

## **SO Water en bodem rond constructies (WBC)**

**Zandtransport en zakking in open filters**



# **SO Water en bodem rond constructies (WBC)**

**Zandtransport en zakking in open filters**

G. Wolters

**Titel**  
SO Water en bodem rond constructies (WBC)

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Pagina's</b>	<b>Project</b>
Deltares	48	1200160.004




**Trefwoorden**  
Open filter, transport, zakking

**Samenvatting**  
Het doel van deze bureaustudie is een overzicht van beschikbare informatie over zandtransport in open filters en zettingsverschijnselen te krijgen.

Twee macroscopische transportmodellen (Klein Breteler 1992 en Den Adel et al. 1992) voor filters zijn gepresenteerd met elk hun eigen beperkingen. Algemene beperkingen van beide modellen zijn stationaire en turbulente stroming en macroscopisch transport. Den Adel's model is alleen voor bodemtransport geschikt (geen suspensietransport).

Beide macroscopische transportmodellen zijn alleen geschikt om een orde van grootte inschatting te maken van het transport. De geldigheid voor cyclische stroming wordt verondersteld voor  $T > 2-5s$  maar is niet geverifieerd.

Het transportmodel van Den Adel heeft vanwege zijn vele parameters (bv. dichtheiden  $\rho$  en  $\mu$ , korrelsnelheid, los- en vangfrequentie, meerdere evenredigheidsconstanten) veel ruimte voor onzekerheden. Deze onzekerheden zijn niet alle gekwantificeerd in het model. Het transportmodel van Den Adel is evenwel het enige beschikbare model dat op een brede theoretische en fysische aanpak is gebaseerd. Het model van Klein Breteler is vergelijkbaar eenvoudig maar heeft het voordeel van minder parameters en evenredigheidsconstanten.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	2010-03-05	G. Wolters		H. Verheij		M.R.A. van Gent	

**Status**  
definitief

## Inhoud

### Lijst van Tabellen

### Lijst van Figuren

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond: Geometrisch dichte en geometrisch open filters	1
<b>2</b>	<b>Stationaire stroming</b>	<b>3</b>
2.1	Inleiding	3
2.2	De Graauw et al. (1983)	3
2.3	Klein Breteler (1989)	4
2.4	Klein Breteler et al (1992)	6
2.5	CUR 161 (1993)	6
2.6	Conclusies voor 'begin van beweging'	7
<b>3</b>	<b>Cyclische stroming</b>	<b>8</b>
3.1	Cyclische stroming langs horizontaal / hellend grensvlak	8
3.2	Materiaalgradering	8
3.3	Mobiliteitsgetal $\psi$	9
<b>4</b>	<b>Zandtransport en filterzakking</b>	<b>11</b>
4.1	Macroscopisch transport (grensvlak instabiliteit)	11
4.2	Macroscopisch transportmodel van Klein Breteler (1992)	12
	Verdere resultaten uit het onderzoek van Klein Breteler (1992):	13
4.3	Macroscopisch transportmodel van Den Adel (1992)	16
4.3.1	Algemeen	16
4.3.2	Het transportmodel	17
4.3.3	Bepaling van losfrequentie en loskans	19
4.3.4	Zakking	21
4.3.5	Beperkingen transportmodel Adel et al.:	22
4.3.6	Discussie model	22
4.4	Afschatting zandindringing filter en zakking	23
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Literatuur</b>	<b>26</b>

### Bijlage(n)

**Appendix A:** Voorbeelden van uitgevoerde transportmetingen

## Symbolenlijst

Symbol	Eenheid	Betekenis
a,b	-	Forchheimer coëfficiënten
c	-	empirische coëfficiënt
$D_{15,f}$	m	filter diameter die door 15% (gewicht) wordt overschreden
$D_{50,b}$	m	basis diameter die door 50% (gewicht) wordt overschreden
g	$m/s^2$	zwaartekrachtversnelling
H	m	golfooogte
i	-	verhang
$i_{cr}$	-	kritieke verhang
KC	-	Keulegan-Carpenter getal
m	-	empirische coëfficiënt
$m_l$	m/s	mediane liggingsnelheid
N	-	aantal golven
n	-	porositeit
$n_f$	-	filter porositeit
$P_{los}$	-	kans dat een stilstaande korrel in beweging komt (loskans)
T	s	periode
T	kg/m	transport
$T_t$	s	duur van een wervel
U, v	m/s	stroomsnelheid
$v_{cr}$	m/s	kritieke stroomsnelheid
$v_f$	m/s	filtersnelheid (snelheid gemiddeld over gehele dwarsprofiel, inclusief filtermateriaal)
$\vec{v}$	m/s	snelheidsvector van de korrels
$v_d$	m/s	korrelsnelheid
x	m	plaatscoördinaat
$\alpha$	°	taludhelling
$\sigma'$	-	effectieve variatie in de liggings- en watersnelheid
$\Phi$	rad	rusthoek basismateriaal
$\psi$	-	mobilitetsgetal
$\psi_s$	-	Shields parameter
$\mu$	$1/m^3$	dichtheid van stilstaande korrels
$\mu_0$	$1/m^3$	dichtheid van stilstaande korrels aan het oppervlak tussen basis en filter
$\nu_w$	$m^2/s$	viscositeit van water
$\nu$	Hz	vangfrequentie
$\nu_1$	Hz	losfrequentie
$\rho_w$	$kg/m^3$	dichtheid water [ $kg/m^3$ ]
$\rho$	$1/m^3$	dichtheid (lees aantal korrels per volumen eenheid) van het totaal aantal korrels (stilstaand en bewegend)
$\rho_s$	$kg/m^3$	dichtheid sediment
$\Delta$	-	relatieve dichtheid ( $\rho_s / \rho - 1$ )

