

Literatuur- en bronnenstudie 12604 **“Vervolgonderzoek Schelpenwinning”**

Met focus op de hydrodynamische en morfologische
aspecten van schelpenwinning in de Waddenzee

In opdracht van: Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Literatuur- en bronnenstudie “Vervolgonderzoek Schelpenwinning”

C-12378

925

Met focus op de hydrodynamische en morfologische aspecten van
schelpenwinning in de Waddenzee.

Datum:

November 2000

Auteur:

S. de Vries

Projectnummer:

24507-00

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat,

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Geo-informatie bureau
GEO Plus B.V.
Hellingwal 1
Postbus 22
9649 ZG Muntendam

Inhoudsopgave

I. LIJST MET FIGUREN	4
II. LIJST MET TABELLEN.....	5
1. INLEIDING.....	6
2. SCHELPEVOORKOMENS	8
2.1. INLEIDING.....	8
2.2. LOCATIES EN DIMENSIES	8
2.2.1. Noordzeekustzone en Noordzee	10
2.2.2. Conclusies.....	11
2.3. GEOLOGISCHE ASPECTEN IN HET KADER VAN VOORKOMENS, VOORRAAD EN TRANSPORT.....	11
2.3.1. Grootschalig kustontwikkeling gedurende het Holoceen in het kader van schelpaccumulaties.....	12
2.3.2. Ouderdom	18
2.4. SAMENSTELLING VAN DE SCHELPEN.....	22
2.5. CONCLUSIES	28
3. FYSISCH ASPECTEN ROND SCHELPEVOORKOMENS.....	29
3.1. INLEIDING.....	29
3.2. BRUTO/NETTO AANWAS.....	29
3.3. VERLIESPOSTEN.....	33
3.3.1. Chemische verwerking/oplossing	34
3.4. TRANSPORT EN AFZETTING VAN SCHELPEN	35
3.4.1. Inleiding.....	35
3.4.2. Fysische parameters.....	35
3.4.2.1. Reynoldsgetal.....	35
3.4.2.2. Froude getal.....	35
3.4.2.3. Bodemschuifspanning.....	36
3.4.2.4. Specifieke vorm van schelpen en invloed hiervan op valsnelheid en transport.....	37
3.4.2.5. Stroming en golven.....	41
3.4.2.6. Bodemvormen.....	42
3.4.2.7. Transport en accumulatie.....	44
3.4.3. Transportprocessen in de kustzone.....	49
3.5. CONCLUSIES	51
4. MORFOLOGISCHE ASPECTEN (STABILITEIT BANK EN BODEM, LEVENSDUUR, PLAATVALLEN).....	53
4.1. INLEIDING.....	53
4.2. STABILITEIT BANK, BODEM EN LEVENSDUUR	53
4.3. PLAATVALLEN.....	54
4.4. CONCLUSIES	56
5. WINNING (DIMENSIES, WINBAARHEID, WINPUTGEDRAG)	57
5.1 INLEIDING.....	57
5.2. DIMENSIES VAN WINNINGEN.....	57
5.3. WINBAARHEID EN WINPUTGEDRAG.....	61
5.4. TROEBELHEID.....	65
5.5. CONCLUSIES MET BETREKKING TOT DE WINNING, WINBAARHEID EN WINPUTGEDRAG.....	66
6. CONCLUSIES	67
7. LITERATUURLIJST	69

i. Lijst met figuren

Figuur 1. Zeespiegel curve volgens Jelgersma (1979) met de diepte van monsternamen en C-14 ouderdom (Flessa, 1998). Punten zijn monster uit Doggersbank, driehoeken betreffen monsters van Waddenzee en Duitse Bocht.	12
Figuur 2. Reconstructie van de Nederlandse kustvlakte ong. 7000 jaar geleden (Van der Spek, 1994).....	13
Figuur 3. Reconstructie van de Nederlandse kustvlakte ong. 5300 BP (Beets et al, 1995).....	14
Figuur 4. Geologische tijdsindeling (Beets et al, 1995).....	16
Figuur 5. Verdeling van de (dode cq fossiele) schelpensoorten volgens Krause (1950) op het Wad, in een zeegat en voor de Kust.	23
Figuur 6. Relatie tussen de valsnelheid (u_{val}) en de vormfactor (SF) voor een groot aantal schelpen (Futterer, 1977).....	39
Figuur 7. Relatie tussen de op de schelp werkende krachten en de geprojecteerde oppervlakte van de bovenkant en de frontale oppervlakte bij een stroomsnelheid van 0.625 m/s, voor verschillende soorten schelpen (Olivera and Wood, 1997).....	40
Figuur 8. Ontwikkeling van de verschillende bodemvormen bij onregelmatig gevormde korrels bij verschillende stroomsnelheden (Flemming, 1992).	43
Figuur 9. Hypothetische doorsnede door een transgressieve waddensysteem, welke de potentiële schelpaccumulaties als geulbodemaafzettingen laten zien (Flemming, 1992).....	47
Figuur 10. Diepte/stroomsnelheid diagram, welke de ontwikkeling van de verschillende bodemvormen laat zien. A in het geval van fijn kwarts zand en B in het geval voor onregelmatig gevormde korrels (schelpgruis) (Flemming, 1992).....	48
Figuur 11. Opbouw van een zich lateraal verplaatsende geul in een getijdegebied (Allen, 1984).....	54
Figuur 12. Jaarlijkse hoeveelheid gewonnen schelpen in de Waddenzee. Volgens Geologische Stichting (RGD-'52), Rijkswaterstaat (RWS-opgave) en op basis van de schelpkalk en -grit productie. De schatting van de Geologische Stichting is aanmerkelijk lager, de bron van deze schatting wordt in dit document niet beschreven.....	59

ii. Lijst met tabellen.

Tabel 1. Ouderdommen schelpen in boringen Ameland (van der Spek, 1994)	18
Tabel 2. Gewichtspercentage van de schelpen gebruikt voor ouderdomsbepaling (Van der Spek, 2000).....	19
Tabel 3. Ouderdommen schelpen van schelpenbanken uit Van der Spek (in prep. 2000).....	20
Tabel 4. Introductie en verdwijning van enige schelpsoorten. Bron: Oost (in prep.) en Geologische Stichting (1952)	21
Tabel 5. Tabel met de verdeling van de verschillende schelpbestanddelen in procenten van het totaal (Krause, 1950).	23
Tabel 6. Tabel met de soorten schelpen die gevonden zijn in de waarnemingen van Krause (1950)	24
Tabel 7. Tabel met de verdeling in procenten van de verschillende soorten dode cq fossiele schelpen volgens Krause (1950).....	25
Tabel 8. Soortensamenstelling schelpen op diverse locatie in de Waddenzee en in de Westerschelde volgens Weststeijn (1998) en Essink et al (1996).....	26
Tabel 9. Vergelijking van verdeling van soorten in de Waddenzee.....	27
Tabel 10. Levende soorten in % die voorkomen in de 257 hapmonsters rondom de -20 meter dieptelijn (Kok, 1997).	28
Tabel 11. Productie cijfers kokkels (Cerastoderma edule) RIVO (1998).....	32
Tabel 13. Enige eigenschappen van de belangrijkste schelpen (Futterer, 1977)	41
Tabel 14. Stroomsnelheden bij initieel transport (bij welke stroomsnelheid begint transport van schelpen); Stroomsnelheid in m/s gemeten 1 cm boven bodem (Futterer, 1977):	42
Tabel 15. Winningsgegevens vanaf 1850.	60
Tabel 16. Reactietijden van een aantal zandwinputten, waargenomen en berekend (Gerritsen, 2000).....	65

1. Inleiding

In de MER-Schelpenwinning (1998) en in de Landelijke beleidsnota (1998) wordt geconstateerd dat er op onvoldoende kennis is over de schelpenvoorraad. Om deze kennisleemten in te vullen is het "Projectplan vervolgonderzoek schelpenwinning" opgesteld (Reijngoud et al., 1999). In dit projectplan worden een aantal onderzoeksvragen gesteld. Het voorliggend rapport behandelt enkele specifieke morfologische vragen welke als aanvulling kunnen worden beschouwd op het onderzoek welke is uitgevoerd door Cramer (1998) en Van Dobben (2000). De notitie van Cramer, welke als onderliggende rapport voor de Milieu Effect Rapportage "MER Schelpenwinning" is gemaakt heeft reeds een redelijk volledig beeld gegeven van de morfologische aspecten rondom schelpenwinning. Het literatuuronderzoek van Van Dobben (2000) moet worden beschouwd als eerste aanvulling hierop. Een aantal vragen zijn echter binnen deze twee rapporten nog niet uitputtend onderzocht. Met name de morfologische en hydrodynamische aspecten, specifiek gericht op de Waddenzee worden extra belicht. Ecologische, biologische en economische aspecten worden hier niet behandeld. Het onderzoek heeft zich voornamelijk gericht op een literatuur- en bronnenstudie.

De vragen, op het gebied van morfologie, voorkomen en hydrodynamische aspecten die in het kader van het vervolgonderzoek schelpenwinning worden gesteld en in dit rapport worden behandeld zijn, volgens nummering van projectplan (Reijngoud et al, 1999):

- 2.1. Waar komen schelpenbanken voor.
- 2.2.1. Invloed van grootschalige morfologische dynamiek op de aanwas en nalevering van de winbare hoeveelheid.
- 2.2.2. Onderzoek naar fysische processen achter de vorming van schelpenbanken m.b.t. de aanwas en nalevering van de winbare hoeveelheid.
- 2.3.1. Eventueel aanvulling op de uitgevoerde literatuur- en bronnenstudie naar de winbare hoeveelheid nu en in het verleden.
- 3.1.1. Morfologische aspecten (dimensies van schelpenbanken, erosiebestendigheid van een bank, dimensies van een winning en gedrag van een winput) in het kader van de vraag: wat is de morfologische functie van schelpenbanken en de invloed op de morfologie
- 3.1.4. Plaatvallen in relatie tot schelpenwinning.
- 3.2.1. Levensduur en stabiliteit van schelpenbanken.
- 3.2.2. Morfologische dynamiek van schelpenbanken.
- 3.3.1. Grootte van winning per deelgebied. In het kader van de invloed op de kusterosie.
- 3.3.3. Winbare hoeveelheid in de kustzone.

Voor de verschillende onderzoeksvragen zal vaak dezelfde literatuur bestudeerd moeten worden. Voor een efficiëntere aanpak is er voor gekozen om bovenstaande vragen te bundelen op basis van inhoud. Bovenstaande vragen kunnen worden onderverdeeld in een 4-tal onderzoeksonderdelen:

- Schelpenvoorkomens (locaties, dimensies)
- Aanwas, transport en afzetting van schelpen (fysische aspecten)
- Morfologische aspecten (stabiliteit bank en bodem, levensduur, plaatvallen)
- Winning (dimensies, winbaarheid, winputgedrag)

In dit rapport wordt de behandelde literatuur volgens bovenstaande onderzoeksonderdelen behandeld.

Achterin dit rapport is een lijst opgenomen met de gebruikte literatuur. Deze lijst betreft een combinatie van de gebruikte literatuur voor de voor de MER onderliggende notitie van Cramer (1998), het literatuuronderzoek van Van Dobben (2000), en onderhavige rapport, zodat er een complete lijst van geraadpleegde literatuur beschikbaar is.

De gebruikte literatuur in de onderzoeken van Van Dobben (2000) en Cramer (1998) is voor het merendeel van Nederlandse oorsprong. Er zijn in deze rapporten slechts 3 Duitse bronnen en 1 Engelse bron gebruikt. In het rapport van Van Dobben (2000) is moeilijk te achterhalen welke bron voor welke vraag gebruikt is, en wordt niet elk bron die vermeld staat in de literatuurlijst aangehaald. De bronnen die niet werden aangehaald zijn alsnog bestudeerd op bruikbaarheid. Daarnaast zijn in de onderzoeken de verschillende bronnen in vele gevallen voor slechts één onderzoeksvraag gebruikt. De genoemde bron kan derhalve uitputtender worden gebruikt. In de literatuurlijst staat overigens aangegeven welke bronnen ook bestudeerd zijn in de onderzoeken van Van Dobben (2000) en Cramer (1998).

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, begeleid door Ir. H.P.J. Mulder, projectleider schelpenwinning.

2. Schelpenvoorkomens

2.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een aantal aspecten behandeld met betrekking tot de schelpenvoorkomens. De vragen die aan de basis liggen van dit hoofdstuk zijn:

- Waar komen schelpenbanken voor (vraag 2.1. uit Projectplan vervolgonderzoek Schelpenwinning (Reijngoud et al, 1999)).
- Aanvulling op literatuur- en bronnenstudie naar de winbare hoeveelheden (vraag 2.3.1)
- Winbare hoeveelheid in de Kustzone (vraag 3.3.3).

Het hoofdstuk is onderverdeeld in een aantal delen. In het eerste deel zal ingegaan worden op de beschikbare literatuur betreffende de locaties en dimensies in het algemeen en de Waddenzee specifiek. Daarna zal de kustzone als apart deel worden beschouwd. De voorkomens van schelpen is sterk gerelateerd aan de geologische ontwikkeling van het gebied, de ouderdom van de schelpen is hierin een belangrijke parameter. Vandaar dat deze aspecten in een apart deel binnen dit hoofdstuk worden behandeld.

Als laatste komt de samenstelling van de schelpen aan de orde. De samenstelling is van belang voor het analyseren van de transportprocessen en de voorkomens. Als er veel allochtone schelpen (ver buiten het milieu waar het dier in levende vorm aanwezig is) in de schelpenbanken aanwezig zijn, zegt dit iets over de transport.

2.2. Locaties en Dimensies

Informatie afkomstig van schelpenwinners (Van Dobben, 2000), geeft aan dat winning voornamelijk plaatsvindt in geulen met een maximale waterdiepte van 20 meter. Bij grotere diepte bestaat de kans dat de zuigbuis breekt. De schelpen liggen vaak begraven in het sediment. Volgens de schelpenwinners is een van de weinige plaatsen waar schelpen vrijliggend aan de oppervlakte voorkomen de locatie "Gronden van Stortemelk" in het Zeegat van het Vlie.

Schelpenwinners komen vaak op dezelfde locatie terug tot de daar aanwezige voorraad gewonnen is. In een enkel geval komt het voor dat er in de buurt van een eerdere winlokatie weer schelpen worden gevonden. Volgens de schelpenwinners gaat het dan waarschijnlijk om een niet eerder ontdekte (of deel van een) schelpenbank en niet zozeer aanvoer van nieuwe schelpen. Wanneer naar een nieuwe locatie wordt gezocht, wordt eerst gekeken naar de bekende plaatsen, en vervolgens wordt er gezocht d.m.v. steekproeven.

Garnalenvissers slepen hun netten over de bodem. Indien ze hierbij stuiten op een schelpenbank, kunnen de netten vastraken of zelfs beschadigd raken. Garnalenvissers houden informatie over schelpenbanken daarom goed bij. Deze informatie wordt weer gebruikt door de schelpenwinners.

Er wordt ook gebruik gemaakt van oppervlaktekenmerken. Zo zijn de stroomnaden, waar twee geulen bij elkaar komen en in de bochten van de geulen bekende oppervlakte kenmerken die potentiële locaties voor schelpenbanken kunnen zijn. Daarnaast werd er aangegeven dat sterk dynamische geulen de voorkeur genieten wanneer er naar nieuwe locaties wordt gezocht.

Aanwezigheid van schelpen in sedimenten kan een drietal oorzaken hebben:

1. De schelpendieren hebben oorspronkelijk in het sediment geleefd en zijn door bedekking met jongere sedimenten afgestorven en fossiel geraakt. Afgezien van de kolonievormende soorten is de dichtheid van schelpvoorkomens in deze gevallen relatief laag
2. Schelpen zijn na afsterving door stromingen en golfwerking uit de oorspronkelijke leefpositie losgeraakt en verplaatst. Onder invloed van hydrodynamische processen kan er vervolgens concentratie van schelpen optreden. Veelal gebeurt dit op de bodem van geulen, of op de randen van platen en kwelders.
3. Schelpen zijn door erosie van oudere sedimentpakketten opnieuw deel gaan uitmaken van het sedimenttransportsysteem waarbij onder invloed van transportmechanismen concentratie plaatsvindt.

Accumulaties van schelpen in de Waddenzee kunnen in twee groepen worden ingedeeld. Ten eerste de zgn. oppervlakte-schelpenbanken. Dit zijn de schelpenaccumulaties die voorkomen op de platen of op de randen van de ondiepe prielen en geulen. De tweede groep schelpenbanken wordt gevormd door de accumulaties die aanwezig zijn op de bodem van de geulen. Voornamelijk als gevolg van laterale migratie van getijdengeulen worden levende en dode schelpen "gereworked" (omgewerkt) en geconcentreerd in schelpenbanken op de bodem van de geul (Wilson, 1967). De schelpen aanwezig in de sedimentlagen die door de migrerende geulen worden aangesneden, vallen naar de bodem van de geulen en worden in slechts een enkel geval nog een zekere afstand op de geulbodem verplaatst. De dikte van de schelpenlaag varieert en hangt voornamelijk af van de migratiesnelheid van de geul (Wilson, 1967). Oppervlakte-schelpen op de randen van prielen ontstaan door getijdestromingen welke op de oppervlakte van de platen actief zijn. In het onderzochte gebied (Solway Firth in Schotland) zijn stroomsnelheden geconstateerd van maximaal 0.51 m/s (Wilson, 1967). Golfactiviteit is hierbij een belangrijke energiebron voor het mobiliseren van schelpen. Erosie van platen door getijde- en/of stormacties beïnvloedt alleen maar de bovenste paar cm's, terwijl migrerende getijdengeulen enkele meters doorwoelen. Oppervlakte-schelpenbanken zijn vaak maar enkele cm's dik. Een niet-significant maar toch opvallend resultaat is het voorkomen van meer rechter dan linker kleppen van de *Cerastoderma edule* in het onderzoek van Wilson (1967). Een verklaring hiervoor wordt niet gegeven, maar waarschijnlijk er sprake van enige mate van sortering.

Meeste van de schelpen gevonden op de geulbodem liggen met hun convexe (bolle) kant naar boven. Oppervlakteschelpen zijn vaak anders van samenstelling als de schelpenbanken op de geulbodem. De oppervlakte-schelpenbanken bestaan volledig uit soorten die in de nabijheid van de bank ook levend voorkomen, terwijl de schelpenbanken op de geulbodem ook vaak andere soorten die niet levend in de nabijheid voorkomen, bevatten.

Op vele plaatsen in de Waddenzee kunnen aanrijkingen plaatsvinden van schelpen, waarvan de *Hydrobia ulva* een groot deel van uitmaakt. Deze laagjes, door Van Straaten (1952) hydrobialaagjes genoemd ontstaan door het rondpompen van zand door de wadpier *Arenicola marina*, waardoor de grovere delen in het sediment zoals schelpen naar beneden worden getransporteerd tot onder de diepte waar de *Arenicola* leeft (ong. 20-30 cm). Vanwege de grote verspreiding van zowel *Hydrobia* als *Arenicola* kunnen dergelijke aanrijkingen wijd verspreid ontstaan. De aanwezige *Cerastoderma* in deze aanrijkingen zijn zelden gebroken en vaak zijn zowel rechter als linker klep dicht bij elkaar, wat aanwijzingen geeft voor korte transportwegen.

Binnen de geul zijn er plaatsen waar de stroomnaad zich verlegt en waardoor er gebieden ontstaat waar de stroomsterkte afneemt en de schelpen accumuleren (Geologische Stichting, 1952). Vaak wordt er kort na de vereniging van 2 prielen schelpenophopingen gevonden.

Waarschijnlijk is hier dan een verdieping in de bedding aanwezig, waarbij de stroom de schelpen niet meer tegen de helling van de verdieping kan meevoeren. De schelpenbanken kunnen dus in het eerste geval langgerekt zijn terwijl in het tweede geval de schelpenbank minder langgerekt en breder en ook vaak dikker is (Geologische Stichting, 1952).

Als gevolg van de zeespiegelrijzing en het bijbehorende kustwaartse migratie van het gehele waddensysteem vanaf ongeveer 6500 BP, mag veronderstelt worden dat de bijbehorende schelprijke geulafzettingen zeewaarts stratigrafisch steeds dieper voorkomen (Tieze et al., 1991).

In het algemeen geldt dat de omgewerkte schelpen in een geulbodem zich op grotere diepte bevinden dan de sedimentlaag waar ze oorspronkelijk uit afkomstig zijn.

2.2.1. Noordzeekustzone en Noordzee

Naast massale aanspoelingen van schelpen op het strand worden er in andere gebieden in de Noordzeekustzone soms ook aanrijkingen van schelpen gevonden. De Geologische Dienst heeft in 1992 een onderzoek uitgevoerd naar schelpenvoorkomens in het gebied rond de 20 meter dieptelijn in de Noordzee (De Bruyne, 1992). Op 57 locaties uit het boorarchief van de Geologische Dienst bevat de eerste meter beneden zeebodem schelpvoorkomens met tussen de 0 en 10% schelpen, terwijl op 6 locaties schelpvoorkomens aanwezig zijn met tussen de 10 en 20% schelpmateriaal. Voor 1-2 meter beneden zeebodem zijn dat resp. 44 en 6 locaties en voor 2-3 meter beneden zeebodem resp. 37 en 4 locaties. Van een aantal extra genomen hapmonsters (257 in totaal) zijn er 32 monsters welke schelpenpercentages van meer dan 1% opleverden en slechts 3 keer kwam het schelppercentage uit boven de 5%. Het streefpercentage van 20% of meer (winbare hoeveelheid, volgens dit rapport (De Bruyne, 1992)) kwam geen enkele maal voor.

Dit onderzoek is in 1997 opnieuw uitgevoerd (Kok, 1997). In dit rapport wordt vermeld dat er in de gebieden zeewaarts van de Waddeneilanden en noordwaarts van IJmuiden voor de Noord-Hollandse kust in het bestand van het NITG (Voorheen Geologische Dienst) nagenoeg geen boringen aanwezig zijn die aan de eisen voldoen. Deze eisen bestonden in dit onderzoek uit het opsporen van schelpenvoorkomens in de kustzone rondom de 20 meter dieptelijn. In aanmerking komen die gebieden, waarin zich, onder een sedimentpakket dat niet dikker is dan 2 meter, een laag met een dikte van minstens 30 cm en een gewichtspercentage schelpkalk groter dan 10 % bevindt.

Uit het analyseren van kaarten met de sedimentsamenstelling van de bovenste 10 cm van de Geologische Dienst blijkt dat er geen gebieden/locaties in de Noordzee aanwezig te zijn die rijk zijn aan schelpen (30% of meer schelpen) (Oosterbaan, 1989). Uit boorbeschrijvingen van de Rijks Geologische dienst zijn, in het kader van een onderzoek naar schelpenvoorkomens in de Noordzee, die locaties in de Noordzee geselecteerd welke de beschrijving: zeer veel schelpen, schelpenbank of uiterst rijk aan schelpen bevatten. In de beschrijvingen met schelpen is meestal sprake van de volgende soorten: *Spisula subtruncata*, *Spisula solida*, *Spisula elliptica* en *Cerastoderma edule*. De gevonden schelpvoorraden zijn voornamelijk (sub-)fossiel en worden nauwelijks aangevuld. *Spisula*-soorten komen ter plaatse wel levend voor, maar niet in grote hoeveelheden, zo blijkt uit de boorrapporten. Waarschijnlijk zijn de schelpenlagen ophopingen van schelpen uit een groter gebied en over een periode van honderden of duizenden jaren (Oosterbaan, 1989). De locaties met schelpenvoorkomens in de bovenste twee meter van de zeebodem concentreren zich in het

kustgebied; met name de Hollandse kust en de Scheldemonden. Verderop in de zee zijn slechts enkele waarnemingen. Waarschijnlijk is de betere sortering van schelpen en zand ten gevolge van de relatief sterke getijdenstromen in het kustgebied de oorzaak van de verdeling (Oosterbaan, 1989).

2.2.2. Conclusies.

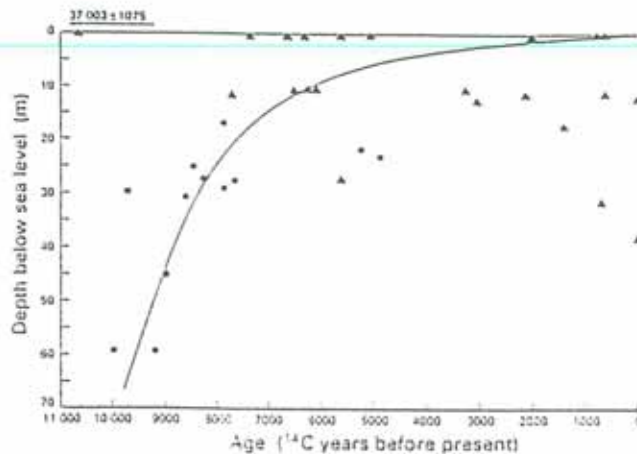
Uit de literatuur- en bronnen studie van Cramer (1998) wordt geconcludeerd dat de belangrijkste schelpwinlocaties liggen in zeer dynamisch gebied. Vooral in de buitenbochten van de geulen "waar de stroomnaad de geulwand inloopt" blijken in de praktijk belangrijke gebieden te zijn voor voorkomens. Uit de resultaten van de veldinventarisatie (Zant, 2000) wordt dit ook geconcludeerd. Naast de voorkomens in de geulen komen er ook op de platen nog een tweetal concentratiegebieden voor. Nabij ondiepe prielen en geulen en op een diepte van ongeveer 30 cm onder de oppervlakte op de hogere platen waar *Arenicola marina* de bodem doorwoelt. Deze gebieden zijn ofwel voor de winners niet economisch interessant ofwel niet te bereiken. Daarnaast vallen deze gebieden buiten de vergunningsgebieden.

Er zijn geen aanwijzingen dat er in de Noordzee zich belangrijke, economisch interessante schelpenbanken bevinden. In de Noordzeekustzone zijn wellicht wel interessante aanrijkingen te vinden. Dit zal verder in het hoofdstuk transport worden besproken.

2.3. *Geologische aspecten in het kader van voorkomens, voorraad en transport.*

Er zijn Holocene kokkels (*Cerastoderma edule*) van recente ouderdom gevonden op de Doggersbank en in de Duitse bocht, wat zeewaarts transport indiceert (Flessa, 1998). Echter het gaat hier niet om massaal transport richting zee. Schelpen die naar dieper water worden getransporteerd zijn slechts een kleine fractie van het totaal aan schelpen op die diepte. Flessa (1998) heeft kokkels verzameld van een drietal gebieden in de zuidelijke Noordzee: de intergetijdegebieden, stranden en ondiepe subgetijdegeulen van de Oost-Friese eilanden en Duitse Waddenzee, de Duitse bocht en de Doggersbank. Kokkels komen in levende toestand voor tussen op de droogvallende platen en in het ondiep subtidal (onder laagwaterniveau) bereik. Levende exemplaren van kokkels zijn uitstekende indicatoren voor een intertidal milieu.

