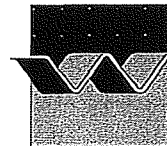


Verspreiding boorspecie Westerscheldetunnel bij storten in de Westerschelde

F.W.J. van Vliet



waterloopkundig laboratorium | WL



waterloopkundig laboratorium

KLANT : Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Postbus 8039, 4330 EA Middelburg

TITEL : Verspreiding boorspecie Westerscheldetunnel bij storten in de Westerschelde

SAMENVATTING : In deze studie wordt beschouwd hoe de boorspecie die vrijkomt bij het boren van de Westerscheldetunnel zich zal verspreiden indien het wordt gestort in de Westerschelde.

Een literatuurstudie is verricht naar vertroebelingsmetingen rond het storten van baggerslib in Nederland. Hieruit volgt dat in het algemeen maximaal 5% van de specie middels turbulente uitwisseling in het oppervlaktewater terecht komt. Door een dichtheidsstroming over de bodem kan de specie zich over honderden meters van de stortlocatie verspreiden. Bij een veldonderzoek rond een boorplatform waar boorspoelingen op waterbasis zijn geloosd zijn geen effecten op de bodemfauna vastgesteld.

Middels berekeningen zijn schattingen gemaakt voor de verspreiding van de boorspecie. De boorspecie zal door stroming op maximaal 20 meter van de stortlocatie de bodem raken. Een dichtheidsstroming over de bodem kan het materiaal radiaal verspreiden over 250 meter. Hierin is de mogelijke invloed van de getijstroming nog niet verdisconteerd.

De aanwezigheid van bentoniet zal nauwelijks invloed hebben op de verspreiding van boorspecie over de waterverticaal en ook niet op het valproces van de primaire stortstraal. Wel heeft het bentoniet mogelijk invloed op de afstand waarover een dichtheidsstroom zich voordoet. Deze invloed is met de huidige modellen niet goed te voorspellen.

REFERENTIES :

REV	AUTEUR	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDKEURING
2	F.W.J. van Vliet	17.11.1997		Joh.G.S. Pennekamp	Joh.G.S. Pennekamp
1	F.W.J. van Vliet	03.09.1997		Joh.G.S. Pennekamp	Joh.G.S. Pennekamp
0	F.W.J. van Vliet	20.08.1997		Joh.G.S. Pennekamp	Joh.G.S. Pennekamp
TREFWOORD(EN)			INHOUD		STATUS
storten, boorspecie, bentoniet			TEKST : 20		☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF
			TABELLEN : --		
			FIGUREN : 16		
			APPENDICES :		
			PROJECTNUMMER: J1442		

Inhoud

Lijst van figuren

1	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Methode van onderzoek	1
1.4	Doelstelling van dit rapport	2
1.5	Opbouw van het rapport	2
2	Het storten van baggerspecie	3
2.1	Het storten vanuit varend transport	3
2.2	Het storten met behulp van hydraulische transport	4
2.3	Omvang van het stort	5
3	Overzicht troebelheidsmetingen bij storten van slib	6
3.1	Troebelheidsmetingen rond het storten van baggerspecie	6
3.1.1	Australiëhaven	6
3.1.2	Cromstrijen	6
3.1.3	Loswal Noord	7
3.1.4	Slufter	8
3.1.5	Eems-Dollard	8
3.1.6	Lateraalkanaal Linne-Buggenum	8
3.1.7	Put van Heenvliet	9
3.1.8	Zevenhuizerplas	9
3.1.9	Overige storten	9
3.2	Lozing van boorspoelingen bij olieboringen op zee	10
4	Oriënterende berekeningen verspreiding van boorspecie	11
4.1	Inleiding	11
4.2	Randvoorwaarden	11
4.2.1	Stortmethodiek	11
4.2.2	Samenstelling van het te storten materiaal	12
4.2.3	Stortlocaties	12
4.3	Berekeningen verspreiding van slib	13

	4.3.1	Openen van het beun	13
	4.3.2	Valproces bij storten van de boorspecie	13
	4.3.3	Verspreiding over de bodem.....	15
5		Conclusies en aanbevelingen.....	18
	5.1	Conclusies.....	18
	5.2	Aanbevelingen	19
6		Literatuur	20

Lijst van figuren

1. Het storten van slib met behulp van een splijtbak
2. Dichtheid mengsel na ontmenging kleibrokken
3. Stortvakken boorspecie Westerschelde en diepte
4. Stortvakken Westerschelde en maximale stroomsnelheden bij gemiddeld getij bij vloed
5. Stortvakken Westerschelde en maximale stroomsnelheden bij gemiddeld getij bij eb
6. Baan speciéstorting bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
7. Dichtheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
8. Valsnelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
9. Absolute snelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
10. Baan speciéstorting bij aanvangsdichtheid 1650 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
11. Dichtheid specie bij aanvangsdichtheid 1650 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
12. Valsnelheid specie bij aanvangsdichtheid 1650 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
13. Absolute snelheid specie bij aanvangsdichtheid 1650 kg/m^3 (berekening STRAAL3D)
14. Aangenomen omvang stortoppervlak op bodem
15. Frontsnelheid dichtheidsstroming als functie van dichtheid en dikte suspensielaag
16. Foto dichtheidsstroming over de bodem onder laboratoriumomstandigheden

I Inleiding

I.1 Probleemstelling

Momenteel wordt een milieu-effect rapport (MER) opgesteld voor de afvoeralternatieven van de grond welke vrij zal komen bij het boren van de tunnel onder de Westerschelde. Het storten van deze boorspecie in de Westerschelde vormt één van de alternatieven. Om de milieu-effecten hiervan te kunnen voorspellen is onderzocht hoe de boorspecie zich tijdens en na het storten zal verspreiden. De aandacht gaat hierbij uit naar het gedrag van het fijne materiaal, dat voor een klein deel zal bestaan uit het mineraal bentoniet.

De volgende vragen spelen hierbij een rol:

- Hoe verspreiden slib en bentoniet zich na storten?
- Is het gedrag anders indien het slib en de bentoniet zijn vermengd met grover materiaal (treedt ontmenging op of blijven de fijnere deeltjes “gevangen” tussen de grovere)?
- Wat is de invloed van:
 - zoutgehalte water
 - initiële dichtheid bentonietsuspensie
 - korrelverdeling gronddelen
 - snelheid en methode van storten
 - waterdiepte
- Wat zijn de overeenkomsten en verschillen met het storten van (haven-)slib?
- Wat zijn de gevolgen van het storten voor de troebelheid en sedimentatie in de wijde omgeving van de stortlocatie?

I.2 Doelstelling

De doelstelling van het project is inzicht te verkrijgen in de verspreiding van boorspecie na het storten in de Westerschelde teneinde de effecten hiervan op het milieu te kunnen voorspellen.

I.3 Methode van onderzoek

De volgende fasering van het onderzoek wordt voorgesteld:

- A. Literatuurstudie met betrekking tot vertroebelingsmetingen bij het storten van slib
- B. Oriënterende berekeningen
- C. Oriënterende laboratoriumproeven
- D. Gedetailleerde laboratoriumproeven
- E. Praktijkmeting vertroebeling bij het storten van slib in de Westerschelde
- F. Numerieke modellering van vertroebeling en sedimentatie in de wijde omgeving van de stortlocatie

In elke fase van het onderzoek moet duidelijk worden of het uitvoeren van de daarop volgende fase nuttig is voor het verwezenlijken van de doelstelling.

I.4 Doelstelling van dit rapport

In dit rapport wordt verslag gedaan van de onderzoeksfase A “Literatuurstudie met betrekking tot vertroebelingsmetingen bij het storten van slib” en B “Oriënterende berekeningen”. Onderdeel A behelst een literatuurstudie die ten doel heeft een beeld te verkrijgen van intensiteit en omvang van optredende vertroebelingswolken bij het storten van slib. Hierbij gaat de aandacht uit naar de gevoeligheid hiervan voor de eigenschappen van het slib, lokale omstandigheden, golf- en stromingscondities, manieren van storten en uitvoeringsaspecten.

Onderdeel B behelst oriënterende berekeningen die ten doel hebben globaal inzicht te verkrijgen in de valsnelheid van de wolk van slib en bentoniet en de snelheid waarmee deze zich als dichtheidsstroom over de bodem zal verspreiden.

Deze fasen hebben een oriënterend karakter en dienen uitsluitend te geven over het nut van het doen van vervolgonderzoek naar het uitzakgedrag van boorspecie in de Westerschelde.

I.5 Opbouw van het rapport

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de aspecten die een rol spelen bij het storten van ontgravingsspecie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen het rechtstreeks lossen van de specie uit bakken via kleppen in de bodem en het storten via een persleiding.

Veel kennis van de effecten van het storten van slib op de omgeving is verkregen middels veldmeetcampagnes op grote en kleine schaal. Hierbij is gekeken naar de verspreiding van slib rond de stortlocatie en de vertroebeling van het omgevingswater. In hoofdstuk 3 wordt een overzicht gegeven van de metingen die de laatste tijd in Nederland zijn uitgevoerd.

Tevens wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan het lozen van boorspecie bij olieboringen op zee, omdat deze boorspecie, net als de boorspoeling van de Westerscheldetunnel, kan bestaan uit gronddelen vermengd met bentoniet.

Aan de hand van de door de aannemer beschikbaar gestelde informatie met betrekking tot de ontgraven grond en de toe te passen hoeveelheden bentoniet en water zijn berekeningen gemaakt voor de verspreiding van boorspecie en gronddelen in de omgeving bij storting in de Westerschelde. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in hoofdstuk 4.

Het rapport wordt besloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Het storten van baggerspecie

2.1 Het storten vanuit varend transport

Een gebruikelijke en goedkope methode van het storten van mineraal aggregaat en baggerspecie in onderwaterdepots of marine fill is het storten met gebruik van onderlossers (ca. 50 tot 1000 m³), splijtbakken (ca. 100 tot 2000 m³) of splijthopperzuigers.

Deze methode houdt in dat vlak beneden het wateroppervlak de baggerspecie, al dan niet geregeld, in het water wordt losgelaten. Onder invloed van het volumegewicht groter dan water "valt" de specie naar de bodem. (zie figuur 1). Bij dit "klappen" van water- en slibrijke zand en specie in diep water (waterdiepte groter dan enige malen de diepgang van de geladen bak) gaat een deel van de specie tijdens de val over naar de waterfase [Pennekamp en Quaak, 1990; Blokland en Van Raalte, 1988]. Deze vertroebeling ontstaat door:

- segregatie aan de buitenzijde van de baggerspecie
- entrainment van water
- turbulente uitwisseling
- het ontwijken van gas (lucht)

De mate van vertroebeling is afhankelijk van:

- het type baggerspecie
- de korrelverdeling
- de consolidatiegraad (consistentie)
- de waterdiepte

Het klappen van een bak duurt enige tot een tiental minuten, vanaf het moment dat de bodemkleppen worden geopend totdat het ruim leeg is. Al naar gelang de dichtheid en de consistentie van de te storten specie en de stortdiepte kan de valsnelheid van de bulk van de stortlading oplopen tot verscheidene meters per seconde (3 tot 5 m/s). De baggerspecie bereikt binnen enkele seconden de bodem [Pennekamp en Van Raalte, 1989].

De inslag van de vracht op de bodem zal resulteren in erosie en opwerveling van bodem-materiaal. Deze secundaire dichtheidsstroming is des te groter als gestort wordt op plaatsen waar recentelijk storten zijn uitgevoerd. De erosie kan in bepaalde situaties kraters in de oorspronkelijke bodem veroorzaken van enige meters diep.

Tijdens en na het storten wordt boven in de watervertikaal een vertroebelingswolk waargenomen van zeer fijn materiaal met geringe dichtheidsverhoging. Deze wolk zakt niet als een dichtheidsstroming uit maar volgens de, veel kleinere, valsnelheid van de individuele deeltjes. Deze wolk is onderhevig aan de convectie van de hoofdstroom en kan daardoor uiteindelijk ver buiten het stortgebied tot bezinking komen. De totale hoeveelheid baggerspecie in deze oppervlaktewolk is veelal niet groter dan enige procenten van de totale lading van de bak.

De suspensies met een hogere dichtheid zakken als een dichtheidsstroming naar de bodem. Door de dichtheidsstratificatie kan vertroebeling op de spronglaag blijven "hangen" en dispergeren. De uitzakking van zo'n zwevende suspensie zal zich vanaf die waterdiepte voortzetten met de valsnelheid van de individuele deeltjes. Dit verlengt de leeftijd van deze suspensie aanzienlijk. Door convectie van de hoofdstroom kunnen deze vertroebelingswolken uiteindelijk ver buiten het stortgebied tot bezinking komen.

De zwaardere suspensies (2 g/liter en hoger) verspreiden zich als een dichtheidsstroming radiaal over de bodem. De foto van figuur 16 toont een mooi voorbeeld van dit proces onder laboratoriumomstandigheden. De invloed van de hoofdstroming op deze dichtheidsstroming is vaak marginaal. Bij de grote stroomsnelheden die initieel in de dichtheidsstroming kunnen ontstaan, zullen interne golven gaan breken wat resulteert in een grote uitwisseling van gestort materiaal uit de suspensiestroom naar het oppervlaktewater.

2.2 Het storten met behulp van hydraulische transport

Een persleiding biedt de mogelijkheid de specie door de leiding tot op de bodem te brengen. Ook als het transport met behulp van varende eenheden gebeurt, kunnen de bakken met behulp van een bakkenzuiger worden gelegegd. Hopperzuigers kunnen hun lading via een persleiding lossen.

De persleiding kan boven water uitmonden. Al naar gelang de storthoogte boven water ontstaan dan grote vertroebelingswolken en dichtheidsstromingen. Als de persleiding onder water horizontaal uitmondt, wordt de vertroebelingsontwikkeling met 10 à 15 procent gereduceerd [Neal, 1978; Pennekamp en Bosland, 1992].

Verdere reductie van vertroebeling ontstaat als de persleiding meer naar de bodem gericht wordt, met als uiterste een verticale persleiding die onderwater uitmondt. De reductie van de vertroebeling bij de verticale stand van de persleiding bedraagt 50 tot 60 procent ten opzichte van de bovenwaterstortmethode.

Om de uitwisseling met de omgeving nog verder te minimaliseren kan aan de persleiding een diffusor worden geplaatst. Met de diffusor wordt beoogd de snelheid van de aanstromende baggerspecie zodanig te reduceren dat er zo min mogelijk vertroebeling ontstaat en de specie zo snel mogelijk bezinkt. Ten opzichte van de eerder genoemde stortmethoden zorgt een diffusor er daarbij voor dat minder lokaal water met de baggerspecie wordt vermengd. De stroomsnelheid van de specie wordt in de diffusor tot een acceptabel niveau gereduceerd en tegelijkertijd wordt de turbulentie daarbij zo laag mogelijk gehouden. Bij ongunstige hydrodynamische omstandigheden en ongunstige slibkwaliteit kan een beheerste specie-inbreng middels het gebruik van een diffusor aan te bevelen zijn.

Ook bij het gebruik van de diffusor ontstaat soms een vertroebeling vlak onder het wateroppervlak boven het stortpunt. De laagdikte van deze wolk is slechts enige decimeters. De vertroebelingswolk wordt gevoed door het vrijkomende gas en de ingesloten lucht die als een bellenfontein rond de stortpijp omhoog komt en baggerspecie meeneemt. De totale hoeveelheid baggerspecie in deze oppervlakte vertroebeling bedraagt slechts enkele promillen van de totale stortvracht.