## Subscripts

b	-	basis (zand)
cr	-	kritiek
f	-	filter
m	-	gemiddeld
p	-	porie
rms	-	root-mean-square

## Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	$v_{fc}$ en $i_{cr}$ als gemeten in Klein Breteler (1989)	5
Tabel 4.1	filter materiaal en transport intensiteiten	13
Tabel 4.2	Parameters voor de berekening van de kritieke filtersnelheid	21

## Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Kritiek verhang bij stationaire stroming parallel met het grensvlak (volgens de Graauw, 1983)	4
Figuur 2.2	Kritiek verhang bij stationaire stroming parallel met het grensvlak	7
Figuur 3.1	Begin van uitspoeling ("suction") onder golfbelasting, $d = D_{50,b}$ en $D = D_{50,f}$	10
Figuur 4.1	Transport van materiaal per 30 minuten bij een stijgend en dalend verval (verhang)	14
Figuur 4.2	Gemeten en berekend transport van potentieel zeer instabiele materialen (T1- T4: grind, toenemend grover, T4': met gecorrigeerde filtersnelheid)	14
Figuur 4.3	Gemeten en berekend transport van potentieel minder instabiele materialen (T5-T6: mijnsteen, toenemend grover), berekening slechts voor T2 weergegeven	15
Figuur 4.4	Kans op transport bij gegeven diameters als functie van de filtersnelheid	16
Figuur 4.5	Evenwichtshelling zandindringing	24
Figuur 4.6	Bepaling zakking	24



# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond: Geometrisch dichte en geometrisch open filters

Het ontwerp van geometrisch dichte filters is relatief eenvoudig, maar vaak is een onnodig hoog aantal aan filterlagen en volume aan materiaal benodigd. Geometrisch dichte filters zijn vaak moeilijk te realiseren in het veld omdat er limitaties zijn aan wat voor materiaal steengroeven kunnen leveren. Bovendien, als constructiewerkzaamheden onder water worden uitgevoerd (bv. golfbreker teen), is een geometrisch dicht filter moeilijk te implementeren.

Een optie is geometrisch open filters. In dit geval is het filter zo ontworpen dat de hydraulische belasting te klein is om erosie van het basismateriaal te veroorzaken (de hydraulische gradient  $i$  is kleiner dan  $i_{cr}$ ). Ook is een beperkte erosie in het veld dikwijls toegestaan. Helaas is er slechts een beperkte hoeveelheid aan informatie beschikbaar over het ontwerp van geometrisch open filters die een aanvaardbaar en voorspelbaar verlies van kern materiaal onder golf- en stroombelasting toelaten.

Open filters worden bijvoorbeeld toegepast als kabelbescherming in offshore windparken en bij teenconstructies van golfbrekers, waar ze vaak de overgang vormen tot de onbeschermd zeebodem. De verbonden ontgroning en verzakking kan nog niet goed voorspeld worden wat aangetoond wordt door het falen (door ontgroning) van verschillende kust- en offshore constructies. In golfbrekers en 'revetments' is het zetten van de teen kritisch omdat het de stabiliteit van de toplaag ('armour layer') kan bedreigen, bijvoorbeeld voor steenzettingen en 'interlocked armour units'. Als de stabiliteit van de toplaag wordt aangetast kan dat snel tot het bezwijken van de hele constructie leiden (zie CUR 2007).

In de 1980s en 1990s is een groot aantal proeven gedaan door bijvoorbeeld Bakker et al. (1994), Klein Breteler (1992) om de kritische hydraulische gradiënt (parallel en normaal t.o.v. het grensvlak) voor transport in filters te bepalen wat geresulteerd heeft o.a. in verschillende formules en een ontwerp diagram voor de grensvlakstabiliteit van korrelfilters, die ook is opgenomen in de richtlijnen van CUR (2007). Verder zijn nieuwe criteria voor grensvlakstabiliteit geïntroduceerd door Verheij et al. (2009), hoewel deze nog niet volledig zijn geverifieerd. De toepasbaarheid van de formules op grote schaal is nog niet specifiek onderzocht. Ook over de spreiding in de resultaten van de verschillende methodieken is weinig bekend.

De boven genoemde onderzoeken zijn uitgevoerd vooral voor stationaire, niet-cyclische stroming en gefocust op het begin van transport van basismateriaal door het filter. Er is dus niet specifiek gekeken naar de hoeveelheid aan getransporteerd materiaal of de zakking van het filter, hoewel er een aantal transportmetingen zijn gedaan (meestal voor kleine transportmassa en voor niet-cyclische stroming). Kritische hydraulische gradiënten en materiaaltransport voor cyclische stroming zijn dus nauwelijks bekend.

De boven genoemde aspecten duiden aan dat betere richtlijnen voor de stabiliteit van open filters onder golf- en stromingsbelasting tot grote kostenreductie, betere uitvoerbaarheid en minder materiaal verbruik kunnen leiden, en dus van groot belang voor de industrie zijn.

Het doel van deze bureaustudie is een overzicht van beschikbare informatie van zandtransport in open filters en zettingsverschijnselen te krijgen om toekomstige modelproeven voor te bereiden.