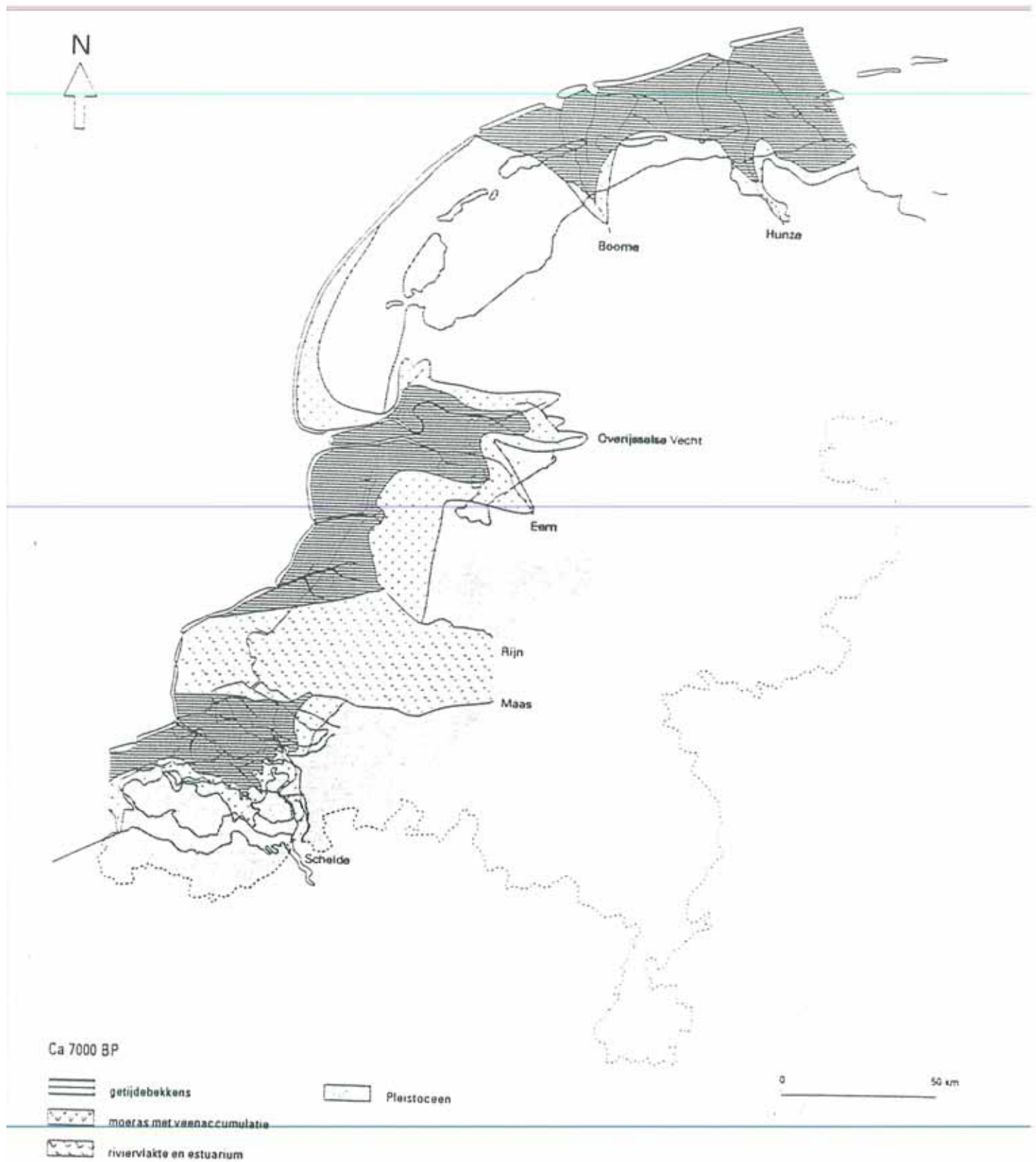
De bemonsterde kokkels zijn vervolgens op ouderdom geanalyseerd. De ouderdom en diepte waarop ze zijn gevonden zijn vervolgens met elkaar vergeleken en afgezet tegen de zeespiegel-curve voor het specifieke gebied. Uitgaande van de volgende aanname: indien een schelp van 5000 jaar oud gevonden is op het strand, is hij landwaarts getransporteerd. Namelijk ten tijde dat hij levend was stond de zeespiegel ongeveer 6 meter lager (zie figuur 1). Van de 34 exemplaren waarop de ouderdom is bepaald blijken er 24% min of meer op dezelfde diepte te zijn gebleven, 32 % is naar ondieper water getransporteerd en 44% is naar dieper water getransporteerd. Schelpen kunnen alleen landwaarts worden verplaatst als ze in het bereik zijn van golfwerking (ongeveer <12 m.) Schelpen worden landwaarts verplaatst over duizenden jaren na hun dood als de zeespiegel langzaam stijgt. Maar in het geval ze onder de golfbasis geraken, worden ze verder niet landwaarts getransporteerd. Daarnaast kunnen de schelpen gedurende het transport afslijten en/of uiteenvallen. De leeftijd van schelpen welke landwaarts getransporteerd worden blijft relatief jong. Er zijn schelpen gevonden van recente ouderdom (40-50 jaar oud) welke gevonden zijn in dieper water (37 m) nabij Helgoland in de Duitse Bocht (Flessa, 1998)



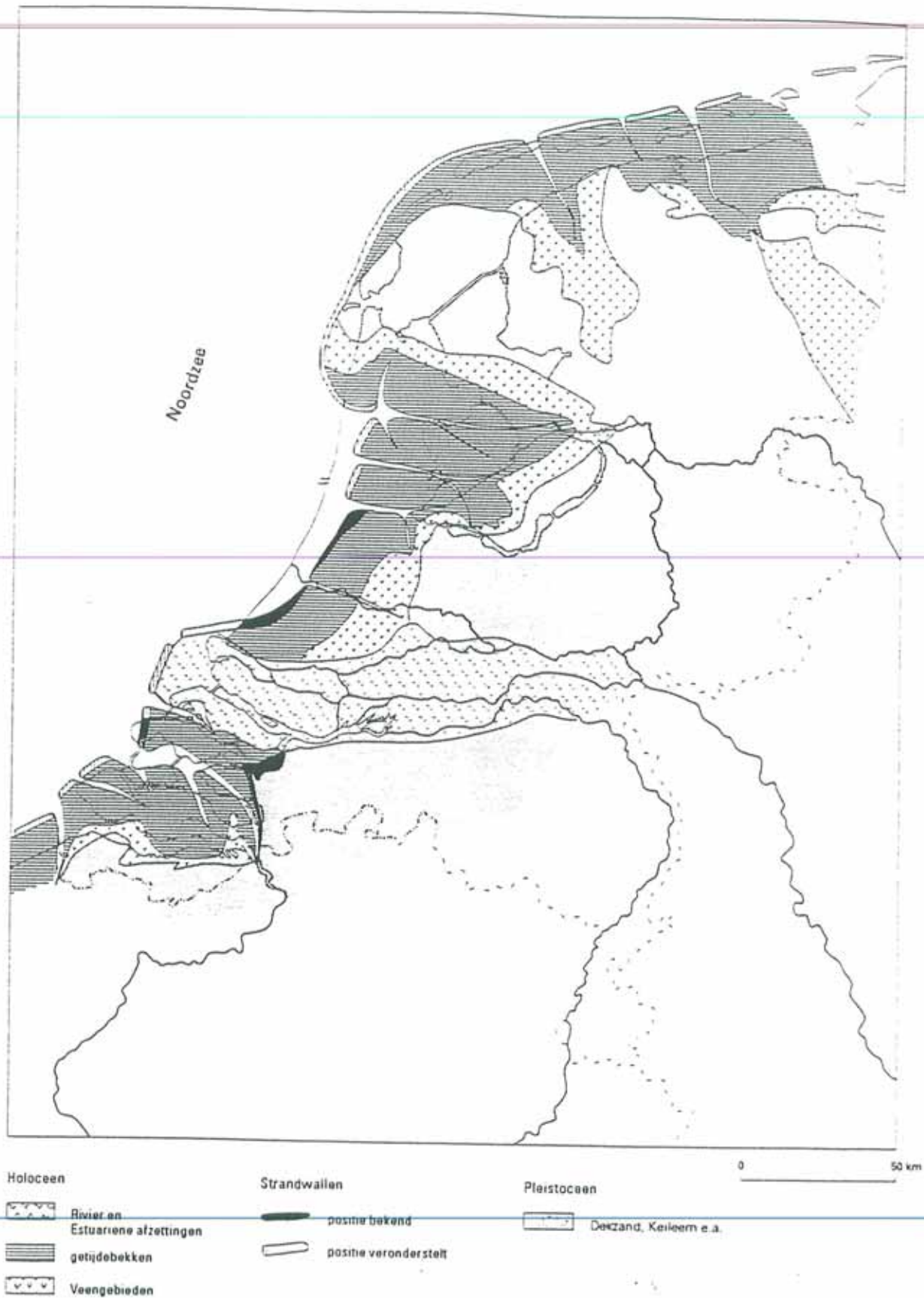
Figuur 1. Zeespiegel curve volgens Jelgersma (1979) met de diepte van monsternamen en C-14 ouderdom (Flessa, 1998). Punten zijn monster uit Doggersbank, driehoeken betreffen monsters van Waddenzee en Duitse Bocht.

2.3.1. Grootschalig kustontwikkeling gedurende het Holocene in het kader van schelpaccumulaties.

Tengevolge van het afsmelten van de ijskappen gevormd gedurende de laatste ijstijd steeg de zeespiegel vanaf ongeveer 18000 jaar BP over een verticale afstand van ongeveer 120 meter. Voor 7000 BP steeg de zeespiegel met tenminste 0.80 m per 100 jaar; daarna nam dit geleidelijk af van 0.60 m per 100 jaar tussen 7000 en 6000 BP tot 0.15 m per jaar tussen 5000 en 3000 BP (Beets et al, 1995). Tot 6000 BP was de aanvoer van sediment onvoldoende om de zeespiegelstijging bij te houden (zie figuur 2 en 3). Vanaf die tijd kon de sedimentaanvoer de zeespiegelstijging bijhouden, waardoor getijdegebieden zoals die van Holland en Zeeland geheel opgevuld konden raken. Rond 3000 BP was, met uitzondering van een aantal zeegaten in het oostelijk Waddengebied en de mondingen van de Rijn, de gehele Nederlandse kust gesloten en beschermde de achterliggende veengebieden (Beets et al, 1995). Omdat de zeespiegel bleef stijgen (na 3000 BP met gemiddeld 0.05 m per 100 jaar), kwam er opnieuw behoefte aan zand om dit te compenseren. De sterke toename van inbraken en overstromingen in de laatste 2000 jaar, vooral na de Romeinse tijd en in de Middeleeuwen, wordt veelal geweten aan enerzijds natuurlijke oorzaken en anderzijds antropogene oorzaken. De natuurlijke oorzaken kunnen worden toegeschreven aan een toename van de snelheid van zeespiegelrijzing gedurende korte periode en een tijdelijke verhoogde stormactiviteit tengevolge van klimaatsverandering. Daarnaast was er onvoldoende zand van buiten het kuststelsel aanwezig om de zeespiegelrijzing bij te houden. Het beschikbare zand was voornamelijk gebruikt voor het uitbouwen van de kust in de vorige periode (Beets et al, 1995).



Figuur 2. Reconstructie van de Nederlandse kustvlakte ong. 7000 jaar geleden (Van der Spek, 1994)



Figuur 3. Reconstructie van de Nederlandse kustvlakte ong. 5300 BP (Beets et al. 1995)

De activiteiten van de vroegere bewoners, met name de ontginning van veen en de bewerking en drainage van veen- en kleigebieden hadden een sterk maaiveldverlaging tot gevolg, welke bij inbraken potentiële kombergings betekende.

Het laat Pleistocene landschap werd gedomineerd door een 2-tal stuwwallen, 1 nabij Texel en Wieringen en 1 bij Ameland als voortzetting van het Drents plateau. Daarnaast bevonden zich 2 grote relatief bekkens: het Boorne bekken (voorm. Middelzee) en het Hunze bekken. Deze bekkens waren de eerste gebieden die gedurende de Holocene transgressie gedeeltelijk werden opgevuld.

In de periode 10.000 - 5.000 BP bestond een groot deel van de zuidelijke Noordzee uit droogvallende platen (Beets et al, 1995). Grote hoeveelheden voornamelijk Noordzee sediment inclusief schelpen zijn vervolgens getransporteerd door de steeds maar terugtrekkende kustlijn naar het Waddengebied. Gedurende de eerste periode van het Holoceen trok de kust zich terug en steeg de grondwaterspiegel in het achterland, wat de vorming van uitgestrekte veengebieden tot gevolg had. De "transgressie" duurde tot ongeveer 5000 BP. Daarna bleef de positie van de Nederlandse kustlijn ongeveer stabiel. De Pleistocene ondergrond en topografie bepaalde voor een groot deel de ontwikkeling van het waddengebied. Langs de kust van Zuid- en Noord Holland progradeerde de kust als gevolg van toevoer van sediment afkomstig van de rivieren en van de toenmalige vooroever (oude Ebb-tidal delta's (Beets et al 1992)). Na 5500 BP nam de snelheid van zeespiegelstijging verder af en werd het waddengebied langzaam opgevuld met zand, klei en veen. De kustlijn werd gesloten en er ontstond een tweede periode met grootschalige vervorming (Hollandveen), gedurende het Midden Subboreaal en Onder Atlanticum (zie figuur 4). Uiteindelijk verlanden de meeste waddengebieden en werden de bijbehorende zeegaten opgevuld met zand en klei. Het oostelijke waddengebied (Boorne en Hunze bekkens) werd echter nooit geheel opgevuld met sediment (van der Spek, 1994). De veengebieden werden vervolgens later weer overstroomd door de zee a.g.v. tekort aan sediment.

In het Westelijke Waddengebied lag het Pleistocene oppervlak relatief hoog, waardoor de zee minder ver kon binnendringen. Tot 3700 BP vond hier eenzelfde ontwikkeling plaats als in West-Nederland, met uitzondering van het Texel-hoog, wat niet onder water kwam en waar geen vorming van veen plaatsvond. Na 3700 BP ontstond er een waddengebied ten oosten van de Vlie-geul. Ten zuiden van de lijn Texel-Bolsward (Balgzand, Texelstroom, Zuiderzee) vond op grote schaal veenvorming plaats, tot in de vroege middeleeuwen. Ter plaatse van de Texel-inlet (Marsdiep) bevond zich enkel een kleine rivier. De zee kwam pas laat dit gebied binnen. Pas rond het jaar 1000 BP verdronk dit gebied. Ook de Zuiderzee ontstond gedurende de Middeleeuwen. De Texel-inlet ontstond pas in 1170, en bereikte een diepte van ongeveer 25 meter in 1583. De huidige diepte bedraagt ongeveer 50 meter. Pas vanaf het begin van onze jaartelling zijn de grotere bekkens gevormd zoals de Westelijke Waddenzee, Zuiderzee, Middelzee en de Lauwerszee met als laatste grote bekken de Dollard in de 12- 15 eeuw (Beets et al, 1995). Op het wantij van Ameland hebben verschillende Holocene geulen tot in de Eem Formatie ingesneden en geïrodeerd. Fossiele schelpen uit de Eemperiode zijn op deze wijze weer in het afzettings- en transportmilieu terecht gekomen.

ouderdom		geologische tijdsindeling	
C 14-jaren [™] Zonnejaren voor heden (BP)			
1250	8e eeuw na Chr	Laat-Holoceen	Subatlanticum
1950	AD		
2900	1100 v Chr		
3700	2100 v Chr	Midden-Holoceen	Subboreaal
5000	3780 v Chr		Atlanticum
8000	± 6900 v Chr	Vroeg Holoceen	Boreaal
9000	± 8030 v Chr		Praeboreaal
10000	± 9250 v Chr		Laat-Weichselien
		Pleistoceen	

Figuur 4. Geologische tijdsindeling (Beets et al, 1995).

De getijdengeulen afzettingen die gevonden zijn op het eiland Ameland laten een sequentie zien van ongeveer 30 meter in dikte (van der Spek, 1994). De sequentie begint meestal met een 3,5 meter dikke channel-lag afzetting met daarin veel schelpen. In de daarboven liggende afzetting komen nog wel regelmatig schelpen voor, welke dan met hun convexe zijde boven liggen en af en toe komen nog specifieke laagjes schelpen voor (van der Spek, 1994). Verder naar boven verdwijnen de schelpen. De soorten schelpen die worden gevonden verschillen van beneden naar boven. Onderin de sequentie worden voornamelijk *Cerastoderma edule*, *Spisula*, *Macoma baltica* en *Mytilus edulis* gevonden, terwijl verder naar boven, *Macoma*

baltica, *Cerastoderma edule* en *Donax* de meest dominante soorten worden (van der Spek, 1994).

De basis van het kwartair in de Waddenzee wordt gevormd door voornamelijk mariene afzettingen. Deze mariene afzettingen worden gerekend tot de Formatie van Maassluis. De aanwezige zee werd gedurende het Praetiglien en Tiglien steeds kouder en er ontwikkelde zich een glaciële molluskenfauna, een gezelschap dat zich thuis voelt in de poolzee. Door een daling van de zeespiegel a.g.v. een kouder wordende klimaat en de vorming van ijskappen, was het waddengebied in het laatste deel van het Tiglien voor het grootste deel land en vonden er rivierafzettingen plaats. De Maassluis formatie bestaat uit fijne tot matig grove zanden met plaatselijk veel schelpresten, en komt in de ondergrond voor van Den Helder tot aan de oostpunt van Schiermonnikoog. De diepte van de bovenkant van de afzetting ligt in het algemeen op 210-270 meter onder NAP en onbereikbaar voor de huidige geulen. De schelpsoorten van deze formatie welke nu nog voorkomen/gevonden worden zijn o.a. : *Mya Arenaria*, *Hydrobia Ulvea*, *Cardium edule*, *Donax vittatus*. Soorten die uitsluitend in het oud-Pleistoceen optreden zijn: *Ringicula ventricosa*, *Macoma preatenuis* en *Nucula tenuis*. Waarbij de laatste weer in het Holocene terugkomt. Vervolgens komen er een aantal perioden voor waarbij er alleen rivierafzettingen in het Waddengebied zijn gevormd. In het vroegste deel Cromerien (Midden Pleistoceen) lag de kustlijn op korte afstand van het Waddengebied en zijn er geen mariene afzettingen in het waddengebied gevonden, in het laatste deel van het Cromerien, ong. 400.000 jaar geleden, zijn er wel mariene afzettingen in de Waddenzee bekend. De kustlijn had min of meer dezelfde vorm en ligging als de huidige kustlijn. De mariene afzettingen van deze tijd worden gerekend tot de Formatie van Urk. De mariene afzettingen van het Holsteinien worden ook tot de Formatie van Urk gerekend. In verschillende boringen zijn schelpen gevonden. *Macoma baltica* wordt voor het eerst aangetroffen en ook van *Barnea candida* is dit het eerste voorkomen. De mariene fauna wijst op een ondiep litoraal milieu (wadden of open zee). Het Holsteinien bevat kustnabije of volmariene afzettingen. In het westelijke Waddengebied ligt de bovenste deel van de formatie van Urk op een diepte van 25 meter in het Oostelijke Waddengebied op 17 meter. Door ijsstuwing in het Saalien kan de formatie ondieper zijn komen te liggen. Stuwing heeft voornamelijk plaatsgevonden in de Westelijke Waddenzee nabij Texel, Wieringen en de Afsluitdijk, waar de stuwwallen tot enkele meters boven NAP aanwezig zijn. De zeespiegelrijzing aan het eind van het Saalien bracht de zee terug in de Waddenzee, en leidde tot vorming van mariene afzettingen met grove zanden en mariene schelpen. De schelphoudende zanden van de Eemformatie zijn veelvuldig in het Holocene geërodeerd waardoor schelpen uit het Eem zijn geremanieerd (hergebruikt). Van de Eem formatie is in het Waddengebied weinig origineel meer terug te vinden. Vooral de basis van de Westland Formatie (de jongste afzettingen) bestaat vaak uit geremanieerd Eem materiaal.

2.3.2. Ouderdom

Locatie	Diepte t.o.v. NAP	Soort	Ouderdom BP	fout
Stuifdijk	0,34	diverse	3330	±60
Koolhoeve	-1,32	diverse	1930	±50
wantij 1.2	-12,8	Cerastoderma edule	1260	±40
Wantij 1.1.	-22,38	Cerastoderma edule	4140	±40
Wantij 3.1.	-10,62	Cerastoderma edule	3040	±60
Wantij 4.2	-14,34	Cerastoderma edule	1930	±60
Wantij 4.1.	-15,55	Cerastoderma edule	4200	±50
Wantij 5.2	-2,05	Cerastoderma edule	700	±50
Wantij 5.1	-6,62	Cerastoderma edule	2450	±50
Suezkanaal	-8,98	Scrobicularia plana	5640	±80
Hollumberbos	-0,67	Cerastoderma edule	1980	±50
Westergrie	-2,5	Cerastoderma edule	1580	±50
Zuiderspruit	-11,14	Cerastoderma edule	1000	±40
Wantij 3.1	-12 ?		3040	±60
Wantij 2.2.	-6,56	Cerastoderma edule	460	±40
Wantij 2.1	-11,39	Cerastoderma edule	1040	±40
Buurderduinen 3	-0,5	Spisula subtruncata	1290	±50
Buurderduinen 2	-15	Spisula subtruncata	2110	±60
Buurderduinen 1	-24	Spisula subtruncata	2490	±40
Hollumerduinen	-19	Spisula subtruncata	2870	±50

Tabel 1. Ouderdommen schelpen in boringen Ameland (van der Spek, 1994)

De ouderdomsgegevens zoals weergegeven in tabel 1 betreffen een aantal koolstof-14 dateringen van een aantal monsters nabij Ameland. Het betreffen monsters uit boringen waarbij de diepte van de monsternamen tussen de 1 en 23 meter onder het maaiveld betreft, dus monsters uit begraven schelprijke afzettingen. De diepte t.o.v. maaiveld is afgeleid uit de profielen in dit rapport, in de tabel wordt alleen de diepte t.o.v. NAP vermeldt. Het gemiddelde ouderdom in deze monsters ligt op 2324 BP met een maximum van 5640 en een jongste ouderdom van 460 jaar voor heden.

Wanneer men deze getallen vergelijkt met de gegevens uit het ouderdomsonderzoek (van der Spek, 2000) van schelpen afkomstig van schelpenbanken op de bodem van enkele geulen, uitgevoerd in het kader van de "Vervolgonderzoek Schelpenwinning, blijkt dat er grote overeenkomsten bestaan met de ouderdommen. Het gemiddelde ligt in ongeveer de zelfde orde van grootte plus dat de spreiding ook grote overeenkomsten vertoont. Uiteraard moeten hier niet al te snel conclusies over gemaakt worden omdat het hier maar om een beperkt aantal waarnemingen gaat, maar het geeft wel een indicatie. Het totale gemiddelde van alle ouderdomsbepalingen in dit onderzoek, met uitzondering van de zeer hoge ouderdommen van meer dan 25.000 BP, laten een gemiddelde zien van 3116 met een spreiding tussen 268 en 7003 BP (van der Spek, 2000) (zie tabel 3.). Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de jongere schelpen op basis van uiterlijke kenmerken buiten de ouderdomsanalyse zijn gelaten; de gemiddelde ouderdom van schelpen in een oppervlakte-schelpenbank zal dientengevolge lager liggen. Percentages van de jonge schelpen welke buitengesloten zijn voor analyse staan

vermeld in tabel 2 in de categorie C1 resp. S1: relatief vers. De gemiddelde ouderdom van de *Cerastoderma edule* ligt echter wel veel hoger dan die van *Spisula subtruncata* (resp. 3983 en 1435 BP). Opmerkelijk is dat de *Spisula*'s met lage ouderdommen ment name in het Marsdiep zijn gevonden. Het gebied van het Marsdiep is slechts hooguit 1000 jaar oud. Het percentage aan *Spisula*'s in de totale monsters ligt op ongeveer 28% en dat van kokkels op 48% voor de monsterlocaties in het Marsdiep. In de overige monsterlocaties ligt het aandeel aan *Spisula*'s aanmerkelijk lager maximaal 7%. Het hoge percentage van een typische Noordzee kustbewoner als de *Spisula*, naast de ouderdom van minder dan 1000 jaar, duidt toch op een transport vanaf de Noordzee het Waddengebied binnen. Het Marsdiep is een relatief diep zeevat, waar de eb- en vloedstroming in vergelijking met overige zeevaten van het Waddengebied hoog is. In de ouderdomsverdeling van *Spisula*'s is het opvallend dat veel schelpen een ouderdom hebben tussen 250 en 500 jaar en tussen 1600 en 2800 BP, en dat er geen schelpen gevonden zijn met tussenliggende ouderdommen.

Gewichts- percent. in %		Mars diep	Mars diep	Mars diep	Storte melk	Vlie- stroom	Noord meep	NO- Meep	NO- Meep		omschrijving categorie
	Cate gorie	1	8	12	Ia	Ila	Illa		5	6	
Cerastoderma edule	C1	3	4	4	21	18	22				relatief vers
	C2	21	5	13	24	8	13	2	10		wit, gesleten, (beetje) uitgelooft
	C3	12	8	6	15	20	17	25	9		lichte blauwkleuring
	C4	32	39	40							gesleten, lichte blauw/oranje- kleuring
	C5	17	21	15	34	52	48	73	81		matige tot sterke blauwkleuring
	C6	16	22	21	6	1					oranje-bruine verkleuring
Spisula subtruncata	S1	27	33	20	16				2	3	relatief vers
	S2	8	8	6							wit, gesleten, uitgelooft
	S3	6	11	12							enige tot matige blauwkleuring
	S3a				58			83	95		matige tot sterke blauwkleuring
	S4	9	7	9							lichte blauw/oranje- kleuring
	S5	50	41	52	26						enige tot sterke bruinkleuring
	S5a							15	2		enige bruinkleuring
Totaal		201	199	198	200	99	100	200	200		

Tabel 2. Gewichtspercentage van de schelpen gebruikt voor ouderdomsbepaling (Van der Spek, 2000).

Ouderom BP		Mars diep	Mars diep	Mars diep	Storte melk	Vlie-stroom	Noord meep	NO-Meep	NO-Meep	
	Catego rie	1	8	12	la	lla	llla	5	6	omschrijving categorie
Cerasto-derma e.	C1									relatief vers
	C2	5309	2675	4520	4410	6156	4441	2344	1173	wit, gesleten, (beetje) uitgelopen
	C3	2954	2287	4050	5110	4239	496	6408	28098	lichte blauwkleuring
	C4	4631	6778	5914						gesleten, lichte blauw/oranjekleurin
	C5	2275	2340	7003	3204	3262	4523	2738	6273	matige tot sterke blauwkleuring
	C6	3245	1627	1475	5594	6031				oranje-bruine verkleuring
<i>gemidd. Cerast.</i>		3683	3141	4592	4580	4922	3153	3830	3723	3983
Spisula s.	S1									relatief vers
	S2	277	288	1812						wit, gesleten, uitgelopen
	S3	277	473	2313						enige tot matige blauwkleuring
	S3a				2700			2884	29898	matige tot sterke blauwkleuring
	S4	407	398	2927						lichte blauw/oranjekleurin
	S5	2566	268	3263	1622					enige tot sterke bruinkleurin
	S5a							478		enige bruinkleurin
<i>gemidd. Spisula</i>		882	357	2579	2161			1681		1435
<i>gemidd. totaal</i>		2438	1904	3697	3773	4922	3153	2970	3723	3116

Tabel 3. Ouderdommen schelpen van schelpenbanken uit Van der Spek (in prep. 2000).

De hoge ouderdommen, bepaald m.b.v. radioactief koolstof (^{14}C), van de schelpen die gevonden zijn, zijn in het algemeen erg onbetrouwbaar. Ouderdommen van meer van 8000 jaar moeten met een korrel zout worden genomen (Flemming, pers.com.) Ten gevolge van recrystalizatie processen, waarbij nieuw ^{14}C kan worden opgenomen, is ouderdomsbepaling met ^{14}C methode vaak niet erg zinvol en kunnen een lagere ouderdom geven dan er in werkelijkheid is (Chapell and Pollack, 1972). De hoge ouderdommen van 30.000 jaar oud zijn zeer waarschijnlijk schelpen uit het Eem periode of nog ouder. Er moeten nooit bepaalde conclusies worden getrokken uit ouderdomsbepalingen met dergelijke hoge ouderdommen. Flessa (1998) geeft ook een voorbeeld aan met een hoge ouderdom. Als oorzaak voor de hoge datering geeft hij aan dat de schelp waarschijnlijk als fossiel uit het Eemien of ouder opnieuw aan het afzettingsmilieu deelneemt en nieuw jonger koolstof opneemt. Ook in vergelijking met andere dateringsmethode kunnen grote verschillen optreden, wat laat zien dat toepassing van ^{14}C op ouder materiaal onbetrouwbaar is. Een onderzoek aan pre-Holocene mariene afzettingen in Hong Kong leverde met ^{14}C een ouderdom van 22-46 Ka BP terwijl datering met Uraniumseries een veel oudere datering liet zien; 130-142 Ka BP (Saito et al, 1998). Blootstelling aan de lucht met opname van jonger koolstof gedurende een laagstand van de zeespiegel gedurende de laatste glaciaal is waarschijnlijk de oorzaak. Hoge ouderdommen op basis van radioactieve ^{14}C dateringen moeten meer worden beschouwd als een minimale ouderdom. In dit artikel wordt tevens aangetoond dat er geen aanwijzingen zijn dat in de

afgelopen 50.000 jaar gedurende het Pleistocene hogere zeespiegelstanden optreden dan 50 meter lager dan het huidige niveau (Saito et al, 1998).

Een andere manier voor het bepalen van de ouderdom is aan de hand van de soorten-samenstelling. Sommige soorten komen pas op een gegeven moment door menselijke invloeden in het Waddemilieu binnen (zie tabel 4). Zo is de introductie van *Ensis Directus* zeer nauwkeurig te bepalen. Deze schelp is in 1982 in het Waddengebied geïntroduceerd. Hieronder is een overzicht van de soorten en hun introductie/verdwijning in/uit het Waddengebied.

Soort	Ned. benaming	introductie/verdwijning
<i>Cerastoderma edule</i> (oude naam <i>Cardium edule</i>)	Kokkel	
<i>Macoma baltica</i>	Nonnetje	
<i>Mytilus edulis</i>	Mossel	
<i>Ostrea edulis</i>	Oester	voor 1940
<i>Mya arenaria</i>	Strandgaper	na 14 ^e of 15 ^e eeuw
<i>Barnea candida</i>	Witte boormossel	
<i>Petricola pholadiformis</i>	Amerikaanse boormossel	na 1904
<i>Scrobicularia plana</i>	Platte slijkgaper	
<i>Mya truncata</i>	Afgeknotte gaper	
<i>Mactra corallina</i> <i>plistonaeerlandica</i>		
<i>Littorina littorea</i>	Alikruik	
<i>Crepidula fornicata</i>	Watermuiltje	na 1926
<i>Spisula subtruncata</i>		
<i>Donax vittatus</i>	Zaagje	
<i>Mactra corallina</i>	Grote strandschelp	
<i>Solen marginatus</i>		
<i>Ensis ensis</i>	mesheft	
<i>Ensis siliqua/minor</i>		na 1920
<i>Ensis directus/americanus</i>	Amerikaanse zwaardschede	na 1982
<i>Venerupis pullastra</i>	Tapijtschelp	voor 1970 (Marsdiep)
<i>Cardium aculeatum</i>		
<i>Cardium tuberculatum</i>		
<i>Cardium crassum</i>		
<i>Buccinum undatum</i>	Wulk	voor 1940
<i>Crassostrea gigas</i>	Japanse oester	na 1983
<i>Teredo navalis</i>	Scheepsworm	na 1730
<i>Venus mercenaria</i> L.		na 1954?
<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	Brakwaterslakje	na 1915
<i>Littorina obtusa</i>	Stompe alikruik	voor 1978
<i>Corambe obscura</i>		
<i>Lacuna vincta</i>		
<i>Rissoa membranacea</i>		
<i>Cingula semicostata aculeus</i> Gould		

Tabel 4. Introductie en verdwijning van enige schelpsoorten. Bron: Oost (in prep.) en Geologische Stichting (1952).

Radioactieve koolstof ^{14}C dateringen verschaffen een mogelijkheid om de gemiddelde tijd te bepalen welke een schelp in een actieve sedimentaire milieu kan bestaan (Flessa and Kowalewski, 1994). In het algemeen zijn de schelpen gevonden in de kustnabije milieu veel jonger dan de schelpen gevonden in de diepere Noordzee. Dit kan het gevolg zijn van de volgende factoren:

1. Snellere afbraak van schelpen t.g.v. meer invloed door golfenergie, en invloed van borende algen
2. Grotere sedimentatiesnelheden in kustnabije milieus waardoor de schelpen sneller begraven raken.
3. Als de bioturbatie activiteit in relatie tot de sedimentatie snelheid hoger is op de shelf-milieus dan in de kustnabije milieu dan zijn oudere schelpen op de shelf vaker aanwezig aan de oppervlakte.
4. Ten gevolge van de snelle Holocene zeespiegelstijging hebben schelpen in de kustnabije afzettingen minder tijd gehad om te accumuleren dan schelpen die op de shelf liggen. 7000 jaar geleden lag zeespiegel ongeveer 10 meter lager dan nu. Het kustmilieu is ondieper dan 10 meter.

2.4. Samenstelling van de schelpen

De belangrijkste schelpsoort voor de schelpenwinning is de kokkel (*Cerastoderma edule*). Verreweg het grootste deel van de schelpensoorten in de schelpenbanken die gewonnen worden bestaat uit *Cerastoderma edule*. De samenstelling van de schelpenbanken bestaat echter ook voor een deel uit andere schelpen. Het aandeel van de verschillende soorten hangt af van de locatie. Er zijn verschillende metingen en schattingen uitgevoerd. Reitsma (1992) geeft aan dat voor wat betreft de Waddenzee 80 % van de gewonnen schelpen bestaan uit kokkels en 20% uit overige soorten. In de zeegaten en in de Noordzee bestaan de gewonnen schelpen voor ongeveer 30% uit kokkels (*Cerastoderma edule*), 10% uit nonnetjes (*Macoma baltica*), 40% uit de Noorse Hartschelp (*Laevicardium crassum*) en 20% overigen. In onderstaande tabellen zijn verschillende onderzoeken naar soortensamenstelling op een rij gezet. Opvallend hierbij is de Noorse Hartschelp welke uit de melding van Reitsma (1992) zo prominent aanwezig is in de monsters uit de zeegaten in de overige onderzoeken nauwelijks een rol van betekenis speelt.