2.3 Omvang van het stort

Onder invloed van sedimentatie, turbulentie en schuifspanningen aan de bodem en aan het bovengrensvlak verliest de dichtheidsstroming van de gestorte baggerspecie gaande voort impuls. De dichtheidsstroming heeft daardoor op grotere afstanden van het stortpunt minder materiaaltransport. Op een oorspronkelijk vlakke bodem kan door de dichtheidsstroming de uiteindelijk bezonken baggerspecie zich uitstrekken over een gebied met een straal van honderden meters rondom het stortpunt. De reikwijdte van de dichtheidsstroming is kleiner als de stroom tegen een helling op moet stromen bij het storten in putten en slenken [Davies, 1981; Briek, 1990; Brilhuis, 1984; Gordon, 1974; Van Heuvel, 1988].

Naarmate de baggerspeciastort op grotere diepte plaatsvindt, bijvoorbeeld in geulen, neemt de kans op een grote verspreiding van specie toe. Bij erosie van slib door de stroom kan dit leiden tot een significante toename van het zwevend stofgehalte nabij de stortlocatie. Vanuit dit oogpunt verdient een ondiepe stortlocatie de voorkeur.

3 Overzicht troebelheidsmetingen bij storten van slib

3.1 Troebelheidsmetingen rond het storten van baggerspecie

Onderstaand wordt een overzicht gegeven van metingen die zijn verricht rond het storten van slib in Nederland.

3.1.1 Australiëhaven

In de Australiëhaven in Amsterdam is in het voorjaar van 1997 onderzoek verricht naar de verspreiding van baggerspecie richting het oppervlaktewater tijdens storten. Het onderzoek omvatte het storten met onderlossers, het storten door een valpijp en het storten met een grijper waarbij de specie boven of onder water werd gelost.

Als gevolg van het schutten van schepen in IJmuiden is er in de Australiëhaven sprake van een zoet-zoutstratificatie. Deze stratificatie vertraagt het bezinken en bevordert de horizontale verspreiding van opgewekte vertroebeling significant.

Het percentage van de specie dat tijdens storten in vertroebeling gaat is hoger dan gemeten in ander onderzoek (1-5%). Bij het storten met een onderlosser gaat 7-14% in vertroebeling, bij een valpijp 3-6%, bij een grijper onder water 6-13% en bij een grijper boven water 9-19%.

De gemeten verspreidingsafstand ten opzichte van de stortlocatie voor de storttechnieken valpijp, onderlosser, grijper onder water en grijper boven water is respectievelijk 40 m, 75 m, 70 m en 70 m. Hierbij is turbulentie het belangrijkste verspreidingsmechanisme, hetgeen wordt versterkt in de waterlagen waarin zich een dichtheidsverschil bevindt. De gemeten uitzaktijd voor genoemde storttechnieken is respectievelijk: >3 uur, 2 uur, 2,5 uur en 3 uur. De methode die de minste vertroebeling veroorzaakt is het storten met gebruik van de valpijp. Deze vertroebeling bevindt zich dicht bij de bodem, in tegenstelling tot de andere methoden. Bij het storten met een grijper concentreert de vertroebeling zich in de overgangslaag van zoet naar zout. Door de positie van deze laag in de Australiëhaven is deze vertroebeling zeer gevoelig voor verspreiding ten gevolge van convectie [F.R. Harris, 1997].

3.1.2 Cromstrijen

Rond de stortlocatie Cromstrijen in het Hollandsch Diep is in 1984 onderzoek uitgevoerd om het effect van de stort van baggerspecie vast te stellen [Mol, 1984]. Tijdens het onderzoek werd er specie gestort door knijperschepen en onderlossers.

Tijdens het onderzoek is slechts een geringe verhoging van de concentratie zwevend stof vastgesteld. De maxima die gevonden zijn waren 82 mg/l bij de stort vanuit een knijperschip en 163 mg/l bij de stort vanuit een onderlosser. Het gebied waarbinnen de verhoging van de vertroebeling zich voordeed was niet groter dan ca. 100 m rondom onderlosser en knijperschip.

In 1993 is rond de stortlocatie Cromstrijen gemeten met behulp van echoloding en sonartechnieken. De stort kon goed worden gevolgd en tevens kon de omvang van het stort worden bepaald [Verbeek en Cornelisse, 1993].

Met de echoloding en sonarbeelden is vastgesteld dat de stort leidde tot een inslagkrater omringd door een stuwwal. In de krater en de stuwwal is 350 m^3 terechtgekomen. In de directe omgeving is een lichte neerslag van suspensiemateriaal gevonden (ongeveer 300 m^3). De overige 1.600 m^3 (ruim 70%) is, ondanks de nauwkeurige meetmethode, niet teruggevonden.

Met de sonarbeelden kon de snelheid van het front van de speciestroom over de bodem worden geschat op 0,8 tot 1,5 m/s.

3.1.3 Loswal Noord

In 1982 zijn in het kader van het onderzoek naar de verspreiding van baggerspecie op Loswal Noord met behulp van een tweetal schepen metingen verricht in de nabije omgeving van de stortlocatie van een sleephopperzuiger. Daarbij zijn de gedragingen van in totaal 14 storten vastgelegd, waarbij de hoofdaandacht lag bij de verspreiding in ruimte en tijd in het horizontale vlak boven de bodem.

Het overgrote deel van het gestorte materiaal blijkt in het onderste deel van de waterkolom terecht te komen. De stortmassa gedraagt zich vervolgens als een afzonderlijke vloeibare massa met een eigen transportrichting- en snelheid.

Het verspreidingsproces lijkt zich in een aantal afzonderlijke fasen te voltrekken. Ten gevolge van de potentiële energie die bij het storten vrijkomt vindt er een radiale verspreiding plaats (initiële fase of fase 1). Vervolgens is er sprake van verspreiding ten gevolge van de bodemhelling en, voor zover deze van belang is, getijstroming (fase 2). In het geval de getijstroming aanzienlijke waarden aanneemt (op 1 meter boven de bodem groter dan 0,4 m/s) gaat fase 2 na verloop van tijd over in fase 3, waarin enkel nog de getijstroomcomponent verantwoordelijk is voor de verplaatsing van de stortmassa. In deze omstandigheden kan de stortmassa verplaatsingen van ruim 2 kilometer ondergaan (op 1 meter boven de bodem), waarbij de samenstelling van het stortmateriaal een belangrijke parameter voor de transportweg lijkt te zijn.

De stortmassa is circa twee uur na de stort met de beschikbare detectiemiddelen niet meer te detecteren [Kohsiek en Louisse, 1982].

Ook is met behulp van semi-permanente stations onderzoek gedaan naar het transport van vers gestort materiaal [Verlaan en Spanhoff, 1992]. Op basis van deze metingen zijn schattingen gemaakt van de transportflux van gestort baggermateriaal. Vastgesteld is dat slechts een deel van het gestorte materiaal op de stortlocatie achterblijft. Een groot deel zal met de reststroom mee richting Waddenzee trekken en een klein deel draagt bij aan een retourstroom richting Maasmond. Tevens is vastgesteld dat bij erosie van vers gestort materiaal onder bepaalde omstandigheden een slibdeken gevormd wordt.

In 1988 zijn metingen uitgevoerd om beter inzicht te krijgen in de ruimtelijke representativiteit van het slibplatform dat op de bodem bij Loswal Noord geplaatst is [Van Heuvel en Theune, 1989]. Opvallend is dat tijdens passage van het front de verticale snelheidscomponent van de stroom toeneemt.

3.1.4 Slufter

In het kader van het meten van vertroebeling rond diverse baggerwerktuigen en baggerprocessen zijn in juni 1990 vertroebelingsmetingen uitgevoerd rond het storten van slib in de "Slufter" bij de Maasvlakte bij Europoort [Pennekamp en Bosland, 1992; Pennekamp, 1989]. Tijdens de metingen is baggerspecie afkomstig uit het Botlekbecken, de 1e Petroleumhaven en de meer zandige Nieuwe Maas gestort door sleephopperzuigers. Hierbij is gebruik gemaakt van een diffusor op 1 m en op 3 m boven de bodem en van een rechte stortpijp.

Beide stortmethoden veroorzaken een verhoging van de vertroebeling in de bovenste laag. Dit wordt veroorzaakt door het opborrelen van lucht die door de persbuis wordt aangevoerd. De luchtbellenfontein die hiermee ontstaat voert slibdeeltjes mee naar het wateroppervlak, waar ze zijwaarts uitstromen. Ook de vertroebeling in het middengedeelte van de waterkolom is voor een belangrijk deel het gevolg van de luchtontwikking. De vertroebeling heeft scherpe gradiënten; met name de dunne laag boven de bodem veroorzaakt een scherpe verticale gradiënt.

De diffusor op 1 m van de bodem genereert in het algemeen iets minder vertroebeling dan de diffusor op 3 m van de bodem en de rechte stortpijp.

Vanuit de waarnemingen rond de diffusor alswel de rechte stortpijp volgt dat buiten een straal van 50 m rond het stortpunt geen noemenswaardige vertroebelingstoename optreedt.

3.1.5 Eems-Dollard

In de Eems-Dollard is een groot onderzoek uitgevoerd naar de invloed van baggerspecie-stortingen op de vertroebeling van het omgevingswater. Op de stortlocatie Groote Gat werd dagelijks baggerspecie gestort, afkomstig uit de haven van Delfzijl. Op circa 630 m. afstand van de stortlocatie stond een meetpaal die de saliniteit, de stroomrichting en -snelheden en het slibgehalte heeft gemeten.

Het onderzoek heeft vastgesteld dat de verhoging van de slibconcentratie meer in verband gebracht kan worden met golven dan met stortingen. De pieken in het slibconcentratiepatroon nemen wel toe tijdens de stortperioden ten opzichte van normale perioden (met zo'n 15%). Wordt er meer gestort, dan komen incidenteel zeer hoge concentraties voor. Hieruit volgt dat meerdere stortingen of een grote windbelasting ervoor zorgen dat de concentratie zwevend stof sterk toeneemt.

Door vergelijking van peilkaarten is gebleken dat er zeewaarts van de stortlocatie sedimentatie optreedt. Dit wordt veroorzaakt door de bodemhelling (circa 0,2 %) en is zelfs tegen de vloedstroom in. [Van der Heide en Ploeg, 1992].

In 1990 zijn metingen uitgevoerd in de Bocht van Wattum rond het storten door het baggervaartuig "Albatros". De resultaten van deze metingen zijn echter weinig betrouwbaar wegens onnauwkeurigheden in de watermonsteranalyse.

3.1.6 Lateraalkanaal Linne-Buggenum

In het Lateraalkanaal Linne-Buggenum is gekeken naar de invloed van stort van materiaal uit de Maas [Van Vuuren, 1988]. Hierbij is vastgesteld dat significante hoeveelheden slib vrij in het oppervlaktewater voorkomen in de vorm van een slibwolk. Door de doorspoeling van het kanaal (nodig voor de handhaving van de waterkwaliteit) komt de fijne fractie niet tot bezinking.

3.1.7 Put van Heenvliet

Bij het verbreden van de mond van het Hartelkanaal werd de gebaggerde specie geperst naar het stort in de put van Heenvliet. De specie bestond voornamelijk uit klei, een hoeveelheid veen en sporen zand. Omdat hoge eisen werden gesteld aan de maximale verspreiding van het slib en de maximale vertroebeling is gebruik gemaakt van een aangepaste uitstroomopening aan het einde van de pijpleiding. Tijdens het storten zijn troebelheidsmetingen, peilingen en dichtheidsmetingen uitgevoerd.

Uit de metingen blijkt dat de specie zich radiaal verspreidde vanaf de spuitmond. Diepe gedeelten van de put werden als eerste opgevuld. Door deze ongelijkmatige afstroming over de bodem trad ongelijkmatige vertroebeling op [Gemeentewerken Rotterdam, 1983].

3.1.8 Zevenhuizerplas

In 1976 zijn proeven uitgevoerd in de Zevenhuizerplas om na te gaan in welke mate vertroebeling zou optreden bij het vullen van de plas met baggerspecie. Twee methoden zijn onderzocht, te weten horizontaal boven water en verticaal onder water. De pijpleiding had geen aangepaste uitstroomopening. In beide gevallen vertroebelt het water waarin wordt gestort tot op grote hoogte boven de bodem. Vlak onder de waterspiegel worden over een groot oppervlak concentraties waargenomen van ca. 500 mg/l.

Uit de meetresultaten kan worden geconcludeerd dat het voor wat betreft de mate van vertroebeling weinig verschil maakt of boven of onder water wordt gestort.

3.1.9 Overige storten

Door opdrachtgever zijn in verband met voorliggende studie meetrapporten beschikbaar gesteld waarin verslag wordt gedaan van troebelheidsmetingen in Zierikzee en Terneuzen.

Voor de havenmond van Zierikzee zijn in 1992 stroom- en sedimentmetingen uitgevoerd in de voormalige munitiestortplaats in verband met het storten van baggerspecie [Meetdienst Zeeland, 1992]. Tegelijkertijd zijn lodingen verricht en zijn bodemonsters genomen. In de havens van Terneuzen zijn stroom- en sedimentmetingen gedaan in verband met bagger- en stortwerkzaamheden [Meetdienst Zeeland, 1991]. Gelijktijdig zijn lodingen verricht die een beeld geven van de verspreiding van de vertroebelingswolk

Zowel de metingen in Zierikzee als de metingen in Terneuzen zijn zorgvuldig gerapporteerd maar niet nader geïnterpreteerd.

Het onderwaterstorten van grond en bentoniet uit een tunnelboorproject blijkt enkele jaren geleden ook te hebben plaatsgevonden, zij het op veel kleinere schaal dan voor de Westerscheldetunnel mogelijk het geval zal zijn. In het Braassemmermeer is bentoniet gestort dat afkomstig was van een boring onder de Gouwe in Alphen aan den Rijn. Het betrof de aanleg van een aardgasleiding met een diameter van 2 meter over een lengte van 800 meter. De bentonietsuspensie had een dichtheid van 1200 à 1300 kg/m³. Bij de lozing zijn geen metingen verricht [mondelinge communicatie Stolk, Hoogheemraadschap van Rijnland].

3.2 Lozing van boorspoelingen bij olieboringen op zee

Bij olieboringen op zee worden boorvloeistoffen en ontgraven grond (cuttings) veelal gestort rond het boorplatform. Veel onderzoek is verricht naar de mogelijke ecologische effecten van het storten van dit materiaal op de omgeving [Van het Groenewoud et al., 1988; Zevenboom, 1992]. Het onderzoek spitst zich echter met name toe op boorspoelingen op oliebasis (Oil Based Mud = OBM). Sinds 1993 is het lozen van OBM-houdend boorgruis in de Nederlandse sector van de Noordzee niet meer toegestaan. Daarom worden nu bij voorkeur boorspoelingen op waterbasis gebruikt (Water Based Mud = WBM) of wordt, wanneer aan het gebruik van OBM niet te ontkomen valt, het met olie verontreinigde boorgruis aan land gebracht.

In de zomer van 1991 is in het Friese Front gebied een exploratieboring verricht waarbij uitsluitend WBM werd toegepast en waarbij het opgeboorde materiaal en de boorspoeling op de zeebodem werd geloosd (als spoelingen werden gebruikt een "spud mud" en een "salt saturated polymer mud").

Teneinde vast te stellen of lozing van WBM-houdend materiaal negatieve effecten heeft op de levensgemeenschap in de zeebodem, werd in oktober 1991 een gecombineerd biologisch en chemisch veldonderzoek uitgevoerd. Op dezelfde locatie is een jaar later een vervolgsurvey verricht.