## 2 Stationaire stroming

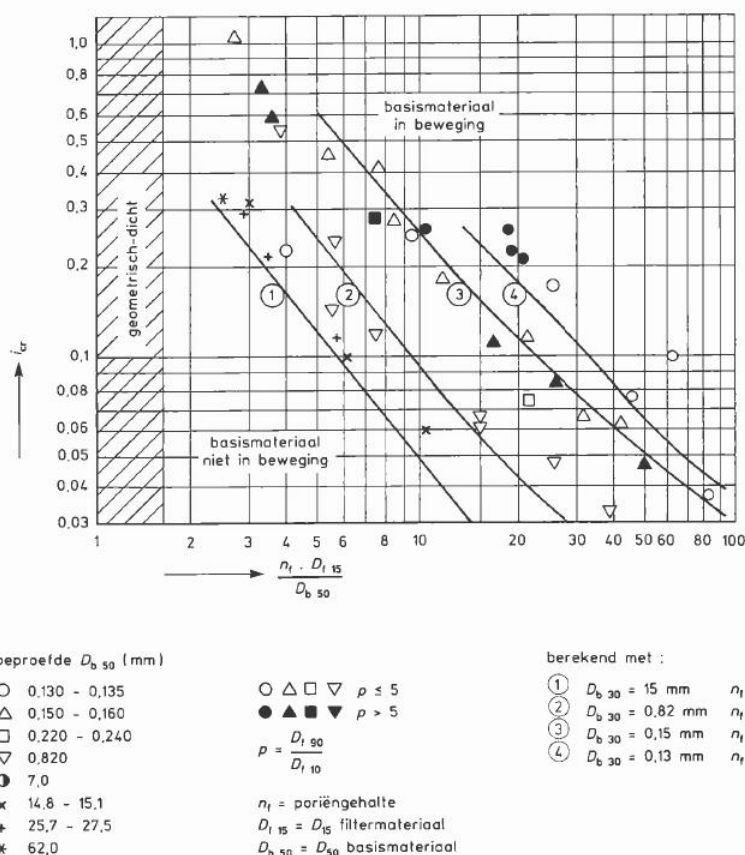
### 2.1 Inleiding

Een uitgebreid verslag over de stand van kennis voor open filters en het begin van beweging bij stationaire stroming is al door De Vroeg (2009) uitgevoerd. Alleen de voor dit rapport meest belangrijke formules voor het begin van beweging zijn hier opgenomen. Voor meer informatie wordt verwezen naar De Vroeg (2009). Het navolgend rapport focust voornamelijk op transportprocessen en filter zakking.

Er wordt naar De Vroeg (2009) verwezen voor een discussie van de onderzoeken van Uelman (2006) en Ockeloen (2007). Deze onderzoeken richten zich op zanderosie door een hellend filter van een golfbreker en de daaruit volgende vervorming van de golfbrekeroppervlak. Geconcludeerd werd dat de dimensieloze parameter  $m = d_f / D_{50,f}$  een belangrijke parameter is. Met toenemende waarde van  $m$  nam de vervorming (erosie bovendeel) af. Twee vergelijkingen zijn afgeleid voor de totale erosie van het zandprofiel.

### 2.2 De Graauw et al. (1983)

In de Graauw et al. (1983) worden nieuwe inzichten volgend uit het Oosterschelde-onderzoek samengevat. Metingen van het kritieke verhang gedaan voor uniforme stroming zijn samengevat in Figuur 2.1. Opvallend is dat bij een constante verhouding tussen de karakteristieke diameters van het filter- en basismateriaal het kritieke verhang afneemt bij een toename van de diameter van het basismateriaal. Waarschijnlijk zijn de eigenschappen van het filter boven het zand dominant over de zandeigenschappen.



**Figuur 2.1** Kritiek verhang bij stationaire stroming parallel met het grensvlak (volgens de Graauw, 1983)

Voor stationaire stroom evenwijdig aan het grensvlak werd een nieuwe empirische relatie voorgesteld:

$$i_{cr} = \left[ \frac{0.06}{n_f^3 D_{15,f}^{4/3}} + \frac{n_f^{5/3} D_{15,f}^{1/3}}{1000 D_{50,b}^{5/3}} \right] v_{*cr}^2 \tag{2.1}$$

met voor zand als basismateriaal:

$$v_{*cr} = 1.3 D_{50,b}^{0.57} + 8.3 \cdot 10^{-8} D_{50,b}^{-1.2} \tag{2.2}$$

Opgemerkt wordt dat deze relaties dimensie-dragende coëfficiënten bevatten.

### 2.3 Klein Breteler (1989)

Klein Breteler (1989) bevat resultaten van proeven voor horizontale stationaire stroming door een filter boven een zandbed. Doel van het onderzoek was bij te dragen aan een onderzoek naar zandtransport in granulaire filters.

Drie proeven werden uitgevoerd waarbij stroming werd gegenereerd door een filterlaag op zand. Zandtransport-metingen werden uitgevoerd waaruit de kritieke filtersnelheid en het kritieke verhang bij begin van zandtransport werden afgeleid. Typische materiaal-karakteristieken en meetresultaten zijn samengevat in Tabel 2.1.

test	D <sub>50,b</sub> (mm)	n <sub>b</sub>	D <sub>50,f</sub> (mm)	D <sub>15,f</sub> (mm)	n <sub>f</sub>	v <sub>f,cr</sub> (mm/s)	i <sub>cr</sub>
T1*	0.15	0.49	8.0	7.0	0.39	21	0.15
T2*	0.15	0.41	8.0	7.0	0.39	19	0.13
T3	0.15	?	4.0	3.4	0.41	14	0.27

Tabel 2.1 v<sub>f,cr</sub> en i<sub>cr</sub> als gemeten in Klein Breteler (1989) Bij proef T1 zat veel lucht in het zand, bij proef T2 niet.