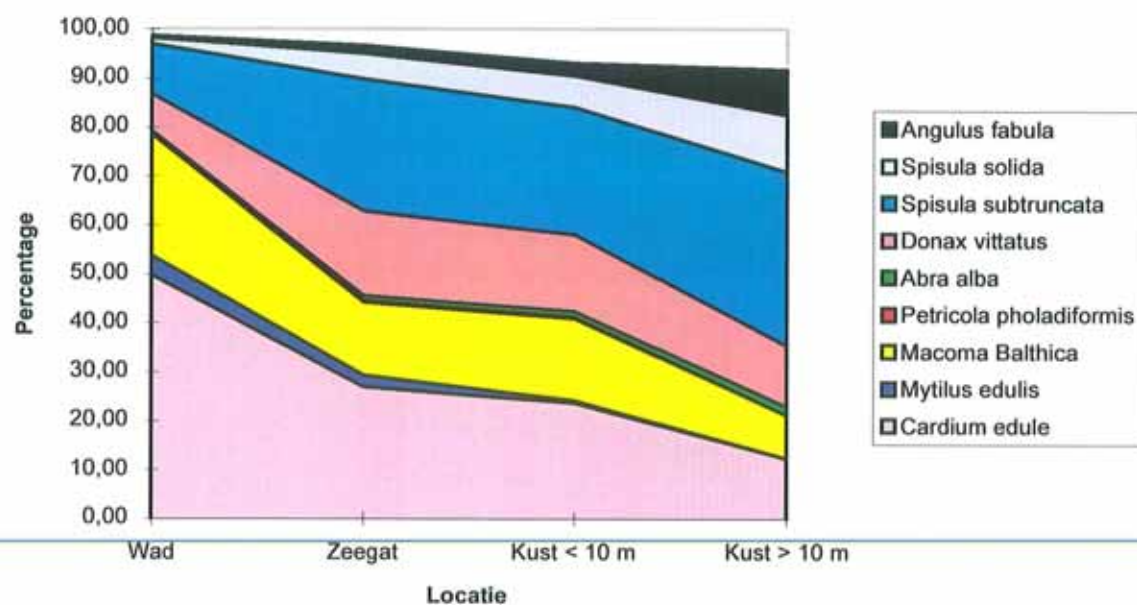
Daarnaast is de samenstelling van de schelpen uiteraard van belang om een indicatie te geven over het transport. Naast het feit dat de verhouding hele schelpen/ gruis iets zegt over de verwerking en de relatieve transportafstand, is de soortenverdeling ook indicatief voor de mate van transport. Allochtone soorten, soorten die niet in het milieu van afzetting leven, zeggen iets over de transport-afstand. De import van Noordzeemateriaal valt af te leiden van de aanwezigheid van typische Noordzee soorten in de geulbodemaafzetting van de "back-barrier" geulen (Van Straaten, 1952).

Krause (1950) heeft de gewichtspercentages van verschillende schelpbestanddelen bekeken; hij heeft onderscheid gemaakt in dubbelkleppigen, enkelvoudige kleppen, geboorde kleppen, geërodeerde kleppen, verschillende groottefracties van gruis, slakkenhuizen, en wormbuizen. En heeft gekeken naar de verdeling van deze bestanddelen over een groot waddengebied tot aan de zeegaten. Opvallend hierbij is dat het aandeel aan kleinere gruisfracties naar de zee toeneemt.

	Wad-gebied	Zeegat	Kust tot 10 meter diepte	Kust tot 15 meter diepte	Kust tot 20 m diepte.
Dubbelkleppen	1,9	0,4	0,1	0,2	0,1
Enkelkleppen	39,7	24,0	15,4	11,4	15,7
Geboorde kleppen	1,0	0,9	0,7	0,5	0,8
Geërodeerde kleppen	1,7	1,4	3,3	0,2	0,4
Gruis tot 20 mm.	4,8	1,7	1,3	0,1	0,8
Gruis tot 15 mm.	4,7	1,9	1,5	0,7	0,5
Gruis tot 10 mm	8,8	6,5	9,6	4,7	4,3
Gruis < 10 mm	34,4	55,8	61,0	71,0	64,3
Slakkenhuizen	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1
Wormbuizen	1,8	6,7	6,6	11,0	0,3
Diversen	0,8	0,6	0,4	-	0,3
totaal	100	100	100	100	100

Tabel 5. Tabel met de verdeling van de verschillende schelpbestanddelen in procenten van het totaal (Krause, 1950).

Verdeling schelpensoorten in schelpenbanken op het Wad, in een Zeegat en voor de Kust (Krause, 1950)



Figuur 5. Verdeling van de (dode cq fossiele) schelpensoorten volgens Krause (1950) op het Wad, in een zeegat en voor de Kust.

In tabel 5 is duidelijk te zien dat in de richting van de zee de dubbelkleppen, enkelkleppen en slakkenhuizen afnemen terwijl het percentage gruis toeneemt. Dit duidt op een steeds hogere mate van verwerking in de richting van de zee. In de diepere delen van de kust neemt het gruisdeel en geërodeerde kleppen af. De grootste erosieve werking treedt op in de ondiepe kustzone en in het zeegat. Daarnaast is er een duidelijke relatie aanwezig tussen het voorkomen van specifieke schelpensoorten en de locatie (zie tabel 6, 7 en fig. 5.) (Krause, 1950)

<i>Levend aan getroffen:</i>	<i>Alleen fossiel</i>
<i>Abra alba</i>	<i>Alodis gibba</i>
<i>Angulus fabula</i>	<i>Astarte sulcata</i>
<i>Angulus tenuis</i>	<i>Astarte triangularis</i>
<i>Anra prismatica</i>	<i>Bittium reticulatum</i>
<i>Assiminea grayana</i>	<i>Buccinum undatum</i>
<i>Barnea candida</i>	<i>Cardium crassum</i>
<i>Buccinum undatum</i>	<i>Cardium echinatum</i>
<i>Cerastoderma edule</i>	<i>Cardium exiguum</i>
<i>Donax vittatus</i>	<i>Cardium tuberculatum</i>
<i>Hydrobia ulvae</i>	<i>Cirphaea crispata</i>
<i>Littorina littorea</i>	<i>Corbula gibba</i>
<i>Lora turricola</i>	<i>Crepidula fornicata</i>
<i>Macoma baltica</i>	<i>Crepidula fornicata</i>
<i>Mactra corallina</i>	<i>Cylichnia cylindratia</i>
<i>Montacuta bidentata</i>	<i>Cyprina islandica</i>
<i>Mya arenaria</i>	<i>Dinvaricella divaricata</i>
<i>Mysella bidentata</i>	<i>Dosinia linct</i>
<i>Natica catena</i>	<i>Ensis directus</i>
<i>Petricola pholadiformis</i>	<i>Ensis ensis</i>
<i>phaxas pellucidus</i>	<i>Ensis siliqua</i>
<i>Retusa alba</i>	<i>Mya truncata</i>
<i>Rissoa membranacea</i>	<i>Mytilus edulis</i>
<i>Scrobicularia plana</i>	<i>Nassarius incrassatus</i>
<i>Spisula solida</i>	<i>Ostrea edulis</i>
<i>Spisula subtruncata</i>	<i>Pecten varius</i>
<i>Tellina pygmae</i>	<i>Rissoa parva</i>
<i>Thracia papyracea</i>	<i>Saxicava arctica</i>
<i>Venus striatula</i>	<i>Saxicavella jeffreysi</i>
	<i>Scala clathrus</i>
	<i>Tellina fabula</i>
	<i>Tellina tenuis</i>
	<i>Turritella communis</i>
	<i>Venerupis decussata</i>
	<i>Venerupis pullastra</i>
	<i>Venerupis senecens</i>
	<i>Venus ovata</i>
	<i>Zirfea cripta</i>

Tabel 6. Tabel met de soorten schelpen die gevonden zijn in de waarnemingen van Krause (1950)

Soort schelp	% Wad	% Zeegat	% Kust < 10 m	% Kust > 10 m
<i>Cardium edule</i>	49,79	27,00	23,67	12,33
<i>Mytilus edulis</i>	3,93	2,31	0,57	0,03
<i>Macoma Baltica</i>	24,79	15,00	16,67	8,83
<i>Petricola pholadiformis</i>	0,21	0,33	0,37	0,02
<i>Abra alba</i>	0,57	0,91	1,20	1,67
<i>Donax vittatus</i>	7,50	17,29	15,67	12,50
<i>Spisula subtruncata</i>	10,21	27,00	25,83	35,50
<i>Spisula solida</i>	1,21	5,14	6,50	11,50
<i>Angulus fabula</i>	0,43	1,76	2,68	9,50
<i>Angulus tenuis</i>	0,21	0,50	1,20	1,17
<i>Alodis gibba</i>	0,21	0,61	1,17	2,50
<i>Mysella bidentia</i>	0,07	0,91	2,00	1,85
<i>Astarte triangularis</i>	0,00	0,49	0,53	0,20
<i>Montacuta ferruginosa</i>	0,07	0,34	0,85	1,00
<i>Astarte sulcata</i>	0,00	0,00	0,02	
<i>Barnea candida</i>	0,08	0,03	0,00	
<i>Cardium exiguum</i>	0,01	0,05	0,05	
<i>Divaricella divaricata</i>	0,02	0,05	0,11	
<i>Dosinia linct</i>	0,00	0,00	0,02	
<i>Venus striatula</i>	0,00	0,03	0,08	
<i>Venus ovata</i>	0,00	0,00	0,03	
<i>Abra prismatica</i>	0,00	0,00	0,06	
<i>Tellina pygmea</i>	0,00	0,01	0,02	
<i>Phaxas pellucidus</i>	0,00	0,00	0,02	
<i>Thracia papyracea</i>	0,00	0,01	0,05	
<i>Zirfea crispata</i>	0,02	0,02	0,02	
<i>Venerupis pullastra</i>	0,03	0,01	0,00	
<i>Mactra corallina</i>	0,07	0,05	0,12	
<i>Mya arenaria</i>	0,24	0,07	0,00	
<i>Mya truncata</i>	0,05	0,03	0,02	
<i>Ostrea edulis</i>	0,00	0,00	0,02	
<i>Saxicava arctica</i>	0,00	0,00	0,01	
<i>Saxicavella jeffreysi</i>	0,00	0,01	0,01	
<i>Scrobicularia plana</i>	0,12	0,11	0,08	

Tabel 7. Tabel met de verdeling in procenten van de verschillende soorten dode cq fossiele schelpen volgens Krause (1950).

De verhouding fossiele en subrecente schelpen in de schelpenbanken geeft een indicatie van de ouderdom en het transportproces. Naast onderzoek in de Waddenzee is er ook onderzoek gedaan naar de samenstelling van schelpen in schelpenbanken in de Westerschelde. Door de aanwezigheid van schelprijke fossiele afzettingen kan worden bestudeerd in hoeverre deze fossiele (Tertiaire of vroeg-Kwartaire), goed herkenbare, schelpen uit de oudere afzetting deel uitmaken van de schelpenbanken, waardoor iets gezegd kan worden over de herkomst van de schelpen.

Er is in 1997 schelpmateriaal verzameld op een tweetal plaatsen in de Zeeuwse delta. Er was materiaal voorhanden van een locatie in de Westerschelde (Schaar van Spijkerplaat tussen boei SS-8 en SS-10) en er was materiaal van een locatie op de voordelta ten Noordwesten van Westkapelle. Het materiaal is gezeefd op een zeef van 1 mm en van alle materiaal is gepoogd de soort te achterhalen en het drooggewicht. Een overzicht van soorten die zijn gevonden inclusief de bijbehorende drooggewichtsspercentages is weergegeven in tabel 8. In het geval van gruis is het gruis-materiaal waarvan de soort niet meer kan worden achterhaald. Alles is groter dan 1 mm (Weststeijn, 1998). Er zit in beide monster, uit de Zeeuwse delta relatief vrij veel gruis.

Soort:	Westkapelle	Wester- schelde	Stortem elk	NOM	Vliestroom	NOM9	VS22
<i>Mytilus edulis</i>	0,32	1,21	2,55	9,71	7,77	11,76	16,1
<i>Ostrea edulis</i>	1,21	5,87	1,05	0,69	0,54	1,31	0,04
<i>Aequipecten opercularis</i>	0,18	4,92					
<i>Pododesmus</i> sp.	0	0,02					
<i>Cerastoderma edule</i> (fossiel)	24,86	29,08	70,55	77,7	77,2	66,32	79,5
<i>Cerastoderma edule</i> (recent)	0,97	0					
<i>Macra</i> sp.	0,73	0					
<i>Spisula</i> sp.	41,65	3,13	9,91	1,71	7,3	3,29	0,69
<i>Ensis</i> sp.	8,29	0	0,03	0	0	0,23	0
<i>Angulus</i> sp.	0,06	0					
<i>Macoma baltica</i> sp.	1,67	1,17	2,39	3,12	2,14	8,66	0,97
<i>Scrobicularia plana</i>	0	0,05	0	0,18	0,11	0	0,36
<i>Abra alba</i>	0,04	0					
<i>Donax vittatus</i>	0,73	0,04	4,43	0,18	1,65	0,15	0
<i>Petricola pholadiformis</i>	1,62	0	0	0,03	0	0	0,04
<i>Venerupis</i> sp.	0,33	0					
<i>Mya</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0,21
<i>Chamelea striatula</i> /Dosina exoleta	0	0	0,02	0,03	0,01	0	0
Diversen		0,45	0				
<i>Nassarius</i> sp.	0	0	0,12	0,08	0,02	0	0
<i>Buccinum undatum</i>	0	0	0,03	0,03	0,25	0,03	0,14
<i>Hydrobia ulvae</i>	0	0	0	0	0,001	0	0
Pliocene compleet	0	0,47					
Pliocene fragmenten	0	14,17					
<i>Lunatia alderi</i>		0,18	0,01				
<i>Littorina littorea</i>	0	0,15	1,75	1,66	0,95	1,8	1,2
Pliocene Gastropoda	0	1,46					
Diversen	0,22						
<i>Terebratula</i> sp.	0	0,09					
Kalkkokerwormen	0	0,01					
Hout, veen grind, steen, haaietand, bot	6,1						
Gruis	16,29	32,08	7,17	4,85	2,07	6,46	0,77
Totaal:	105,27	94,55	100,01	100	100,011	100	100

Tabel 8. Soortensamenstelling schelpen op diverse locatie in de Waddenzee en in de Westerschelde volgens Weststeijn (1998) en Essink et al (1996).

Ook volgens een ander onderzoek in de Westerschelde (Westerhoff, 1997) bevatten de aanwezige schelpen in de geulafzettingen voor een belangrijk deel materiaal dat uit eerder afgezette laagpakketten is gevormd. Het aandeel schelpen van Holocene ouderdom is echter meestal dominant. In de Waddenzee zijn er geen oudere schelprijke formaties direct beschikbaar, waardoor de samenstelling van de schelpen nagenoeg volledig uit Holocene materiaal bestaat.

Ook voor de Waddenzee is een onderzoek gedaan (Essink et al, 1996) naar de samenstelling en verhouding in drooggewicht. Monsters zijn genomen op de Gronden van Stortemelk (zeegat van Terschelling), in de Noordoostmeep (NOM; geul onder Terschelling), in de Vliestroom VS3-VS5 (onder Vlieland), in de Noordoostmeep (NOM9) onder Terschelling en in de Vliesloot (VS22; Vlieland).

Vergelijkend komt men op het volgende resultaat voor de soortensamenstelling van schelpenbanken in de Waddenzee (zie tabel 9.). *Mytilus Edulis* is de grote afwezige in veel schelpenbanken, omdat deze schelp gemakkelijk oplost en desintegreert (Muller, 1983).

Soort	Essink et al, 1996	Krause, 1950	Geologische stichting, 1952	Reitsma, 1992
<i>Cerastoderma edule</i>	74	50	95	80
<i>Mytilus edulis</i>	9,5	4		
<i>Macoma baltica</i>	3,5	25		
<i>Spisula subtruncata</i>	4,5	10		
<i>Donax vittatus</i>	1,2	7,5		

Tabel 9. Vergelijking van verdeling van soorten in de Waddenzee.

Voor de zeegaten en de kustzone neemt over het algemeen het aandeel van de kokkel (*Cerastoderma edule*) t.o.v. de Waddenzee, af en het aandeel *Spisula subtruncata* en *Macoma baltica* toe.

Onderzoek van Schubert (1990) geeft duidelijke aanwijzingen dat de schelpen in de Duitse Waddengebied (Spiekeroog en omgeving) in samenhang met stormen uit NW-richting in het "backbarrier" gebied getransporteerd werden. In geulen die niet onder invloed staan van een noordwestelijke zeegang treed geen schelpaccumulatie op met sublitorale schelpen, terwijl in geulen die beïnvloed worden door een NW- zeegang er duidelijke aandeel van sublitorale-schelpen ten opzichte van het totaal aanwezig is.

Door het NITG-TNO (Kok, 1997) is een onderzoek uitgevoerd naar de voorkomens van schelpenbanken in de Noordzeekustzone rond de -20 m NAP dieptelijn. Binnen dit onderzoek is ook gekeken naar de samenstelling van de schelpen. De samenstelling in de Noordzeekustzone staat in tabel 10.

Soort	Percentage in %
Angulus fabulus	35.65
Donax vittatus	17.51
Spisula subtruncata	40.79
Angulus tenuis	1.37
Lunatia poliana	2.62
Ensis arcuatus	0.46
Ensis phaxoides	0.4
Spisula solida	0.17
Chamelea striatula	0.11
Dosinia exoleta	0.29
Ensis ensis	0.11
Spisula elliptica	0.11
Lunatia catena	0.06
Mya of truncata	0.29
Phaxas pellucidus	0.06

Tabel 10. Levende soorten in % die voorkomen in de 257 hapmonsters rondom de -20 meter dieptelijn (Kok, 1997).

2.5. Conclusies

Er is per locatie een duidelijk verschil aanwezig in de samenstelling van de schelpen in de schelpenbanken. De samenstelling van de schelpen gevonden in de schelpenbanken in de Noordzeekustzone verschillen van de schelpen in de banken in de Waddenzee. Naast aanmerkelijk meer gruis in de schelpenbanken in de Noordzeekustzone is de soortensamenstelling van de schelpen anders. In de schelpenbanken in de Waddenzee worden meer schelpen gevonden die typisch kunnen worden geacht voor het Waddenmilieu. Er is een directe relatie tussen de soortensamenstelling en de locatie van afzetting. De horizontale afstanden van de bron (het gebied waar de schelpen in levende positie worden gevonden.) naar afzetting is relatief gering t.o.v. totale waddengebied. In de Westerschelde worden relatief veel fossiele schelpen gevonden uit pre-Holocene afzettingen. Deze afzettingen worden vaak in de nabijheid van de gevonden schelpenbanken aangesneden. De kokkelsschelpen gevonden in de Noordzeekustzone zijn grotendeels fossielen of restanten van de periode dat de kust een aantal kilometers verder zeewaarts heeft gelegen en er ter plaatse een waddenmilieu heerste. Alleen rond (fossiele) zeegaten kan er ook enige transport van de Waddenzee naar de Noordzee hebben plaatsgevonden.

De ouderdommen van de kokkels die worden gevonden liggen gemiddeld (exclusief de verse schelpen) op ongeveer 3900 BP. Als deze hoge gemiddelde ouderdommen afgezet worden tegen de historische ontwikkeling van het Waddengebied, betekent dit dat er min of meer volledige menging plaats vindt van alle schelpen. De schelpen die gevonden worden op de geulbodem reflecteren dus de gehele Holocene historie. In het geval van de Spisula's is er een belangrijk verschil tussen de schelpen gevonden in het Marsdiep en in de overige monsterlocaties. Ten gevolge van de hoge stroomsnelheden in het Marsdiep is er enig transport van de kust naar het waddengebied plaatsgevonden in de 1000 jarige bestaan van het Marsdiep.

3. Fysische aspecten rond schelpenvoorkomens

3.1. Inleiding

De fysische aspecten rond schelpenvoorkomens komen in dit hoofdstuk aan bod in de volgorde vanaf de bron, waar de schelp leeft, naar de definitieve afzetting. De aanwas en de verliesposten worden nogmaals in aanvulling op de studies betreffende schelpenwinning uitgevoerd door Cramer (1998) en Van Dobben (2000) behandeld omdat er onduidelijkheid over de gebruikte cijfers heerst. Daarnaast worden er nog enkele additionele zaken rondom aanwas en verliesposten opgenoemd. De cijfers hebben voornamelijk betrekking op de aanwas van kokkels (*Cerastoderma edule*), met name omdat dit veruit de belangrijkste schelpensoort is die in de schelpenbanken voorkomt (ong. 75% van het totaal).

De transport- en accumulatieprocessen worden in het tweede deel behandeld. Met name enkele fysische en hydrodynamische principes rondom schelpentransport wordt hier behandeld. Deze aspecten zijn in de eerder studies van Van Dobben (2000) en Cramer (1998) onderbelicht gebleven.

3.2. Bruto/netto aanwas

De sinds 1990 uitgevoerde jaarlijkse inventarisatie van het kokkelbestand in de Oosterschelde en in de Waddenzee uitgevoerd door van het Rijksinstituut voor Visserijonderzoek in IJmuiden (RIVO) vormt de basis van cijfers voor de jaarlijkse aanwas van kokkelschelpen. Deze bestandsopname is echter niet uitgesplitst in vleesgewicht en drooggewicht. Restwater, restslib en -zand en ouderdom van de schelp kunnen het kalkgewicht derhalve beïnvloeden. Daarnaast geeft deze bestandsopname een beeld van de levende populatie schelpen. Voor het kokkelschelpkalkbestand is het sterftecijfer belangrijk. Hierbij moet de vraag gesteld worden of een 10-jaar lange meetreeks als voldoende representatief kan worden beschouwd voor het bepalen van een langjarig gemiddelde kokkelschelpkalk productie. Conclusie hierbij is dat deze cijfers met een grote foutenmarge gebruikt dienen te worden.

De cijfers zijn in de rapporten van Van Dobben (2000) en de notitie van Cramer (1998) beschreven. In het rapport van Van Dobben (2000) is echter onduidelijk hoe de cijfers precies zijn gebruikt, en welke berekening er aan ten grondslag ligt. Zo zijn in de cijfers van Beukema en Cadée (1997) de verliesposten reeds meegenomen. In het rapport van Van Dobben (2000) wordt niet duidelijk beschreven of deze verliesposten ook in de cijfers van het NIOZ en het RIVO zijn verwerkt.

In de meeste literatuur worden biomassa's en gewichten uitgedrukt in grammen asvrijdrooggewicht. Ter illustratie: een kokkel van 10 gram versgewicht met een vleespercentage van 15% heeft een asvrij drooggewicht van 0.4 gram. Het vleesgehalte van de kokkels is in september meestal maximaal en ligt rond 20%. In de maanden daarna dalen de vleesgewichten en kunnen, afhankelijk van de omstandigheden, laat in de winter teruglopen tot 10 a 12 % van het versgewicht (Van Stralen, 1990).

Essink heeft in 1993 een overzicht gemaakt van de kokkelschelpkalkproductie van de Waddenzee. Door Beukema is in 1982 een schatting gemaakt van de kokkelkalkproductie in de gehele Nederlandse Waddenzee, onder de aanname dat de gegevens die door hem op het Balgzand (50 km²) verkregen zijn, representatief geacht kunnen worden voor de hele

Nederlandse Waddenzee (toen: 1300 km² droogvallende platen). Zo wordt op basis van gegevens uit 1968-1982 de jaarlijkse productie geschat op 156.000 ton kokkelschelpkalk oftewel ca. 234.000 m³ kokkelschelpen. Buiten de droogvallende platen komen vooral in de Westelijke Waddenzee ook nog kokkelbestanden voor. Door Beukema (1993) zijn de eerder door hem gepubliceerde gegevens (Beukema, 1982) over de schelpkalkproductie van kokkels op het Balgzand geactualiseerd, ondermeer het oppervlakte van de droogvallende platen (1500 i.p.v. 1300 km²). De gemiddelde jaarlijkse productie van kokkelschelpkalk over 24 jaar blijkt ongeveer 15% lager te liggen dan de in 1982 gepubliceerde waarde van 234.000 m³. Het gewichtsaandeel kleine schelpen is 15%. Het volume aandeel van deze kleine schelpen moet wat lager worden geschat; ongeveer 10%.

Hieronder volgt een overzicht van de productiecijfers voor kokkels (Essink, 1993):

Productie Waddenzee (Beukema, 1982): 156.000 ton of 234.000 m ³ na aanp. 1993 (-15%):	200.000 m ³
Sublitoraal (Dekker, 1989) ongeveer 10%: 15.000 ton of 23.000 m ³ na aanp. 1993:	20.000 m ³
Totaal (schatting Beukema, Dekker na aanpassing in 1993):	220.000 m ³

Verliesposten:

begraven op de wadplaten (Cadée, 1976):	5%	
vergruizing door vogels (Cadée, 1993) :	15%	
1-jarige schelpen (niet econ. interess.) (Beukema, 1993)	10%	
Totaal verlies:	30%	=> <u>66.000 m³</u>
Netto productie =		<u>154.000 m³</u>

Essink (1993) noemt een onzekerheidsfactor met betrekking tot de schatting van de jaarlijkse kokkelschelpkalkproductie door Beukema. Dit betreft de vraag van de mate van representativiteit van het onderzochte gebied, het Balgzand, voor de gehele Waddenzee. De jaarlijkse aanwas wordt door Reitsma (1992) hoger geschat, namelijk op 426.000 m³. Deze berekening is uitgevoerd op basis van de biomassa cijfers van de gegevens van het Balgzand rapport van Beukema (1982), welke zijn geïnterpoleerd naar de gehele Waddenzee. Volgens Essink (1993) geven de biomassagegevens een verkeerd beeld omdat ze werken met vers-vleesgewicht i.p.v. schelpgewicht. Met versgewicht wordt het gewicht van de totale schelp na bemonsteren inclusief schelpkalk, vlees en restwater bedoelt. In het geval van de cijfers van het RIVO zijn de metrisch tonnen versgewicht die berekend en gegeven zijn voor het voorjaar en het najaar bij elkaar opgeteld en gedeeld door 2, en vervolgens m.b.v. onderstaande omrekeningsfactoren omgerekend naar schelpproductie in m³.

Hieronder volgen enige omrekeningscijfers.

- drooggewicht = 0.4 * versgewicht
- schelpproductie = 1.1. * schelpbestand (1.1 = Gewogen gemiddelde sterfte van de schelpen ouder dan 1 jaar. Jaarwaarden van instantane sterfte varieert van 0.2- 4.9 als factor van schelpbestand. De factor is met name afhankelijk van wintersterfte en predatie (Cadée en Beukema, 1997)). Schelpbestand is het totaal aan levende schelpdieren op een bepaald moment.
- 1 ton schelpen = 1.5 m³ schelpen, dus 667 kg schelpen.
- 1 g asvrijdrooggewicht biomassa = 25 g versgewicht schelp.
- Soortelijk gewicht is 2.8 g/cm³ of 2.8 ton/m³
- Porositeit schelpen is ongeveer 76 % (100-porositeit)*2.8 = 667 kg
- Versgewicht is schelp+vlees+vocht+ev. ingesloten zand

- Volgens het RIVO is 45% van het versgewicht kokkelschelpkalk. Beukema en Cadée (1997) houden na eigen analyse het schelpgewicht op 50% van het versgewicht (gemiddeld tussen 47 en 54%). Kokkelschelp bevat in augustus 42% vlees en 33% in maart.

Essink (1993) gaat uit van een netto jaarlijkse aanwas 154.000 m^3 of 103.000 ton per jaar (zie boven). Uit berekeningen van de jaarlijkse aanwas van kokkelschelpen uit Van Dobben (2000) worden de volgende cijfers gegeven NIOZ: $126 \cdot 10^3 \text{ ton}$, RIVO: $176 \cdot 10^3 \text{ ton}$ en Beukema en Cadée: $88 \cdot 10^3 \text{ ton}$. Deze cijfers kunnen echter niet met elkaar worden vergeleken omdat in het geval van de gegevens van het RIVO er geen verliesposten zijn meegerekend en bij Beukema en Cadée wel. De NIOZ-cijfers welke door Van Dobben worden gehanteerd zijn waarschijnlijk de bruto-cijfers van Beukema en Cadée! De cijfers van het RIVO zijn gebaseerd op een langjarig gemiddelde. Herberekening van de cijfers van het RIVO laten een iets ander beeld zien. In het rapport van het RIVO (van Stralen en Kesteloo-Hendrikse, 1998), worden de jaarlijkse cijfers aangegeven in miljoenen kg nat vlees gewicht, dit is, na overleg met de auteur van het RIVO-rapport, teruggerekend naar versgewicht door aan te nemen dat 15 % van het versgewicht uit nat vlees bestaat. Na berekening geeft dit het onderstaand resultaat (zie tabel 11.). Dit geeft aan dat de jaarlijkse aanwas nogal kan fluctueren. Het langjarig gemiddelde bruto productie van kokkels van 1971 t/m 2000 is 188.738 ton of 283.107 m^3 . Dit is nagenoeg dezelfde hoeveelheid als Van Dobben (2000) aangeeft. De berekende gegevens betreffende het nat vleesgewicht uit het rapport van het RIVO (van Stralen en Kesteloo-Hendrikse, 1998) over de jaren 1990-1997 wijken echter af van de hoeveelheden in de jaarlijkse rapportage zoals in tabel 12. In de tekst van de rapporten wordt niet duidelijk beschreven op welke wijze de getallen zijn berekend. Uitgaande van een verlies post van 30 % (zie boven) levert dit een netto productie op van 198.175 m^3 . Op grond van een meetserie van 28 jaar op het Balgzand, uitgevoerd door het NIOZ, is de gemiddelde jaarlijkse productie van grote kokkelschelpen geschat, welke geëxtrapoleerd is naar 1500 km^2 van de Waddenzee. Beukema komen op een gemiddeld hoeveelheid geproduceerde grote kokkelschelpen (groter dan 1,5 cm) op het Balgzand van 107 gram per m^2 , met een fout van $\pm 33 \text{ gram per m}^2$ (95% betrouwbaarheidsinterval). Uit vergelijking met cijfers van het RIVO is wordt door Beukema en Cadée (1997) een gecorrigeerde schatting voor de totale hoeveelheid in de Waddenzee gegeven van 84 gram per m^2 , met een fout van $\pm 26 \text{ gram per m}^2$. Dit geeft een bruto aanwas voor de gehele Waddenzee van 126.000 ton of 189.000 m^3 . Reeds rekening houdend met een verlies van 30% (door vraat, vergruizing en begraving) komen Beukema en Cadée (1997) op een netto schatting van 132.000 m^3 aan grote kokkelschelpen, omgerekend naar ton is dat ongeveer 88.000 ton . Het is onduidelijk in hoeverre het sublitoraal kokkelbestand in de cijfers van Beukema en Cadée (1997) is meegenomen. Door Essink (1993) wordt dit geschat op 10% van het totaal, waardoor de netto schatting op 145.000 m^3 of 97.000 ton komt.

Schattingen netto kokkelschelpkalkproductie (dus met verliesposten van 30% en het sublitoraal deel (10%) in het geval van cijfers van Beukema en Cadée (1997)):

Beukema en Cadée, 1998 (Balgzandcijfers):	145.000 m^3 of 97.000 ton
RIVO 2000 langjarig gemiddelde:	198.000 m^3 of 132.000 ton

In tabel 12 worden de productiecijfers van kokkels in de laatste 11 jaar getoond. Opvallend is de sterke daling van de productie na de strenge winter van 1995-1996. Rekening houdend met 30% verliezen (begraven, vergruizen en jonge schelpen) is de netto productie van kokkelschelpkalk op basis van de RIVO-cijfers over de laatste 11 jaar (1990 t/m 2000) ongeveer 155.700 m^3 per jaar.

jaar	milj kg vlees	versgewicht (15% van verse schelp is vlees) in tonnen	Schelpproductie in tonnen = 1.1 * drooggewicht (=0.4 * versgewicht)	m ³
1971	32	213333	93867	140800
1972	28	186667	82133	123200
1973	50	333333	146667	220000
1974	90	600000	264000	396000
1975	10	66667	29333	44000
1976	120	800000	352000	528000
1977	130	866667	381333	572000
1978	94	626667	275733	413600
1979	10	66667	29333	44000
1980	220	1466667	645333	968000
1981	210	1400000	616000	924000
1982	114	760000	334400	501600
1983	72	480000	211200	316800
1984	34	226667	99733	149600
1985	15	100000	44000	66000
1986	10	66667	29333	44000
1987	12	80000	35200	52800
1988	175	1166667	513333	770000
1989	115	766667	337333	506000
1990	26	173333	76267	114400
1991	4,5	30000	13200	19800
1992	40,9	272667	119973	179960
1993	53,9	359333	158107	237160
1994	24,7	164667	72453	108680
1995	34,1	227333	100027	150040
1996	3,8	25333	11147	16720
1997	13,6	90667	39893	59840

Tabel 11. Productie cijfers kokkels (*Cerastoderma edule*) RIVO (1998).