De resultaten van de eerste survey duiden erop dat zich op de korte termijn geen negatieve effecten van de lozingen voordeden op de bentische levensgemeenschap. Zelfs op een station op maar 25 meter van het voormalige lozingspunt, waar bij voorbaat rekening was gehouden met eventuele verstikking van de macrofauna als gevolg van bedelving onder boorgruis, werd geen significant effect vastgesteld en boorgruis werd hier ook maar in geringe hoeveelheden waargenomen. Ook op langere termijn zijn geen effecten op de bentische levensgemeenschap bij de locatie waargenomen. De resultaten wijzen er derhalve op dat lozing van boorgruis met een samenstelling als die welke op de onderzochte boorlocatie is gebruikt geen meetbaar effect heeft op de samenstelling van de bodemfauna [Daan en Mulder, 1993].

De samenstelling van de WBM die is toegepast bij de bovenstaand beschouwde exploratieboring wijkt wezenlijk af van de boorvloeistof die wordt toegepast bij het boren van tunnels. De spoeling voor de Westerscheldetunnel zal vrijwel geheel bestaan uit bentoniet, terwijl de spoeling voor de exploratieboring voor 63 gewichtsprocent bestond uit Bariumsulfaat en voor slechts 12 gewichtsprocent uit bentoniet. Bariumsulfaat wordt toegepast vanwege het hoge soortelijk gewicht: 4500 kg/m^3 . Voor de effecten op de omgeving betekent dit dat het materiaal na lozing sneller zal uitzakken dan bentoniet.

Een tweede belangrijk verschil is dat bij een olieboring meer spoeling wordt gebruikt per kubieke meter ontgraven grond dan bij het boren van een tunnel. Van de beschouwde boring zijn deze getallen niet bekend, maar bij een andere exploratieboring waarbij WBM is toegepast bestond slechts 15 volumepercent van het stortmateriaal uit cuttings. Bij de Westerscheldetunnel zal 50 volumepercent van het te storten materiaal uit ontgraven grond bestaan.

4 Oriënterende berekeningen verspreiding van boorspecie

4.1 Inleiding

Het stort- en verspreidingsproces van specie kan worden opgedeeld in opeenvolgende fasen. Veelal wordt hierbij onderscheiden:

- het openen van het beun
- het vallen van de specie
- de verspreiding van de specie over de bodem

Voor elk van deze fasen zijn berekeningen gemaakt op basis van door de aannemerscombinatie beschikbaar gestelde waarden van parameters. Voor het storten van de boorspecie van de Westerscheldetunnel is hierbij onderscheid gemaakt tussen het storten van klei en het storten van zand. In paragraaf 4.3 worden de resultaten van deze berekeningen weergegeven. De randvoorwaarden die aan de berekeningen ten grondslag liggen worden besproken in paragraaf 4.2.

4.2 Randvoorwaarden

4.2.1 Stortmethodiek

Voor de afvoer van de boorspecie wordt door de aannemerscombinatie gedacht aan de inzet van zelfvarende of geduwde splijtbakken [Kombinatie Middelpaalt Westerschelde, 1997]. Een splijtbak is een schip dat in langsrichting uit twee, met lucht gevulde, op elkaar scharnierende secties bestaat. De twee secties vormen samen in gesloten toestand een laadruim waarin de specie gestort wordt. De secties zijn tijdens het laden en varen vergrendeld. Op de stortlocatie aangekomen worden de scharnieren ontgrendeld en drijven de met lucht gevulde secties, uit elkaar en valt de lading uit de bak naar beneden. Vervolgens worden de twee secties weer naar elkaar toe gedraaid en vergrendeld.

Afhankelijk van de boorsnelheid worden één of twee splijtbakken ingezet. Bij de inzet van twee schepen ligt in principe het ene schip voor de wal voor belading en het andere vaart of lost.

De in te zetten schepen hebben een lengte van ca. 70 tot 90 m en een breedte van ca. 10 tot 12 m en een dieptegang van ca. 3,5 m. De laadcapaciteit is maximaal 1000 m³. Voor de frequentie van laden, varen en storten en retourvaren is gerekend op een cyclustijd per schip van 1,5 uur. [KMW, 1997]

4.2.2 Samenstelling van het te storten materiaal

In Tabel 1 van de notitie bij de Workshop MER d.d. 18-06-97 [KMW, 1997] is voor de verschillende delen van het boortraject aangegeven hoeveel kubieke meter grond wordt ontgraven en hoeveel bentoniet hiervoor benodigd is. Bovendien wordt gesteld dat voor elke kubieke meter ontgraven grond één kubieke meter water benodigd is.

Om tot een schatting van het volumegewicht van het te storten mengsel te komen is aangenomen dat de zandlagen een porositeit hebben van 35%, overeenkomend met een volumegewicht van ongeveer 2070 kg/m^3 . Wanneer dit vermengd wordt met de in de KMW-notitie aangegeven hoeveelheden bentoniet en water ontstaat een mengsel met een dichtheid van ongeveer 1650 kg/m^3 . De hoeveelheid bentoniet bedraagt tussen 1 en 3 gewichtsprocent van de hoeveelheid vaste stof in het mengsel.

Voor de kleilagen is een volumegewicht aangenomen van 1900 kg/m^3 . Wanneer dit wordt vermengd met de aangegeven hoeveelheden bentoniet en water dan ontstaat een mengsel met een dichtheid van ongeveer 1450 kg/m^3 . Ook in dit mengsel is de hoeveelheid bentoniet ongeveer 2 gewichtsprocent van de hoeveelheid vaste stof in het mengsel.

De klei wordt bij het ontgraven losgemaakt in de vorm van brokken of schillen. Deze productie-eenheden zullen tijdens het mengen in de mengkamer en tijdens het transport door de leiding naar het maaiveld gedeeltelijk degraderen, waarbij kleideeltjes worden opgenomen in de omringende slurry. In de scheidingsinstallatie zullen brokken en omringende slurry van elkaar worden gescheiden maar uiteindelijk wordt alle materiaal dat niet wordt hergebruikt samengevoegd in dezelfde splijtbak. De dichtheid van deze bentoniet/klei-suspensie die de kleibrokken omringt is afhankelijk van het percentage klei dat als kleibrokken de scheidingsinstallatie binnenkomt (zie figuur 2).

In de hier uitgevoerde berekeningen is er vanuit gegaan dat 35% van de klei degradeert en wordt opgenomen in suspensie en derhalve 65% van de klei als brokken wordt gestort. Het volumegewicht van het omringende mengsel is dan 1250 kg/m^3 .

4.2.3 Stortlocaties

In de figuren 3, 4 en 5 is aangegeven op welke locaties in de Westerschelde de boorspecie zal worden gestort. In figuur 3 is daarbij weergegeven wat de diepte van de stortlocaties is en de figuren 4 en 5 geven de maximale stroomsnelheden bij gemiddeld getij bij vloed respectievelijk eb.

De waterdiepte bedraagt minimaal 10 meter en is op sommige locaties groter dan 30 meter. De stroomsnelheid bij vloed is minimaal $0,25 \text{ m/s}$ en maximaal $1,50 \text{ m/s}$. Bij eb is de stroomsnelheid minimaal $0,25 \text{ m/s}$ en maximaal $1,25 \text{ m/s}$. Voor de berekeningen is een waterdiepte van 30 meter aangehouden en een stroomsnelheid van $1,25 \text{ m/s}$ over de volledige hoogte van de waterverticaal.

4.3 Berekeningen verspreiding van slib

4.3.1 Openen van het beun

De snelheid waarmee de boorspecie het schip verlaat tijdens het openen van het beun wordt bepaald door de openingsgrootte en de viscositeit van het mengsel. De potentiële energie (het dichtheidsverschil tussen water en specie vermenigvuldigd met de storthoogte) wordt omgezet in kinetische energie en beperkt door de wrijving. Vaak gaat het beun niet direct in zijn geheel open maar in stappen. Dit zorgt voor grotere weerstand tijdens de stort en een lagere vertreksnelheid.

Voor het storten van de boorspecie wordt uitgegaan van splijtbakken, waarbij de boorspecie vrijwel in één keer wordt losgelaten. Op basis van waarnemingen in het Eems-Dollard-gebied is voor de "Kinhem", een sleepopperzuiger met een inhoud van 800 m³, berekend dat de vertrek-stortsnelheden liggen tussen de 0,5 en 1,0 m/s. Voor de berekeningen aan het storten van boorspecie in de Westerschelde is als uitgangspunt de vertrek-stortsnelheid gesteld op 0,5 m/s.

4.3.2 Valproces bij storten van de boorspecie

Vanuit het schip zal de specie versneld worden door de zwaartekracht. Tijdens de val wordt het omringende water aangezogen en opgenomen door entrainment. Dit zorgt voor een extra verdunning van de boorspecie.

Voor het valproces bij het storten van de boorspecie zijn berekeningen uitgevoerd met behulp van het programma STRAAL3D. Dit programma berekent de driedimensionale baan en de verdunning van een ronde straal in een stromend medium, waarbij de dichtheid van de straal zowel groter als kleiner kan zijn dan de dichtheid van het omringende medium. De baan en verdunning van de straal worden beïnvloed door de zwaartekracht (belangrijke grootheden hierin zijn de versnelling van de zwaartekracht en het verschil in dichtheid tussen straal en omringend medium), de menging met de omgeving (belangrijke parameter is de entrainment-coëfficiënt) en het stromende ontvangende medium (belangrijke grootheden zijn de stroomsnelheid en "drag"-coëfficiënt van het medium). De behoudswetten voor impuls en massa leveren een stelsel gekoppelde differentiaalvergelijkingen, die de straalbaan en de verdunning in de straal beschrijven.

Voor de berekening zijn de volgende waarden aangehouden:

Breedte stortopening	:	7 m	
Lengte stortopening	:	60 m	
Inhoud beun	:	1000 m ³	
Stortsnelheid	:	0,5 m/s	
Uitstroomhoek	:	-90°	(d.w.z. loodrecht naar beneden)
Waterdiepte	:	30 m	
Diepgang splijtbak	:	3,5 m	
Storthoogte	:	26,5 m	(waterdiepte minus diepgang)
Getijstroming	:	1,25 m/s	
Dichtheid zeewater	:	1010 kg/m ³	
Dichtheid mengsel	:	1250 kg/m ³	Case I: boren in klei
	:	1650 kg/m ³	Case II: boren in zand

Het programma STRAAL3D rekent met een ronde straal. De diameter van deze straal is gelijk gekozen aan de breedte van de stortopening, te weten 7 m.

Uit de afmetingen van de stortopening, de inhoud van het beun en de stortsnelheid volgt een stortdebiet van $210 \text{ m}^3/\text{s}$, zodat de tijdsduur van storten vijf seconden bedraagt.

In de figuren 6 tot en met 13 zijn de resultaten weergegeven van de berekeningen met STRAAL3D. Voor beide cases is weergegeven:

- de baan van de specie (hartlijn en grenzen)
- de dichtheid van de specie
- de valsnelheid van de specie
- de absolute snelheid van de specie

Voor beide cases is duidelijk te zien dat de straal/pluim eerst contractie vertoont bij een flinke toename van de snelheid. Dit betekent dat de zwaartekracht overheerst over de beginimpuls.

Vervolgens wordt de pluim in toenemende mate verdund door turbulente menging (entrainment). De beginwaarden voor snelheid en breedte zijn dus niet sterk van invloed, daarentegen is wel de massastroom van belang $[\text{kg/s}]$.

De snelheid en dichtheid waarmee de pluim uiteindelijk de bodem treft is af te lezen uit de figuren 7 en 11. Het klei-bentonietmengsel treft de bodem met een snelheid van ongeveer 2 m/s bij een dichtheid van minder dan 1050 kg/m^3 . De horizontale uitwijking is ondanks de flinke getijstroom beperkt (ca. 15 m).

Bij case II (mengsel van zand en bentoniet) met een veel hogere dichtheid is de eindsnelheid aanzienlijk hoger (ca. 4 m/s) bij ongeveer gelijke einddichtheid als case I. Vanwege de hogere valsnelheid is de uitwijking minder.

De verdunning als berekend met STRAAL3D zal zich niet tot aan het centrum van de stortwolk voordoen, aangezien de stortwolk al voor die tijd de bodem zal hebben bereikt. Dit geldt met name voor het mengsel met een begindichtheid van 1650 kg/m^3 . In de stortwolk met een begindichtheid van 1250 kg/m^3 zal de verdunning veel gemakkelijker tot het centrum van de wolk kunnen doordringen.

Indien er sprake is van samenhangende baggerspecie (brokken klei in het beun) dan kunnen individuele brokken zich los maken uit het front van de baggerspecie-kolom en sneller uitzakken. Waarnemingen uitgevoerd in de Verenigde Staten met behulp van een echolood aan boord van het stortschip toonden dit aan [Bokuniewicz, 1978].

Om zich los te maken van de stortwolk zullen de kleibrokken in de stortwolk een hogere valsnelheid moeten hebben dan de stortwolk zelf. De valsnelheid van deeltjes in een niet-Newtonse vloeistof kan worden berekend met [Wan en Wang, 1994]:

$$C_D \frac{1}{2} \rho_b u^2 \pi r^2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta \rho_b g - \frac{7}{8} \pi d^2 \tau_y$$

waarin:

C_D	: vormweerstandscoefficiënt	(1)
ρ_b	: dichtheid van de vloeistof	(1250 kg/m^3)
u	: stroomsnelheid	($2,5 \text{ m/s}$)
r	: straal van de korrel	(te berekenen)
Δ	: relatieve dichtheid	(0,52)

g	: versnelling van de zwaartekracht	(9,81 m/s ²)
τ_y	: zwichtspanning van de boorvloeistof	(10 Pa)

De invloed van de zwichtspanning op de valsnelheid blijkt verwaarloosbaar te zijn. Om zich los te maken van de stortwolk moet de diameter van de brokken groter zijn dan 80 centimeter.

Tijdens storten in het beun zullen de grote brokken zich echter verzamelen in de onderste laag en zullen bij het storten in de Westerschelde als eerste naar beneden vallen. Om zich los te maken van de stortwolk moet dan de valsnelheid in water groter zijn dan de valsnelheid van de stortwolk. De minimale brokdiameter om dit te bewerkstelligen is 40 centimeter.

Dit betekent dat hooguit enkele productie-eenheden zich zullen losmaken uit de stortwolk zodat er nauwelijks sprake zal zijn van segregatie/ontmenging.

Tijdens het valproces zullen deeltjes overgaan in de waterfase ten gevolge van segregatie aan de buitenzijde van de baggerspecie, entrainment van water, turbulente uitwisseling en het ontwijken van gas (lucht). Onderzoek in de Verenigde Staten [Bokuniewicz, 1978] toonde aan dat dit in de orde van 1-5% van de totale massa aan baggerspecie ligt. Dit betekent voor het hier beschouwde geval dat bij het storten van 1000 m³ baggerspecie met een dichtheid van 1650 kg/m³ maximaal 80 ton baggerspecie in suspensie zal gaan. Zoals gesteld in hoofdstuk 2 zakt deze wolk niet als een dichtheidsstroming uit maar volgens de, veel kleinere, valsnelheid van de individuele deeltjes. Ook bentonietdeeltjes zullen zich op deze wijze over de waterverticaal verspreiden en zullen gezien hun kleine deeltjesgrootte slechts zeer langzaam uitzakken.

Voor het berekenen van het zwevend stof gehalte in de omgeving van de stortlocatie bestaan geen modellen. In het algemeen bedraagt deze vertroebeling tientallen milligrammen per liter tot tien maal de van nature aanwezige achtergrond vertroebeling. Bij hogere dichtheden zakt de wolk uit als een dichtheidsstroming.