De metingen werden vergeleken met berekende waarden voor v<sub>f,cr</sub>, bepaald met de formule

$$v_{f,cr} = \left[ \frac{n_f}{c} \left( \frac{D_{15,f}}{v_w} \right)^m \sqrt{(\psi_s \Delta g D_{50,b})} \right]^{\frac{1}{(1-m)}} \quad \text{voor } 0,1 < D_{50,b} < 1 \text{ mm} \quad (2.3)$$

$$v_{f,cr} = \frac{n_f}{0,22} \sqrt{(\psi_s \Delta g D_{50,b})} \quad \text{voor } D_{50,b} > 0,7 \text{ mm} \quad (2.4)$$

Met

c, m = empirische coëfficiënten (afhankelijk van D<sub>50,b</sub>, waarden o.a. in CUR (1993))

ψ<sub>s</sub> = Shields parameter (afhankelijk van D<sub>50,b</sub>, waarden o.a. in CUR (1993))

v<sub>w</sub> = viscositeit water

Voor ψ<sub>s</sub> kan ook de volgende relatie gebruikt worden (geldig voor diameters D<sub>50,b</sub> tussen 0,1mm en 1m, Den Adel et al. 1992):

$$\psi_s(D_{50,b}) \approx \frac{0.0000108}{D_{50,b}} + 0.06 \cdot \text{tgh}(-500 \cdot D_{50,b}) \quad (2.5)$$

Het bijbehorende verhang (voor v<sub>f,cr</sub>) werd bepaald met de formule van Forchheimer:

$$i = av_f + bv_f^2 \quad (2.6)$$

Met:

$$a = \frac{160v_w(1-n_f)^2}{gn_f^3 D_{15,f}^2} \quad (2.7)$$

$$b = \frac{2.2}{gn_f^2 D_{15,f}} \quad (2.8)$$

De berekende kritieke waarden bleken wat kleiner (enkele tientallen procenten) dan de gemeten waarden.

## 2.4 Klein Breteler et al (1992)

In Klein Breteler et al. (1992) worden ontwerpregels op basis van TAW onderzoek gepresenteerd. In het onderzoek is geconcludeerd dat de grootte van de filtersnelheid bepalend is voor uitspoeling van het bedmateriaal. In het rapport wordt gesteld dat – hoewel het onderzoek gericht was op filters onder steenzettingen – de resultaten ook bruikbaar zijn voor andere typen constructies.

Voor de kritieke filtersnelheid, waarbij het zandtransport nog net niet op gang komt, wordt de volgende formule gepresenteerd (stationaire stroming, voor  $0.1 < D_{50,b} < 1 \text{ mm}$ ):

$$v_{f,cr} = \frac{n_f}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{50,b} \left( \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1 - n_b)} \right)} \quad (2.9)$$

met:

$$e = c \text{Re}^{-m} = c \left[ \frac{v_{f,cr} D_{15,f}}{v_w} \right]^{-m} \quad (2.10)$$

met:

$\phi$  = rusthoek basismateriaal

$\alpha$  = taludhelling

$i_{\perp}$  = verhang in de basis, loodrecht op het grensvlak

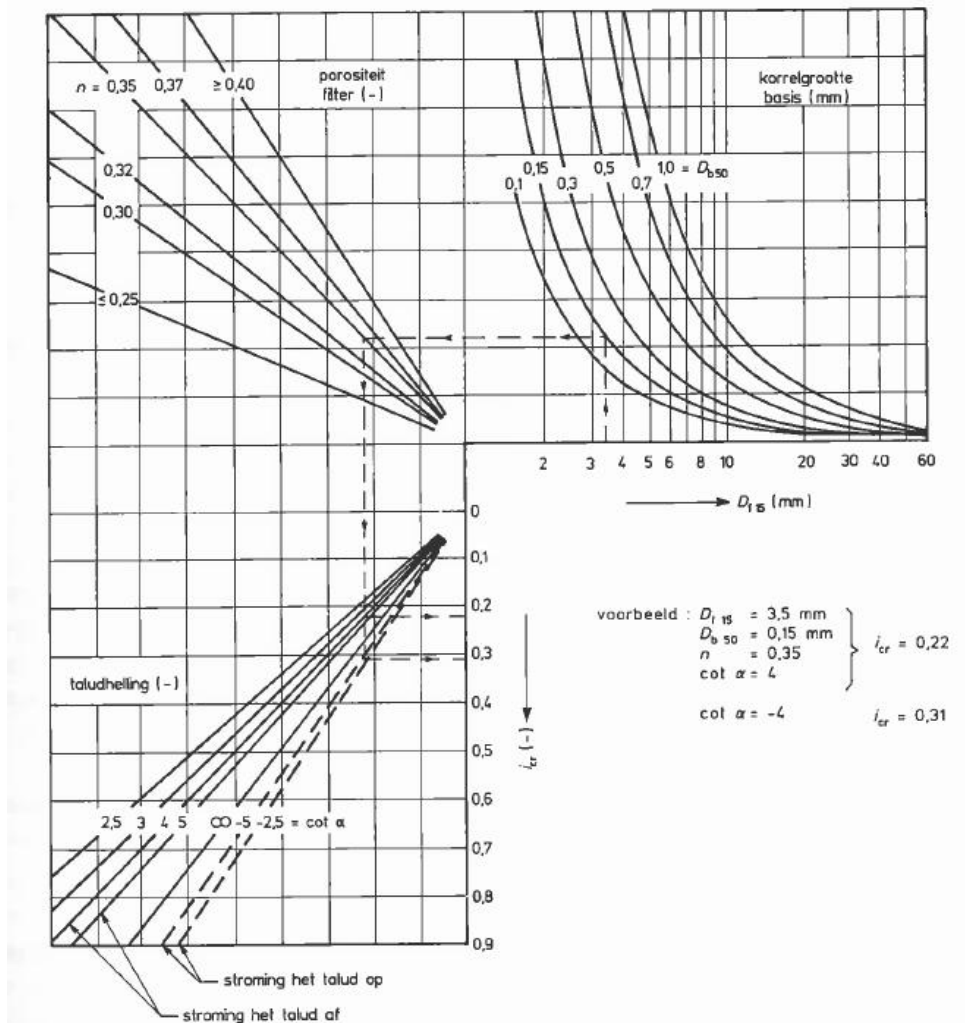
Formule (2.9) is door middel van fysisch model onderzoek geverifieerd. De verificatie is grotendeels uitgevoerd met zand en grind met een steile zeefkromme. Voor dit materiaal is geconcludeerd dat de formule betrouwbaar is. De formule is tevens getoetst voor breed gegradeerd filtermateriaal. Geconcludeerd werd dat de afgeleide formules ook voor die filtermaterialen gebruikt kunnen worden.