Jaar	Gemiddeld schelpproductie in ton (vers*.4*1.1)	Gemiddeld schelpproductie in m ³ (ton*1,5)
1990	55400	83100
1991	11400	17100
1992	80400	120500
1993	107600	161400
1994	72500	108700
1995	100000	150000
1996	3600	5500
1997	101000	151500
1998	283700	425600
1999	182900	274400
2000	143400	215000
Gemiddelde per jaar	103800	155700

Tabel 12. Productiecijfers Kokkels laatste 10 jaar RIVO (jaarlijkse rapporten RIVO).

Beide cijfers bevatten onnauwkeurigheden. De cijfers van het RIVO zijn berekend a.d.h. van vleesgewichten. Daarnaast gaat het bij de RIVO-cijfers om levende bestanden, het is de vraag of de meetreeks voldoende lang is geweest om dit te vertalen naar jaarlijkse sterfte. Als derde is er nog het verschil in de gegevens over de laatste 10 jaar. Dit maakt de berekening van het bruto productie aan schelpkalk onnauwkeurig. De kokkelschelpkalkproductie zoals berekend door Beukema en Cadée (1997) geeft de meest betrouwbare resultaat. Het schelpkalkgewicht is direct gemeten. Het is echter onduidelijk in welke mate de sublitorale schelpkalkproductie in deze cijfers is meegenomen, daarnaast moet de vraag worden gesteld in hoeverre het balgzandgebied representatief mag worden geacht voor de gehele Waddenzee. Beukema en Cadée (1997) geven dit in het onderzoek, op basis van de RIVO cijfers aan en passen een correctie op de berekening toe. Buiten de kokkelschelpkalkproductie moet nog een percentage voor kalk afkomstig van de overige schelpen bij opgeteld worden. De bekende schelpen-voorkomens bestaan voor ongeveer 75% uit kokkels en voor 25% uit overige soorten. Voor de totale schelpkalkproductie moet er derhalve 30% bij opgeteld worden, uitgaande van de aanname dat de verhouding kokkelschelpen-overige schelpen in het verleden ongeveer hetzelfde is dan heden. Dit geeft een totaal schelpkalk productie van **126.000 ton of 188.500 m³**, waarbij de fout op ongeveer $\pm 30\%$ ligt.

3.3. Verliesposten

De verliesposten zijn reeds in het vorige hoofdstuk gebruikt voor de berekening bruto productie naar netto jaarlijkse productie. Een bepaald percentage van de jaarlijkse bruto productie komt niet beschikbaar voor de schelpenwinning. Deze verliesposten zijn:

- A. Jonge schelpen: ong. 5% is te klein en niet geschikt voor schelpenwinning (Essink, 1996).
- B. Kokkelvisserij: 50% wordt gekookt waarbij de schelp wordt teruggezet. Ongeveer 5% van de totale jaarlijkse productie verdwijnt uit het waddensysteem (Beukema en Cadée, 1997).
- C. Enkele soorten vogels (scholeksters en meeuwen) vervoeren ook wat schelpen naar het land (o.a. als soort van huwelijksgeschenk voor hun partners). Het betreft vooral grote schelpen. De hoeveelheden zijn niet bekend, maar verwaarloosbaar in vergelijking met de kokkelvisserij (Beukema en Cadée, 1997).
- D. Vergruizing door vissen; marginaal en betreft alleen kleine schelpen
- E. Vergruizing door golfslag of stroming; ook marginaal, in Waddenzee van weinig belang: ongeveer 3% (Beukema en Cadée, 1997).
- F. Fragmentering door vogels: ongeveer 17% van de jaarlijkse productie. Kokkels worden vooral door Eidereenden en Scholeksters vergruisd en in minder mate door Zilvermeeuwen (Beukema en Cadée, 1997)
- G. Begraving op Kwelders en andere gebieden buiten bereik van het geulensysteem. geschat op 5 %. (Essink, 1996).
- H. Aantasting en oplossen door o.a. booralgen: marginaal.
- I. Chemisch oplossen: zie § 3.3.1.

In totaal wordt er volgens Beukema en Cadée (1997) rekening gehouden met een verliespost van 30%. In de productieberekeningen van Beukema en Cadée worden alleen de oudere, grotere schelpen (vanaf het begin van het tweede groeiseizoen, als de schelpen 1 a 2 cm groot zijn) meegenomen. De verliespost (verliespost A) aan jonge schelpen (5%), zoals genoemd door Essink (1993), is dus door Beukema en Cadée reeds verwerkt in de bruto-cijfers. Essink (1993) hanteert ook een verliespost van 30% voor de bruto-productie gegevens uit Beukema (1993 en 1982). De 30% verlies die Essink (1993) gebruikt is opgebouwd uit 15% fragmentering door vogels (Beukema en Cadée (1997) hanteren 17%), 5% begraving, en 10%

jonge kleine schelpen. Beukema en Cadée (1997) komen ook op een verliespost van 30%, maar deze is opgebouwd uit: 5% kokkelvisserij, 17% fragmentering door vogels, 3% fysieke vergruizing en 5% permanente begraving. Mechanische verwerking vindt plaats door biologische vergruizing/breken en door breken door transport a.g.v. schuren, botsen etc. (Muller, 1983). Massale vergruizing vindt alleen plaats onder een intensieve zeegang in de brandingszone dus niet in de meer diepere gedeelten. In het algemeen kan gesteld worden dat getijdenstromingen in regel op de bodem van de geulen niet dermate hoog en stootsgewijs kunnen zijn dat het mogelijk is om schelpen te vergruizen.

Stormen zijn belangrijke "events" voor afzetting van sediment op de kwelders (Dijkema, pers. comm.). Als gevolg van stormen kunnen in korte tijd relatief dikke sediment-lagen worden afgezet. Het materiaal kan fijn slib zijn, maar er zijn ook voorbeelden van afzetting van zand in de greppels en op de kwelder. Als de tijdens stormen getransporteerde schelpen niet in de prielen worden vastgehouden, worden ze getransporteerd tot in de kwelders, waar ze ook lagen kunnen vormen. Ze kunnen ook op de hogere delen van de kwelder worden afgezet, waarna ze worden overgroeid door de kweldervegetatie en vastgelegd, en opvallende witte lagen vormen (Reineck, 1982). Grote hoeveelheden schelpen worden voornamelijk gevonden langs de kwelderrand. In zo'n geval is het percentage gebroken schelpen/ gruis erg hoog (van Straaten, 1952). Van lage naar hoge kwelder nemen de hoeveelheid en grootte van de schelpen af. Op de hogere delen van de kwelder komt waarschijnlijk alleen in enkele gevallen een schelpenlaagje voor. In het algemeen zijn de schelpenlagen relatief dun (hooguit enkele cm's) en markeren ze een stormperiode. In veel bodemprofielen op de kwelder komen schelpenlaagjes voor.

3.3.1. Chemische verwerking/oplossing

In kwelder bodems zijn schelpen sterk onderhevig aan oplossing. Dikke oesterafzettingen in kwelders in Georgia (USA) lieten zien dat hoe hoger de schelpafzetting boven het hoogwater niveau ligt hoe langduriger terrestrische verweringsprocessen kunnen inwerken, om het kalk skelet op te lossen (Wiedemann, 1971). Door een lagere zuurgraad, invloed van regenwater, biochemische verwerking door algen en blootstelling aan lucht kunnen schelpen oplossen. Op enige diepte in kwelderafzettingen worden zelden schelpen gevonden.

Experimenteel is onderzocht dat schelpen onder normale omstandigheden in normaal zeewater een aanzienlijk deel van het schelpgewicht door oplossing kunnen verliezen (Muller, 1983).

<i>Cardium edule</i> :	10,61 % gewichtsvermindering in 10 maanden
<i>Mytilus edulis</i> :	3,34 % gewichtsvermindering in 10 maanden

Hierbij is de oplossingsgevoeligheid niet afhankelijk van het gewicht van de schelp maar meer van de dikte en de grootte van de schelp. Een grote dunne schelp kan sneller oplossen dan een dikke kleine. Totale oplossing van schelpen is uiteraard sterk afhankelijk van de omstandigheden. Hierbij speelt de dichtheid en porositeit een belangrijke rol. Afhankelijk van deze 2 factoren kan, wat proefondervindelijk is vastgesteld, een *Cerastoderma Edule* in 2,5 tot 95 jaar volledig oplossen, onder invloed van gedestilleerd water en regelmatig schudden. Volledige oplossing is vrij moeilijk omdat een deel van de schelp uit chitine bestaat (de Glopper, pers. com.). Deze verliespost is vooralsnog niet in te schatten.

3.4. Transport en afzetting van schelpen

3.4.1. Inleiding

In dit onderdeel zal eerst een aantal fysische parameters, welke met name betrekking hebben op de specifieke hydrodynamische eigenschappen van schelpen worden behandeld. De accumulatieprocessen en vorming van schelpenbanken als lithologische eenheid in de vorm van geulbodem (channel-lag) afzettingen wordt als laatste behandeld.

3.4.2. Fysische parameters.

Voor het karakteriseren van stroming zijn het Reynoldsgetal en het Froudegetal de meest belangrijke beschrijvende parameters. De meest beschrijvende parameters om het transportproces van schelpen te karakteriseren is de valsnelheid en de hieraan gerelateerde vormfactor.

3.4.2.1. Reynoldsgetal.

Een karakteriserende grootte voor de aard van de stroming is het Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal geeft de overgang aan van laminaire naar turbulente stroming.

$$Re = (u.R)/\nu$$

waarin:

Re = Reynoldsgetal

u = gemiddelde stroomsnelheid in cm/s

R = diameter van doorstroomprofiel in cm

ν = kinematische viscositeit van het water cm^2/s

Tussen de turbulente en laminaire stroming is een overgangszone aanwezig welke bepaald wordt door de ruwheid van de wanden. Deze transitiezone ligt tussen $Re = 500$ en $Re = 2000$. In het geval van een vlakke harde bodem (waterdiepte van 25 cm) met verschillende stroomsnelheden tussen 5 en 80 cm/s ligt het Reynoldsgetal tussen de 6648 en 106368 (Futterer, 1977). Bij een ruwe bodem (zandbed) met een waterdiepte van 20 cm, ligt het Reynoldsgetal tussen de 5866 tot 87983 bij stroomsnelheden tussen de 5 en 75 cm/s. In het experiment van Futterer (1977) overheerst de turbulente stromingscondities. In de natuur zullen ook turbulente stromingsconditie overheersen, omdat de hydraulische straal over het algemeen zeer groot is en derhalve ook Re proportioneel zeer groot.

3.4.2.2. Froude getal.

Het tweede getal welke de stroming karakteriseert is het Froude-getal, die de overgang van stromend naar schietend water (stroomsnelheid groter dan voortplantingssnelheid) aangeeft:

$$Fr = u/\sqrt{(g.h)}$$

waarin:

Fr = Froudegetal

u = gemiddelde stromingssnelheid in cm/s

g = zwaartekrachtversnelling (cm/s^2)

h = waterdiepte (cm)

Bij $Fr < 1$ heerst stromend water (Lower Flow regime) bij $Fr > 1$ overheerst schietend water (Upper Flow regime). In het onderzoek van Futterer (1977) zijn de volgende Froude getallen berekend. In het geval van een gladde bodem met een waterdiepte van 25 cm en een stroomsnelheid tussen 5 en 80 cm/s is een Froude-getal berekend tussen 0.036 en 0.57. Bij een bodem bestaande uit zand, een waterdiepte van 20 cm en een stroomsnelheid tussen 5 en 75 cm/s geeft een Froude-getal tussen 0.032 en 0.48.

3.4.2.3. Bodemschuifspanning.

Het begin van transport is grotendeels afhankelijk van de verhouding tussen bodemschuifspanning en kritische transportsnelheid.

Volgens Futterer (1977) is de kritische bodemschuifspanning (τ_0) de meest geschikte parameter voor transport van schelpen. In laboratoriumproeven laat τ_0 zich exact uit de stroomsnelheden berekenen.

In alle formules die gebruikt worden voor transport van sediment, wordt de bodemschuifspanning gebruikt. De bodemschuifspanning bezit in de sedimenttransport een soort van sleutelfunctie omdat in deze parameter alle krachten die voor turbulentie verantwoordelijk zijn, zijn behandeld. Zij wordt direct beïnvloed door cohesiekrachten, adhesiekrachten en grenslaageffecten. In Van Rijn (1995) wordt in het geval van het gecombineerd effect van bodemschuifspanning t.g.v. golven en stroming het belang hiervan op de sedimenttransport beschreven. Bij het initiëren van transport is de maximum bodemschuifspanning van belang. In de verschillende modellen voor het berekenen van bodemschuifspanning, die in gebruik zijn, zitten variaties die op kunnen lopen tot 30 %. Er is een relatie tussen de kritische bodemschuifspanning en de valsnelheid van afzonderlijke sedimentdeeltjes (Flemming, pers. com.). Daarnaast is de temperatuur van grote invloed op de viscositeit en dientengevolge op de kritische transportsnelheid en mobiliteit van de schelpen (Krogel and Flemming, 1998). In de winterperiode is de mobiliteit van sediment, inclusief schelpen hoger dan in de zomerperiode. Oorzaken voor verhoogde mobiliteit zijn:

- De betere beschikbaarheid van schelpen doordat koude levende schelpen minder actief zijn en bij blootlegging minder snel weer terugkruipen onder de oppervlak en gemakkelijker uitgespoeld raken. De temperatuur in het Waddengebied fluctueert jaarlijks ongeveer 20 graden. In een artikel van Krogel en Flemming (1998) wordt dit verder uitgediept en er is een formule ontwikkeld.
- Verhoogde stormactiviteit in de winterperiode
- Lagere temperatuur en invloed hiervan op de viscositeit van het water en de verandering hierdoor op de bodemschuifspanning.

De bodemschuifspanning kan op de volgende manier worden weergegeven (Futterer, 1977):

$$\tau_0 = \rho_1(u_{y2} - u_{y1}) / [5.75 \log(y_2/y_1)]^2$$

Waarin:

τ_0 = bodemschuifspanning in N/m^2

ρ_1 = dichtheid van water in g/cm^3

u_{y1}, u_{y2} = stroomsnelheid op verschillende loodrechte afstanden van de bodem in cm/s

y_1, y_2 = loodrechte afstanden van de bodem in cm

Bij het berekenen van de bodemschuifspanning t.g.v. stroming en golven in de Waddenzee t.b.v. het onderzoek naar kansrijke gebieden voor schelpenwinning (De Vries, 2000), komt duidelijk naar voren dat er binnen het waddengebied een minimum aanwezig is in de getijdegeulen. Op de droogvallende platen en de ondiepe prielen heerst door de aanwezigheid van golfenergie, welke de ondiepe bodem makkelijk kan bereiken, in combinatie met stroming een hoge bodemschuifspanning. In de zeegaten tussen de eilanden heerst, tengevolge van de hoge getijdenstromingen ook een hoge bodemschuifspanning. In de overige getijdegeulen, bijvoorbeeld de diepere geulen onder de eilanden, heeft ten gevolge van afnemende golfenergie met de diepte en een matige stroomsnelheid, een lagere bodemschuifspanning. Hoewel schelptransport van “backbarrier” getijdegeulen naar de shoreface gedurende krachtige ebstromingen niet helemaal kan worden uitgesloten, lijkt het onwaarschijnlijk dat dit proces een belangrijke rol speelt in recente schelpverspreidingspatronen in de kustzone (Tieze et al., 1991).

3.4.2.4. Specifieke vorm van schelpen en invloed hiervan op valsnelheid en transport.

De verschillende schelpen hebben allen een verschillende weerstand tegen chemische, mechanische en biologische verwerking, afhankelijk van de dikte, vorm, zweefbaarheid, chemische samenstelling en soortelijk gewicht. Tauber (1942) heeft een 4-tal schelpen nader onderzocht en is tot de conclusie gekomen dat vooral *Mytilus edule* en *Macoma baltica* een relatief hoge zweefvaardigheid hebben (oppervlakte/ (4* gemiddelde gewicht)) en gemakkelijker getransporteerd kunnen worden dan *Cardium* (*Cerastoderma*) *edule* en *Mya arenaria*. Voor de “settling velocity” (valsnelheid) geldt de volgende formule:

$$u_{val} = k \cdot \sqrt{(G_A/F)} \cdot \rho_1$$

waarin:

u_{val} = valsnelheid in cm/s

k = vorm-afhankelijk waarde (is helling van regressie coëfficiënt uit grafiek tussen $\sqrt{G_A/F}$ en valsnelheid)

ρ_1 = dichtheid van het water g/cm³

G_A = Gewicht van een deeltje onder water in kg

F = Stroomwerkzame oppervlakte van een deeltje, in cm²

Kegelvormige slakkenhuizen draaien tijdens het vallen in spiraalbanen. Kleppen van mollusken vallen allemaal met de bolle (convexe) kant naar beneden. De valsnelheid van de schelpen is van belang voor de transportmogelijkheden van de schelp. In het geval van een hoge valsnelheid zal de schelp minder getransporteerd worden. Futterer (1977,1978) en Mehta et al (1980) hebben onderzoek gedaan naar valsnelheden van schelpen. De vorm van de schelp en de dichtheid/gewicht van de schelp zijn hierbij van belang. Er is een sterke correlatie aanwezig tussen de valsnelheid en de effectieve dichtheid alsmede met de vorm van de schelp (Futterer, 1977,1978). De valsnelheid kan worden afgeleid uit de sleepweerstand (drag-coëfficiënt), Reynolds-getal en een vormfactor. Waarbij de vormfactor de belangrijkste beschrijvende factor is voor het classificeren van schelpen met betrekking tot de valsnelheid (zie figuur 6.). De drag-coëfficiënt neemt toe bij een kleiner wordende vormfactor of afnemende sphericiteit. Mehta et al (1980) heeft de vormfactor als volgt gedefinieerd:

$$\beta = SF \cdot d_s/d_n$$

Waarin:

SF is de Corey shape factor (vormfactor) $SF = c/\sqrt{ab}$

Hieruit volgt:

$$\beta = c/\sqrt{ab} \, d_s/d_n$$

Waarin:

- c = kleinste dimensie
- a = grootste dimensie
- b = middelste dimensie
- d_s = diameter van een bol met dezelfde oppervlakte als het betreffende deeltje
- d_n = diameter van een bol met dezelfde volume als het betreffende deeltje

De vorm- of shape-factor is een belangrijke parameter voor het bepalen van de valsnelheid. In figuur 6 wordt de relatie tussen de valsnelheid en de vormfactor voor een aantal schelpen weergegeven. De vormfactor voor *Cerastoderma edule* is ong. 0.26, *Macoma baltica* ong. 0.22 en *Hydrobia ulvae* ong. 0.53. Ter vergelijking, zand heeft een gemiddelde vormfactor van 0.7 (Schubert, 1990).

Bij transport en afzetting van schelpen speelt valsnelheid in de volgende gevallen een belangrijke rol:

1. Met behulp van de valsnelheid is het mogelijk de equivalente doorsnede te berekenen, wat de doorsnede van een kwartskorrel is met dezelfde valsnelheid als het schelpdeeltje, wat wellicht een indicatie geeft met welke sedimentkorrelgrootte schelpen tezamen afgezet kunnen worden.
2. Reeds afgezette schelpdeeltjes raken bij hogere stroomsnelheden in zwevend transport en worden weer afgezet bij afnemende stroomsnelheid
3. De valsnelheid is sterk evenredig met de kritische transportsnelheid, geschikte parameters zijn o.a. vormfactor, nominaal doorsnee en de dichtheid van de schelpdeeltjes.

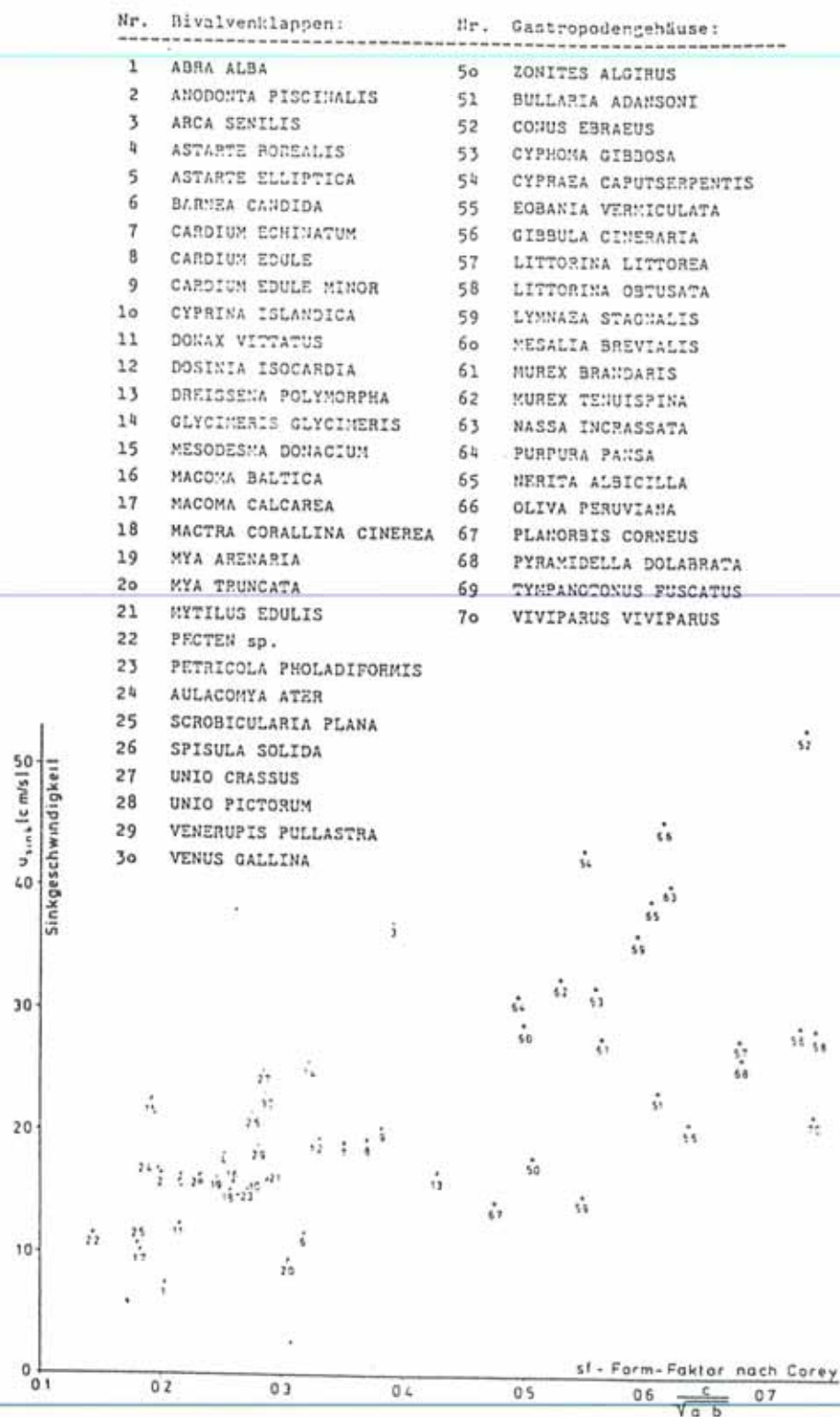
De valsnelheid is ondermeer afhankelijk van de aanwezige weerstandkrachten en zwaartekrachten volgens onderstaande formule (Schubert, 1990):

$$u_{val}^2 = 2(\rho_2 - \rho_1) * g * V / C * \rho_1 * F$$

Waarin:

- C = weerstandsfactor
- F = valweerstandsoppervlakte cm^2
- ρ_1 = dichtheid van het water g/cm^3
- ρ_2 = dichtheid van het deeltjes g/cm^3
- g = zwaartekrachtversnelling cm/s^2
- V = volume van het deeltje cm^3

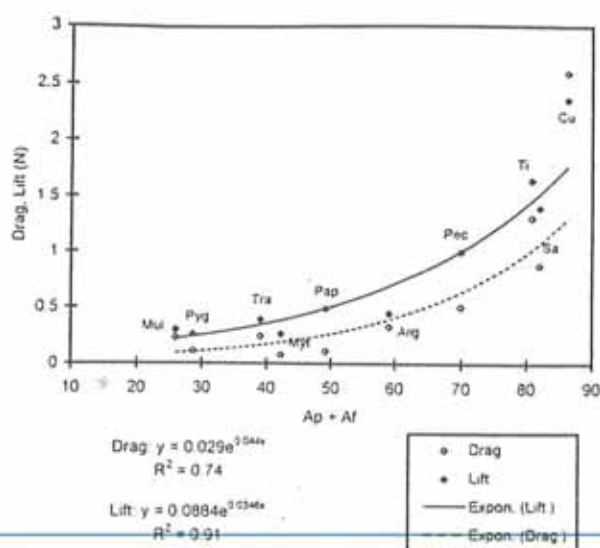
Uit deze formules kunnen de valsnelheden worden berekend.



Figuur 6. Relatie tussen de valsnelheid (u_{val}) en de vormfactor (SF) voor een groot aantal schelpen (Futterer, 1977).

De valsnelheden liggen (afhankelijk van de grootte) tussen 6.6-10.1 cm/s bij *Abra alba* en 27.8-44.4 cm/s bij *Arcasenilis*, voor *Cerastoderma* ligt dit tussen 12 en 24 cm/s, *Mytilus edulis* 11-18 cm/s. Op basis van de valsnelheid kan vervolgens de equivalent korrelgrootte worden berekend. Daaruit blijkt dat de equivalente korrelgrootte varieert tussen 0.51-3.2 mm of (500-3200 μm .) voor schelpen (zie ook tabel 13) (Futterer, 1978, 1977). Voor gastropoden ligt dit ongeveer tussen 950 en 5500 μm . Alleen bij sedimentatie vanuit zwevend transport geeft de equivalente korrelgrootte die kwartskorrelgrootte aan welke tezamen met de schelpendeeltjes kan sedimenteren. Bij rollende en salterende transport is de nominaaldoorsnede de belangrijkste parameter.

In experimentele studies op verschillende schelpen blijkt dat de schelpen op een systematische en voorspellende wijze reageren op hydrodynamische processen. Door middel van verhoudingsgetallen tussen het geprojecteerde frontale en bovenaanzicht en op basis van krachtverdeling kunnen transportsnelheden worden berekend (Olivera and Wood, 1997). Verhoudingen tussen vormparameters en krachten laten zien dat schelp-response consistent is met bestaande hydrodynamische principes. Er kunnen derhalve methodes worden ontwikkeld om schelptransport te interpreteren (Olivera and Wood, 1997). Schelpen met een grote geprojecteerde frontale- en bovenoppervlakte genereren grote opwaartse en drukkrachten waardoor deze schelpen gemakkelijker kunnen worden getransporteerd (zie figuur 7.) (Olivera and Wood, 1997). Schelpen met een ruwe oppervlak (ribbel) zijn stabiel, door het reduceren van de drag-krachten. Langgerechte schelpen zijn gemakkelijker te transporteren dan ronde of rechthoekige schelpen. Convexe (bolvormige) schelpen laten een groter lift-to-drag ratio zien, waardoor deze meer rollend en/of salterend worden getransporteerd, terwijl platte schelpen meer schuivend worden getransporteerd. Wellicht heeft dit een sorterend effect op de schelpen. Het lijkt erop dat kokkels relatieve lage opwaartse en drukkrachten produceren met als gevolg dat ze relatief moeilijk te transporteren zijn (Olivera and Wood, 1997).



Figuur 7. Relatie tussen de op de schelp werkende krachten en de geprojecteerde oppervlakte van de bovenkant en de frontale oppervlakte bij een stroomsnelheid van 0.625 m/s, voor verschillende soorten schelpen (Olivera and Wood, 1997).

3.4.2.5. Stroming en golven.

De volgende stroomsnelheden zijn nodig om bodemmateriaal in beweging te brengen (Krause, 1950):

0,25- 0,30 m/s	Fijner zand en kleinste schelpen
0,40	Grover zand en kleinere schelpen
0,60-0,65	Grootste schelpen

Volwassen kokkels worden bij ongeveer 0,45 m/s getransporteerd (Krause, 1950). In het rapport van Krause (1950) worden in de wadprielen stroomsnelheden tussen 0,8 en 1,5 m/s gemeten, in vrije zee tot 1,2 m/s en in het zeegat tussen Nordeney en Juist ongeveer 1,8-2,0 m/s. Deze waarden gelden echter alleen aan het oppervlak. De hoogste concentraties aan schelpen in het kustgebied worden niet gevonden in de nabijheid van een zeegat maar verder daarvan verwijderd en wel in oostelijke richting, zowel aan de kustzijde van de eilanden als aan de landzijde van de eilanden. In de studie van Krause (1950) wordt geconcludeerd dat het materiaal voornamelijk jong is. Waddenschelpen zijn in het algemeen gruis-arm en grofkorreliger dan schelpenbanken in de Noordzee en dicht naar de Noordzeekustzone.

Golven en stroming laten duidelijk verschillende oriëntatie patronen in schelpen zien. Stroom georiënteerde schelpen liggen vaak met hun lengteas in de richting van de stroom of juist van de stroom af. Golf georiënteerde schelpen liggen daarentegen vaak met hun lengteas parallel aan de golfkam (Nagle, 1967).

Futterer (1977) heeft voor een groot aantal schelpensoorten diverse parameters bepaald. In tabel 13 zijn een aantal parameters van enkele voor schelpenwinning belangrijke schelpensoorten weergegeven. In tabel 14 worden de kritische stroomsnelheden voor een aantal schelpen getoond.