Omdat de wolk onderhevig is aan de convectie van de hoofdstroom kan deze uiteindelijk ver buiten het stortgebied tot bezinking komen.

4.3.3 Verspreiding over de bodem

Door de inslag van de stort op de bodem ontstaat door de plotselinge blokkade een ombuiging van de verticale beweging naar een radiale, horizontale verspreiding. Hierbij gaat een deel van de kinetische energie verloren door de grote interne turbulentie. Er treedt in het ombuigingstraject een "super-kritische" stroming op met een Froude-getal groter dan 1. Als de aanvoer stopt zal door de radiale verspreiding een ring met veel gesuspendeerd materiaal ontstaan zijn met een centrum met minder sediment [Bokuniewicz en Gordon, 1980]. Bij het storten van mengsels van zand en bentoniet zal van een dergelijke verspreiding sprake zijn.

Echter bij het storten van klei en bentoniet zullen de compacte kleibrokken nauwelijks verspreiden, omdat het grootste deel van de kinetische energie verloren gaat in de deformatie van de brokken. Deze brokken zullen een hoop vormen op de plaats waar zij op de waterbodem terecht komen. De specie die de brokken omgeeft zal zich wel over de bodem verspreiden.

De stroming van de suspensielaag over de bodem wordt bepaald door de afstroming onder invloed van gravitatie, depositie vanuit de suspensielaag, entrainment van of entrainment door de omringende stroming en diffusie met de omringende stroming. Met de huidige kennis kunnen deze processen niet eenvoudig bepaald worden; de bestaande theorieën en

empirische beschrijvingen zijn in het algemeen opgesteld voor systemen met lage concentraties. De invloed van de hoge sedimentconcentratie op de valsnelheid en turbulentie is kwantitatief nauwelijks bekend, de invloed op de flocculatie is zelfs nauwelijks te beschrijven.

Om toch enig inzicht te verkrijgen in de afstand waarover de slurry over de bodem zal worden verspreid kan worden uitgegaan van de meest eenvoudige situatie waarin een homogene zware vloeistof zich verspreidt over een vlakke bodem. De frontsnelheid u_f wordt gegeven door:

$$u_f = k \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g h}$$

waarin:

u_f	:	frontsnelheid	(m/s)
k	:	een empirische constante	(-)
ρ_s	:	dichtheid van de korrels	(kg/m ³)
ρ_w	:	dichtheid van water	(kg/m ³)
g	:	versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
h	:	hoogte van het front	(m)

De hoogte van de slibwolk kan ruw worden geschat door te veronderstellen dat de slibwolk zich in eerste instantie horizontaal verplaatst met dezelfde snelheid als waarmee zij naar beneden is gekomen en dat het slib zich naar alle kanten gelijkmatig verspreidt. Uit de STRAAL3D-berekeningen is de dichtheid van de slibwolk bekend. Omdat tevens de totale hoeveelheid vaste stof bekend is, is daarmee de inhoud van de slibwolk bekend.

Bij het storten van zand wordt er vanuit gegaan dat de helft van het zand direct na storten bezinkt.

Voor de hier beschouwde cases volgt hieruit:

	Case Zand	Case Klei
Volume slurry voor storten	1000 m ³	680 m ³
Dichtheid voor storten	1650 kg/m ³	1250 kg/m ³
Dichtheid bij bodem	1070 kg/m ³	1030 kg/m ³
Volume bij bodem	9300 m ³	5700 m ³
Valsnelheid bij bodem	4,7 m/s	2,6 m/s
Omtrek stortplek	140 m	150 m
Dikte suspensielaag	1,5 m	2,9 m
Frontsnelheid	0,45 m/s	0,38 m/s

Het volume voor storten bij de Case Klei is slechts 680 m³. De overige 320 m³ wordt gestort in de vorm van brokken die niet worden meegenomen in de suspensiestroming.

De omtrek van de plaats waar de slibwolk de bodem treft is geschat door te veronderstellen dat de slibwolk de breedte heeft die wordt gevonden met de STRAAL3D-berekening en de lengte van de uitstroomopening vermeerderd met eenmaal de diameter gevonden met STRAAL3D (zie figuur 14).

In figuur 15 is de frontsnelheid weergegeven als functie van de dichtheid en de dikte van de suspensielaag. De gevonden frontsnelheden stemmen qua orde grootte overeen met hetgeen is gemeten in de Verenigde Staten en op Loswal Noord [Kohsiek en Louisse, 1982].

Nu de frontsnelheid bekend is kan berekend worden hoever de slibwolk zich zal uitspreiden als bekend is hoe snel deze deeltjes uitzakken. Dit kan worden geschat met behulp van Stokes:

$$w = \frac{\Delta g d^2}{18\nu}$$

waarin:

w	:	valsnelheid deeltjes	(m/s)
Δ	:	relatieve dichtheid	(-)
d	:	diameter deeltjes	(m)
ν	:	kinematische viscositeit van de vloeistof	(m ² /s)

Voor deeltjes van 50 μm volgt hieruit een valsnelheid van 2,25 mm/s. Uit metingen blijkt een redelijke waarde voor de sedimentatie van slibvlokken in orde te liggen van 10 mm/s bij hoge concentraties en 1 mm/s bij lage slibconcentraties (100 mg/l) [Van Leussen, 1988].

Voor de gemiddelde frontsnelheid tijdens verspreiding wordt de frontsnelheid aangehouden behorende bij de helft van de maximale fronthoogte. Ook voor de valhoogte wordt aangehouden de helft van de maximale fronthoogte. Bij het storten van zand wordt voor deeltjes van 50 μm een horizontale verplaatsing gevonden van 210 m. Bij het storten van klei wordt voor deze deeltjesgrootte een horizontale verplaatsing gevonden van 250 m. Bentoniet zal langzamer uitzakken dan de gronddeeltjes en zal zich over een groter gebied verspreiden. De concentraties bentoniet zijn echter laag en het zoute milieu veroorzaakt mogelijk flocculatie van de bentoniet hetgeen de uitzaksnelheid verhoogt.

Bij bovenstaande berekening van de verspreiding over de bodem kunnen enkele kanttekeningen worden geplaatst:

- Er is uitgegaan van een constante frontsnelheid behorende bij de maximale laagdikte. In werkelijkheid neemt de laagdikte en daarmee de frontsnelheid af met toenemende afstand tot de stortlocatie.
- In werkelijkheid is de zeebodem niet vlak. Uiteindelijk zal het slib zich verzamelen in de kuilen op de zeebodem en zich niet verder uitspreiden.

Hier staat tegenover dat de invloed van de getijstrooming op de verspreiding van het materiaal alleen is meegenomen voor het valtraject (berekening STRAAL3D). Ook de suspensiestrooming over de bodem zal echter beïnvloed worden door de getijstrooming. Bentonietdeeltjes zullen gevoelig zijn voor turbulente resuspensie door de hoofdstroom. Tenslotte kan ook een helling in het bodemoppervlak de verspreiding van de suspensielaag sterk beïnvloeden.

De tijdschaal van het uitzakken van de dichtheidsstrooming bedraagt enkele uren. Omdat de cyclustijd van het laden, varen en lossen van boorspecie ongeveer anderhalf uur bedraagt, kan rond de stortlocatie worden gesproken van een permanente verhoging van de dichtheid bij de bodem.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De algemene conclusie van het rapport luidt dat de invloed van de aanwezigheid van bentoniet in boorspecie van de Westerscheldetunnel op de verspreiding tijdens en na storten in de Westerschelde gering zal zijn vanwege de lage concentraties bentoniet;

- Omdat het valproces van de primaire straal niet wordt bepaald door de valsnelheid van individuele deeltjes maar door de totale massastroom, is de aanwezigheid van bentoniet hierop niet van invloed.
- De aanwezigheid van bentoniet zal wel van invloed zijn op de afstand waarover zich een dichtheidsstroming zal voordoen over de bodem. Ten gevolge van de lange uitzaktijd van bentoniet zal de dichtheidsstroming zich over een grotere afstand verplaatsen. Deze invloed is met de huidige modellen niet goed te voorspellen.
- De invloed van bentoniet op de verspreiding van boorspecie over de waterverticaal zal verwaarloosbaar zijn. Ongeveer 5% van de boorspecie gaat in suspensie ten gevolge van turbulente uitwisseling en hiervan bestaat 2% uit bentoniet.
- Uit de metingen die zijn verricht rond het storten van baggerspecie blijkt dat de toename van vertroebeling van het omgevingswater sterk afhankelijk is van lokale omstandigheden en eigenschappen van het gestorte materiaal. Vanuit de analyse van meetresultaten van elders uitgevoerde metingen kunnen geen gedetailleerde voorspellingen worden gedaan voor de vertroebeling in de Westerschelde, anders dan hierboven geformuleerd. Beter inzicht in de verspreiding van boorspecie bij storten in de Westerschelde kan worden verkregen door het uitvoeren van een monitoringprogramma bij het storten van (bagger-)specie op in de MER voorgestelde locaties.

Naast het bovengenoemde kunnen uit deze studie de volgende conclusies worden getrokken:

- Uit tot nog toe uitgevoerde metingen volgt dat bij het storten van slib maximaal 5% van het materiaal door turbulente uitwisseling in suspensie gaat. Een uitzondering hierop vormen recente metingen in de Australiëhaven waar bij het storten met een onderlosser 7-13% van het materiaal in vertroebeling ging. Eigenschappen van het materieel en lokale omstandigheden spelen hierbij een belangrijke rol.
- Ten gevolge van een dichtheidsstroom over de bodem kan gestort slib zich over enkele honderden meters van de stortlocatie verplaatsen.
- Veel onderzoek naar de mogelijke ecologische effecten van storten van boorgruis bij olieboringen op zee spitst zich toe op boorspoelingen op oliebasis. Rond een boorlocatie waar uitsluitend boorspoelingen op waterbasis zijn gebruikt en gestort heeft biologisch en chemisch veldonderzoek geen meetbaar effect van de lozing kunnen vaststellen op de samenstelling van de bodemfauna.
- Bij het storten van de boorspecie met splijtbakken zal de hoofdstraal van het materiaal bij een stortdiepte van 30 meter en een getijstrooming van 1,25 m/s op maximaal 20 meter van de stortlocatie de bodem raken.
- Uit globale berekeningen voor de verspreiding ten gevolge van de dichtheidsstroming volgt voor een vlakke horizontale bodem een radiale verspreiding over 250 meter. Hierin is de mogelijke invloed van de getijstrooming niet verdisconteerd.

5.2 Aanbevelingen

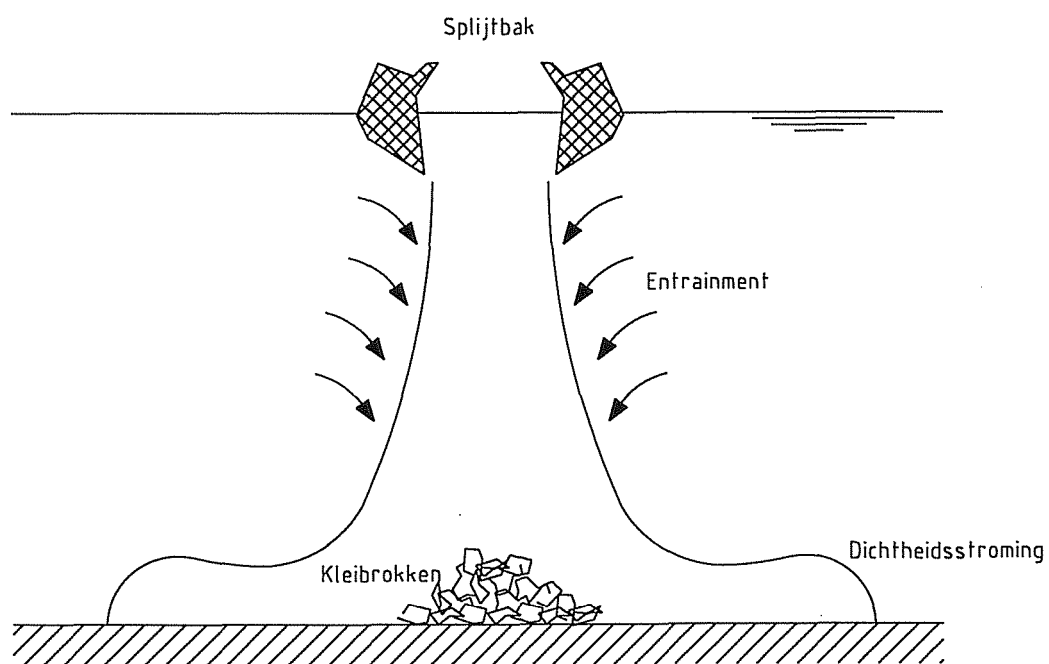
- Omdat de invloed van bentoniet op de verspreiding van boorspecie tijdens en na storten gering zal zijn is het uitvoeren van uitgebreid fysisch onderzoek naar deze invloed in dit kader niet gerechtvaardigd.
- Om bovenstaande conclusies gestand te doen verdient het aanbeveling het mogelijk storten van boorspecie in de Westerschelde te begeleiden met een monitoringsprogramma waarin vertroebeling van het omgevingswater en verspreiding van boorspecie over de bodem gemeten worden.
- Ook met het oog op toekomstige tunnelboorprojecten verdient het aanbeveling de effecten van het storten van boorspecie te monitoren.
- Om voorafgaand aan het mogelijk storten van boorspecie in de Westerschelde extra fysische kennis te verzamelen voor de specifieke lokale omstandigheden, verdient het aanbeveling om monitoring te verrichten rond het storten van havenslib in de Westerschelde. Met dergelijke metingen kan locatie-specifieke kennis worden vergaard tegen een geringe extra inspanning.
- De invloed van getijstroming op het convectief transport van boorspecie kan nader worden onderzocht met numerieke modellen.
- Het verdient aanbeveling de resultaten van de troebelheidsmetingen in Terneuzen en Zierikzee, die zijn uitgevoerd in 1991 en 1992, nader te interpreteren.