Voor de relatie tussen de filtersnelheid en het verhang worden in Klein Breteler et al. (1992) vergelijkingen (2.6) t/m (2.8) geadviseerd (formule van Forchheimer).

De formules (2.9) en (2.10) zijn verwerkt tot een ontwerpdiagram waaruit de waarde van  $i_{cr}$  kan worden geschat, zie Figuur 2.2.

## 2.5 CUR 161 (1993)

In de CUR-manual voor 'filters in de waterbouw' worden de Figuren 2.1 en 2.2 gepresenteerd voor stationaire stroming parallel met het grensvlak tussen basis en filter (op basis van de onderzoeken van De Graauw et al. (1983) resp. Klein Breteler et al. (1992)).



Figuur 2.2 Kritiek verhang bij stationaire stroming parallel met het grensvlak

## 2.6 Conclusies voor 'begin van beweging'

De gepresenteerde formules voor  $i_{cr}$  en  $v_{f,cr}$  zijn geldig voor stationaire waterbeweging en zijn gericht op het begin van beweging. Hoewel tijdens de onderliggende onderzoeken sommige transportmetingen zijn uitgevoerd, zijn de gemeten transporten relatief laag en hoofdzakelijk beperkt tot het begin van transport. De transportmetingen zijn kort documenteert maar een uitgebreide analyse van de metingen is niet gedaan. Voor typische metingen is verwezen naar appendix A.

### 3 Cyclische stroming

#### 3.1 Cyclische stroming langs horizontaal / hellend grensvlak

De formules in hoofdstuk 2 gelden voor stationaire waterbeweging. Voor cyclische beweging (golven) wordt door Klein Breteler et al. (1992) gesteld dat deze in filters als quasi-stationair kan worden beschouwd, aangezien in een filter het snelheidsprofiel meer gekenmerkt wordt door de lokale geometrie dan door de tijdsduur dat het water in één richting stroomt.

Een cyclische stroming is quasi-stationair te noemen (t.a.v. het begin van korrelbeweging) als de kritieke (filter-) snelheid of het kritieke verhang voor begin van beweging niet afwijkt van stationaire stroming (zie Klein Breteler et al., 1992). Verondersteld wordt dat de stroming quasi-stationair is als de orbitaal beweging van het water in de poriën veel groter is dan de kleine filterkorrels ( $D_{f15}$ ). In Klein Breteler et al. (1992) wordt vergelijking (2.9) op basis van deze beschouwing verondersteld ook toepasbaar te zijn voor veel gevallen van cyclische stroming.

Uit het onderzoek van Klein Breteler et al. (1992) blijkt dat de stroming ten aanzien van begin van beweging quasi-stationair kan worden opgevat bij een golfperiode  $T > 2$  sec, waarbij het maatgevende verhang gelijk is aan het maximaal optredende verhang in een golfperiode. Opgemerkt wordt dat een grote invloed van de periode (instationair gedrag) verwacht wordt als de stroming laminair is (doorlatendheid afhankelijk van periode). Bij fijner materiaal is een kleinere invloed van de golfperiode te verwachten omdat de traagheid-weerstand verhouding van de stroming in de poriën dan kleiner is.

Tijdens de proeven van Klein Breteler et al. (1992) is gebleken dat langs het hellend grensvlak minder snel erosie optreedt dan voor het horizontale grensvlak. Dit is blijkbaar veroorzaakt door het gezamenlijke optreden van verschillende belastingscomponenten (namelijk stroming langs grensvlak, verhang component langs- en loodrecht op grensvlak, zwaartekrachtcomponent langs het grensvlak en niet-stationaire stroming). Voor de praktijk betekent dit dat het gebruik van ontwerpregels voor een horizontale grensvlak waarschijnlijk een veilige constructie oplevert.

Voor cyclische belasting wordt in de Graauw et al. (1983) geconcludeerd dat de kritieke amplitude van de hydraulische gradiënt van gelijke orde-grootte is als de hydraulische gradiënt voor stationaire stroming.