Soort schelp	Gewicht in gram	Lengt in cm.	Breedte in cm	Hoogte in cm.	Vorm factor (Corey, SF)	Dicht heid in lucht g/cm ³	Dicht heid in water g/cm ³	Val-snel-heid in cm/s	Equi-valente korrel-grootte in mm
Cerastoderma edule	0.17-1.02	1.5-2.38	1.3-2.18	0.47-0.86	0.370	2.8	0.437	13.8-23.7	0.8-1.7
Donax vittatus	0.2-0.78	2.2-3.55	1.2-1.8	0.33-0.55	0.215	2.8	0.341	9.7-15.3	0.67-1.03
Macoma baltica	0.14-0.79	1.6-2.3	1.3-1.9	0.33-0.63	0.26	2.8	0.371	12.8-20.4	0.85-1.45
Mya arenaria	1.48-19.5	4.3-9.7	2.6-5.6	0.75-1.7	0.247	2.8	0.213	13.2-23.9	0.88-1.7
Mytilus edulis	1.04-3.67	3.3-5.8	1.8-2.4	0.8-1.0	0.288	2.8	0.339	13.9-19.2	0.93-1.28
Spisula solida	0.37-4.88	2.2-3.7	1.6-2.85	0.55-0.9	0.276	2.8	0.468	14.9-28.6	0.99-2.05

Tabel 13. Enige eigenschappen van de belangrijkste schelpen (Futterer, 1977)

Soort schelp	Stroomsnelheid bij initieel transport (schelp ligt met bolle kant naar boven) in cm/s	Stroomsnelheid bij initieel transport (schelp ligt met bolle kant naar beneden) in cm/s
<i>Cerastoderma edule</i>	35-55 cm/s	vanaf 14 cm/s (edule minor)
<i>Donax vittatus</i>	Geen waarnemingen	
<i>Macoma baltica</i>	29-38 cm/s	vanaf 12 cm/s
<i>Mya arenaria</i>	Geen waarnemingen	
<i>Mytilus edulis</i>	vanaf 51 cm/s	vanaf 16 cm/s
<i>Spisula solida</i>	44-53	16-24

Tabel 14. Stroomsnelheden bij initieel transport (bij welke stroomsnelheid begint transport van schelpen); Stroomsnelheid in m/s gemeten 1 cm boven bodem (Futterer, 1977):

Getijdenstromingen op de bovenste "shoreface" zijn aanmerkelijk lager dan stroomsnelheden gevonden in de getijdengeulen in het waddengebied. In de Noordzeekustzone kan het schelpmateriaal enkel worden getransporteerd door de werking van golven. Er zijn geen voorbeelden beschikbaar van schelpenaccumulaties van dezelfde schaalgrootte als die in de getijdengeulen voorkomen. Op basis hiervan kan verondersteld worden dat hoewel golven schelpen kunnen transporteren, het geen redelijke mechanisme is voor het vormen van grote schelpafzettingen in dit gebied (Tieze et al., 1991).

Flemming (1992) heeft onderscheid gemaakt in een stroom-dominante getijdegeulen en golfdominante getijde geulen. Opvallend is dat alle monsters in de stroomdominante geulen waarin aanmerkelijke hoeveelheden schelpen voorkomen een bimodale korrelgrootteverdeling hebben. Ze hebben een specifieke korrelgrootteverdeling voor het schelp-aandeel en een specifieke korrelgrootte verdeling van het kwartsdeel, terwijl de individuele componenten redelijk unimodaal zijn verdeeld. Ongeveer de helft van het aanwezige schelpmateriaal in de stroom-gedomineerde getijdengeulen bestaat uit gastropoden (*Hydrobia Ulvae* en *Littorina Littorea*), de andere helft uit tweekleppigen voor het overgrote deel afkomstig van de droogvallende platen.

3.4.2.6. Bodemvormen.

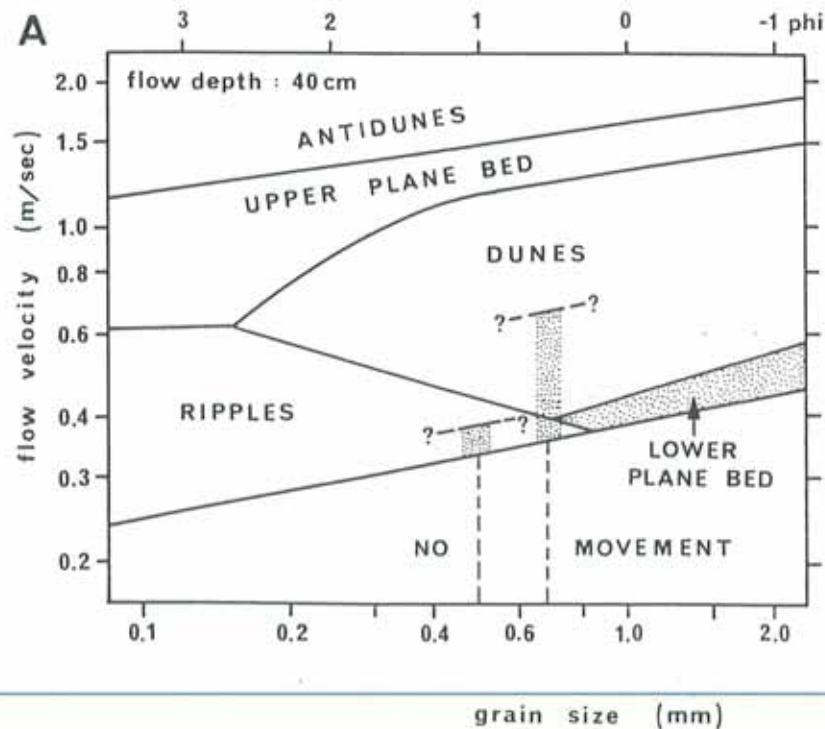
De grote afvoer en sterke getijdestroming van de grote geulen resulteren in een korte kenteringsperiode en hoge bodemschuifspanningen, wat een grof zandige geulbodemaafzetting tot gevolg heeft. Geulbodemaafzettingen bestaan voornamelijk uit mud-pebbles, schelpen en andere grover materiaal. Een schelpenlaag op de beulbodem wordt vaak bedekt door prograderende megaribbels die uit zand en/of schelpgruis bestaat (Van Straaten, 1952). De schelpenlaag is in dit geval een niet-actieve stabiele ondergrond; de megaribbels zijn in een dergelijk geval de bodemvormen die in overeenstemming zijn met de fysische condities. De migratie van megaribbels vindt vooral plaats gedurende springtij. Tijdens springtij en/of opzet t.g.v. stormen, kan de stroomsnelheid in geul flink oplopen. In getijdegebieden met een gemiddeld tijverschil tussen 3 en 4 meter kunnen de stroomsnelheden tijdens springtij oplopen tot meer dan 0,6 m/s. (Dillo, 1960 en Allen, 1984). Tijdens deze condities kunnen de megaribbels enkele cm's (Nio en Siegenthaler, 1979) of 40 cm (Simon, 1959) tot 3,7 meter per getijde (Reineck, 1961) migreren.

Flemming (1992) heeft een experimenteel onderzoek uitgevoerd naar transport fenomenen van onregelmatig afgeronde korrels (schelpenzanden of bioclastisch sediment) onder "unsteady non-equilibrated" flow omstandigheden zoals getijdenstromingen. Er is gebruik gemaakt van sediment met een bulk vormfactor (SF) van 0.55 en 0.40 en met bulk dichtheden van 2.35 gcm^{-3} en 2.75 gcm^{-3} . De diepte werd constant gehouden op 35 cm. Maximum Froudegetallen kwamen niet boven de $Fr=0.42$ in geval van middelgrof zand en 0.56 in het geval van grof bioclastisch zand. Stroomsnelheden werd steeds met 2 cm/s vergroot na 15 minuten. Een belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat het initiëren van beweging plaats vond bij slechts iets grotere snelheden dan verwacht zou worden bij goed afgerond sediment. De bodemvormen lieten wel grote verschillen zien met de stroomsnelheid/korrelgrootte diagrammen. De "Lower stage plane bed phase" is meer aanwezig dan in het geval van sediment bestaande uit zand, en de eerste duinvorming ontstaat pas bij hoge stroomsnelheden van 70 cm/s of meer. (Flemming, 1992).

Het vasthaken van onregelmatig gevormde korrels zoals schelpen heeft als gevolg dat het initiëren van transport bij een iets hoger stroomsnelheid begint als in het geval van goed afgeronde korrels (Flemming, 1992).

Experimenteel is aangetoond dat de "Lower plane bed transport phase" bij bioclastisch zand met een lage vormfactor nog optreed bij een, in vergelijking met goed afgeronde korrels, hoge stromingssnelheid (zie figuur 8.) (Flemming, 1992).

104



Figuur 8. Ontwikkeling van de verschillende bodemvormen bij onregelmatig gevormde korrels bij verschillende stroomsnelheden (Flemming, 1992).

Een gevolg hiervan is een vertraging in de ontwikkeling van ribbels en duinen, vooral bij lagere vormfactoren. Dit kan niet alleen het gevolg zijn van vasthaken van de verschillende onregelmatig gevormde korrels. Bodemruwheid wordt verminderd in een zich verplaatsende bodem. Daarnaast is de gevonden mate van vertraging in ontwikkeling tot ribbel of duin zodanig dat het moeilijk te bevatten is dat het onregelmatig karakter van de stroming hiervan het gevolg kan zijn. Ook de kleine verschillen in dichtheid van de bioclastische sedimenten t.o.v. vergelijkende kwarts zanden zijn onwaarschijnlijk dat deze de oorzaak is van een dergelijke dramatisch verschil in bedvorm-response. Het is aangetoond dat de deeltjes met een lage vormfactor ($SF \ll 1.0$) een aanmerkelijk hogere weerstand tegen transport hebben dan beter afgeronde korrels. Er mag verwacht worden dat enige "drag" geïnduceerde weerstand tegen beweging actief zal blijven tijdens transport en dat dit effect toeneemt met een kleinere vormfactor. Als resultaat zullen de bewegende deeltjes dichter bij de bodem worden gehouden, en dientengevolge de interne wrijving van de bewegende laag vergroten, welke een mechanisme is voor het produceren van deeltjes-imbricaties (specifieke stapeling/oriëntatie van korrels). Imbricatie in schelprijk zand is vooral aanwezig bij lage transportsnelheden (Thieze et al, 1991).

Dus grotere vorm-geïnduceerde weerstand en grote interne wrijving zijn de meest waarschijnlijke veroorzakers voor de ongewone transport karakteristieken van bioclastische zand. Deze factoren beïnvloeden ook de vorming van bodemvormen (ribbels en duinen). Deze zullen alleen gevormd worden als de bodemschuifspanning dermate hoog is om de tegenwerkende wrijvingskrachten in de bovenste sedimentlaag te overbruggen. In goed afgeronde, niet-cohesieve zanden wordt de kritische interne wrijving snel overwonnen na het initiëren van de eerste beweging. Zanden met een lagere vormfactor bereiken deze condities pas bij aanzienlijke hogere snelheden, en verlengen derhalve het stadium met vlakke bodemvormen (Lower plane bed transport phase). Dit kan het veelvuldig voorkomen van vlakke schelpenbanken (shell-lag pavements) in getijdengeulen verklaren.

3.4.2.7. Transport en accumulatie.

De levensduur van de meest voorkomende schelpen in de Waddenzee (*Macoma Baltica*, *Cardium* (*Cerastoderma*) *Edule*, *Scrobicularia plana*, *Mya Arenaria* en *Mytilus edulis* is ongeveer 5-7 jaar (Reineck, 1982). De meeste halen echter deze leeftijd niet en sterven voor die tijd af. Bij de in de bodem levende schelpen blijven na het afsterven de kleppen eerst begraven. Maar afhankelijk van de soortafhankelijke vestigingsomstandigheden zullen deze door de stroming en golven snel uitgespoeld worden, of ze blijven lang in de bodem steken. De kokkel leeft vlak onder het oppervlak en kan al relatief snel uitgespoeld worden. Zo worden er bijna geen dode kokkels in levenshouding in het wadsediment gevonden. *Macoma baltica* zit ongeveer 3-5 cm in de bodem, waardoor ook deze soort relatief makkelijk kan worden uitgespoeld. De *Scrobicularia* komen als volwassene op een diepte van 10 cm onder het oppervlak voor, waardoor deze moeilijker wordt uitgespoeld. De *Mya arenaria* zit met een diepte van 15-30 cm onder het oppervlak op een diepte die alleen uitgespoeld wordt wanneer een priel over een veld heen migreert. Vaak worden blootliggende dode schelpen door Booralgen aangetast, die op hun beurt weer door *Littorina littorea* worden verorbert. Aanrijkingen van dode schelpen van *Mytilus edulis* worden alleen daar gevonden waar ze ook in levende positie worden aangetroffen: de mosselbanken. De levende mossels houden zich vast met hun byssusdraden aan los en/of vast materiaal, dus ook aan elkaar. Initieel vestigen de mossels zich vaak aan kolonies van jonge kokkels. In het Waddengebied bevinden zich

twee gebieden waar schelpen bij stormen worden geaccumuleerd. Dit zijn de prielen en geulen en de zeewaarts kant van de kwelders. Als de schelpen in de prielen of geulen geraken, worden ze nagenoeg niet meer in horizontale richting verplaatst. Als gevolg van de aflopende stroom verzamelen ze zich vervolgens in de stroomluwtes in de prielen/geulen tot dikke lagen. Vanwege de sterk meanderende activiteiten van de prielen worden ze echter al snel begraven onder sediment, waarbij ze als sedimentlaag blijven liggen.

Transport van schelpen kan volgens Krause (1950) op verschillende wijze plaatsvinden waarbij de stroming nagenoeg de enige is die volgens Krause grote hoeveelheden kan transporteren.

1. Getijde stroming
2. IJsschotsen
3. Drijven
4. Schelpen etende organismen (Pleuronectiden, vissen en vogels)

Op basis van relatieve samenstellingen van allochtone schelpensoorten kan een uitspraak worden gedaan over transportwegen van schelpen, waarbij geconcludeerd kan worden dat schelptransport vergeleken kan worden met zandtransport. In de Waddenzee is weinig bijmenging van schelpen uit de Noordzee. Alleen in de zeegaten is er sprake van enige substantiële bijmenging van Noordzee exemplaren (Geologische Stichting, 1952).

De verwerking en fragmentering van schelpen en/of schelpresten kan naar gelang de transportafstand en/of de resistentie van de schelp verschillend sterk zijn. O.a Tauber (1942) stelde vast dat lichte mollusken zoals *Macoma baltica* of *Mytilus edulis* minder sterk afdrijven als zwaardere schelpen zoals *Cardium edule* of *Mya arenaria*. De eerste zal meer zwevend, de zwaardere meer rollend of salterend worden meegevoerd. Een zekere bewijs voor verplaatsing van materiaal is sortering van schelpdeeltjes op basis van gewicht, grootte of volumedichtheid (gewicht van een deeltje onder opwaartse druk/volume).

Belangrijke parameter voor het bepalen van de kritische transportsnelheden is de effectieve volumedichtheid: het soortelijk gewicht onder water. Des te kleiner de volumedichtheid, des te eerder wordt het deeltje getransporteerd. In enkele gevallen is de stroomwerkzame oppervlakte van een schelp, de oppervlakte waarop de stroom kan aangrijpen, een meer belangrijker factor voor de hoogte van de kritische stroomsnelheid dan de nominaaldiameter van een schelp.

Transport van schelpen op een zandige ondergrond wordt sterk beïnvloed en belemmerd door de vroeg-inzettende vorming van kolkgeden aan de loefzijde van het deeltje (Futterer, 1978). De schelpen vallen vervolgens in de kolkgeden en worden begraven. Enkele lichter schelpensoorten zijn echter een uitzondering hierop, zij kunnen door hun geringe volumegegewicht relatief vrij snel rollend/salterend getransporteerd worden zonder dat er kans bestaat op kolkvorming. Volgens onderzoek worden de schelpen van *Abra alba* bij ongeveer 18 cm/s getransporteerd over het zand, bij *Macoma baltica* (0,37 g/cm³) ongeveer bij 35 cm/s en bij de middelgrote schelpen zoals *Cardium/Scrobicularia* en *Mytilus* pas boven de 60 cm/s, bij deze snelheid bewegen de zandkorrels (D50 = 225 µm) voor het grote deel zwevend in suspensie.

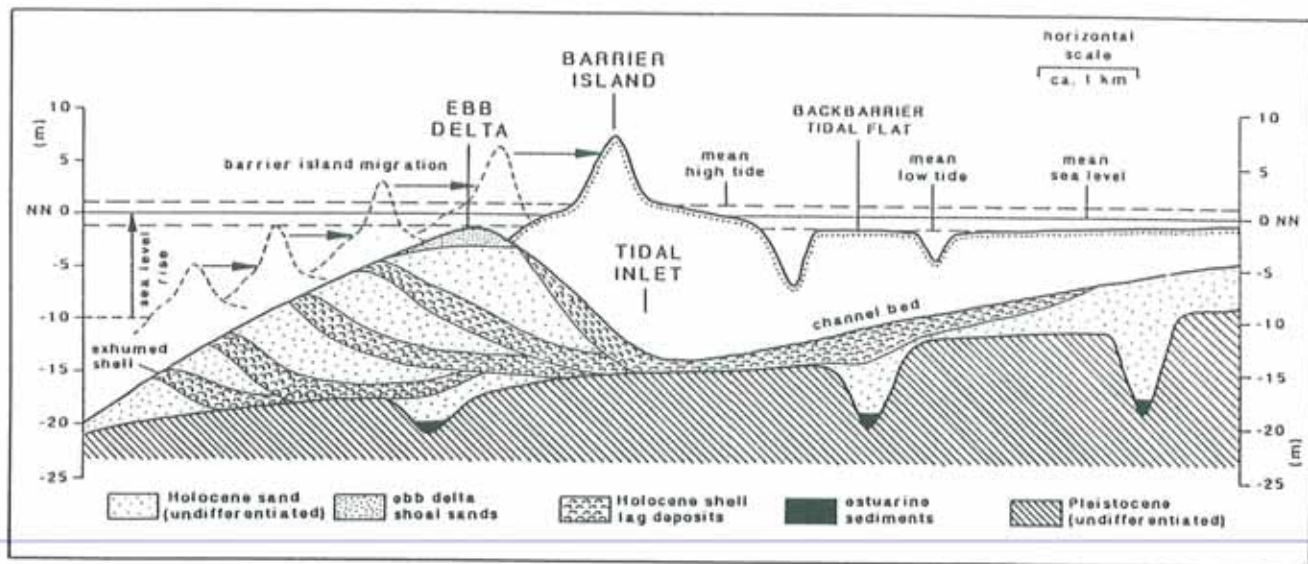
De korrelgrootteverdeling van het zanddeel is vaak direct afhankelijk van de in de geul heersende fysische omstandigheden en de korrelgrootteverdeling is daarbij vaak vrij nauw (goed gesorteerd). De schelpfractie is vaak toevallig verdeeld, er is geen duidelijke sortering geconstateerd (Schubert, 1990). Dit betekent dat er waarschijnlijk geen directe relatie is met de heersende fysische omstandigheden.

Het laterale transport van schelpen hangt sterk af van de gesteldheid van de onderliggende bodem (harde ondergrond, zandbed, klei) (Futterer, 1977, 1978). In het geval van een zandbodem verhindert de inzettende kolkontwikkeling en de daarop volgende inbedding van de schelp, massale transport van schelpen (Futterer, 1977, 1978).

Bij een onderzoek uitgevoerd in een getijdegebied in Nieuw Zeeland zijn een aantal zgn. sedimentvallen geplaatst (Pickril, 1986). Deze sedimentvallen zijn gedurende een langere periode in een aantal geulen geplaatst, waarbij een indruk kon worden gekregen over de hoeveelheid getransporteerd materiaal. De geulbodem bestond in dit geval uit schelpen. Transport van zand is nagenoeg onafhankelijk van bodemnabije snelheden van stroming en meer afhankelijk van de passage van zandlichamen die in de vorm van megaribbels over de channel-lag heen migreren (Pickril, 1986). Bij stroomsnelheden van maximaal 1.2 m/s tijdens springvloed was het opvallend dat op de schelprijke geulbodemaafzetting nagenoeg geen transport plaatsvond. Transport was niet meer dan 0.003 kg/m/s, en gevangen sediment bestond uit slecht gesorteerd grof schelpenzand en schelpengrind (Pickril, 1986). Daarnaast gaat sedimenttransport niet altijd samen met periode van hoge stroomsnelheden. Verwaarloosbare hoeveelheden sediment wordt getransporteerd als bedload over de schelprijke geulbodemaafzetting. Weinig schelpmateriaal wordt getransporteerd. (Pickril, 1986). Enkel zandlichamen in de vorm van megaribbels komen af en toe langs. Sedimenttransport wordt begrensd door de afwezigheid van zand, niet door afwezigheid van stromingsenergie. (Pickril, 1986).

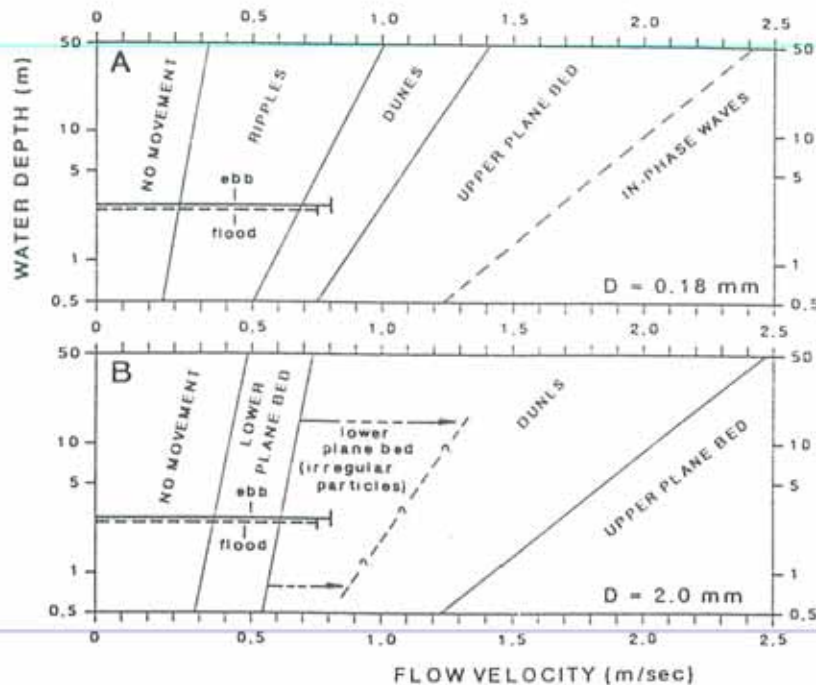
Aanrijkingen van bioclastisch schelpmateriaal bestaan vaak uit een tweetal componenten: zandkorrels en grove schelpenresten. Transport van enige betekenis als gevolg van golven is beperkt tot grofweg het gebied boven gemiddeld laagwater. Echter dit mechanisme kan geen schelpafzettingen produceren die voldoende groot zijn om commercieel belangrijk te zijn. De grote schelpenvoorkomens onder gemiddeld laagwater zijn niet primair geconcentreerd door getijdenstromingen. Genetisch behoren de bioclastische accumulaties tot "condensation deposits of channel-lag deposits". Als zodanig hebben ze een goed preservatie potentieel (zie figuur 9.) (Flemming, 1992).

In Flemming et al (1992) blijkt dat het hydraulisch regime harmonieert met het kwarts-sediment en dat het veel grovere schelpmateriaal grotendeel een passieve component is het systeem is, wat in overeenstemming is met de definitie van een geulbodem-afzetting. Voor de fijnere korrelgrootte fractie worden de kritische transportsnelheden regelmatig overschreden met als theoretisch gevolg de ontwikkeling van duinen (zie figuur 10). D.m.v. sonar is dit duidelijk aangetoond. De fijnkorrelige duinen migreren over een redelijk vlakke grofkorrelige schelpenlaag.



Figuur 9. Hypothetische doorsnede door een transgressieve waddensysteem, welke de potentiële schelpaccumulaties als geulbodemaafzettingen laten zien (Flemming, 1992).

Theoretisch zou schelptransport mogelijk moeten zijn (Lower plane bed). Dat dit ook daadwerkelijk gebeurd is, is te zien aan de stapeling van het schelpmateriaal (imbricatie). Tieze et al (1991) liet zien dat de stapeling van schelpmateriaal (imbricatie) vooral ontstaat tijdens het begin van transport. Indien het hydrodynamisch regime meer toegesneden is op het fijnere sediment, wat in het onderzoek van Flemming het geval lijkt te zijn, dat ligt het schelpmateriaal (channel lag) op een beschutte plaats en wordt de mobiliteit van schelpcomponenten sterk gereduceerd. Dit is in tegenspraak met de opvattingen van Krause (1950) en Luders & Trusheim (1929, 1931) welke gewone getijdestroming zagen als de belangrijkste transporteur van schelpmateriaal. Belangrijk schelptransport vindt pas plaats bij stroomsnelheden boven de 1 -1.5 m/s, snelheden die alleen plaatsvinden tijdens hevige stormen waarbij de snelheden in de zeegaten vervolgens kunnen oplopen tot 2 - 2.3 m/s (Wadatlas, 1989).



Figuur 10. Diepte/stroomsnelheid diagram, welke de ontwikkeling van de verschillende bodemvormen laat zien. A in het geval van fijn kwarts zand en B in het geval voor onregelmatig gevormde korrels (schelpgruis) (Flemming, 1992).

Transport van schelpen vindt nagenoeg niet plaats in de getijdengeulen (Flemming, pers com.). Het belangrijkste accumulatieproces is het gravitatief naar beneden vallen van schelpen bij een aansnijding van wadplaten. Door migreren van geulen, welk proces de laatste honderden jaren door bedijkingen en vastlegging van eilanden sterk is bevorderd, worden de wadplaten regelmatig doorwoeld. Hierbij raken de schelpen los uit het sediment en accumuleren dan op de bodem van de geulen. Eenmaal op de bodem van de geulen worden ze nagenoeg niet meer getransporteerd. De stroming in de geulen en met name de karakteriserende bodemschuifspanning is niet voldoende om massale transport van schelpen teweeg te brengen. Materiaal met grove korrelgrootte in een macrogetijdegebied (6-8 meter tijverskil) in Korea, aanwezig in duinen op een geulbodem, verplaatst in een periode van enkele jaren slechts enkele meters (Flemming, pers comm.). In een Waddengebied met geringere getijverskil en met grovere materiaal (schelpen) zullen deze waarden nog lager zijn. Daarnaast is uit stroomgoot-experimenten gebleken dat schelpen pas bij zeer hoge stroomsnelheden worden gemobiliseerd (Flemming, 1992). De schelpenbanken ontstaan dus meer door uitspoeling van zand, dan door transport van schelpen.

Golfactiviteit en de wadpier *Arenicola marina*, welke door het omwoelen van de bovenste 30 cm van de wadplaten de schelpen naar beneden transporteert, zijn de belangrijkste transport- en accumulatie mechanismen voor schelpen op de droogvallende wadplaten. Golven

mobiliseren de schelpen en door residuele stroming worden de schelpen dan getransporteerd naar de ondiepe prielen en geultjes, waar ze accumuleren. Laterale migratie van deze geultjes kan vervolgens hele velden aan schelpen achterlaten. Schelptransport vindt alleen plaats onder verhoogde golfactiviteit (stormen). Door regelmatige wisselwerking van erosie en sedimentatie, als gevolg van laterale verplaatsingen van geulen, worden schelpenlagen weer opgewerkt. De schelpen vallen in de diepere gedeelten van de geulen. Deze ontwikkeling wordt regelmatig herhaald, totdat de geulen niet dieper uitsnijden, waardoor er een schelpafzetting ontstaat. Omdat de geulen over grote afstanden migreren ontstaat in het gehele geulbodembereik een schelpenlaag. Daar waar de schelpen niet door zand bedekt worden kunnen de schelpen een dakpansgewijze oriëntatie aannemen als gevolg van stroming (Schubert, 1990)

3.4.3. Transportprocessen in de kustzone

Op het strand komen regelmatig massale aanspoelingen van grote hoeveelheden schelpen voor. Daarom vonden de eerste vormen van schelpenwinning dan ook plaats op het strand. Oorzaken voor massale aanspoelingen op het strand kunnen zijn:

- Losspoelen in leefomgeving onder invloed van zeestromingen en stormen
- Actief loswerken door de schelp zelf, om een meer gunstiger levensmilieu op te sporen (b.v. *Ensis* sp.)
- Koudegevoeligheid: tijdens strenge winters kan een deel of een volledige populatie van bepaalde vorstgevoelige schelpen afsterven (zoals in de strenge winter van '78-'79 toen een gehele populatie van *Donax vittatus* verdwenen is). Bij lage temperaturen neemt de spieractiviteit van de meeste tweekleppigen drastisch af of stopt zelfs, bij *Cerastoderma edule* al beneden 1,5 °C. Van *Abra alba*, *Cerastoderma edule*, *Angulus tenuis*, *Angulus fabulus* en *Donax vittatus* spoelen de grootste aantallen levende exemplaren tijdens de wintermaanden aan (de Bruyne, 1990)

De actieve zone (de brekerbank zone) bevat vermoedelijk zeer weinig mollusken in situ. Er worden 3 zone's onderverdeeld: zone A is een ondiepe kustzone beginnend op een waterdiepte van 5-7 meter en lopend tot de grens met zone B. Zone B is de diepere kustzone, gelegen tussen 15-16 meter diepte en de grens met zone C. Zone C tenslotte is de open zee zone, vanaf 20 meter dieptelijn (de Bruyne en van der Valk, 1991). Zone A wordt voornamelijk bewoond door "selective deposit feeders" terwijl in zone B voornamelijk "suspension feeders" voorkomen. Binnen deze zones komen de volgende schelpen voor:

Levend:

Zone A: *Abra alba*, *Cerastoderma edule*, *Macoma baltica*, *Ensis directus*, *Ensis minor*, *Angulus fabulus*, *Angulus tenuis*, *Venerupis senegalensis*, *Mya arenaria* en *Mya truncata*.

Zone B: *Chameiea striatula*, *Donax vittatus*, *Spisula elliptica*, *Mactra carallina*, *Spisula subtruncata*, *Ensis arcuatus*, *Ensis ensis*, *Lunatia catena*, *Tellinomya ferruginosa*, *Mysella bidentata*, *Chrysallida sarsi*, *Turboella inconspicua* en *Lunatia poliana*, *Zirfaea crispata*

Zone C: *Goodallia triangularis*, *Donax vittatus*, *Angulus pygmaeus*, *Thracia papyracea*, *Turneria jeffreysi*, *Phaxas pellucidus*, *Lunatia catena*, *Petricola pholadiformis*, *Tomus subcarinatus*, *Spisula solida*, *Abra prismatica*, *Acteon tornatilis*, en *Aequipecten opercularis*.

In de kustzone zijn de volgende schelpsoorten sterk in aantal afgenomen of zelfs geheel verdwenen:

Abra alba, *Acanthocardia echinata*, *Buccinum undatum*, *Cerastoderma edule*, *Ensis minor*, *Venerupis senegalensis*, *Mya arenaria*, *Mya truncata*, *Chameiea striatula*, *Donax vittatus*, *Lunatia catena*, *Zirfaea crispata*, *Abra prismatica*.

Soorten welke duidelijk in aantal zijn toegenomen: *Macoma baltica*, *Ensis directus*, *Angulus fabulus*, *Lunatia poliana*, *Spisula subtruncata*.

Het verdwijnen van *Cerastoderma edule* uit het Hollandse kustgebied is opvallend. Uit aanspoelgegevens van de strandwacht Katwijk-Noordwijk valt op te maken dat de plotselinge daling is ingezet in 1981. Waarschijnlijk is dit een gevolg van toename van de frequenties van sterke winden, waardoor de turbulentie in het water toeneemt, met als gevolg het langer in suspensie blijven van grotere hoeveelheden kleideeltjes, waardoor er voor de kokkel als bodembewoner minder voedsel beschikbaar komt; er komen minder kleideeltjes tot bezinking en binnen het bereik van de kokkels (de Bruyne en van der Valk, 1991).

Zeer opvallend is de sterke toename van *Spisula subtruncata*. Er zijn gebieden aangetroffen met dichtheden van meer dan 5000-6000 exemplaren per m²!. De soort staat bekend als een 'Flekkensiedler': een soort die zich op plaatsen met toegenomen voedselaanbod in korte tijd tot enorme dichtheden kan ontwikkelen. De dieren produceren zeer veel eieren, en groeien zeer snel. De grootste dichtheid aan *Spisula subtruncata* vindt men in iets dieper water (Zone B: 15-20 m.) (de Bruyne en van der Valk, 1991).