6 Literatuur

- Blokland T.; Raalte G.H. van; "Determination of dredging induced turbidity", Proceedings van de CEDA-Dredging Day: "Environmentally acceptable methods of dredging and handling harbour and channel sediments", B1, Hamburg, 28 september 1988.
- Bokuniewicz, H.J. en R.B. Gordon; "Deposition of dredged sediment at open watersites"; Estuarine and Coastal Marine Science, 1980 nr 10 p. 289-303.
- Bokuniewicz, H.J., et al., "Field study of the mechanics of the placement of dredged material at open-water disposal sites", Department of Geology and Geophysics, Yale University, April 1978.
- Briek, J. Bazuin, A.F., "Onderzoek naar verspreiding van baggerstortslib tijdens storten", Rijkswaterstaat Directie Groningen, notitie 90-02, mei 1990
- Brilhuis, R.A.; "De verdunning en verspreiding van baggerspecie gestort met de sleephopperzuiger Kinhem op de stortlocaties 'Mond van de Dollard' en Bocht van Watum", Rijkswaterstaat Directie Groningen, nota 84-03, januari 1984.
- Daan, R., Mulder, M., "A study on possible short-term environmental effects of WBM cutting discharges in the frisian front area (North Sea)", Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, NIOZ-rapport 1993 - 5.
- Daan, R., Mulder, M., "A study on possible environmental effects of a WBM cutting discharge in the North Sea, one year after termination of drilling", Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, NIOZ-rapport 1993 - 16.
- Davis, P.G.J., "Ervaringen met de grondverbeteringen stormvloedkering in de Oosterschelde", Rijkswaterstaat, Deltadienst, Polytechnisch Tijdschrift/Bouwkunde, wegen- en waterbouw 36, 1981, nr. 9 - 470.
- Frederic R. Harris B.V.; "Onderzoek naar de verspreiding van zwevende stof ten gevolge van de stort van baggerspecie met verschillende storttechnieken", augustus 1997.
- Gemeentewerken Rotterdam; "Het storten van baggerspecie met aangepaste uitstroomopening in de put van Heenvliet", Co. 103.11-R83.06, februari 1983
- Gordon, R.B., "Dispersion of dredged spoil dumped in near-shore waters", Dept. Geology and Geophysics, Estuarine and Coastal Marine Science 2, juni 1974.
- Groenewoud van het H., Vlies van der L., Hoornsman, G., Bowmer, T., "A comparative study of monitoring techniques to establish distribution and biological effects of drilling muds around off-shore installations on the Dutch continental shelf (1986)", TNO Division of Technology for Society, 1988.
- Heide van der T.A., Ploeg, I.W., "Onderzoek naar de invloed van de baggerspeciéstortingen op de slibconcentratie in het Groote Gat", Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, mei 1992.
- Heuvel van T., "Verspreiding van baggerspecie tijdens en na het storten vanuit een baggerschip", Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, nota: GWAO - 88.034, november 1988.
- Heuvel van T., Theune, J.W., "Metingen ter plaatse van Loswal Noord 1988", Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, notitie: GWIO - 89.526, juli 1989.
- Kohsiek, L., Louisse, K., "De verspreiding van baggerspecie op Loswal Noord", Projektgroep Slibverspreiding, "Raad van Overleg voor het fysisch oceanografisch onderzoek van de Noordzee", november 1992.
- Kombinatie Middelplaat Westerschelde; "Notitie Workshop MER d.d. 18-06-97", juni 1997
- Koster, A.W.J., Rij van A.A., "Straal 3D, Ronde straal in stromend medium (3-dim), handleiding", Waterloopkundig Laboratorium, mei 1988.

- Mol, G.A.J., "Onderzoek naar de gevolgen op de waterkwaliteit van het Hollandsch Diep t.g.v. slibstortingen te Cromstrijen", Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater, Hoofdafdeling Oppervlaktewater District Zuidwest, juni 1984.
- Neal, R.W. et al., "Evaluation of submerged discharge of dredged material slurry during pipe line dredge operations", Dredged Material Research Program, US-Army WES, TR D-78-44, augustus, 1978.
- Pennekamp, Joh.G.S., and Raalte, G.H. van, "Environmental Impact of Dredging", bijdrage voor de cursus: "Dredging and the Environment", CEDA Dredging Day, november 1989.
- Pennekamp, Joh.G.S., "Oriëntatie-troebelheidsmeting rond de diffusor in de Slufter op de Maasvlakte", Waterloopkundig Laboratorium voor de Combinatie Spuurwerk Baggertechniek en Gemeentewerken Rotterdam, augustus 1989.
- Pennekamp, Joh.G.S., Bosland, P., "Troebelheidsmetingen in de Slufter tijdens het storten van specie onder water met en zonder diffusor", Waterloopkundig Laboratorium voor de Combinatie Spuurwerk Baggertechniek en Gemeentewerken Rotterdam, augustus 1992.
- Pennekamp Joh.G.S.; Quaak M.P.; "Impact on the environment of turbidity caused by dredging", Terra et Aqua, no. 42 april 1990.
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland, Bouwdienst Rijkswaterstaat; "Boorspecie Westerscheldetunnel, startnotitie", april 1997
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland, "Meetresultaten Stroom- en sedimentmetingen Havens Terneuzen (T 1 fase)", Meetdienst Zeeland, Notitie: ZLMD-91.N.038, juni 1991.
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland, "Meetresultaten Sedimentmeting voor de Havenmond Zierikzee", Meetdienst Zeeland, Notitie: ZLMD-92.N.040, april 1992.
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland, "Meetresultaten Sedimentmeting voor de Havenmond Zierikzee", Meetdienst Zeeland, Notitie: ZLMD-92.N.042, april 1992.
- Vellinga T; "Environmental effects of dredging and disposal operations", Proceedings of WODCON XII, Orlando, Florida, May, 1989. pp 236- 252.
- Verbeek, H., Cornelisse, J. "Slib rond stortlocatie Cromstrijen: veldmeting september 1992", Rijkswaterstaat RIZA/Waterloopkundig Laboratorium, september 1993.
- Verlaan, P. en R. Spanhoff; "In situ procesonderzoek aan slibtransporten met duurmelingen bij de zeebodem"; IMAU, Utrecht 1992.
- Vuuren, W.E. van; "Waterkwaliteitseffecten slibstort Lateraalkanaal"; Rijkswaterstaat, Arnhem 1988.
- Wan Zhaohui en Zaoyin Wang; "Hyperconcentrated flow"; IAHR Monograph, 1994
- Zevenboom, W., et al., "Environmental effects of discharges from the offshore oil and gas industry in the North Sea", voorbereid door de "Working Group on Oil Pollution of the Paris Commission" als bijdrage voor de "1993 Quality Status Report of the North Sea", August 1992.'

Figuren



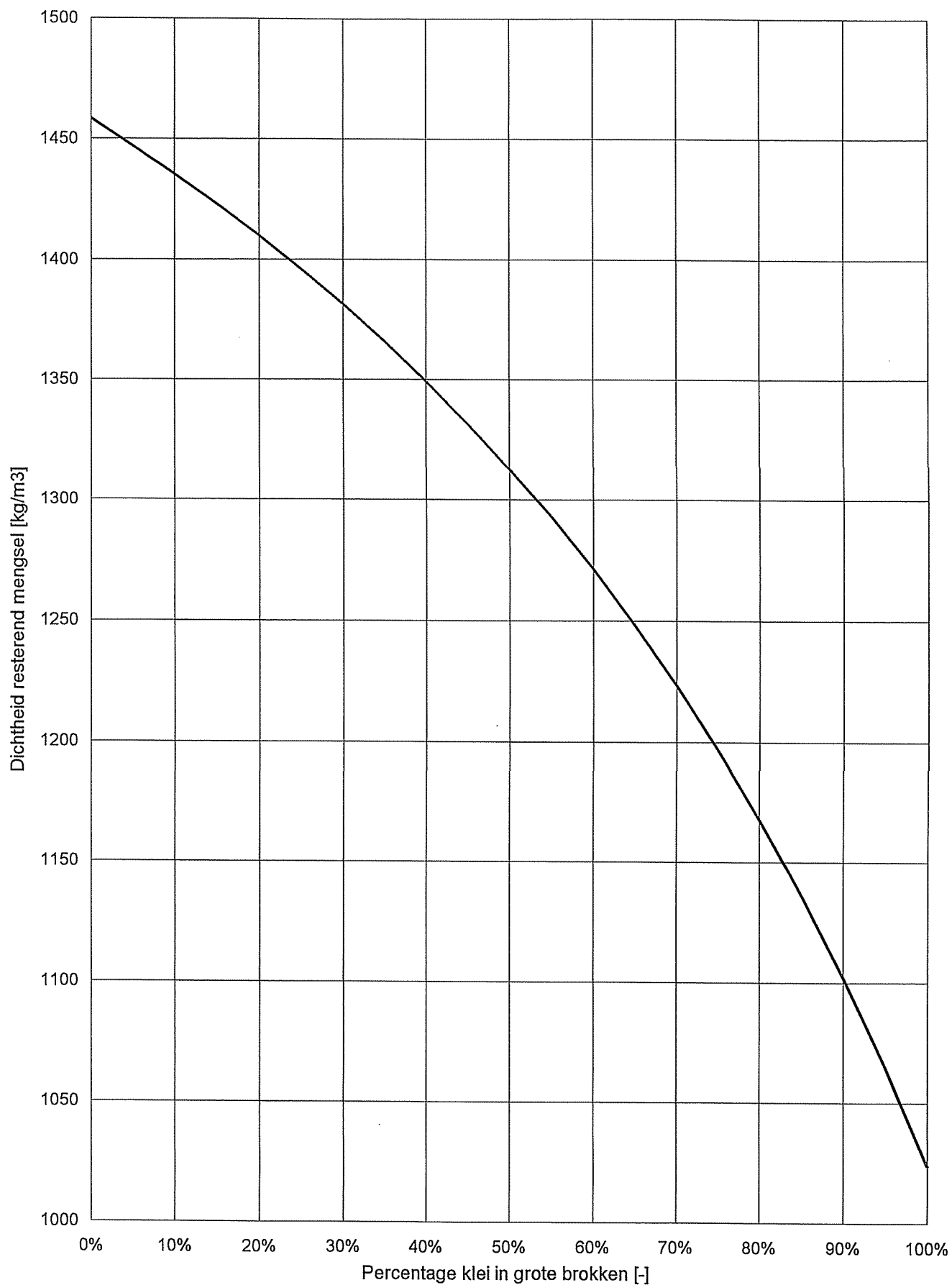
Het storten van slib met behulp van een splijtbak

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 1



Dichtheid mengsel na ontmenging kleibrokken

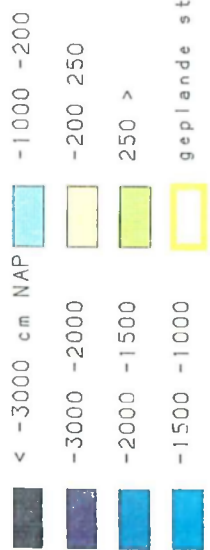
BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 2

Legenda



Stortvakken
boorspecie
Westerschelde

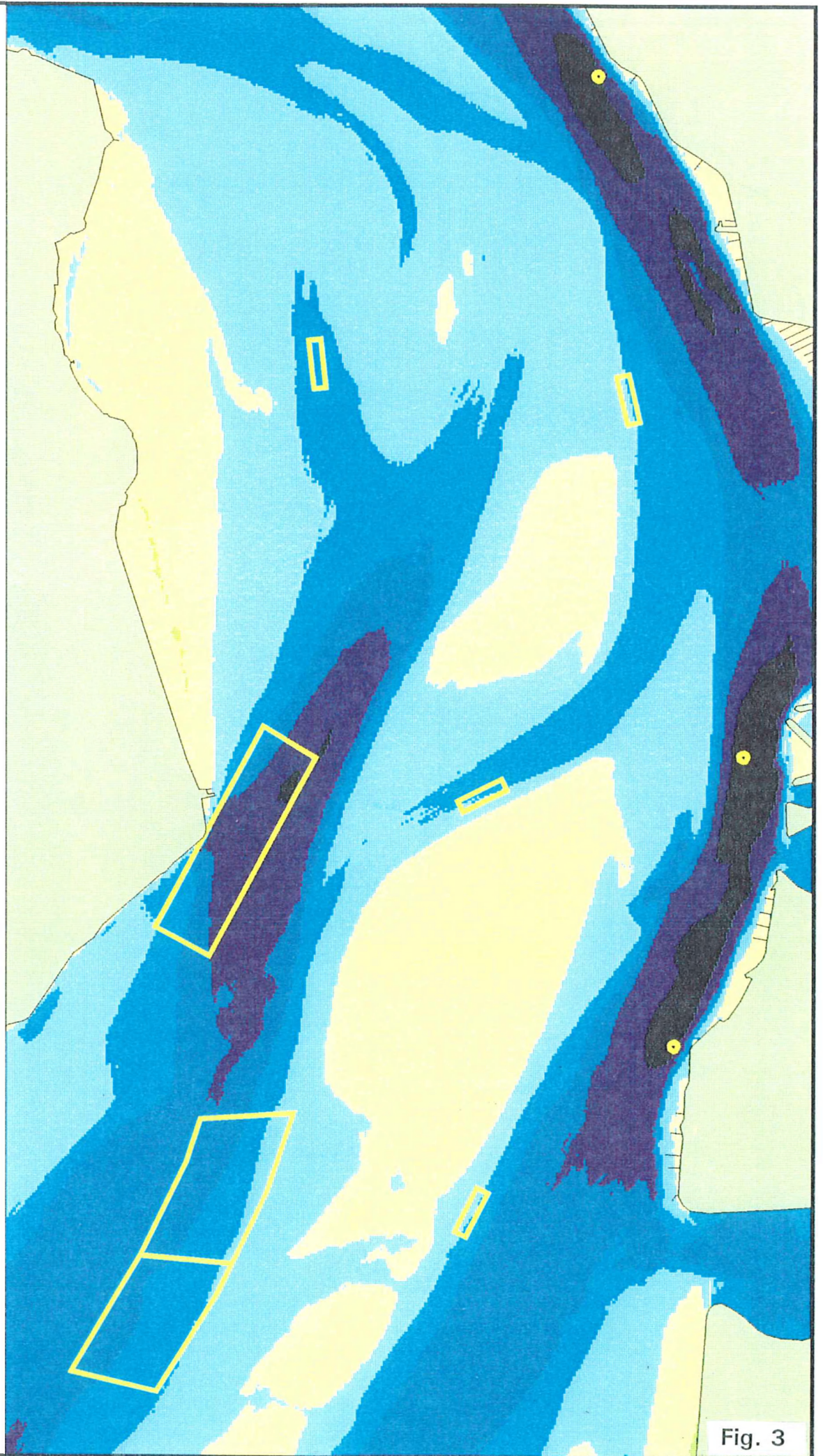


Fig. 3

Project: MER boorspecie Westerschelde
 Onderwerp: max. stroomsnelheden
 gem. getij bij vloed
 Bron: 2DH waterbewegingsmodel,
 Scadis100
 Datum: 31-JUL-1997