De bovengenoemde aspecten doen echter geen uitspraak over het transport zelf. Verwacht wordt dat de hoeveelheid aan transport verandert voor cyclische stroming in vergelijking met stationaire stroming.

#### 3.2 Materiaalgradering

De meeste proeven in het verleden zijn uitgevoerd met weinig gegradeerd materiaal, wat niet zo gemakkelijk ontmengt of intern instabiel kan worden. Proeven van Klein Breteler et al. (1992) met breed gegradeerd filtermateriaal tonen echter aan dat de voor weinig gegradeerd materiaal afgeleide formules voor begin van beweging ook kunnen worden gebruikt voor breed gegradeerd filtermateriaal.



Het wordt opgemerkt dat het transport zelf waarschijnlijk sterk afhankelijk is van de materiaalgradering, omdat het materiaal hindering/blocking en de manier van transport beïnvloedt. De hoeveelheid aan transport kan dus veranderen voor verschillende graderingen en cyclische stroming.

### 3.3 Mobiliteitsgetal $\psi$

Voor het geval van golfbelasting blijkt dat het Keulegan-Carpenter getal (KC) een belangrijke rol kan spelen (zie Dixen et al., 2008 en Van Gent, 1995), met:

$$KC = \frac{U_m T}{D_{50,f}} = \frac{2\pi a}{D_{50,f}} \quad (3.1)$$

met:

T = golf periode

$U_m$  = maximum waarde van de orbitaalsnelheid gemeten op afstand  $D_f$  boven de toppen van de stenen in de filterlaag.

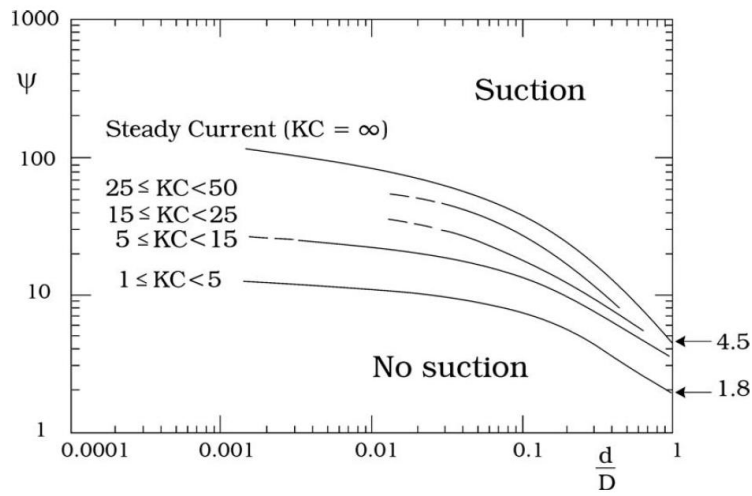
KC is een maat voor de lengte van de orbitaalbeweging (=2a) ten opzichte van de steengrootte van het filter.

In Dixen et al. (2008) is op basis van een aantal tests met variabele  $D_{50,b} / D_{50,f}$  en KC-waarden het kritieke mobiliteitsgetal  $\psi$  voor uitspoeling bepaald, met

$$\psi = \frac{U_m^2}{g(s-1)D_{50,b}} \quad (3.2)$$

(met  $s = \rho_s / \rho_w$ )

Het resultaat is gepresenteerd in Figuur 3.1. De figuur geeft aan dat voor grote KC waarden de situatie als quasi-stationair kan worden beschouwd. Aangezien in prototype in de meeste gevallen  $KC \gg 50$ , mag worden verwacht dat in die gevallen het kritieke mobiliteitsgetal voor uitspoeling dicht bij dat voor stationaire stroming (steady current) zal liggen. Deze resultaten lijken te bevestigen dat het effect van cyclische bewegingen met voldoende grote periode vergeleken kunnen worden met een stationaire beweging.



Figuur 3.1 *Begin van uitspoeling ("suction") onder golfbelasting,  $d = D_{50,b}$  en  $D = D_{50,f}$*

## 4 Zandtransport en filterzakking

### 4.1 Macroscopisch transport (grensvlak instabiliteit)

Er wordt onderscheid gemaakt tussen microscopisch en macroscopisch transport. Bij het macroscopische transport staan de gemiddelde processen centraal, die zich voordoen op een schaal van enkele tot vele malen de grootte van de  $D_{50,f}$ . Grootheden die hierin een rol spelen zijn onder andere:

- Filtersnelheid (gemiddeld over orde  $m^2$ )
- Verhang (gemiddeld over decimeters)
- Materiaaltransport (gemiddeld over orde  $m^2$  doorstroomoppervlak)
- Inhomogeniteiten over een lengteschaal van centimeters

Deze grootheden zijn meetbaar in een modelopstelling.

Bij het microscopische transport staan de eigenschappen van de individuele korrels, die voor transport in aanmerking komen, centraal. Belangrijke grootheden zijn:

- Aantal korrels
- Grootte en ligging van korrels
- Grootte van poriën
- Lokale poriesnelheid
- Krachten op korrels

Deze afzonderlijke grootheden zijn nauwelijks in een model meetbaar en kunnen alleen theoretisch onderzocht worden.

Macroscopisch en microscopisch gedrag is onderzocht door Adel et al. (1992). Het bleek al vroeg dat een microscopisch model te ingewikkeld is om het filtergedrag/transport te kunnen beschrijven, dus is gefocust op macroscopisch gedrag (gemiddelde processen).