Uit strandwaarnemingen blijkt dat de verdeling van bepaalde schelpsoorten over het natte en droge strand niet toevallig is, evenals de verspreiding van bepaalde molluskenschalen in de brekerbank zone. Verse schelpen (pas dood) levend in zone A komen niet voor in de onderste delen van zone A.

Er worden voornamelijk twee transportrichtingen gevonden. De bovenwaartse transportrichting (op het strand) en de benedenwaartse transportrichting (naar dieper water). Langtransport, dus kust parallel transport is niet waarschijnlijk, er zouden dan aanwijzingen moeten zijn dat soorten uit het midden Hollandse Kustgebied, naar het noordelijke Hollandse Kustgebied zijn getransporteerd. Dergelijke aanwijzingen zijn in het onderzoek van De Bruyne en Van der Valk (1991) niet gevonden.

Brekerbankzone.

De brekerbankzone wordt gekarakteriseerd door de invloed van de golven. De golfwerking vanuit het Noordwesten is de drijvende kracht. Deze golven breken op de tot maximaal -7 m diepte gelegen banken. Toevoer van water naar het strand zorgt voor een set-up. Deze set-up moet uiteraard gecompenseerd worden door retourstromen. Deze retourstromen worden rip-currents genoemd. Dit rip-mechanisme zou wel eens het meest aangewezen mechanisme kunnen zijn dat voor afvoer van molluskenschelpen uit de ondiepe kustzone naar dieper water in aanmerking komt. Het is goed voorstelbaar dat onder stormcondities de muien haaks op de kust, tussen de brekerbanken, voor versterkt zeewaarts transport van tegen de kust opgezet water zorgdragen (de Bruyne en van der Valk, 1991). Met de zo ontstane retourstroom kunnen ook grote hoeveelheden schelpmateriaal zeewaarts worden getransporteerd. In deze brekerzone wordt door het hoogenenergetisch karakter vrijwel geen schelpmateriaal geproduceerd. Schelpconcentraties in deze zone zijn altijd eerder lag-concentrations dan een ander soort concentratie.

Onder de brekerbankzone.

Er mag van uit worden gegaan dat transport van materiaal vooral onder de heersende stormwinden (Noordwest tot Zuidwest) plaatsvindt (de Bruyne en van der Valk, 1991). Uit de subfossiele kustafzettingen blijkt dat de gepreserveerde afzettingen veelal de karakteristieken dragen van stormafzettingen (Aigner 1985, Kumar en Sanders, 1976). Ondiepe stormafzettingen onder de zone met de brekerbanken bestaan uit gegradeerde zandafzettingen met schelpenlagen aan de basis met abrupte laagovergangen en soms bedekt met dunne, later doorwerkte (gebioturbeerde) kleilaagjes. Vaak zijn de individuele pakketjes stormafzettingen later weer geërodeerd door een volgende storm.

Als belangrijkste mechanisme voor kustwaartse transport geldt de orbitaalbeweging aan de bodem opgewekt door de golven. Het algemene idee is dat materiaal wordt losgewoeld uit de bovenste bodemlaag, hetgeen zowel voor levend als voor dood schelpmateriaal geldt. Uit Subboreale en Subatlantische kustafzettingen is gebleken dat de grootste volumina schelpmateriaal in de bovenste 8 tot 10 meter van de kustsequentie aanwezig zijn. Dit kan als een maat worden gezien van het kustwaarts gericht transport (de Bruyne en van der Valk, 1991). Soorten- en schelpenarmoede in het Hollands kustgebied ten noorden van Bergen, is waarschijnlijk een gevolg van de afwezigheid van oude duin- en strandafzettingen beneden NAP in dit gebied, er vindt geen recycling plaats van oud schelpmateriaal (de Bruyne en van der Valk, 1991). De soorten-armoede in dit gebied kan het gevolg zijn van de afwijkende topografie van de Noordzeebodem te plaatse en wellicht is er al enig effect van de vloedwerking van het Zeegat van Texel (Marsdiep) aanwezig (de Bruyne en van der Valk, 1991).

De ondergrens van het zeewaartse transport lijkt heel duidelijk te liggen aan de basis van zone A rond 15 tot 17 meter onder NAP. Bijvoorbeeld in het geval van *Ensis directus*, welke nog maar sinds 1978 in de Nederlandse kustwateren voorkomt, komen verse lege schelpen en fragmenten niet voor beneden de 16 meter dieptelijn (de Bruyne en van der Valk, 1991).

3.5. Conclusies

De jaarlijkse aanwascijfers voor schelpkalk zijn gebaseerd op de productie van kokkelschelpkalk. Dit omdat de kokkelschelpen het grootste deel uitmaken van de schelpensamenstelling (75-80%), en hierover veel informatie beschikbaar is omtrent de aanwas/productie cijfers aan kokkelschelpkalk. Voor een compleet beeld van de jaarlijkse productie van schelpkalk moet er dus een percentage bij worden opgeteld voor de kalkproductie van de overige schelpen. Dit zou gesteld kunnen worden op 30 %, aangezien de gewonnen schelpen voor 75% uit kokkels bestaat en 25 % uit overige. Hierbij wordt de aanname gedaan dat in het verleden de verhouding van de verschillende soorten ten aanzien van de jaarlijkse productie hetzelfde is als heden.

Naast berekeningen uitgevoerd door Beukema en Cadée (1997) zijn er ook berekeningen ~~uitgevoerd met als basis de bestandopnames van de jaarlijkse rapporten van het RIVO (Van Stralen, Kesteloo en Hendriksen 1990-2000).~~ Aan de omrekening van het vleesgewicht van de levende kokkel, welke door het RIVO wordt bepaald, naar het kokkelschelpkalkgewicht kleven een aantal nadelen. Het vleesgewicht is geen constante, afhankelijk van ondermeer het jaargetijde varieert het vleesgewicht. In september ligt het vleesgewicht rond de 20% en in het voorjaar rond de 12%. Voor de berekening is de gemiddelde waarde van 15% gebruikt. Daarnaast geeft deze bestandsopname een beeld van de levende populatie schelpen. Voor het

kokkelschelpkalkbestand is het sterftecijfer belangrijk. Hierbij moet de vraag gesteld worden of een 10-jaar lange meetreeks als voldoende representatief kan worden beschouwd voor het bepalen van een langjarig gemiddelde kokkelschelpkalk productie.

In het geval van de berekening door Beukema en Cadée (1997) worden de echte kokkelschelpkalkgewichten gemeten. De gegevens zijn verzameld in het Balgzand.

Vervolgens worden de gegevens geëxtrapoleerd naar het gehele Waddengebied. Het is de vraag of het Balgzand gebied als representatief kan worden beschouwd voor het gehele Waddengebied. De sublitorale (permanent onder waterstaande) gebieden worden in de berekeningen van Beukema en Cadée (1997) niet meegenomen. Deze gegevens zijn echter momenteel de meest betrouwbare cijfers omtrent de jaarlijkse kokkelkalkproductie. Bruto wordt er jaarlijks 126.000 ton of 189.000 m³ kokkelschelpkalk geproduceerd.

Niet al het bruto geproduceerd kokkelschelpkalk komt beschikbaar voor de schelpenwinning. Een deel hiervan raakt onwinbaar. Vergruizing door vogels, vissen en fysische vergruizing, oplossing, kokkelvisserij, permanent begraving en kleine schelpen zijn oorzaken waardoor schelpen voor de schelpenwinning verloren raakt. Deze verliesposten tezamen wordt gesteld op 30% van het totaal. De vraag moet worden gesteld of permanente begraving (zelfs op de kwelder) als definitief onwinbaar moet worden beschouwd. In theorie kunnen deze schelpen namelijk weer aan het accumulatieproces gaan deelnemen. Beukema en Cadée (1997) komen op een verliespost van 30%. Dit betekent dat er een netto jaarlijkse productie aan

kokkelschelpkalk van 88.000 ton of 132.000 m³ in de Waddenzee aanwezig is. Waarschijnlijk is het sublitorale kokkelschelpkalk productie hierbij niet meegenomen. Volgens Essink (1993) ligt dit ongeveer op 10% van het totaal. Voor het litorale gedeelte moet hierbij nog 10% worden opgeteld en voor de overige schelpen nog eens 30%. Dit geeft levert een totaal van 126.000 ton of 188.500 m³ schelpkalk.

Schelpen hebben vanwege hun vorm en gewicht specifieke hydrodynamische eigenschappen. De valsnelheid is zeer specifiek; in deze fysische grootheid komt hun vorm in combinatie met gewicht en dichtheid goed tot uitdrukking. De valsnelheid is dan ook een belangrijke beschrijvende parameter voor het hydrodynamisch gedrag van schelpen. De valsnelheid is equivalent met die van zand van 0,5 tot 3,2 mm.

De schelpafzettingen op de geulbodem, zijn in hydrodynamische zin niet in overeenstemming met de fysische parameters. De schelpenbanken kunnen derhalve dan ook worden beschouwd als restafzetting of "channel lag" (geulbodemaafzetting). Het materiaal blijft achter op de geulbodem, het wordt niet of nauwelijks getransporteerd. De bodemvormen laten ook vaak zien dat er alleen een vlakke bodem aanwezig is, er vindt geen ribbel- en/of duinvorming plaats. Experimenteel onderzoek door Flemming (1993) heeft aangetoond dat ribbelvorming, welke een indicator is voor transport van materiaal, pas in een laat stadium, bij hogere stroomsnelheden dan materiaal met equivalente korrelgrootte plaatsvindt. Dit vanwege hun vorm en, in het geval van een zanderige ondergrond, inbedding en vastzetting in het zand.

De voorkeursgebieden voor schelpenbanken, uit literatuur en winningsgegevens, liggen vooral in de zgn. backbarrier getijdegeulen onder de eilanden. Dit is in overeenstemming met de gevonden verdeling van de maximale bodemschuifspanning. De hogere gebieden, de droogvallende wadplaten, ondervinden een bodemschuifspanning die hoog is ten gevolge van de golfenergie. In de diepe zeegaten is de bodemschuifspanning hoog omdat hier de getijdestroming maximaal voor het waddengebied is. De tussenliggende grotere getijdegeulen bezitten een minimum ten aanzien van de bodemschuifspanning die in de Waddenzee voorkomt.

4. Morfologische aspecten (stabiliteit bank en bodem, levensduur, plaatvallen)

4.1. Inleiding

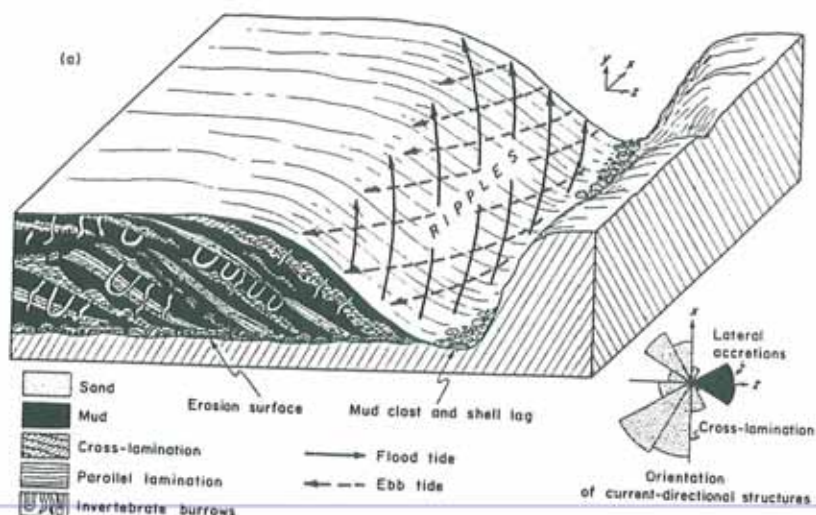
In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de morfologische aspecten van een schelpenbank. De stabiliteit van de bank, wat gebeurt er met de bodem bij verwijdering van de schelpen en eventuele relatie tussen verwijderen van schelpen en het voorkomen van of mogelijkheden tot plaatval zullen worden besproken. In de rapporten met betrekking tot schelpenwinning van Van Dobben (2000) en Cramer (1998) is hier reeds eerder op ingegaan. In dit rapport zal hier, door het raadplegen van nieuwe literatuurgegevens, waar mogelijk een aanvulling op worden gegeven.

4.2. Stabiliteit bank, bodem en levensduur

Winning van schelpen op de geulbodem heeft tot gevolg dat een geul zich moet aanpassen aan een nieuwe situatie. De dimensies van een geul zijn aangepast aan de heersende hydraulische omstandigheden en waarschijnlijk aan een korrelgrootte die een stuk fijner is dan de schelpen. De schelpen worden dan als een "lag-deposit" beschouwd. Na het weghalen van de geulbodemaafzetting bestaat de mogelijkheid dat de geul dieper wordt (Flemming, pers. com.). Het onder de schelpenbank liggend zand heeft een lagere kritische transportsnelheid dan de schelpen; zand wordt bij een lagere stroomsnelheid getransporteerd dan schelpen. Bij verwijdering van de schelpenlaag van de bodem van een geul waar hoge stroomsnelheden heersen kan de onderliggende zandlaag eroderen (Allen, 1984). De geul past zich aan het nieuwe geulprofiel aan; er zal wel wat opvullen, maar de verwachting is dat de geul wel wat dieper wordt, aangepast aan een fijnkorrelige geulbodem (zie figuur 11.).

De Holocene ondergrond in verschillende recente "back-barrier" eiland systemen bestaan voor 30-50 % uit opvulling van getijdengeulen (Sha, 1990). Onderzoek in het Waddengebied onder Ameland laat zien dat de afzettingen voornamelijk bestaan uit Subatlanticum geulopvullingen en binnenbocht (point-bar) afzettingen (van der Spek, 1994). De afzettingen uit het Subboreaal zijn voornamelijk omgewerkt, wat te zien is aan de aanwezigheid van Sub-boreale schelpen in de geulbodemaafzettingen uit het Subatlanticum. Een enkel gebied in het Waddengebied is minder vaak geërodeerd door jongere geulen. Op de Grienderwaard b.v. zijn de vroeger afzettingen niet geërodeerd door jongere getijdengeulen.

Migratie en omwerking door getijdegeulen is een belangrijk proces in de opbouw van het sediment. Ook in andere literatuur (Reineck en Singh, 1980 en Reineck, 1958, 1978) wordt beweerd dat ongeveer 58 % van het backbarrier gebied van Wangeroog omgewerkt is in 68 jaar tijd a.g.v. laterale migratie van geulen. In het kombergingsgebied van de Borndiep (Zeegat van Ameland) is volgens van der Spek (1994) ongeveer 47 % van de oppervlakte dieper dan 2.5 m onder NAP omgewerkt. De omwerking gaat tot een diepte van meer dan 20 meter bij de zeegaten. Migratiesnelheden variëren tussen 25 meter (zand-slib platen) tot 100 meter per jaar (zandplaten).



Figuur 11. Opbouw van een zich lateraal verplaatsende geul in een getijdegebied (Allen, 1984).

Migratie kan in enkele honderden jaren over vele kilometers gaan gezien de migratie van de Lauwers. In 1300 lag de Lauwers oostelijk van Schiermonnikoog en ontwaterde de Lauwerszee (Oost, 1994). Hedendaags ligt de geul een stuk verder naar het oosten, ten oosten van de zandplaat Simonszand en prielt het uit langs de Groningse vastelandskust ten oosten van Noordpolderzijl. Het zeegat migreerde vanaf 1300 ongeveer 10-15 km naar het oosten terwijl het uiteinde van de geul, de prielen welke het wantij ontwateren, zo'n 30 km naar het oosten migreerden. De gehele Waddenzee ter plaatse is op zo'n manier in een paar honderd jaar tijd compleet doorwoeld. De aanwezige schelpen op de platen zijn waarschijnlijk als channel-lags in de geulbodem begraven.

In boringen en seismische opnames van de "Middelplaat" in de Westerschelde is duidelijk te zien dat over de onderliggende Tertiaire afzettingen een geul gemigreerd is. Uit boorgegevens blijkt dat de bodem van deze geul uit schelprijke-afzettingen bestaat. De geul is na de migratie opgevuld met fijnere weinig-schelphoudende sedimenten. De schelpenlaag die op deze wijze is begraven, bestaat uit een relatief groot aandeel Pliocene schelpen, afkomstig uit de formatie van Oosterhout (Westerhoff, 1997). De dikte van de schelpenlagen kunnen op de platen in de Westerschelde oplopen van 4-5 meter tot 8 meter! (Westerhoff, 1977).

4.3. Plaatvallen

Plaatvallen doen zich voor als de interne wrijvingskrachten niet voldoende zijn om weerstand te bieden aan de krachten die zich ontwikkelen door het gewicht van het sediment plus

poriewater, eventueel aangevuld met belasting door kustwerken, de poriewaterdruk en de druk van uitstromend zoetwater. In eerste instantie kan de extra druk van een opvallend kunstwerk (b.v. strekdam) dan de druppel zijn die de emmer doet overlopen. Zoals het voorbeeld van een plaatval op Vlieland met een vrachtwagen, die waarschijnlijk de directe oorzaak hiervan was (Oost in prep.). Als de hellingshoek te groot wordt kunnen de krachten zodanig toenemen dat zich plaatval voordoet. Een versteiling van de geulhelling zal zich voornamelijk voordoen bij sterke aanstroming. Hoewel de kritische hoek tussen de 28 en 34 graden ligt, blijkt uit waarnemingen dat voor plaatval hellingshoeken worden waargenomen van maximaal 25 graden (Oost, in prep.). Dus vooral in gebieden waar een geulwand dicht langs een eiland komt, waardoor een geul minder sterk lateraal kan verplaatsen en daardoor de diepte opzoekt, met een versteiling van het talud als gevolg. Aandachtsgebieden zijn geulen met een hellingshoek van 16 graden of meer. Door uitstroom van zoet water kan makkelijker plaatval optreden door het optreden van een extra druk naar buiten. Daarnaast kan zoet water leiden tot lokale verkitting van het sediment. Bij aanstroming van een dergelijke laag kan deze blijven staan als een steilwandje, terwijl het onderliggende materiaal wordt weggeschuurd waarna bezwijking en soms plaatval zou kunnen optreden. Ditzelfde kan uiteraard gebeuren als de zuigbuis van een schelpenvisser onder een wat meer erosieresistente laag de schelpen wegzuigt. De laag, welke kan bestaan uit een kleilaag, of een andere verkitte laag, kan dan op den duur bezwijken en er zou in bepaalde omstandigheden plaatval kunnen ontstaan. Er zijn aanwijzingen dat plaatval aangrijpt op een niveau met sediment verschillen (kleilaag, geulbodem) op een bepaalde diepte.

In de Westerschelde, met grotere getijdeverschillen en de beperkte laterale verplaatsingsmogelijkheden van de geulen, treedt regelmatig plaatval op. Een grote plaatval (platen van Ossensisse, Hansweert) in september 1971 was de aanleiding voor een onderzoek naar plaatvallen (Wilderom, 1972). Voor de bewuste plaatval waren de laagwaterstanden ettelijke dm's beneden de verwachte laagwaterstand (50 - 70 cm onder het laagste niveau tijdens springtij, Wilderom, 1972). Over een afstand van ongeveer 200 meter ontstond een steilwand die enkele meters boven het laagwaterniveau uitstak. In totaal is (berekend a.d.h. van een peiling in augustus en een peiling na de val) ongeveer 540.000 m³ zand verplaatst (Wilderom, 1972). Stroommetingen langs de plaatrand van de platen van Ossensisse lieten een hoge stroomsnelheid zien tot 1,87 m/sec, gemeten aan de oppervlakte en tijdens springvloed. Daarnaast vinden er tijdens deze hoge stroomsnelheden grote zandtransporten plaats over de zandplaten. Een zeer lage laagwaterstand kan een secundaire oorzaak zijn voor het optreden van zettingsvloeiing. Daardoor treden er grote waterverhangen op en grotere drukverschillen dan gewoonlijk, zodat ook de grondwaterstromingen sterker kunnen zijn. Door grote verschillen in hoogwater en laagwater ontstaan er navenant sterke stromingen. Indien er een oeververdediging of een sterk samenhangende laag aanwezig is dan bestaat de kans dat de ontgronding zich tot kolossale afmetingen ontwikkelt, in het bijzonder als het geulen betreft met grote diepten (55-65 meter in de Westerschelde). Dit wordt als volgt verklaard: Aangroeiing van de plaat brengt mee opdringing van de geul, wat door een verdediging aan een kant van de geul wordt belet; de geul zal in de onverdedigde bodem eroderen. Dit kan doorgaan tot de stroomsterkte niet meer voldoende is om dieper in de ondergrond te eroderen. Vervolgens wordt het onverdedigde zandtalud aan de plaat-zijde van de geul door de stroom aangetast. Zodra dan op een deel van dat talud de kritische helling wordt overschreden, is een labiele situatie ontwikkeld waarin zeer gemakkelijk uitvloeiing van de losgepakte zandafzetting kan plaats vinden. Een combinatie van factoren of van enkele van die factoren kan leiden tot het optreden van een plaatval. Die factoren zijn:

1. Overmatig zandtransport over de plaat in de richting van de hoofdgeul, waardoor de hoofd-geul gedwongen wordt teneinde dezelfde waterhoeveelheid te verplaatsen, om ofwel harder te stromen ofwel de bodem uit te schuren (indien laterale verplaatsing niet mogelijk is).
2. Stroomschuring langs de betreffende plaatrand.
3. Overschrijding van de kritische helling van het zandtalud.
4. Bijzonder lage waterstanden, gepaard gaande met hogere stroomsnelheden dan normaal.
5. In bepaalde gevallen aanwezigheid van een oeververdediging of van sterk samenhangende grondlagen aan de landzijde tegenover de aanzandende plaatrand.

Hoe dieper de geul hoe groter de zettingsvloeiing. De kritische helling voor materiaal van 90% tussen 150 en 300 μm en een D50 van 197 μm (matig fijn) kan ongeveer gesteld worden op 1:3 à 1:2,5 (18-21°).

In de Westerschelde is een flink aantal locaties bekend waar plaatvallen zijn waargenomen. Optredende ondiepten die in korte tijd zijn ontstaan kunnen vaak worden geweten aan plaatvallen. Zandverplaatsingen van enkele miljoenen m^3 (Galgeplaat Oosterschelde) kunnen voorkomen. Op de rand van de Middelpaas in de Westerschelde tegenover Terneuzen, lag in 1959 nog een massale schelpenrug met het hoogste punt op 2.38 meter boven NAP. Het waren vooral *Cerastoderma edule*, recent, vaak dubbelkleppig, onbeschadigd en geen gruis. Een groot deel van de schelpen is door schelpenvissers voor de plaatval verwijderd, en peilingen hebben aangetoond dat de bodem ter plaatse tussen november 1960 en april 1961 ongeveer 10 meter verdiept is. Het kan zijn dat er een mogelijk verband is tussen het verwijderen van schelpen door de schelpenvissers en het optreden van de plaatval, maar dit wordt in het artikel van Wilderom (1972) niet genoemd.

4.4. Conclusies

Het lijkt erop dat in vele gevallen de schelpenbank op de bodem van een geul een beschermende werking heeft. De schelpen kunnen door de heersende stroming niet worden geërodeerd omdat deze niet voldoende sterk is om schelpen te transporteren. Indien een schelpenbank wordt verwijderd is de verwachting dat de geul iets verder zal verdiepen, dit omdat het materiaal onder de schelpenbank waarschijnlijk zandig of kleiig is en wel kan worden getransporteerd onder de heersende stroming. Bij verwijdering van een schelpenbank is de beschermende laag dus verdwenen.

De levensduur van de schelpenbank is volledig afhankelijk van de laterale verplaatsingssnelheid van de geul. De schelpen zijn nagenoeg inactief en worden in geval van laterale verplaatsing van een geul begraven onder de binnenbochtafzettingen van de geul. Plaatvallen kunnen optreden in geulen die beperkt zijn in laterale bewegingsmobiliteit en waar tengevolge van versmalling van doorstroomprofiel, als gevolg van aanzanding van de plaat, aan de overzijde van de laterale bewegingsrichting een verdieping en versteiling van het talud optreedt. In het geval van schelpenwinning in een dergelijke geul, bestaat de kans dat de geulwand dermate steil wordt dat plaatval kan optreden. Er zijn echter maar een beperkt aantal geulen in de Waddenzee die in horizontale zin niet meer kunnen migreren.

5. Winning (dimensies, winbaarheid, winputgedrag)

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op diverse zaken rondom de winning. Er is getracht om in historische zin een overzicht te geven van de gewonnen hoeveelheden schelpen. In de rapporten van Van Dobben (2000) en Cramer (1998) is hier niet specifiek op ingegaan, en dit kan dus worden beschouwd als een aanvulling op deze studies. Daarnaast wordt er wat meer in detail ingegaan op de vraag: wat is het gedrag van een winput, en na welke tijd is een winput weer in evenwicht met zijn omgeving. Ook zal kort aandacht besteed worden aan de vertroebeling van het water ten gevolge van schelpenwinning.

5.2. Dimensies van winningen

Uit een aantal oude geschriften blijkt dat reeds in de 14^e eeuw al op beperkte schaal schelpenwinning op het strand plaatsvond (Rijkswaterstaat, 1977). M.b.v. zgn. beugels werden op het strand schelpen gewonnen en met paard en wagen afgevoerd. De op deze wijze gewonnen schelpen waren zeer geliefd vanwege hun hoog volumegewicht aan schelpen van 0.75-0.80 ton/m³ (Rijkswaterstaat, 1954). Opgravingen in Allingawier hebben aangetoond dat er voor het jaar 1200 reeds schelpen als fundering werden gebruikt (Rijkswaterstaat, 1977). In de 16^e eeuw werd er blijkbaar al zo intensief schelpen gewonnen dat er voor het eerst bepalingen gesteld werden aan de winning om schade aan de zeewering door overbevissing te voorkomen (Rijkswaterstaat, 1954). Vanaf 1600 is er veel gewonnen, niet dat de techniek groot was om veel te winnen maar voornamelijk omdat er veel mensen actief mee bezig waren. Omtrent de hoeveelheden gewonnen schelpen in de periode tot de 20^e eeuw zijn geen cijfers bekend. Echter er mag uit het feit dat de schelpkalk toen de enige metselspecie vormde worden afgeleid dat de gewonnen hoeveelheden schelpen vrij aanzienlijk moesten zijn geweest. Vanaf de 16^e eeuw nam het bouwen van stenen gebouwen, en daaruitvoortvloeiend het gebruik van schelpkalk als metselspecie sterk toe. Daarnaast komt nog dat zowel in Friesland als in Groningen in vrijwel ieder dorp het dorpsplein, de laan rond het kerkhof en de verbindingen tussen de belangrijkste plaatsen in het dorp met schelpen waren verhard. In veel boerderijen langs de kuststrook in Friesland bestond de deel uit een platgewalste laag schelpen (Reitsma, pers com.). De oorspronkelijke winmethodes bestonden uit:

- Het bijeenharken en opscheppen van schelpen langs de zeeweringen, op het strand en op de platen van de Waddenzee. M.b.v. zgn. beugels werden de schelpen op het strand gewonnen en vervolgens met paard en kar afgevoerd. De schelpen die op deze wijze werden gewonnen hadden een hoog volumegewicht aan schelpen 0.75-0.80 ton/m³ (Gewicht van hoeveelheid schelpen t.o.v. het bruto gewicht). Deze winningsmethode werd beugelen of kalksteken genoemd.
- Het vissen met een soort baggerbeugel vanuit schepen. Dit werd schilderen genoemd.

Aan het eind van de 19^e eeuw vreesde men, dat de exploitatie van schelpen aan de Nederlandse kust het terugtrekken van de kust tot gevolg had. Deze vrees was de aanleiding tot onderzoek (Diesen et al., 1896). Uit dit onderzoek bleek dat voor de Hollandse kust in die tijd vanaf het strand gemiddeld 46.000 m³ schelpen per jaar werden weggehaald, en in de Waddenzee nog 24.000 m³. De conclusie van het onderzoek was dat de winning in het niet vielen vergeleken met de natuurlijke verplaatsingen van zand en schelpen.

In de 19^e eeuw werd de vraag naar schelpkalk dermate groot, dat men op zoek ging naar nieuwe winmethodes.

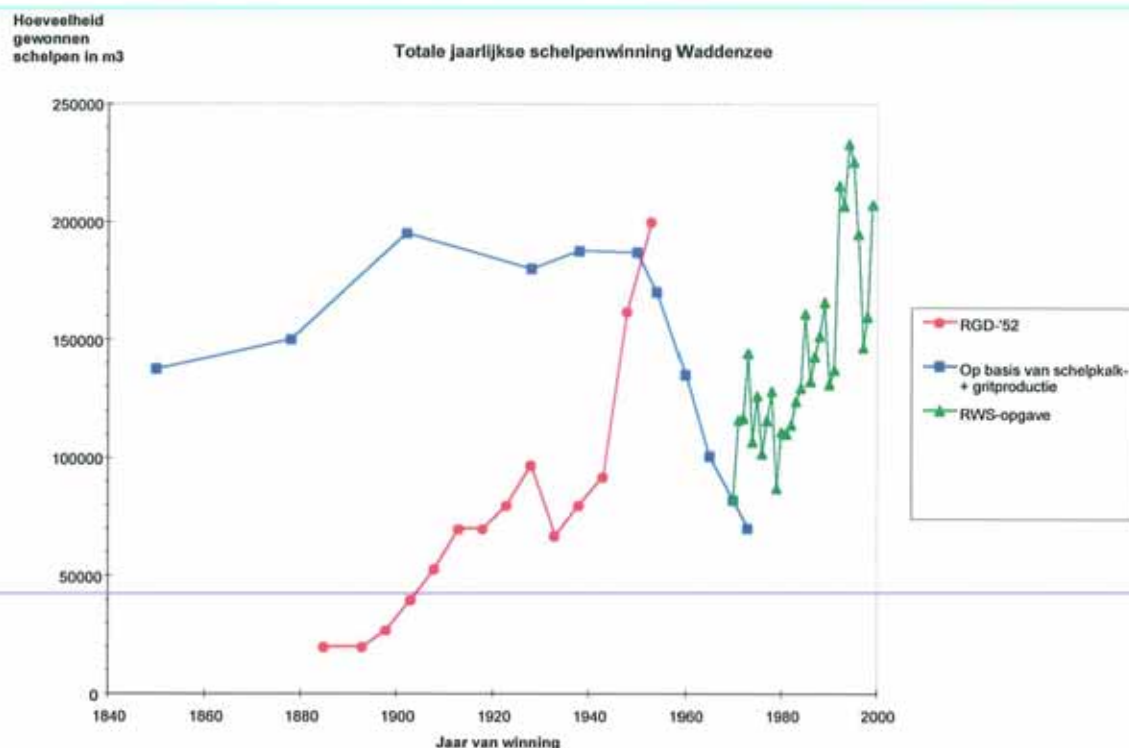
Uiteindelijk bleek de stoomschelpenzuiger het best te voldoen. In 1883 begonnen de eerste stoomschelpenzuigers in de Waddenzee (Geologische stichting, 1952). De capaciteit in het van de eerste zuigers lag ongeveer bij 10 m³ schelpen per uur. Deze methode bood naast het grote voordeel van een grotere productie de mogelijkheid om de dieper gelegen lagen schelpen te kunnen exploiteren. Vanaf 1918 werd het zuigen van schelpen per vergunning geregeld en kwam er inzicht in de omvang van het zuigbedrijf. Tot die tijd zijn er dus geen gegevens voor wat betreft hoeveelheden beschikbaar. In het begin van de 20^e eeuw tussen 1910 en 1940 werden op deze wijze voornamelijk in de Westelijke Waddenzee jaarlijks ongeveer 200.000 m³ schelpen gewonnen (Rijkswaterstaat, 1977, 1979). In 1954 waren er ongeveer 15 schelpenzuigers actief met een capaciteit van 50 m³ per uur Rijkswaterstaat, 1954). In het rapport van de geologische dienst wordt een schatting gemaakt van de totale hoeveelheid gewonnen schelpen tot 1953 (Geologische Stichting, 1952). Er is een schatting gegeven van 5.250.000 m³ gewonnen schelpen (Geologische Stichting, 1952). Vanaf 1929 tot 1954 zijn de gegevens afkomstig van de Dienst der Belastingen in Rotterdam. De periode van 1883 tot 1929 zijn de hoeveelheden geschat uit het aantal en de capaciteit van de zuigers. In 1954 werd ongeveer 200.000 m³ schelpen gezogen. De gegevens zijn weergegeven in figuur 13. De vangstgebieden liggen voornamelijk in het Westelijke waddengebied; in de jaren 1953-1954 werden veel schelpen gewonnen onder Ameland en Schiermonnikoog. De jaarlijkse aanwas aan schelpen werd in 1954 geschat op ongeveer 150.000 tot 200.000 m³ (Rijkswaterstaat, 1954). De jaarlijks gewonnen hoeveelheid ongeveer 250.000 m³ (Geologische stichting, 1952). Halverwege de 20^e eeuw liep de vraag naar schelpkalk, door aanvoer van kalk uit steengroeves uit Duitsland en België sterk terug. Tot 1 september 1971 vond schelpenwinning plaats op basis van het Baggerreglement. Volgens dit reglement mocht er op vrijwel de gehele Waddenzee worden gewonnen. De Dienst der Domeinen ontvangt opgaven van de gewonnen hoeveelheden. Vanaf 1967 vond jaarlijkse registratie bij Rijkswaterstaat plaats, vanaf 1970 zijn de gegevens echter pas betrouwbaar (Rijkswaterstaat, 1977).