Legenda

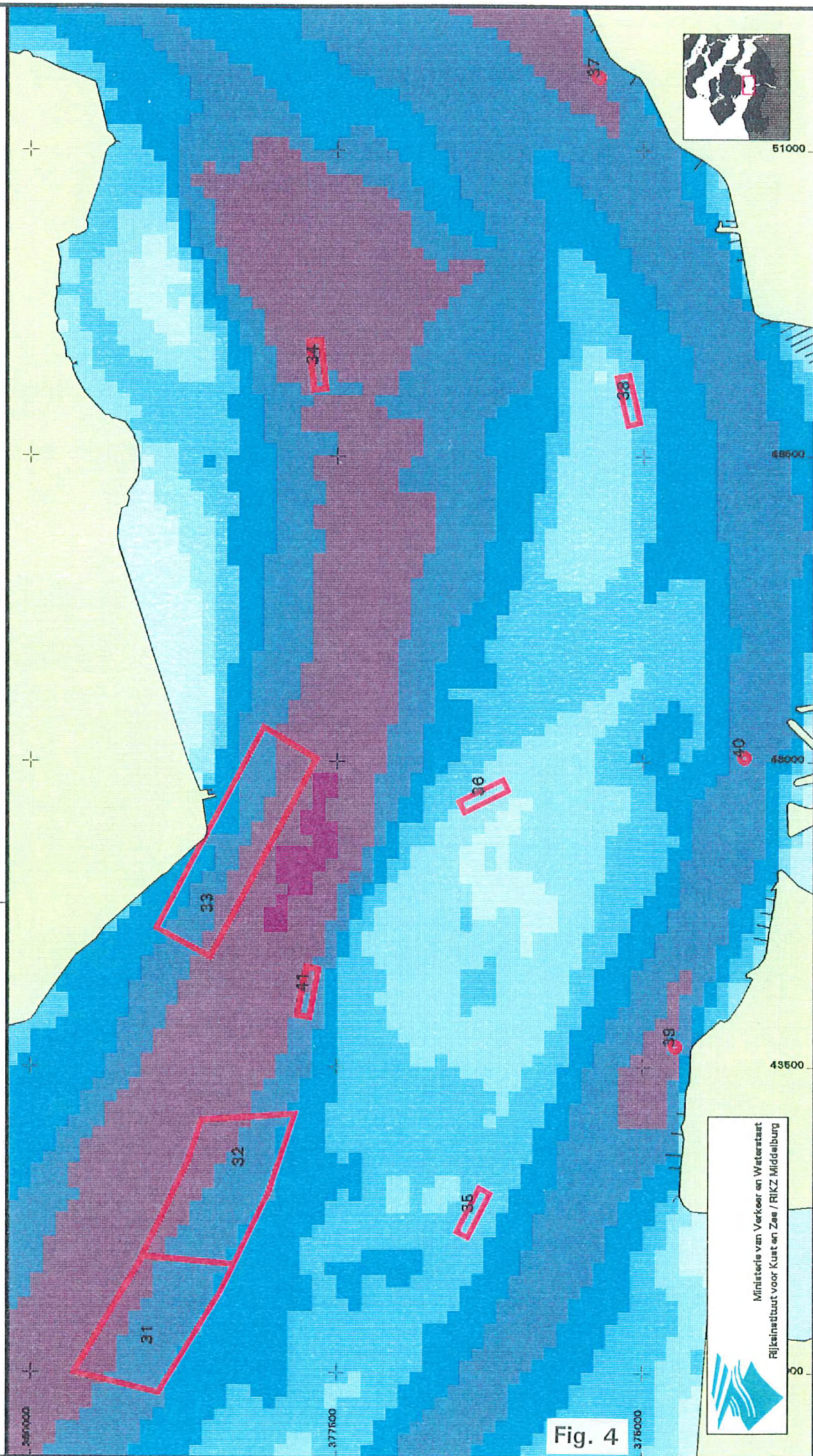
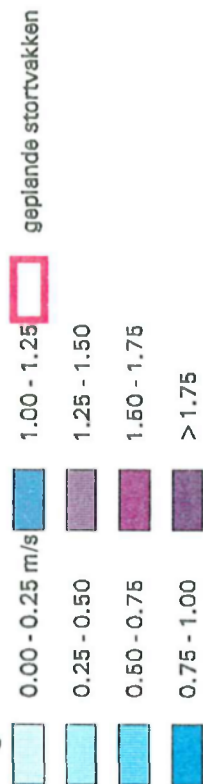


Fig. 4

Project: MER boorspecie Westerschelde
 Onderwerp: max. stroomsnelheden
 gem. getij bij eb
 Bron: 2DH waterbewegingsmodel,
 Scadis100
 Datum: 31-JUL-1997

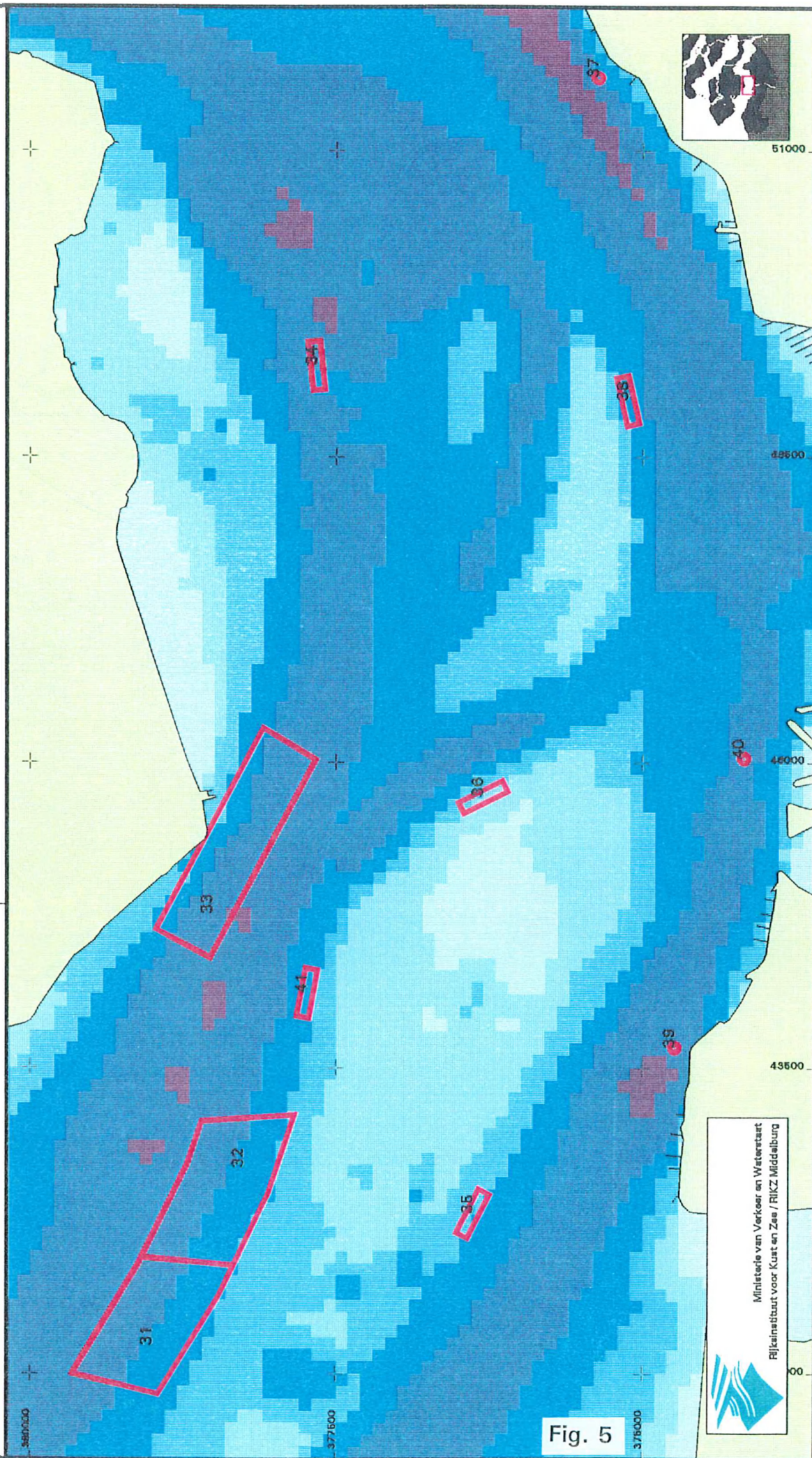
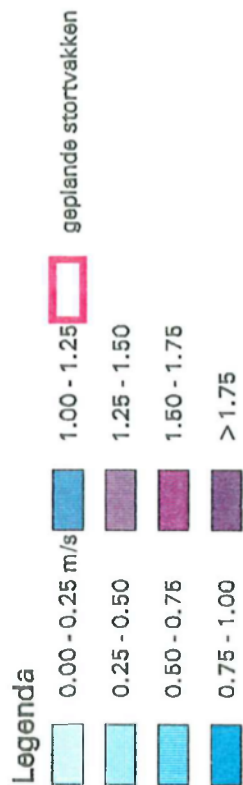
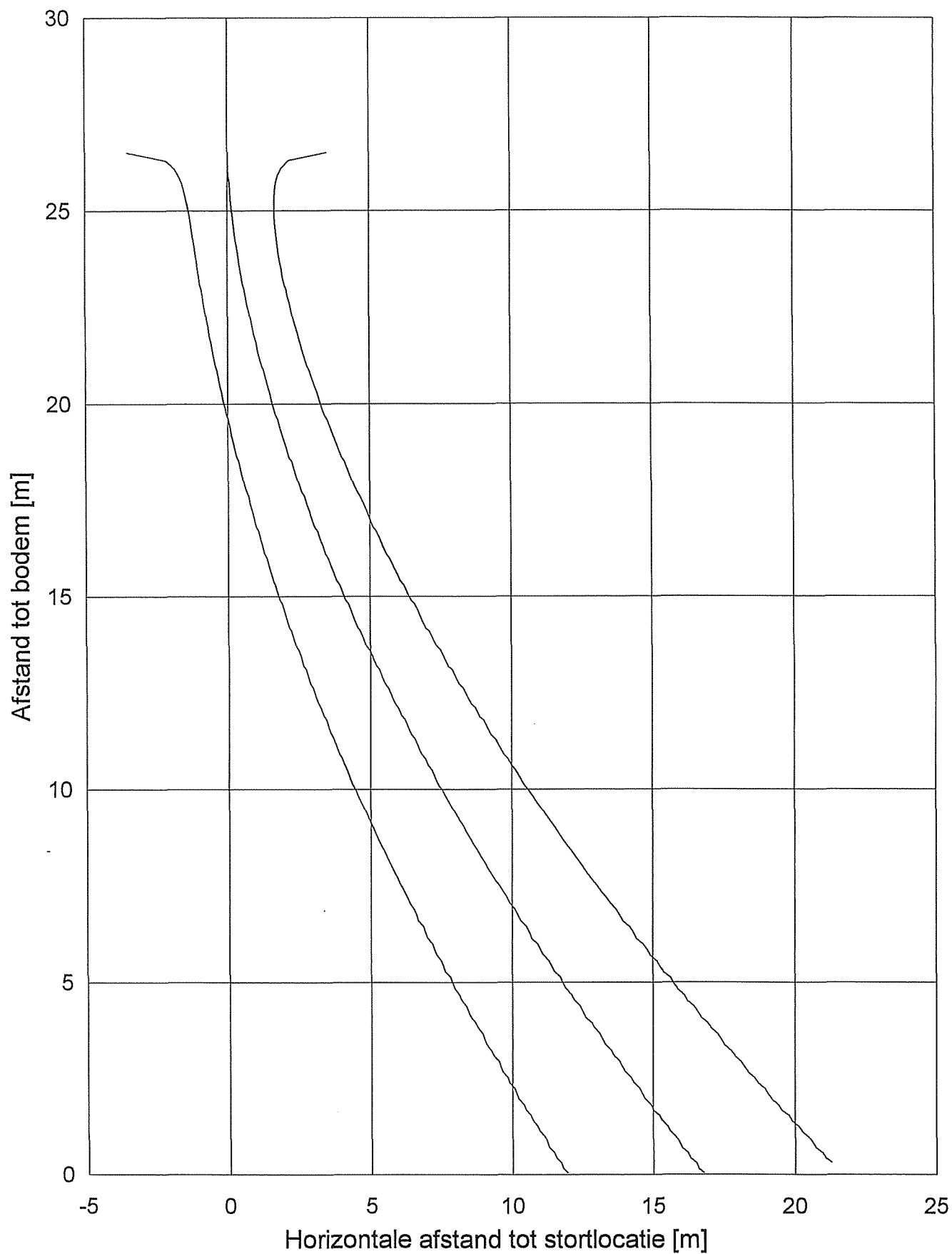


Fig. 5



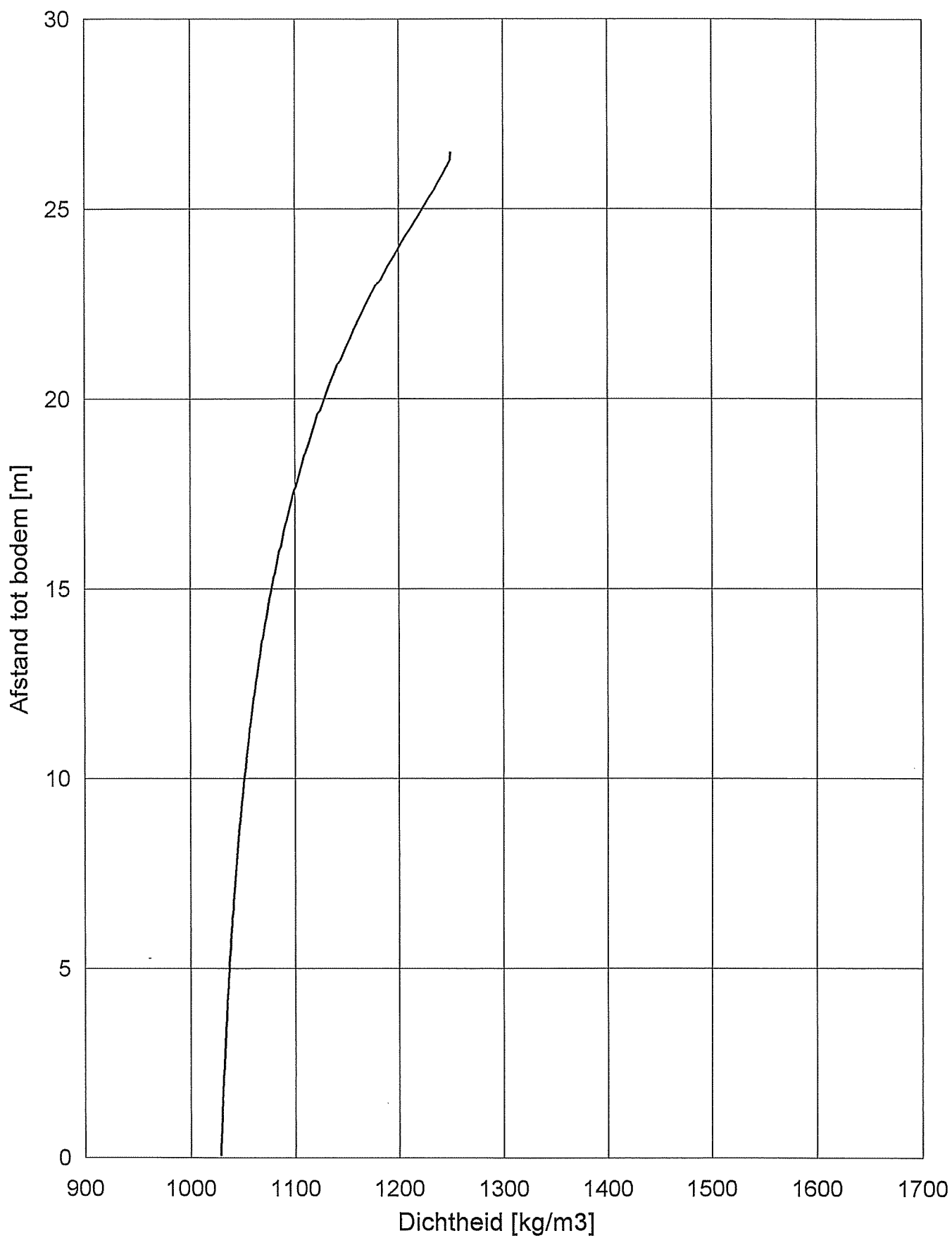
Baan speciestorting bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 6



