: Ik wil bedanken voor