Van de schone schelpen wordt ongeveer de helft verwerkt tot kippengrit, de rest wordt gebruikt voor drainagedoeleinden in bloemkwekerijen en de tuinbouw. De laatste paar jaren wordt een klein deel gebruikt als isolatie- en vochtreguleringsmateriaal in de bouw. Kleischelpen worden gebruikt voor aanleg van fietspaden en sportvelden. De vraag naar schelpen is nog dermate hoog dat er nog steeds een belangrijk bestaansmogelijkheid is voor een aantal schelpenwinners. In het rapport "Marktonderzoek Schelpen" wordt de markt voor schelpen beschreven (Rijkswaterstaat, 2000).

De actieve schelpenwinning is in het Duitse Waddengebied in de 2^{de} helft van de jaren 70 gestopt. Verouderde winningschepen en een afnemende vraag naar schelpkalkproducten had tot gevolg dat er geen economische basis meer was voor een voortduren van de schelpenwinning. In 1985 is winning van grondstoffen buiten winning ten behoeve van de kustverdediging, bij wet verboden (Flemming, pers. com).

In figuur 12 en tabel 15 worden de jaarlijkse hoeveelheden gewonnen schelpen in de Waddenzee weergegeven. De cijfers zijn gebaseerd op de winningsgegevens van Rijkswaterstaat vanaf 1970, de gegevens uit het inventarisatie rapport van de Rijks Geologische Dienst uit 1952 (lijn met punten) en gegevens van de schelpkalk- en grit productie. De hoeveelheden geproduceerde schelpkalk is omgerekend naar m³ schelpen. 1 m³ schelp is ca. 700 kg schelpen en is ca. 500 kg kalk of 2,5 m³ schelpen = 1 m³ schelpkalk (bron: Vereniging van Schelpenvissers). De gegevens van voor 1950 betreffen alleen de schelp-kalk productie over geheel Nederland en zijn dus aan de hoge kant. Rijkswaterstaat vermeld echter

dat in de Waddenzee in de jaren 1910-1940 gemiddeld 200.000 m³ schelpen per jaar zijn gewonnen (Rijkswaterstaat, 1978).



Figuur 12. Jaarlijkse hoeveelheid gewonnen schelpen in de Waddenzee. Volgens Geologische Stichting (RGD-'52), Rijkswaterstaat (RWS-opgave) en op basis van de schelpkalk en -grit productie. De schatting van de Geologische Stichting is aanmerkelijk lager, de bron van deze schatting wordt in dit document niet beschreven.

jaar	Geolog. Stichting 1952	Op basis van schelpkalk- en gritproductie	RWS-opgave	schelpkalk-grit-productie	cumulatief per jaar	cumulatief per jaar
		200.000 m ³ schelpen = 80.000 m ³ kalk			Op basis van productie schelpkalk/grit + RWS	Op basis van Geologische Stichting + RWS
	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
1850		137.500		55.000	137.500	
1878		150.000		60.000	4.168.750	
1885	20.000					20.000
1893	20.000					180.000
1898	27.000					321.000
1902		195.000		78.000	8.481.250	
1903	40.000					522.000
1908	53.000					801.000
1913	70.000					1.170.000
1918	70.000					1.590.000
1923	80.000					2.040.000
1928		180.000		72.000	13.543.750	
1928	97.000					2.571.000

jaar	Geolog. Stichting 1952	Op basis van schelpkalk- en gritprod.	RWS- opgave	schelpkalk- productie	grit- productie	cumulatief per jaar	cumulatief per jaar
		200.000 m ³ schelpen = 80.000 m ³ kalk				Op basis van productie schelpkalk/grit + RWS	Op basis van Geologische Stichting + RWS
	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
1933	67.000						3.063.000
1938		187.500		75.000		15.565.000	
1938	80.000						3.504.000
1943	92.000						4.020.000
1948	162.000						4.782.000
1950		187.000		50.000	62.000	17.999.250	
1953	200.000						5.868.000
1954		170.000		44.000	60.000	18.891.750	
1960		135.000		32.000	55.000	19.959.250	
1965		100.500		21.000	48.000	20.665.750	
1970		82.000		16.000	42.000	21.213.250	
1970			82.369			21.295.619	8.409.321
1971			115.786			21.411.405	8.525.107
1972			116.484			21.527.889	8.641.591
1973		70.000		12.000	40.000	21.527.889	8.641.591
1973			144.041			21.671.930	8.785.632
1974			106.502			21.778.432	8.892.134
1975			125.972			21.904.404	9.018.106
1976			101.518			22.005.922	9.119.624
1977			115.548			22.121.470	9.235.172
1978			128.050			22.249.520	9.363.222
1979			86.912			22.336.432	9.450.134
1980			110.770			22.447.202	9.560.904
1981			109.885			22.557.087	9.670.789
1982			113.665			22.670.752	9.784.454
1983			123.640			22.794.392	9.908.094
1984			129.360			22.923.752	10.037.454
1985			160.885			23.084.637	10.198.339
1986			132.075			23.216.712	10.330.414
1987			142.785			23.359.497	10.473.199
1988			151.335			23.510.832	10.624.534
1989			165.805			23.676.637	10.790.339
1990			130.970			23.807.607	10.921.309
1991			137.105			23.944.712	11.058.414
1992			215.120			24.159.832	11.273.534
1993			206.608			24.366.440	11.480.142
1994			232.830			24.599.270	11.712.972
1995			225.070			24.824.340	11.938.042
1996			194.473			25.018.813	12.132.515
1997			146.486			25.165.299	12.279.001
1998			159.690			25.324.989	12.438.691
1999			207.042			25.532.031	12.645.733
Totaal						25.532.000	12.646.000

Tabel 15. Winningsgegevens vanaf 1850.

De totaal hoeveelheid gewonnen schelpen uit de Waddenzee vanaf 1850 varieert tussen 12.700.000 m³ en 25.500.000 m³. Bij een zeer ruwe schatting van de winning van de 14-15^e eeuw tot aan 1850 van ongeveer 10.000 m³ per jaar komt het totaal wat verwijderd is uit het Waddensysteem op ongeveer 15.000.000 m³ tot 30.000.000 m³ door menselijk handelen.

Er zijn in de literatuur geen gegevens gevonden betreffende de dimensies van de winputten. Bij een laadcapaciteit van een schelpenzuiger van 1000 m³ en een gemiddelde percentage aan schelpen in het sediment van 5% wordt er ongeveer 9000 m³ materiaal verwijderd. Het teruggestort materiaal zal niet direct weer terechtkomen in de gezogen winput. Door stroming, turbulentie zal het teruggestort materiaal op enige afstand van de winput weer op de bodem terechtkomen.

5.3. Winbaarheid en Winputgedrag

Informatie afkomstig van schelpenwinners (Van Dobben, 2000), geeft aan dat winning voornamelijk plaatsvindt doormiddel van het zuigen van een kuil in de bodem op een locatie waarvan verwacht wordt dat er schelpen aanwezig zijn. Het omliggende sediment, met daarin de schelpen, valt dan in de kuil en wordt naar boven gezogen. Het materiaal wordt vervolgens aan boord gezeefd. De kuil kan maximaal 3 a 4 meter diep worden. Bij een dieper wordende kuil bestaat de kans dat de zuigbuis breekt. De maximale waterdiepte ligt hierbij ongeveer bij 20 meter. Het opgezogen materiaal wordt over een rooster geleid voor het uitfilteren van de meest grove delen zoals stenen, kleibrokken en veenbrokken. Het materiaal wordt vervolgens door een roterende horizontale trommel geleid, welke een geperforeerde wand bezit. Door de wand gaan de fijnere deeltjes zoals zand, en kleine schelpfragmenten met het water weer terug naar zee. De grovere deeltjes wordt vervolgens in het ruim van het schip of in het ruim van een naastgelegen vrachtschip gedumpt en afgevoerd.

Een schelpenlaag op een bepaalde diepte onder de zeebodem kan pas worden opgezogen als de zuigbuis onder de basis van deze schelpenlaag zich bevindt. Het materiaal valt dan in de gemaakte kuil en kan worden opgezogen. Het schip wordt aan zijn ankerketting al zuigende iets naar voren getrokken, waardoor de kuil in een richting wordt vergroot. De zuiger maakt dus geen rond gat loodrecht in de bodem, maar zuigt een kuil waarvan de ellipsvormige omtrek steeds groter wordt naarmate er dieper gezogen wordt. De wanden van een dieper wordende kuil zullen steeds ongeveer dezelfde helling behouden, zodat bij dieper zuigen de wanden van alle kanten instorten.

Waarneming tijdens zuigen: Nadat een gat was gezogen van ruim 20 meter diameter en een diepte van 6 meter bleek dit na ca. 10 minuten nog slechts 3,5 meter diep te zijn en na ong. 30 min. was hiervan niets meer te bespeuren. Na zeer korte tijd is er van het gezogen gat niets meer te bespeuren (Geologische stichting, 1952).

Als gevolg van lokaal onttrekken van bodemmateriaal ontstaat op de winplaats een verdieping in de bodem van de Waddenzee. De aanwezigheid van de ontstane winput als verstoring van de natuurlijke situatie beïnvloedt de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling van het betreffende gebied. Voor de aanvoer van sediment naar een winput kunnen met betrekking tot de stroomsnelheid globaal de volgende categorieën worden onderscheiden:

- Lage stroomsnelheden waarbij zich alleen slib in suspensie bevindt. Een gedeelte van dit slib zal zich dan afzetten in de winput.

- Matige stroomsnelheden waarbij naast gesuspendeerd slib ook bodemtransport plaatsvindt. Het materiaal dat in de put verdwijnt zal in eerste instantie afkomstig zijn in de aangrenzende (stroomopwaartse) gebieden. Dit gebied zal ook dan uit evenwicht geraken. Dit gaat door tot dat er een nieuw evenwicht is bereikt.
- Groter stroomsnelheden met zand in suspensie. Dit zand kan, naast van aangrenzende gebieden, ook van grotere afstanden afkomstig zijn.

Uit waarnemingen aan een zandwinput op de grens van geul en plaat in het Kikkertgat blijkt dat de put in enkele jaren weer was opgevuld en de platen waren aangepast (Rijkswaterstaat, 1981). Over invloed van zandwinning op deze morfologische verandering viel niets te zeggen. De put is voornamelijk gevuld met de grovere fractie van het gesuspendeerde materiaal en in mindere mate met het bodemmateriaal van de geul. Het fijnere deel van het gesuspendeerde materiaal heeft in het algemeen onvoldoende gelegenheid om tijdens het passeren van de put te bezinken en zal slechts een zeer geringe bijdrage leveren in het opvullen van een put. De mediane korrelgrootte van een zandwinput in de Blauwe Slenk lag tussen de 120 μm en de 190 μm , met het meest grove deel nabij de putrand (Rijkswaterstaat, 1981). Waarnemingen geven aan dat een winput voor schelpen vaak dermate klein is dat deze vaak na 24 uur al niet meer is terug te vinden (Rijkswaterstaat, 1981 en Geologische Stichting, 1952). De invloed op de morfologische ontwikkelingen zal dan ook zeer gering zijn.

Bij het winnen van schelpen voor de kusten van de Waddeneilanden kan dit leiden tot een lokale verdieping van de onderzeese kustoever. Verwacht mag worden dat deze morfologische verstoring geleidelijk weer zal opvullen tot het oorspronkelijk profiel. Echter de tijdschalen waarop dit zal plaatsvinden zijn afhankelijk van de diepte: binnen enkele jaren voor diepten rond NAP -5 m en enkele decaden voor diepten van NAP -10 tot -15 m (Stive en Bosboom, 1999). De ruimtelijke schaal die betrokken is bij deze opvulling is groot, te weten kilometers in kustlangse richting, zodat uiteindelijk de effecten van lokale winning zich veel globaler zullen manifesteren (Stive en Bosboom, 1999). De additionele erosie van 0.16 m/jaar, loodrecht op de kust voor de westelijke eilanden en 0.08 m/jaar voor de oostelijke eilanden is gering ten opzicht van de fluctuaties, die vele meters erosie en/of aanzanding per jaar kunnen bedragen (Stive en Bosboom, 1999).

Om het wininputgedrag te voorspellen zijn er rekenmodellen ontwikkeld waarmee reactietijden kunnen worden berekend wanneer een winput weer in evenwicht is met zijn omgeving. Hieronder volgt in het kort een samenvatting voor het berekenen van (responstijden) zoals deze besproken is in Gerritsen (2000)

Morfologische "response times" hangen af van de grootte van de verstoring en de grootte van het gebied. Morfologische verstoringen kunnen een natuurlijke oorzaak hebben of ze kunnen het gevolg zijn van menselijk handelen. Grote reactietijden zijn verbonden met grootschalige verstoringen zoals de afsluiting van de Zuiderzee en Lauwerszee, resp. in 1932 en 1969. Morfologische verandering t.g.v. deze grootschalige ingrepen zijn nog steeds bezig. De morfologische aanpassing in de zeegat van Texel en het Friesche zeegat na de afsluiting van de getijdebekkens begint in de nabijheid van het zeegat en propageert landinwaarts waar geul-aanpassingen in een later stadium ontwikkelen. Gebieden achter in de bekkens hebben in dat geval een langere responstijd dan gebieden nabij het zeegat. Menselijke activiteiten met minder impact zijn baggeractiviteiten zoals het op diepte houden van vaarwegen en winning van zand of van schelpen voor industriële toepassingen. Deze variëren van klein tot groot en het is te verwachten dat ook de tijd die nodig is voor morfologische aanpassing aan een nieuw evenwicht varieert van kort (jaren) tot lang (meerdere decades). Een van de meest geschikte

modellen voor morfologische aanpassingen van waaruit responstijden kunnen worden gededuceerd is het ASMITA model. Dit model is met name gemaakt voor het bestuderen van de interactie tussen een getijdebekken en de nabij gelegen kust, gebaseerd op de volgende 5 elementen: getijdebekken, getijdegeulen, ebb-tidal delta en kust. Het ASMITA model geeft goede resultaten in het voorspellen van responstijden voor verschillende types en maten van morfologische verstoringen en verschillende tijd-schalen. Deze kunnen variëren van het opvullen van een bagger/winput tot aan de aanpassingen van een getijdebekken aan de veranderingen in zeespiegel. De gevonden uitkomsten van het modelonderzoek is goed in overeenstemming met de observaties en de verwachtingen. Het opvullen van winputten voor zandwinning varieert van enkele jaren tot 1 decade (Gerritsen, 2000)

In de gebruikte modellen wordt het principe van evenwichtsconcentratie toegepast. In het geval dat alle elementen van een morfologisch systeem in evenwicht zijn, bezitten zij dezelfde sedimentconcentraties en is er geen transport van sediment. Dit wordt de globale evenwichtsconcentratie of CE genoemd. In een lokaal systeem wordt deze concentratie C_e genoemd, indien het systeem binnen één morfologische sectie wordt beschouwd. Als een systeem uit evenwicht is zal het trachten weer terug in evenwicht te komen door transport van sediment vanuit/naar een andere sectie in het morfologische systeem. De ontwikkeling van het actuele morfologische stadium naar zijn evenwichtssituatie gedraagt zich als een exponentieel verval proces (response tijdfactor, τ), gebaseerd op de aanname dat de snelheid van de aanpassing aan een verstoring naar een evenwichtssituatie evenredig is aan de resterende grootte van de verstoring. Observaties maken duidelijk dat dit vaak het geval is. Als de sediment concentraties van naast elkaar liggende eenheden verschillende waarden hebben zal er transport plaatsvinden tussen de verschillende eenheden.

Het initiële volume van een winput is V_0 . Na verloop van tijd t is het overgebleven volume gereduceerd tot V en kan de aanname worden gedaan dat de snelheid van verdere volumevermindering dV/dt , evenredig is met V . Hierbij kan de volgende formule worden opgesteld:

$$dV/dt = -(1/\tau)V$$

Waarin: $1/\tau$ een evenredigheidsconstante is voor de snelheid waarmee de winput opvult. Dus volgt hieruit:

$$V/V_0 = e^{-(t/\tau)}$$

De parameter τ bepaald de tijdschaal wanneer de aanpassing begint en is gedefinieerd als de responstijdschaal van het aanpassingsproces. Deze formule laat zien dat de aanpassingstijd de tijd t bepaald welke nodig is om de grootte van de verstoring te verminderen tot $(1/e)V = 0.37V_0$. Bij een tijd van $t = 2\tau$ zal het overgebleven volume verminderen tot $0.14 V_0$ aan bij $t = 3\tau$ tot een waarde van $0.05 V_0$.

$$dV/dt = -(V_0/\tau)e^{-(t/\tau)}$$

geeft: $\tau = -V_0/(dV/dt)_{t=0}$

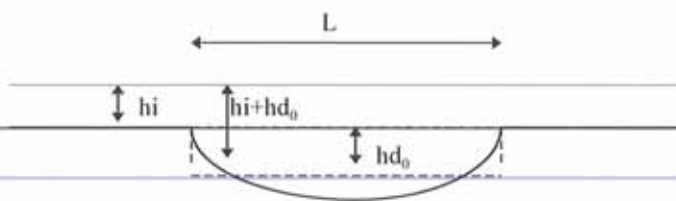
Waarbij de waarde voor $-(dV/dt)_{t=0}$ het transport c.q. de opvulling van de winput aan het begin van het proces representeert.

Reactietijdschalen voor verschillende zandwinputten, waarvan de sedimentatieproces goed is gedocumenteerd, zijn berekend en variëren tussen de 0.5 en 16 jaar. Reactietijden voor schelpenwinputten zullen in elk geval niet hoger liggen.

Voor een geschematiseerde situatie waarbij uitgegaan wordt van een ronde winput, kunnen de responstijdschalen worden afgeleid uit de volgende formule (Gerritsen, 2000):

$$t = [1/(CE(1-\alpha))] * [(hd_0/ws) + (hd_0/hi) (L^2/4D)]$$

$$\alpha = (hi/(hi+hd_0))^n$$



Waarin:

- L = diameter van winput
- hi = initiële waterdiepte
- hd₀ = diepte volgens de berekening $V_0/(1/4\pi L^2)$ is diepte in het geval van een gesneden cilinder
- ws = sediment uitwisselingsparameter in m/s
- CE = evenwichtsconcentratie
- n = factor gerelateerd aan de kracht van snelheid voor het genereren van sediment concentraties en ligt gewoonlijk tussen 2 en 4. n=3 voor fijnkorrelig sediment.
- D = Dispersie coëfficiënt, min of meer evenredig met de diameter L
- t = reactie of respons tijd in jaren

De volgende waarden zijn gebruikt voor de verschillende parameters.

- CE = 10^{-5}
- ws = 0.01 m/s of 0.005 m/s
- n = 3
- D = 250 m²/s.

Een ander gebruikte formule op basis van empirische gevonden gegevens is (Gerritsen, 2000):

$$t = 0.00297V_0/(\sqrt{A_0} \cdot hi)$$

Waarin:

- V₀ = initiële volume van de winput
- A₀ = de oppervlakte
- t = reactie of respons tijd in jaren

Een aantal winputten is nader beschouwd voor een vergelijking tussen de twee berekeningsmethodes (zie tabel 16.). Er blijkt een redelijk goede overeenstemming te zijn tussen de waargenomen τ -waarden en de berekende waarden, waarbij de waarden voor w_s en D zijn aangenomen.

Locatie:	Oppervlakte m^2	Volume winput m^3	τ -waarde waargenomen	τ -waarde berekend $w_s=0.01/0.005$ m/s
Boontjes	175000	956000	3.4	3.4/5.2
Griend	46000	278000	5.2	3.8/5.7
Terschelling 1	14000	161000	7.9-9.0	4.7/8.4
Vlieter	1000000	4000000	16	6.1/7.6

Tabel 16. Reactietijden van een aantal zandwinputten, waargenomen en berekend (Gerritsen, 2000).

In het geval van een relatief smalle maar vrij langgerekte winput zoals in het rapport van Gerritsen (2000) besproken nabij een wrak (initiële volume = $28140 m^3$), is aan de hand van 2 hydrografische meetsessies de initiële sedimentatiesnelheid gesteld op $4846 m^3$ zand en silt in een maand. $\tau = -V_0/(dV/dt)_{t=0}$ geeft vervolgens $28140/4846 = 5.8$ maand $\approx 1/2$ jaar. Berekend, met de volgende waarden voor de parameters: $CE = 10^{-5}$; $w_s = 0.01 m/s$; $D = 250 m^2/s$; $n = 3$; $h_i = 9.6 m$; $h_{d0} = 3.13$ volgt een τ -waarde van 1.8 jaar. Als gevolg van een grotere initiële diepte kan D verhoogd worden naar $500 m^2/s$ en omdat het zand voor $2/3$ uit zand en voor $1/3$ de uit silt bestaat en de stroomsnelheden lokaal oplopen tot meer dan $1 m/s$ kan de waarde voor w_s verhoogd worden tot $0.02 m/s$ waardoor de τ -waarde 0.48 jaar wordt. Exacte vaststelling van de verschillende waarden is dan ook belangrijk. In het geval van een schelpenwinput zijn de dimensies waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte.

Voor berekening van τ is het alleen nodig om het begin van de waarde van mate van transport te weten te komen en is het niet strikt noodzakelijk om het gehele proces van begin tot eind te weten.

5.4. Troebelheid

Er is geen specifieke literatuur gevonden die de effecten van schelpenwinning op de troebelheid beschrijft. In een enkele artikel van Rijkswaterstaat (1979, 1981) worden opmerkingen geplaatst t.a.v. troebelheid bij schelpenwinning. Bij schelpenwinning zal ter plaatse tijdens de winning een verhoogde troebelheid van het water ontstaan als gevolg van het uitspoelen of retourneren van het zand en voornamelijk van de fijnere fractie tijdens het beladen van de hopper. Over de laterale verspreiding van het zwevende stof gehalte wordt in deze artikelen geen opmerking over gemaakt. De mate van troebelheid hangt af van een aantal factoren (Rijkswaterstaat, 1979 en 1981):

1. Winmethode en het materieel
 - 1.1. winplaats
 - 1.2. materieel
 - 1.3. winsnelheid
 - 1.4. periode t.o.v. jaar en getij
 - 1.5. vorm winput (in of langs geul, dwars op de geul diepte put)
 - 1.6. grootte van de winput hoeveelheid gewonnen schelpen/zand
2. intensiteit van de winning; capaciteit
3. lokale omstandigheden; samenstelling van het bodemmateriaal (kleischelpen/schone schelpen)

5.5. Conclusies met betrekking tot de winning, winbaarheid en winputgedrag.

De volumes van winning zijn vanaf 1970 goed en nauwkeurig gedocumenteerd. Met betrekking tot de winningsgegevens van vóór 1970 moet een schatting worden gemaakt. Aan de hand van schelpkalk- en gritproductie waarbij bekend is welk deel afkomstig is uit de Waddenzee kan een schatting worden gemaakt van de winninghoeveelheden van de periode van ruwweg 1885 tot 1970. Van de winning vanaf de Middeleeuwen tot aan 1885 kan alleen een grove schatting worden gemaakt. Cumulatief kan de totale hoeveelheid gewonnen schelpen ruw worden berekend en ligt tussen 15.000.000 m³ en 30.000.000 m³.

Het gedrag van een winput kan door middel van berekening worden voorspeld. De berekeningen zijn echter volledig gebaseerd op zandwinputten. Dimensies van winputten die zijn ontstaan door schelpenwinning zijn in vergelijking met de zandwinputten vaak kleiner. Voor het geval van schelpenwinning kan worden gesteld dat een winput na hooguit enkele decades weer in evenwicht is met zijn omgeving, als bij de berekening wordt uitgegaan van de randvoorwaarden en parameter voor zandwinputten. Door zowel schelpenwinners als een waarneming door de Geologische Stichting (1952), wordt aangegeven dat er na een paar dagen niets meer van de winput te zien is.

Er zijn echter wel verschillen. Zoals in hoofdstuk 4 reeds genoemd is lijkt het erop dat in een aantal gevallen de schelpenbank op de bodem van een geul een beschermende werking heeft. De schelpen kunnen door de heersende stroming niet worden geërodeerd omdat deze niet voldoende sterk genoeg is om schelpen te transporteren. Indien een schelpenbank wordt verwijderd kan de geul verder verdiepen, dit omdat het materiaal onder de schelpenbank waarschijnlijk zandig of kleiig is en wel kan worden getransporteerd onder de heersende stroming. Bij verwijdering van een schelpenbank is de beschermende laag verdwenen. Waarschijnlijk is dit alleen het geval indien een schelpenbank aan de oppervlakte van een geulbodembodem zich bevindt.

6. Conclusies

In dit hoofdstuk zullen enige beknopte conclusies worden gegeven. Analyse en hypothese vorming van de gevonden gegevens zullen worden gegeven in een volgend rapport in het kader van dit project.

Schelpenbanken komen op grote schaal voor in de Waddenzee. In de Noordzeekustzone lijkt de accumulatie van schelpen in banken geringer te zijn. Alleen de muiën, de geulen die haaks op de kust staan, komen in aanmerking als potentiële verzamelplaatsen van schelpen. De schelpenbanken in de Waddenzee met een grotere dimensie komen alleen voor in de grotere geulen, echter niet in de zeegaten tussen de eilanden. Het belangrijkste accumulatieproces in deze lijkt het verplaatsen van geulen in horizontale richting waardoor platen worden aangesneden. De aanwezige schelpen in de platen vallen vervolgens naar de bodem van de geul en blijven op de geulbodem achter. De stroming op de bodem van de geul is niet dermate hoog dat massaal schelptransport voorkomt. Enkel in het geval van stormen met hoge golfenergie en sterke stroming kunnen de schelpen worden verplaatst. De afstand van verplaatsing zal echter minimaal zijn. De meeste kans op dikke schelpenlagen komt voor in geulen die zich verplaatsen en verdiepen. Daarnaast moet er op de geulbodem een voldoende sterke stroming overblijven om het zand weg te transporten, zodat het schelpmateriaal uitgesorteerd wordt.

Er moet nauwkeurig gekeken worden naar de aanwas c.q. productie cijfers van kokkels. Het RIVO werkt met 'levende' kokkelbestanden aan versgewicht. Omrekening van versgewicht naar kokkelschelpkalkgewicht maakt de kans op fouten groot. Er is namelijk een grote variatie in vleesgewicht, afhankelijk van het tijd van het jaar, het voedselaanbod en de grootte van de schelp. Daarnaast zijn de cijfers van het RIVO gebaseerd op de jaarlijkse levende bestanden, de sterfte cijfer moet hierin nog worden meegenomen. De cijfers van Beukema en Cadée (1997) lijken op dit moment de beste benadering te geven voor de jaarlijkse schelpkalkproductie door kokkels in de Waddenzee. In dit onderzoek is het kokkelschelpkalkgewicht direct gemeten. Exclusief verliesposten komen Beukema en Cadée op een gemiddelde kokkelschelpkalkgewicht van 84 gram per m² droogvallende plaat voor het Balgzand gebied. Geëxtrapoleerd naar het gehele Waddengebied (1500 km² droogvallende plaat) geeft dit 126.000 ton bruto aanwas. Inclusief verliesposten (30%) is het netto jaarlijkse kokkelschelpkalkproductie volgens Beukema en Cadée **132.000 m³** voor de droogvallende platen in de Waddenzee. Sublitoraal komt hier waarschijnlijk nog ongeveer 10% bij (Essink, 1993). Omdat de bekende schelpenvoorkomens voor ongeveer 75% uit kokkels bestaat en voor 25% uit overige soorten kan er voor de totale schelpkalkproductie nog 30% bij worden opgeteld, uitgaande van de aanname dat de verhouding kokkelschelpen-overige schelpen in het verleden ongeveer hetzelfde is dan heden. Dit geeft een totaal schelpkalk productie van **126.000 ton of 188.500 m³** schelpkalk.

Winning van schelpen vindt al zeer lang plaats, in de vroegere eeuwen was de techniek voor het winnen van grote hoeveelheden nog niet aanwezig. Maar omdat er wel veel mensen ingeschakeld konden worden moet de gewonnen hoeveelheid in vroegere tijden niet worden onderschat. Redelijke schatting van de totaal hoeveelheid gewonnen schelpen sinds 1850 tezamen met ruwe schatting van voor 1850 laat zien dat de totale hoeveelheid gewonnen schelpen in de Waddenzee ligt in de orde van grootte van 30.000.000 m³.

Schelpenwinputten zijn van beperkte grootte en liggen vaak in dynamische gebieden. De verwachting is dan ook dat de winputten snel opvullen. Reactietijden, de tijd die nodig is om aan een nieuw evenwicht te voldoen, die gevonden en berekend worden, op basis van vergelijkbare zandwinputten liggen in de orde van grootte van een paar maanden tot hooguit enkele jaren. In de praktijk blijkt dat een winput al na enkele uren of dagen al voor een groot gedeelte kan zijn opgevuld. Schelpenbanken die aan de oppervlakte van een geulbodem liggen en verwijderd worden, kunnen een ander effect laten zien. De schelpenbank kan in een dergelijk geval als een bodembeschermende laag worden beschouwd, bij verwijdering ervan kan de geul verdiepen, omdat de heersende stroomsterkte te laag is voor het eroderen van de schelpen maar hoog genoeg voor het eroderen van de onderliggende sediment. Kwantitatief zijn hier echter geen gegevens over, nader onderzoek hierover is aan te bevelen.