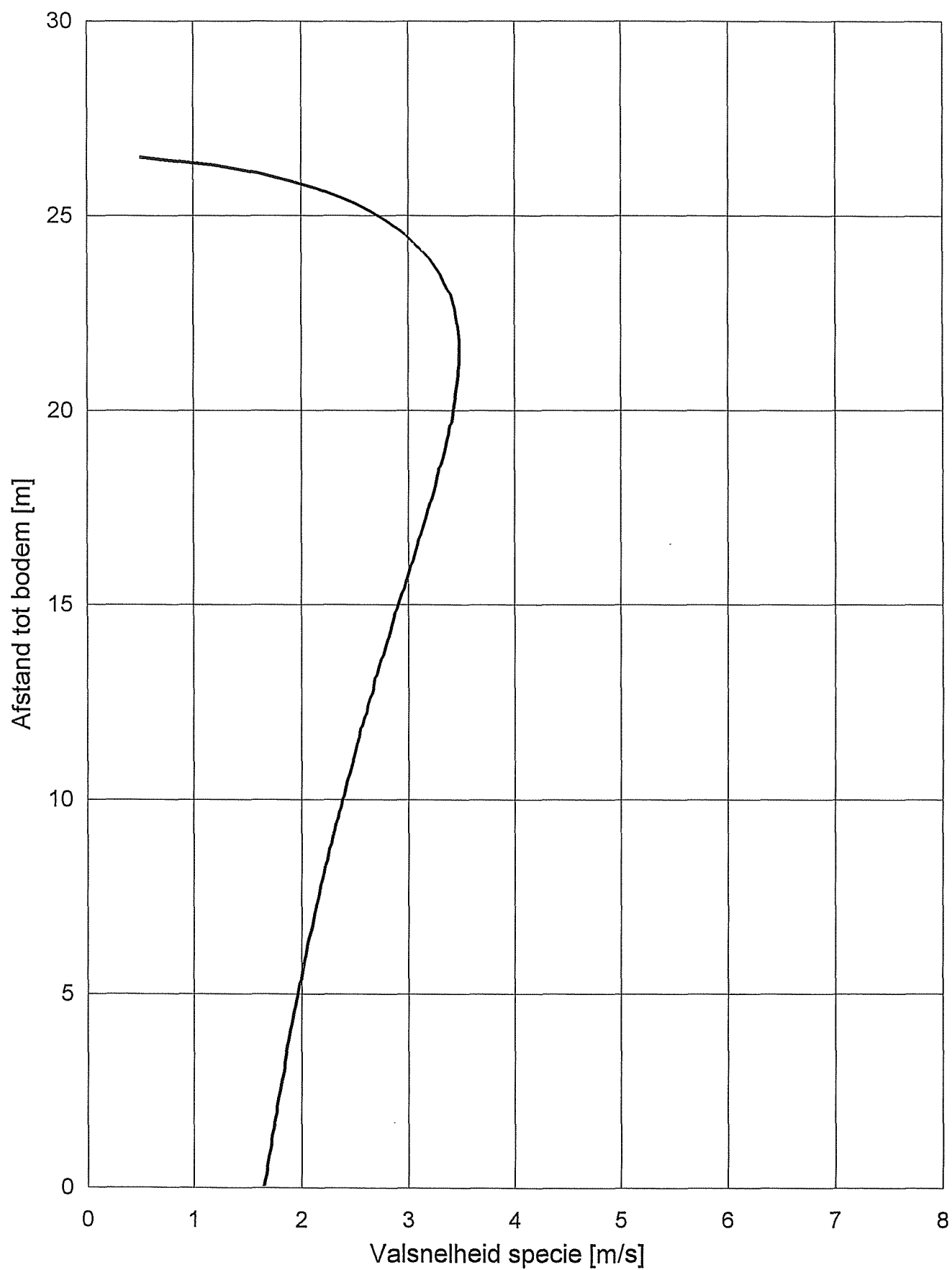
Dichtheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 7



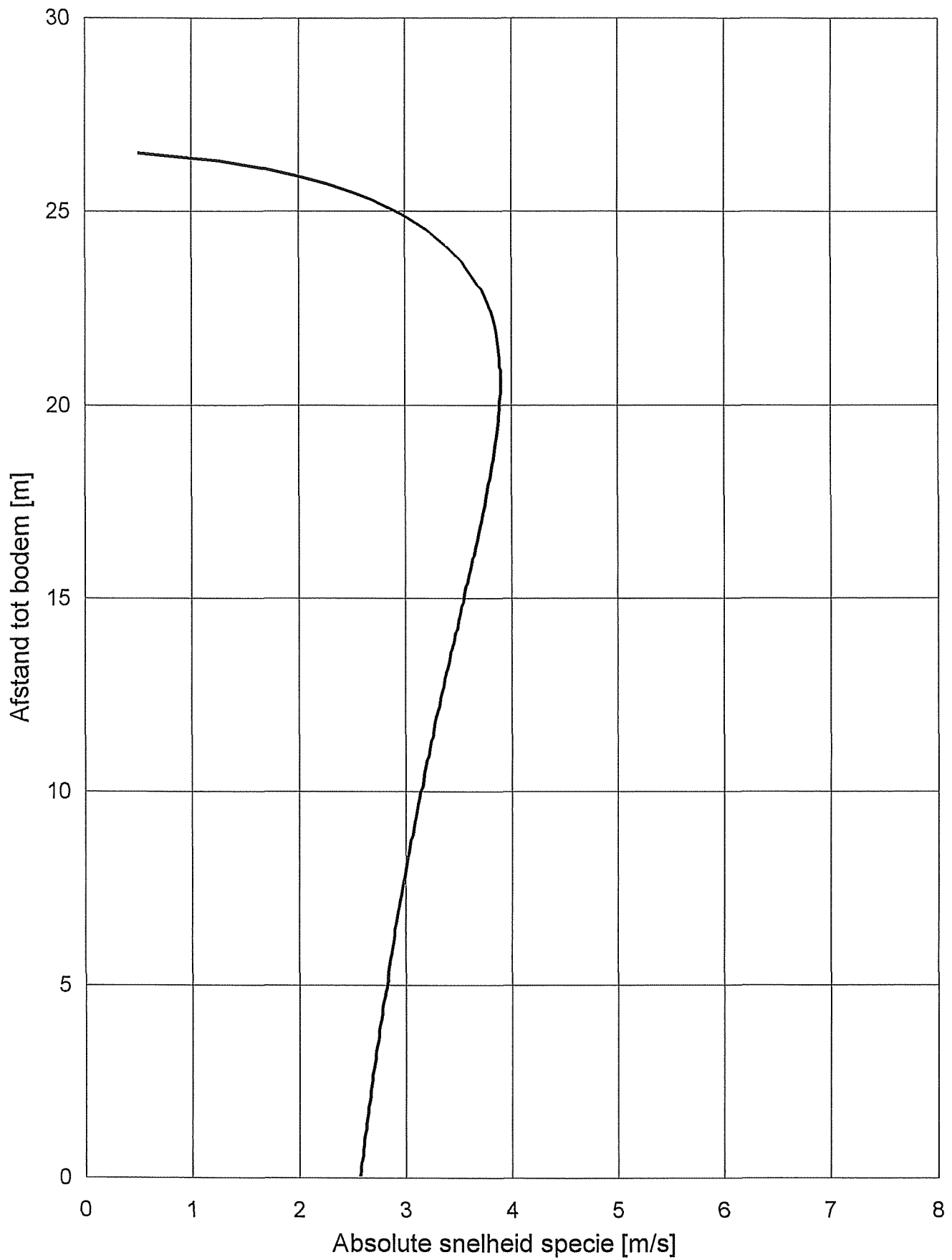
Valsnelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 8



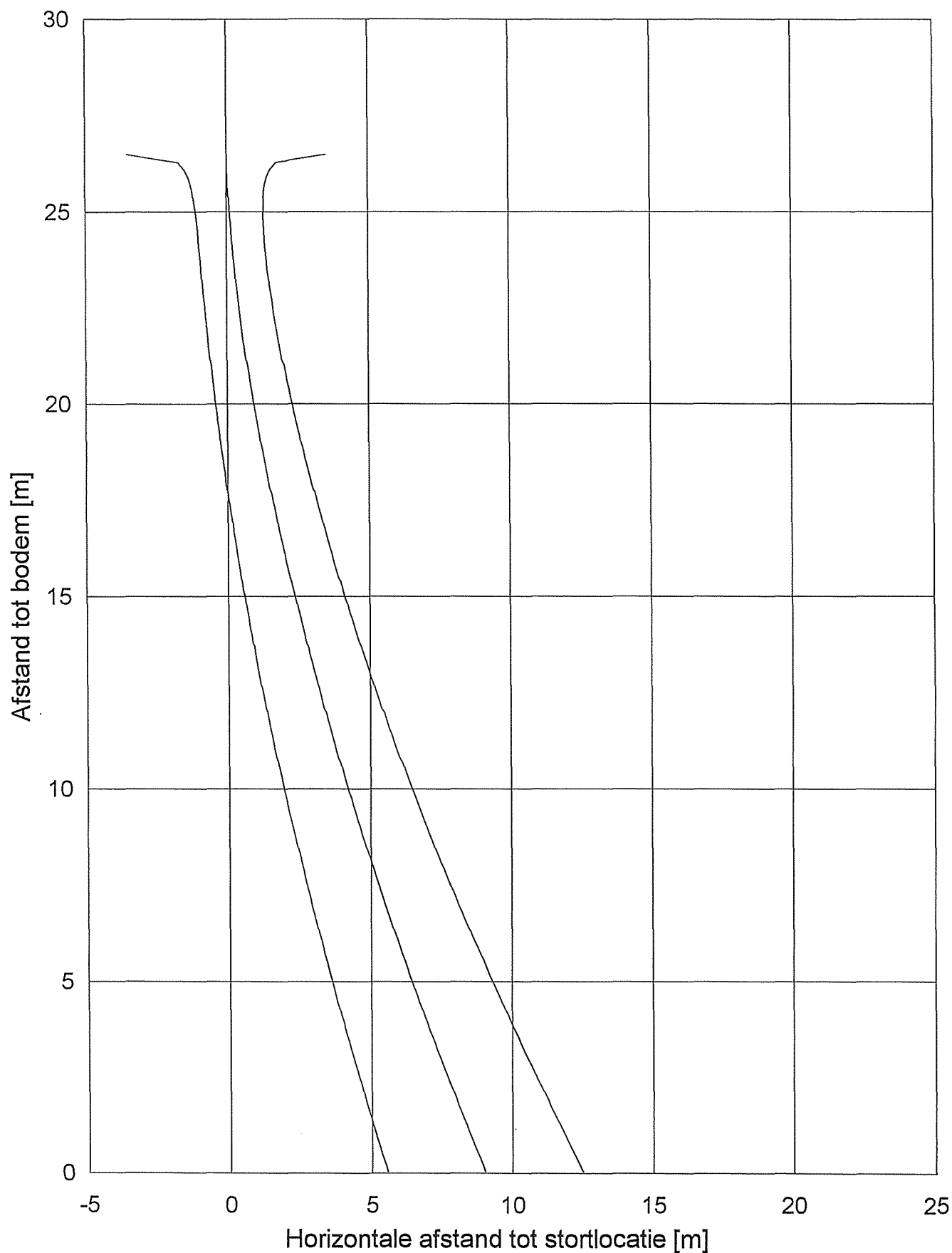
Absolute snelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

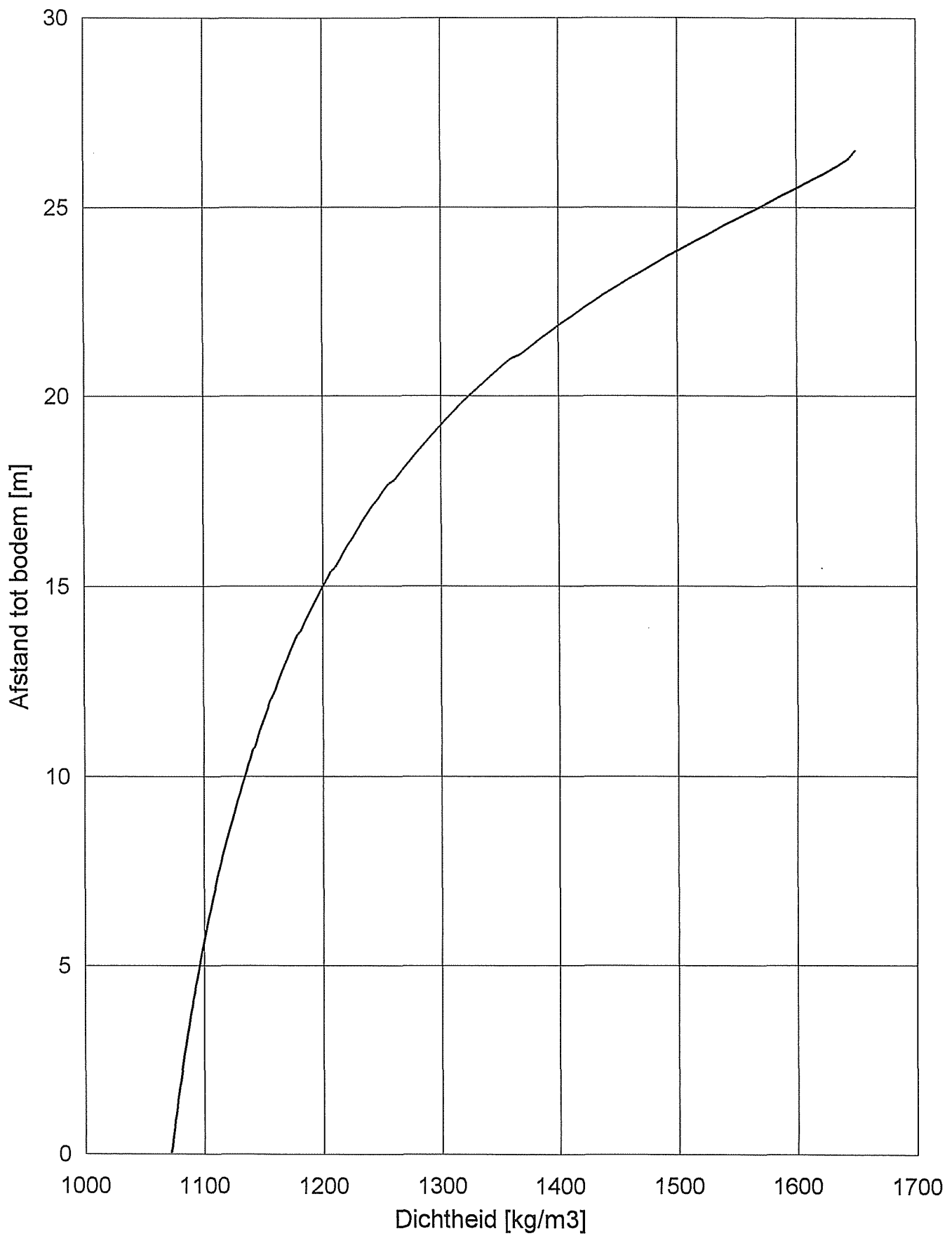
Fig. 9



Baan speciéstorting bij aanvangsdichtheid 1650 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442