Dat is ook geldig voor de meeste andere gepubliceerde transportmodellen. Deze transportmodellen doen dus geen uitspraak over welke korrels op welk tijdstip in beweging of tot stilstand zullen komen, maar meer hoeveel er in een volume gemiddeld per tijdseenheid in beweging zullen komen.

In het volgende zijn twee verschillende *macroscopische* filtertransportmodellen beschreven die in het verleden ontwikkeld werden:

- Klein Breteler (1992)
- Den Adel (1992)

## 4.2 Macroscopisch transportmodel van Klein Breteler (1992)

In Klein Breteler (1992) zijn verschillende empirische transport formules bekeken voor macroscopisch transport in filters:

$$T_1 = \rho_s \cdot p_1 \cdot (i/i_{cr} - 1)^{1.25} \quad \text{of} \quad T_2 = \rho_s \cdot p_2 \cdot (i/i_{cr})(i/i_{cr} - 1) \quad (4.1)$$

$T_i$  = transport in [kg/ms]

$\rho_s$  = dichtheid van getransporteerde materiaal [kg/m<sup>3</sup>]

$p_i$  = transport intensiteit [m<sup>3</sup>/ms]

Deze formules kunnen herschreven worden naar kritieke watersnelheden (uitgaande van turbulente stroming, d.w.z. het verhang is evenredig met het kwadraat van de filtersnelheid):

$$T_1 = \rho_s \cdot p_1 \cdot \left( (v_f / v_{f,cr})^2 - 1 \right)^{1.25} \quad \text{of} \quad T_2 = \rho_s \cdot p_2 \cdot (v_f / v_{f,cr})^2 \left( (v_f / v_{f,cr})^2 - 1 \right) \quad (4.2)$$

Naast deze formules is ook een relatie afgeleid uit de klassieke formule van Meyer-Peter en Mueller voor bodemtransport in open waterlopen:

$$T_3 = \rho_s \cdot p_3 \cdot \left( (v_p / v_{p,cr})^2 - 1 \right)^{1.5} \quad \text{of} \quad T_3 = \rho_s \cdot p_3 \cdot \left( (v_p / v_{p,cr})^2 - 1 \right)^{1.5} \quad (4.3)$$

$V_p$  = poriesnelheid [m/s] =  $v_f/n$  (n=porositeit van filter)

$p_3$  = transport intensiteit =  $1.5 \times 10^{-6}$  [m<sup>3</sup>/ms], gedeeld is over de breedte van de opstelling, loodrecht op de stromingsrichting van het water (de hoogte van de meetfaciliteit is niet van belang omdat erosie immers alleen op het grensvlak tussen filter en basis kan optreden)

De meetgegevens uit Klein Breteler (1992) tonen aan dat de formule van Meyer-Peter en Mueller het best aansluit aan de metingen (macroscopisch transport). Een vergelijking van de gemeten en berekend transporten is getoond in Figuur 4.2 en Figuur 4.3. De waarde van de transport intensiteit  $p$  bleek erbij ruwweg onafhankelijk te zijn van de diameter van het getransporteerde materiaal, zie Tabel 4.1. De bovengenoemde "best-fit" waarde voor  $p_3$  (=  $1.5 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/ms) is voorgesteld door Klein Breteler.

Het gebruikte filtermateriaal en de transport intensiteiten zijn gegeven in Tabel 4.1:

Basismateriaal:

Testen T2-T8:  $D_{f,15} = 4.2 - 83.8\text{mm}$ ,  $D_{b,50} = 0,16\text{mm}$

Testen T11-T14:  $D_{f,15} = 12.6 - 52\text{mm}$ ,  $D_{b,50} = 0,82\text{mm}$ .

Proef	Df15 (mm)	P <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup>	v <sub>fcr</sub> (mm/s)	P <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup>	v <sub>fcr</sub> (mm/s)	P <sub>3</sub> (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup>	v <sub>fcr</sub> (mm/s)
T2	4.2	3.0	39.0	1.3	37.9	2.3	37.1
T16	7.4	1.5	47.9	0.4	44.0	0.9	44.7
T3	8.4	2.3	43.7	0.9	42.3	1.6	41.4
T4	12.6	1.5	41.8	0.6	40.9	1.0	39.9
T5	16.8	3.3	50.0	1.5	49.4	2.7	48.2
T6	21.0	3.1	52.1	1.2	50.9	2.3	50.0
T7	34.7	3.6	66.5	1.5	65.4	2.7	63.8
T8	83.8	1.0	66.8	0.2	61.1	0.6	62.8
T11A	12.6	2.2	84.8	1.1	83.3	1.9	82.1
T11B	12.6	4.4	87.4	2.5	87.8	4.3	85.6
T13	34.7	9.0	101.0	5.2	101.5	8.6	98.5
T13A	34.7	4.6	81.9	1.7	78.8	7.9	78.9
T14	52.0	1.6	81.2	0.1	57.6	0.8	72.3

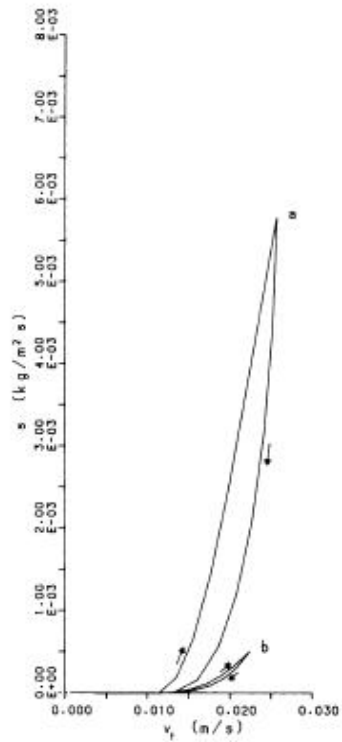
Tabel 4.1 filter materiaal en transport intensiteiten