Er zijn geen gegevens gevonden betreffende de vertroebeling van het water door schelpenwinning.

In het geval van mogelijke plaatvallen a.g.v. schelpwinning moet voorzichtigheid worden betracht in geulen welke begrensd worden in hun laterale bewegingsmogelijkheden waardoor de helling in de geul kan oplopen tot boven een kritische hoek (ongeveer 16 graden). De verwachting is dat er in de Waddenzee slechts enkele gebieden voor in aanmerking komen.

7. Literatuurlijst

* = ook behandeld in rapport van Van Dobben (2000)

+ = ook behandeld in de notitie en mer Cramer (1998).

- Aigner, T., 1985. Storm depositional systems. Lecture notes in Earth Science vol. 3. 1-174
Berlijn.
- Allen, J.R.L., 1984. Sedimentary structures their character and physical basis. Elsevier:
Developments in Sedimentology no. 30
- Alphen, J.S.L.J. van, M.A. Damoiseaux, 1989. A geomorphological map of the Dutch
Shoreface and adjacent part of the continental shelf, Geologie en Mijnbouw, vol 68, no. 4,
p.p. 433-445.
- Baas, J., 1991. Fysische sedimentologie deel 1 & 2. RUU afdeling Sedimentologie.
- +Baptist, H.J.M. en E. Jagtman, 1997. Watersysteemverkenningen 1996. De amoebes van de
zoute wateren. Rapport RIKZ-97.027
- Beets et al 1995. Morfodynamiek van de Nederlandse kust op verschillende tijd- en
ruimteschalen. RGD-rapport Kustgenese.
- +Beheersplan Waddenzee, 1996-2001, 1995. Deel 1 en Deel 2. Ministerie Verkeer en
Waterstaat, Ministerie Landbouw, Natuur en Visserij, Ministerie van Economische Zakne,
Ministerie van VROM, Ministerie van Defensie, Waddenprovincies en Waddegemeenten.
- +Beleidsplan Oosterschelde, 1995. Stuurgroep Oosterschelde.
- +BEON, 1996. Habitatkartering en beschrijvingen van Nederlandse Kustwateren. BEON
rapport nr. 96-5.
- +Berchum, A.M. van en G. Wattel, 1997. De Oosterschelde, van estuarium naar zeearm.
Bekkenrapportage Oosterschelde 1991-1997. RIKZ-97.034.
- +Berchum, A.M. van, 1996. T0 ecologie Westerschelde. Werkdocument RIKZ/AB-96.862X.
Rijkswaterstaat. RIKZ Middelburg.
- Berg, R.H. van der, 1993. Sedimentary characteristics of the Pinkegat/Holwerderbalg Inlet
System, Waddensea, A facies model + bijlagen. Universiteit Utrecht
- *+Beukema, J.J. en G.C. Cadée, 1997. De voor winning beschikbare jaarlijkse
schelpkalkproductie door kokkels in de Nederlandse Waddenzee. NIOZ-rapport i.o.v. RWS
Noord-Nederland.
- *Beukema, J.J. en G.C. Cadée, 1999. An estimate of the sustainable rate of shell extraction
from the Dutch Wadden Sea, Journal of applied Ecology 36 p. 49-58.
- +Beukema, J.J., 1982. Calcimass and carbonate production by molluscs on the tidal flats in
the Dutch Wadden Sea: II The edible cockle, *Cerastoderma edule*. Neth.J.Sea.Res. 15 (3/4)
p. 391-405.
- +Beukema, J.J., 1991. Changes in composition of bottom fauna of a tidal-flat area during a
period of eutrophication
- +Beukema, J.J., 1976. Biomassa Waddenzee: ecoprofiel.
- Bont, P.H.F. en A.C.F. van Eijl, 1996. Marktbehoefte van schelpen, RWS.
- Braitwaith J. et al, 1973. Sedimentology no. 20 pp. 251-262
- +Brasseur, S.M.J.M., en P.J. Reijnders, 1994. Invloed van diverse verstoringsbronnen op het
gedrag en habitat gebruik van gewone zeehonden: consequenties voor de inrichting van het
gebied. Wageningen, IBN-DLO. Rapport 113.
- +Brasseur, S.M.J.M., en P.J. Reijnders, 1996. De zeehond terug op z'n bank: een
haalbaarheidsstudie voor het Brielse Gat. IBN rapport 208.

-
- +Brasseur, S.M.J.M., en P.J. Reijnders, 1997. The harbour Seal in the Netherlands. Project 3501613. ISBN 90-369-3431-1.
- +Bruyne, R.H. de, 1990. Op het strand aangespoelde schelpdieren: een voorstudie naar herkomst en mogelijke betekenis voor zandtransport. RIVO-rapport nr. 185 MO 90-203.
- Bruyne, R.H. de, en L. van der Valk, 1991. Schelpdieren in het Hollands kustgebied: herkomst, aanspoelgedrag en transportmechanismen (Voorstudie naar herkomst en betekenis voor zandtransport). RIVO-rapport MO/91-208
- +Bruyne, R.H. de, L. van der Valk en A.W. Gmelig-Meyling, 1993. Kustgenese, molluscentransport als indicatie voor zandtransport. Een onderzoek naar transportbanen in de ondiepe kustgebieden voor Holland en de Waddeneilanden, RIVO-DLO.
- Bruyne, R.H., de 1992. Onderzoek naar schelpvoorkomens in de Noordzee t.b.v. schelpenwinning. RGD-rapport nr. OP6528.
- +Cadée, G.C., 1976. Sediment reworking by *Arenicola Marina* on tidal flats in the Dutch WaddenSea. *Neth.J.Sea.Res.* Vol. 10: 440-460.
- Cadée, G.C., 1993. Raadsel L/R/ sortering bij door wide wind getransporteerde MIA-schelpen opgelost, corresp. -blad *Ned. Malac. Ver.* 272, p 68-71
- *Cadée, G.C., 1994. Birds as producers of shell fragments in the Wadden Sea; in particular the role of the Herring Gull, *Geobios.*
- Cadée, G.C., 1994. Eider, Shelduck and other predators, the main producers of shell fragments in the Waddensea, Palaeoecological implications, *Palaeontology*, vol. 37, p. 181-202
- Cadée, G.C., 1994. Floating shells, Dutch WaddenSea, *J. Paleont.* P. 903-904
- Cadée, G.C., en J. Cadée-Coenen, 1994. Hoe zilvermeeuwen Amerikaanse zwaardscheden (*Ensis Directus*) vangen, corresp. -blad *Ned. Malac. Ver.* 278, p. 64-71
- +Camphuysen, 1996. Ecologisch profiel van de eidereend (*Somateria mollissima*). RIKZ-werkdocument 96.146x.
- Chapell and Polack, 1972. ¹⁴C recrystallization. *Quaternary Res.* 2: 244-252
- +Coossen, J., F. Twisk, M.W.M. van der Tol, R.H.D. Lambeck, M. Van Stralen en P.M. Meire, 1994. Variability in stock assessment of cockles (*Cerastoderma Edule* L.) in de Oosterschelde (in 1980-1999), in relation to environmental factors. *Hydrobiologia* 281/283: p. 381-395.
- +Craeymeersch, 1997. Effecten van schelpdiervisserij op het bodemleven in de Voordelta. In concept.
- Craeymeersch, J.A., J.J. Kesteloo en P. Kamermans., 2000. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de Voordelta in het voorjaar van 2000. RIVO-rapport C022/00
- +Craeymeersch, J.A., O. Hamerlynck, K. Hostens, A. Vanreusel en M. Vincx, 1990. De ekologische ontwikkeling van de Voordelta. Deelrapport 1. De huidige ekologische situatie van de Voordelta. Delta instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, Yerseke/Rijksuniversiteit Gent, Instituut voor Dierkunde, Gent.
- +Cramer, A. 1998. Beschikbaarheid van schelpen voor schelpenwinning. Notitie Rijksinstituut voor Kust en Zee in concept.
- +Dalfsen, J. van en K. Essink, 1997. 'Riks analysis of coastal Nourishment techniques (RIACON). National evaluation report (the Netherlands). RIKZ-rapport RIKZ-97.022
-
- +Dekker, R. 1989. The macrobenthos of the subtidal western Waddensea. Biomass and species richness. *Neth. J. Sea. Res.* 23 (1): 57-68.
- Diesen, G. van, P.P.C. Hoek en J. Lorje, 1896. Uitkomst van het onderzoek of de schelpvisserij langs de Noordzeekust nadelig kan zijn voor het weerstandsvermogen van het strand en het behoud der duinen als zeewering. Min. van Waterstaat, Handel en Nijverheid, 's-Gravenhage, gebr. van Cleef, 184 p.

- Dillo, H.G., 1960. Sandwanderungen in Tideflüssen. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technische Hochschule Hannover 17: 135-253.
- Dobben, van A.B., 2000. Schelpenbanken in de Nederlandse Waddenzee. Rijkswaterstaat Dir. Noord Nederland, Stageverslag.
- Duiker, J.C.M., E. Nomden and A. Smaal, 1998. De invloed van mechanische schelpdiervisserij op de sedimenthuishouding van de Waddenzee, Universiteit Utrecht.
- Dynamics of the closed coastal system of Holland, Delft hydraulics 1995.
- *Ehlers, J. 1988. The morphodynamics of the Waddensea, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- Essink, K. 1986. Summary report of Dutch investigations on the effect of sand and shell extraction in the WaddenSea, Rijkswaterstaat.
- +Essink, K., 1993a.. Effecten schelpenwinning. Document GWAO-93.603x.
- Essink, K., 1993b. Ecologische effecten van baggeren en storten van baggerspecie in het Eems-Dollard estuarium en Waddenzee. Rapport DGW-93.020.
- Essink, K., 1993c. Schelpenwinning Waddenzee; schelpkalk productie. Werkdocument RWS GWAO-93.602x
- +Essink, K., 1995. Schatting schelpproductie Kustzone. Notitie 8 dec. 1995.
- +Essink, K., 1996a. Schatting schelpen productie kustzone Noord/Zuid Holland. RIKZ/OS - 96.613x
- +Essink, K., 1996b. Schelpenwinning Waddenzee actualisering gegevens natuurlijke productie kokkels. RIKZ/OS-96.623x.
- +Essink, K., 1997. Extrapolatie Oosterschelde data?. RIKZ/OS 97-612x.
- +Essink, K., J. Eppinga, P. Tydeman, 1996. Samenstelling schelpen. RIKZ/OS-96.628.
- +Flemming, B.W., H. Schubert, G. Hertweck en K. Muller, 1992. Bioclastic Tidal channel lag deposits: a genetic model. *Senckenbergiana Maritima*. 2 (3/6): 109-129.
- Flemming, B.W., 1992. De bedphases in Bioclastic Sands Exposed to Unsteady, Non-equilibrated Flows: An experimental Flume Study, *Senckenbergiana Marit.* 22. 3/6 95-108.
- Flessa, K.W. and Kowalewski, M., 1994. Shell survival and time-averaging in nearshore and shelf environments: estimate from the radiocarbon literature. *Lethaia*, vol. 27 pp. 153-165
- Flessa, K.W., 1998. Well-traveled cockles: Shell transport during the Holocene transgression of the southern North Sea. *Geology* feb. 1998; v. 26. no. 2; pp. 187-190
- +Fonds, M., 1973. Sand gobies in the Dutch Wadden Sea (*Pomatoschistus*, Gobiidae, Pisces). *Neth. J. Sea Res.* Vol. 6 (4): 417-478.
- Futterer, E., 1977. Einreglung, transport und ablagerung biogener hartteile im stromungskanal. Dissertation der Ebenhard-Karls-Universitat zu Tübingen.
- Futterer, E., 1978. Untersuchungen über die Sink- und Transportgeschwindigkeit biozener Hartteile. *N. Jb. Geol. Palaont. Abh.*, 155, 318-359; stuttgart 1978.
- Geologische Stichting, 1952. Rapport betreffende de jaarlijkse exploitierbare hoeveelheid schelpen in de Waddenzee. Rapport Afd. Geologische Dienst
- Gerritsen, F., 2000. Response time scales for the Dutch Wadden Sea. Report Rijkswaterstaat/RIKZ
- +Groenendijk, F.C., 1997. Zand voor Nederland. Een analyse vanaf 1964 en een extrapolatie tot 2010 van het zandvolume in de Jarkus-zone. Rapport RIKZ/95.003
- +Groenewold, A. en Y. van Scheppingen (1989). De ruimtelijke verspreiding van het benthos in de zuidelijke Noordzee. Milzon-Benthos rapport nr. 89-06. Rijkswaterstaat.
- Groot, S.J. de, 1981. Bibliography of literature dealing with the effects of marine sand and gravel extraction on fisheries, RIVO, IJmuiden
- Hayes, Miles O., 1974. Barrier Islands morphology as a function of tidal and wave regime.
- Heuvel, P.J.B. van der, 1993. From the ebb tidal delta to the mainland shore of the Holwerderbalg, Dutch WaddenSea: A facies description, Univeriteit Utrecht.

-
- + Integraal beleidsplan Voordelta: Vorm in verandering, 1993. Bestuurlijk overleg Voordelta, Rijkswaterstaat.
 - + Jaarboek Waddenzee, 1996. Kennis gebundeld door de overheden. Concept.
 - + Jonge, V.N. de en D.J. de Jong, 1992. Role of tide, light and fisheries in the decline of *Zostera marina* L. in the Dutch Wadden Sea. In: Dankers, C.J. Smit & M. Scholl (eds.), *Proceedings 7th Int. Wadden Sea Sympos.*, Ameland 1990. *Neth. Inst. Sea Research - Publications Series No. 20* 1992: 161-176.
 - + Jonge, V.N. de, J. van de Bergs en D.J. de Jong, 1997. Zeegras in de Waddenzee, een toekomstperspectief. Rapport RIKZ 97.016.
 - Kamps, L.F., 1954. Slibhuishouding en landaanwinning in het oostelijk Waddengebied. RWS landaanwinning.
 - *+ Kesteloo-Hendrikse, J.J. en M.R. van Stralen, 1995. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de Voordelta in 1995, RIVO
 - *+ Kesteloo-Hendrikse, J.J. en M.R. van Stralen, 1995. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de Voordelta in het voorjaar van 1996, RIVO
 - *+ Kesteloo-Hendrikse, J.J., 1994. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de voordelta in 1994, RIVO.
 - + Kok, P.T.J., 1997. Onderzoek schelpvoorkomens binnen de -20 m. dieptelijn, NITG-TNO.
 - + Kok, P.T.J., 1997. Onderzoek schelpvoorkomens in het Waddengebied, NITG-TNO
 - Koomans, R., J. Cleveringa, R. de Kramer, 1996. The Pinkeat/Holwerderbalg Facies Model, A quantative approach to tide-influenced environments + bijlagen. Universiteit Utrecht.
 - Kramer, R. de, R.L. Koomans, 1996. Spatial data analysis in the Pinkegat Holwerderbalg area, Universiteit Utrecht.
 - + Krause, H.R., 1950. Quantitative Schilluntersuchungen im See- und Wattengebiet von Nordeney und Juist und ihre Verwendung zur Klärung Hydrografische Fragen. *Archiv für Molluskunkunde der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*. Band 79 1950 nummer 4/6 91-116.
 - Krogel, F. and B.W. Flemming., 1998. Evidence for temperature-adjusted sediment distributions in the back-barrier tidal flats of the East Frisian Wadden Sea (Southern North Sea). *Tidalites: Processes and Products*, SEPM Special Publication No. 61.
 - Kumar, N. and J.E. Sanders, 1976. Characteristics of shoreface storm deposits: Modern and ancient examples. *J.Sed.Petr.* 46, 145-162.
 - + Land, M.A. van der, 1995a. Effecten van de schelpdiervisserij op de bodemleven in de Voordelta: De schelpdierbestanden in de voordelta in 1994. BEON-rapport nr. 1995-1.
 - + Land, M.A. van der, 1995b. Effecten van de schelpdiervisserij op het bodemleven in de Voordelta: De schelpdierbestanden in de Voordelta in 1995. RIVO Rapport-concept. Yerseke.
 - + Leopold, M.F. en N.M.J.A. Dankers, 1997. Natuur in de zoute wateren. Achtergrondrapport 2-c natuurverkenningen '97. IKC Natuurbeheer, Wageningen.
 - + Leopold, M.F., 1996. *Spisula Subtruncata* als voedselbron voor zee-eenden in Nederland, BEON, 11-1996.
 - Leopold, M.F., M.A. van der land, H.C. Welleman, *Spisula* en Zee-eenden in de strenge winter van 1995/96 in Nederland, BEON, 12-1998.
 - + Leunen, P. van, 1998. Terschelling en de visserij. Flevodruk Harlingen b.v. ISBN 90-70886-31-6. NUGI code 645.
 - + LNV, 1998. Evaluatie van de ecologische effecten van het reguleren van schelpdiervisserij in de Waddenzee en Delta op bodemorganismen en vogels. Ed. B. Hilger, N. Dankers, A. Smaal en V. de Jonge.
-

-
- +Louters, T. en Gerritsen, 1994. Het mysterie van de Wadden. Hoe een getijdesysteem inspeelt op zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat, RIKZ. Rapport RIKZ-94.040.
- Maiklem, 1968. Some hydraulic properties. *Sedimentology* no. 10 pp. 101-109
- Mehta, A.J., Jieh Lee and B. A. Christensen. Fall velocity of shells as coastal sediment. *Journal of the Hydraulic Division*, nov. 1980 pp. 1727-1744
- +Meiniger, P.L. en F. Aarts, 1997. De strandplevier *Charadrius alexandrinus* als broedvogel in Nederland in de 20^e eeuw. *Limosa* 70: 41-60.
- +Meiniger, P.L., C.M. Berrevoets en R.C.W. Strucker, 1997. Watervogels in de zoute Delta 1995/1996. Rapport RIKZ-97.027.
- +Mijwaard, B. en J. Coossen, 1987. Schelpenzuigen Oosterschelde. Notitie GWWS-87.445.
- +Mer NAM Proefboringen, 1996. Haskoning.
- +Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, 1995. Ecosystemen in Nederland.
- +Mulder, H.P.J., 1993. Sedimenttransport in the "Friese Zeegat" Basin, field survey of 1991, rapport GWAO-93.606x., Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.
- Muller, A.H. 1983. *Lehrbuch der paläozoologie*. Veb Gustav Fisher verlag Jena
- Nagle, J.S. 1967. Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 37. No. 4 pp. 1124-1138.
- NIBE, 1997. Classificatie Tonzon Thermokussens vloerisolatie.
- Nio, S.D. and C. Siegenthaler, 1979. A Holocene mesotidal channel fill sequence in the Oosterschelde Mouth, SW Netherlands. International meeting on Holocene Marine sedimentation in the North Sea Basin, Texel, the Netherlands, september 17-23, 1979, Abstracts: 26.
- Olivera, A.M. and W.L. Wood, 1997. Hydrodynamics of bivalve shell entrainment and transport. *J. of Sed. Pet.*, vol. 67, no 3 p. 514-526.
- Oost, A.P., (in prep.). Plaatvallen.
- *Oost, A.P., 1994. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea, with emphasis on the Frisian Inlet. Proefschrift Geologica Ultraiectina, University of Utrecht.
- Oosterbaan, A.F.F., 1989. Schelpenwinning in de Noordzee. RIVO rapport MO 89-208
- Pavlicek, K.O., 1993. Sequentiele luchtfotokartering van de buitendijkse gebieden langs de Friesche IJsselmeerkust, Rijkswaterstaat.
- Pickrill, R.A., 1986. Sediment pathways and transport rates through a tid-dominated entrance, Rangaunu Harbour, New Zealand. *Sedimentology*, 33: 887-898.
- +Piersma, T. en A. Koolhaas, 1997. Shorebirds, Shellfish(eries) and sediments around Griend, Western Wadden Sea, 1988-1996. *Neth. Inst. of Sea Research*.
- Ping, Sha Li., 1994. Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, The Netherlands. *Geologica Ultraiectina*, Universiteit Utrecht.
- +PKB Waddenzee. Deel 3: Kabinetsstandpunt planologische kernbeslissing. 1993. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke ordening en Milieubeheer, Rijksplanologische dienst.
- +Platteeuw, M. en J.H. Beekman, 1994. Verstoring van watervogels door scheepvaart op Ketelmeer en IJsselmeer. *Limosa* 67:27-33.
- +Regionaal Ontgrondingsplan Noordzee, 1991. Deel A. Beleidsnota. Ministerie van verkeer en Waterstaat.
- *Reijngoud, T.T. 1998. De morfodynamica van de Waddenzee op verschillende ruimte- en tijdschalen, Waddenvereniging.
-
- Reineck, H.E., 1961. Sedimentbewegungen an Kleinrippeln im Watt. *Senckenbergiana lethaea* 42 (1/2): 51-67.
- Reineck, H.E., 1982. *Das Watt*. Verlag von Waldemar Kramer in Frankfurt am Main. 3^{de} druk. ISBN 3-7829-1067-2.
- Reitsma, D. Th., 1990. Schelpenvissen in de Waddenzee.

- Reitsma, D.T., 1992. Schelpenvissen in de Waddenzee en in de aangrenzende zeegaten in de periode 1982-1991, Rijkswaterstaat.
- Ribberink J.S. en de H. Vriend, 1995. Morphodynamics of a meso-tidal barrier-island coast, Delft Hydraulics report H2129-project Kustgenese.
- +Richtlijnen MER t.b.v. landelijke beleidsnota schelpenwinning. D.d. 15 juli 1997. Hoofdkantoor van de Waterstaat.
- Rijks Geologische Dienst, 1971. Onderzoek van het Waddengebied, tussentijdse rapport over 1971, uitgave RGD, Haarlem.
- Rijks Geologische Dienst, 1977. Geologisch onderzoek van het Waddengebied, 1977, uitgave RGD Haarlem.
- Rijkswaterstaat, 1954. Vraagstukken rond het schelpenzuigen in de Waddenzee. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, arr. Hoorn. Nota 6493.
- Rijkswaterstaat. 1978. Notitie Hydrografische-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek m.b.t. de winning van zand in de Waddenzee c.a., 1977.
- Rijkswaterstaat, 1978. Invloed van kleischelpen op stabiliteit van geulen.
- Rijkswaterstaat, 2000. Marktonderzoek schelpen. Dienst weg- en waterbouwkunde., rapportnr. W-DWW-2000-075.
- Rijkswaterstaat directie Friesland, 1979. Zandwinning in de Waddenzee. Resultaten van een biologisch-ecologisch onderzoek. 21 p.
- +Rijkswaterstaat directie Friesland, 1981. Zandwinning in de Waddenzee. Resultaten van een hydrologisch-sedimentologisch onderzoek. 48 p.
- Rijkswaterstaat, 1981. Zandwinning in de Waddenzee. Resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek. Directie Friesland.
- +Rijn, L.C. van, 1987. Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Hydraulics Communications no. 382, Delft (Thesis).
- Rijn, L.C. van, 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications.
- *Rijn, L.C. van, 1994. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua Publications.
- +Ruig, J. de, 1995. De kust in breder perspectief. Basisrapport kustnota 1995. Rapport RIKZ/95-005.
- Saito, Y. et al., 1998. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea. *Sedimentary Geology* 122: 217-232.
- +Schekkerman, H., P.L. Meiniger en P.M. Meire, 1994. Changes in the waterbird populations of the Oosterschelde (SW Netherlands) as a result of large scale coastal engineering works. *Hydrobiologia* 282/283: 509-524.
- +Schelpenwinning in de Westerschelde, april 1995. Dienstkring Noord- en Midden Zeeland.
- +Schobben, J.H.M., 1997. Ecosysteemontwikkeling zoute wateren: De mogelijkheden geanalyseerd. Rapport RIKZ 97.028. Juli 1997.
- +Schubert, H., 1990. Entstehung, Vorkommen und Nutzung sublitoraler Schillanreicherungen im gebiet um Spiekeroog. *Betr. Meerestech.*(Univ. Clausthal), 12: 190 pp.
- Sha li ping, 1990. Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, The Netherlands. - Thesis *Geologica Ultraiectina* .64 ISBN 90-71577-17-1
- Simon, W.G., 1959. ~~Beobachtungen an Strombanken auf trockenfallenden Sandflächen im~~ gezeitenbereich de Elbe 1950/1956. *Abhandlungen und Verhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg N.F.* III: 27-36.
- +Spaans, B., L. Bruineel en C.J. Smit, 1996. Effecten van verstoring door mensen op wadvogels in de Waddenzee en Oosterschelde. IBN-rapport 202.
- *Spek, A.J.F. van der, 1994. Large scale evolution of holocene tidal basins in the Netherlands. Thesis Universiteit Utrecht ISBN 90-393-0664-8

- Spek, A.J.F., van der, 2000. Ouderdoms onderzoek schelpen Waddenzee. NITG-TNO in opdracht van Rijkswaterstaat, directie Noord-Nederland TNO-rapport NITG 00-198-B.
- +Steyaart, F., 1994. Gaswinning Waddenzee, RWS.
- +Stienen, E.W.M. en Brenninkmeijer, A. 1994. Voedsel生态学 van de grote stern *Stena sandvicensis*: Onderzoek ter ondersteuning van een populatie-dynamische model. IBN-rapport 120. ISBN 0928-6888, 1994.
- +Stienen, E.W.M. en Brenninkmeijer, A. 1997. Fluctuaties in de lokale beschikbaarheid in relatie tot de populatiedynamiek van de grote stern *Stena sandvicensis*: resultaten 1995-1996. BEON-rapport 97-01.
- +Stikvoort et al., 1997. Veranderingen bodemfauna na afsluiting Oosterschelde. In prep.
- +Stikvoort, E., 1992. Schelpenwinning Ooster- en Westerschelde. DGW/GWWS-92-874x.
- +Stikvoort, E., 1996. Schelpenproductie Voordelta. RIKZ-96.844.
- +Stikvoort, E., 1997. Aanvullende schattingen van schelpbestanden in de Delta t.b.v. de MER schelpenwinning. RIKZ/AB-97.861x.
- Stive, M.J.F. en J. Bosboom, 1999. Effecten van schelpenwinning op de kusten van de Waddeneilanden. Waterloopkundig laboratorium/ Delft Hydraulics, projectnr. Z2772 1999
- +Straaten, van L.M.J.U., 1952. Biogenic textures and formations of shell beds in the Dutch Waddensea. Proc.K.Ned.Akad.Wet. (B) 55:500-516
- Straaten, van L.M.J.U., 1956. Composition of shell beds formed in tidal flat environments in the Netherlands and in the Bay of Arcachon (France). Geologie en Mijnbouw N.S. 18, 209-226.
- *+Stralen, M.R. van en J.J. Kesteloo-Hendrikse, 1997. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de voordelta in het najaar van 1996, concept, RIVO.
- *+Stralen, van M.R. , 1990. het kokkelbestand in de Oosterschelde en de Waddenzee in 1990. RIVO rapport AQ 90-03
- *+Stralen, M.R. van en J.J. Kesteloo-Hendrikse, 1997. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de voordelta in 1997, RIVO.
- *+Stralen, M.R. van en J.J. Kesteloo-Hendrikse, 1998. De ontwikkeling van het kokkelbestand in de Waddenzee (1971-1997) en de Oosterschelde (1980-1997), RIVO.
- *+Stralen, M.R. van en J.J. Kesteloo-Hendrikse, 1998. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de voordelta in 1998, RIVO.
- *+Stralen, M.R. van en J.J. Kesteloo-Hendrikse, 1999. Het kokkelbestand in de Oosterschelde, de Westerschelde, de Waddenzee en de voordelta in 1999, RIVO.
- +Swennen, C., 1976. Populatie-structuur en voedsel van de eidereend *Somateria mollissima* in de Nederlandse Waddenzee.-*Ardea* 64: 311-371.
- Tauber, A.F. 1942. Postmortalen Eranderung an Molluskenschalen und ihren Auswertbarkeit fur die Erforschung vorzeitlicher Lebensraume.-*palaeobiologica* 7, 448-495, Wien.
- Tieze, K.-W., Lemmer, F., Harnisch, C., Seifer, B. & Walter, C., 1991. Sediment Transport im fliessenden Wasser: Experiments mit Stromungskanal und Sedimentationswaage.- Ber. Senckenberg-am-meer, 91/2: 118-119.
- +Tydeman, P., 1996. Ecologische profiel van de litorale kokkelbank (*Cerastoderma edule*). Rapport RIKZ-96.025.
- +Veer, H.W. van der, M. Bergman en J.J. Beukema, 1985. Dredging activities in the Dutch Waddensea: effect on macrobenthic infauna, *Neth. J. Sea Res.* 19 (2): 183-190.
- +Veldkamp, M.A. & Cleveringa, P., 1997. C14 onderzoek aan schelpmonsters van banken voor de Walcherse kust, Rapport Paleobotanie Kenozoicum 1272.
- +Vlas, J. De, 1982. De effecten van de kokkelvisserij op de bodemfauna van de Waddenzee en Oosterschelde. RIN-rapport 82/19: 1-99.

- Vries, S de, 2000. Kansrijke gebieden voor schelpenwinning in de Waddenzee. Rapport Geo Plus nr. 24505-00 In opdracht van het RIKZ te Haren.
- +Vroon, J. et al, 1997. MAS Baggerspeciëstort Westerschelde, 1997. Conceptrapport RIKZ 97.
- +Vroon, J., C. Storm en J. Coossen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Rapport RIKZ-97.023. pp. 107.
- +Wadatlas, 1989. Rijkswaterstaat.
- +Waterloopkundig Laboratorium, 1979. Morfologie van de Waddenzee. Gevolgen van zand- en schelpenwinning. Verslag Literatuur onderzoek. Rapport R. 1336.
- +Westerhoff, W.E., 1997. Geologische achtergrond m.b.t. schelpvoorkomens in de Westerschelde en Oosterschelde. TNO-rapport NITG-97-267-B.
- +Westerschelde Beleidsplan, 1991. Bestuurlijk klankbord forum Westerschelde.
- +Weststeijn, B., 1998. Onderzoek samenstelling schelpmateriaal Delta.
- Wiedemann, H.U., 1971. Shell deposits and shell preservation in Quaternary and Tertiary estuarine sediments in Georgia, U.S.A. *Sedimentary Geology*, 7: 103-125.
- +Wilderom, M.H., 1972. Plaatvallen. OTAR 57 (1972) 7 288-305.
- Wilson, J.B., 1967. Palaeocological studies on shell-beds and associated sediments in the Solway Firth. *Scott. J. Geol.* 3 (2), 329-371.
- Zagwijn, 1975. De palaeogeografische ontwikkeling van Nederland in de laatste drie miljoen jaar. *K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift*. IX nr. 3.
- +Zagwijn, W.H., 1986. Nederland in het Holoceen. Geologie van Nederland. Rijks Geologische Dienst. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1986.
- Zant, F.M., en H.P.J. Mulder, 2000. Veldinventarisatie schelpvoorkomens in de Waddenzee, RIKZ werkdocument RIKZ/AB-2000.606x
- +Zijlstra, Y. 1998. Schelpenwinning en schelpdiervisserij, de mogelijkheden verkend. Rijkswaterstaat Noord-Nederland, afd. ANW.