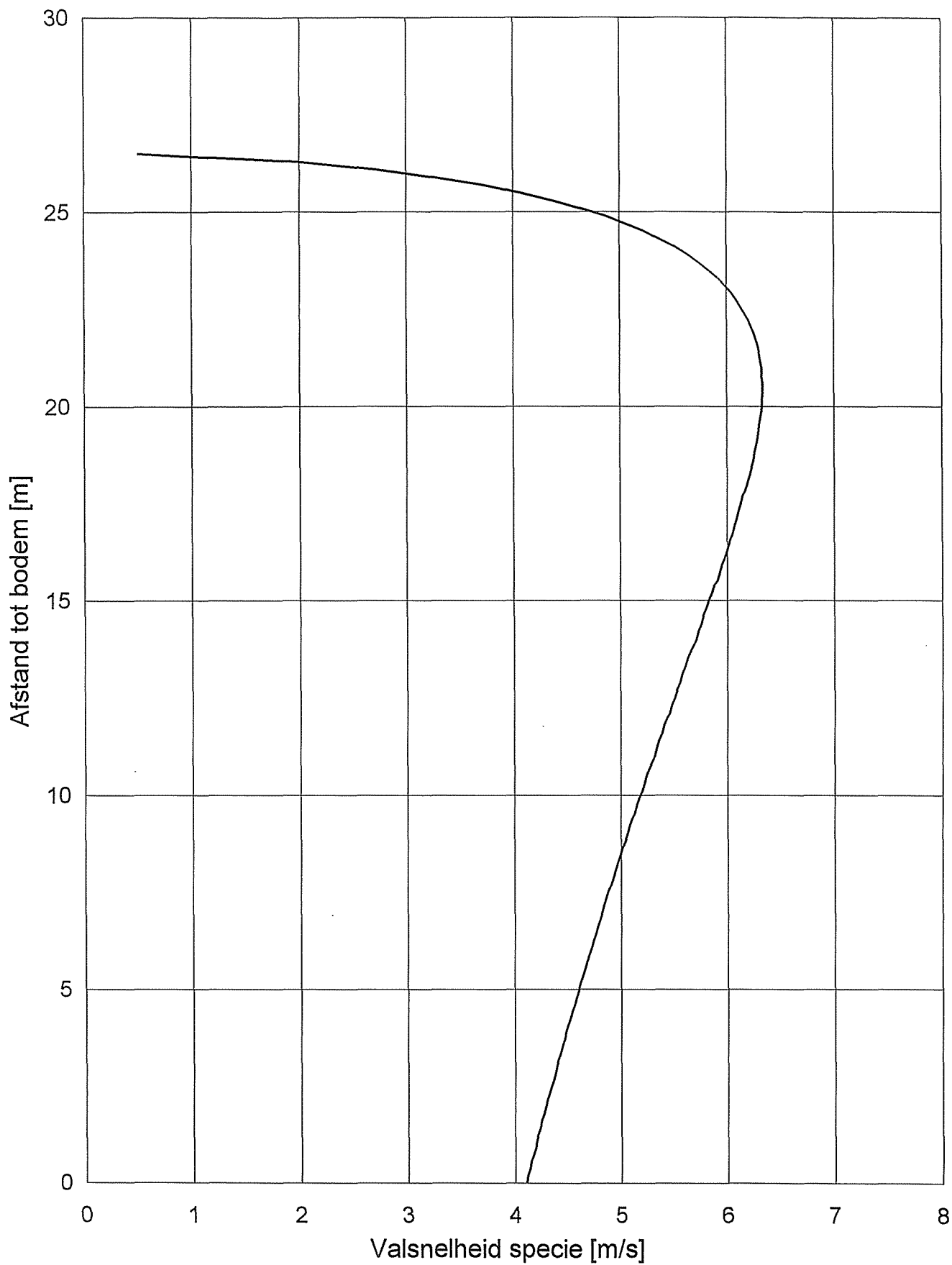
Dichtheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 11



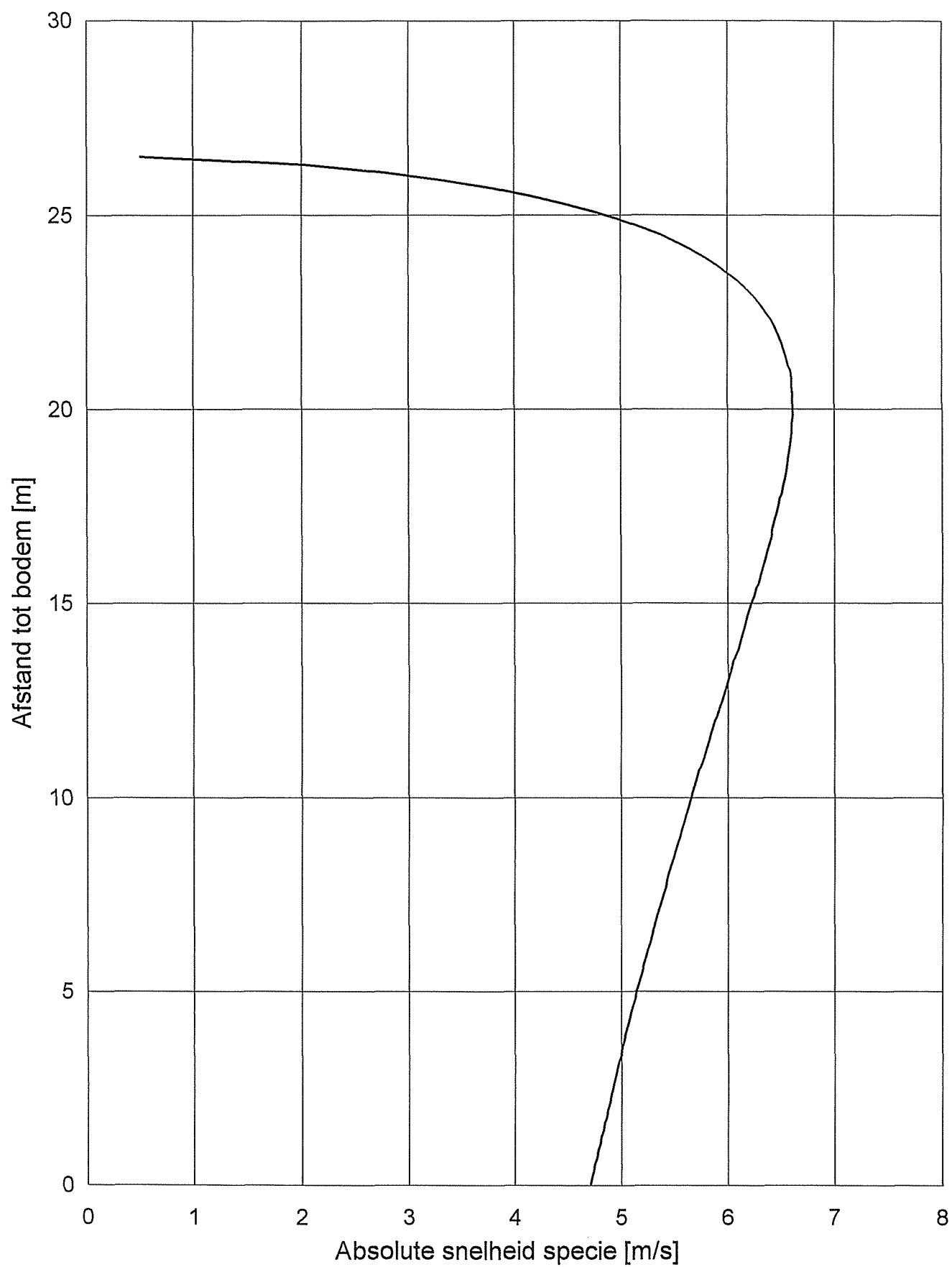
Valsnelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 12



Absolute snelheid specie bij aanvangsdichtheid 1250 kg/m³ (berekening STRAAL3D)

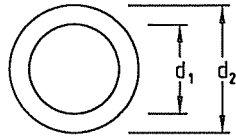
BAGT

J 1442

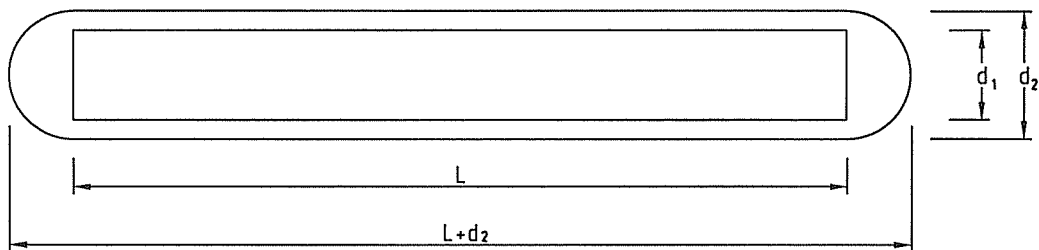
Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 13

Berekend Stortoppervlak op bodem met STRAAL3D
(ronde straal)



Aangenomen stortoppervlak op bodem voor splijtbak



L = lengte stortopening splijtbak
d₁ = breedte stortopening splijtbak
d₂ = breedte stortopening uit STRAAL3D

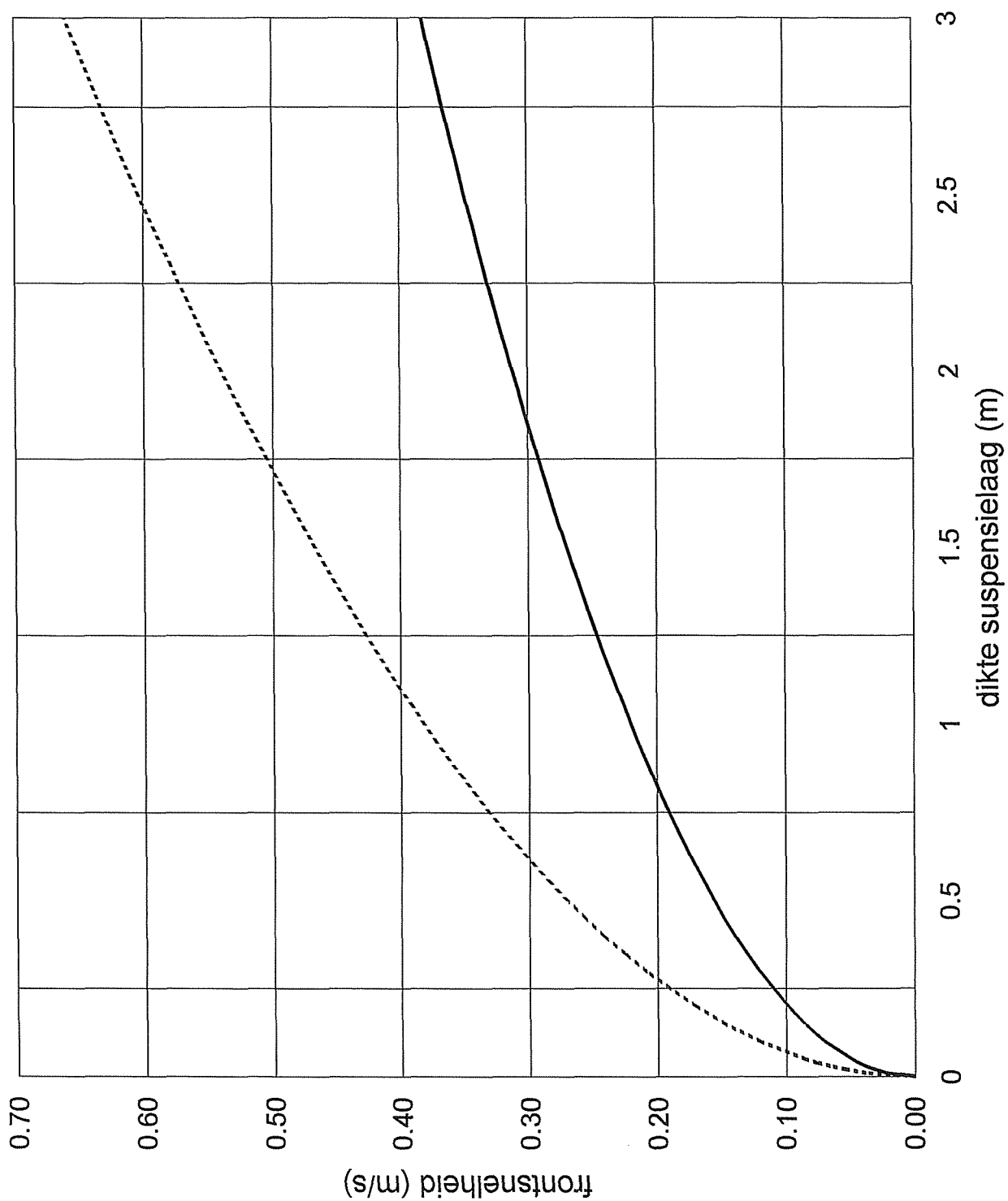
Aangenomen omvang stortoppervlak op bodem

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

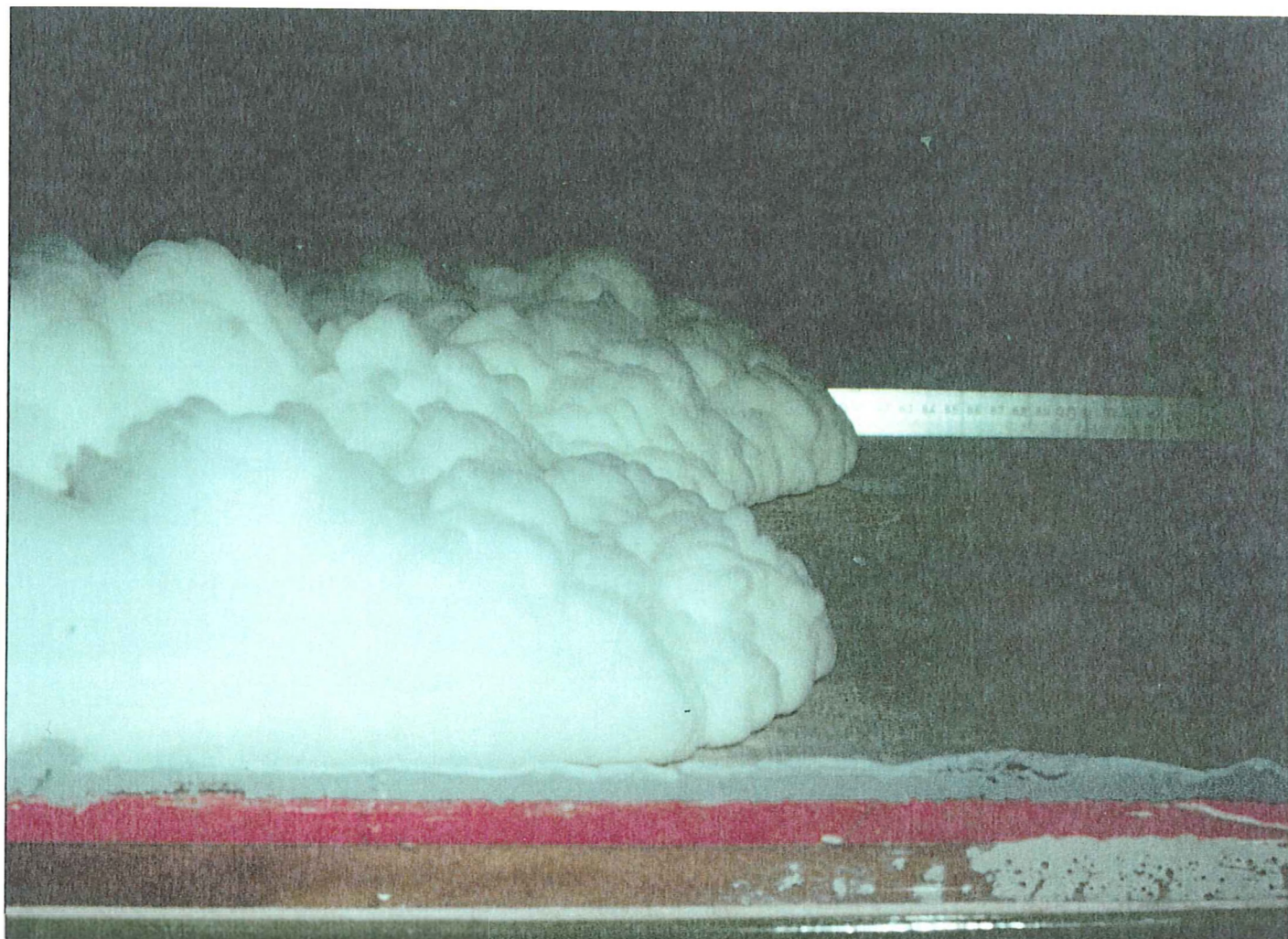
Fig. 14



Frontsnelheid dichtheidsstroming als functie van dichtheid en dikte suspensie laag

BAGT

J 1442



Dichtheidsstroming over de bodem onder laboratoriumomstandigheden

BAGT

J 1442

Waterloopkundig laboratorium | WL

Fig. 16