Opmerking: Als de transportformule voor *interne* filter instabiliteit zal worden toegepast, dan moet in acht genomen worden dat het materiaal niet alleen aan het grensvlak opgenomen wordt maar overal in het korrelpakket. In dit geval is niet alleen de breedte maar ook de hoogte van het korrelpakket van belang. Dit resulteert in een verhoogde  $p_{int} = 3 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s] in de formule van Meyer-Peter-Müller (Let op: transport T is nu in [kg/m<sup>2</sup>s]).

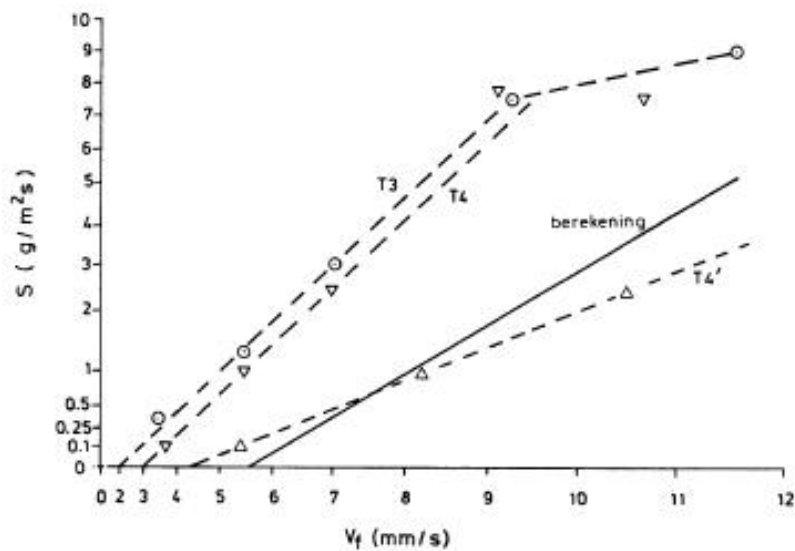
Verdere resultaten uit het onderzoek van Klein Breteler (1992):

- De kritieke snelheden voor fijn basismateriaal blijken afhankelijk te zijn van de diameter van het filtermateriaal  $D$  ( $v_{f,cr}(D_{n50,f})$ ). Dit is conform de theorie. Dit blijkt niet het geval voor grof basismateriaal ( $D_{b,50}=0,82\text{mm}$ ), zie Tabel 4.1.
- Afhankelijk van de ligging van de korrel en lokaal variërende watersnelheid wordt een spreiding van kritieke snelheden gevonden: zie ook Den Adel (1992)
- De hoeveelheid transport is sterk afhankelijk van de korrelverdeling
- Tot zover wordt uitgegaan van homogeen basismateriaal (zand). Als dit niet het geval is (of bij interne stabiliteit waar massa van inhomogeen materiaal beweegt) dan moet transport per klasse van diameters berekend worden (elke klasse met karakteristieke korreldiameter). Totaal transport is dan de som over alle klassen. Uit de korrelverdeling van het getransporteerde materiaal (na proef) kan dan de invloed van elke klasse bepaald worden.
- Het transport-belasting ( $v_f$ ) diagram toont een hysteresis (Fig. 4.1). Voor toenemende  $v_f$  wordt een groter transport gevonden dan voor afnemend  $v_f$  omdat bij groter wordende  $v_f$  grotere korrels meegenomen worden die bij afnemende  $v_f$  blijven liggen.

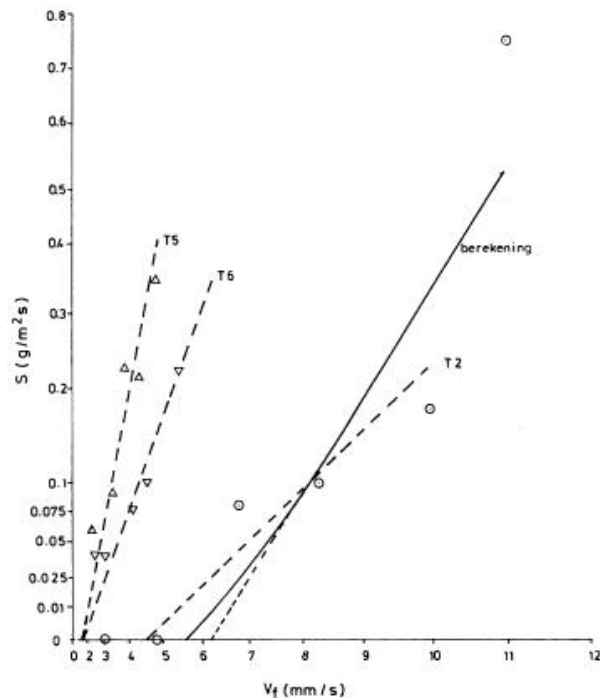
5 maart 2010, definitief



Figuur 4.1 Transport van materiaal per 30 minuten bij een stijgend en dalend verval (verhang)



Figuur 4.2 Gemeten en berekend transport van potentieel zeer instabiele materialen (T1-T4: grind, toenemend grover, T4': met gecorrigeerde filtersnelheid)

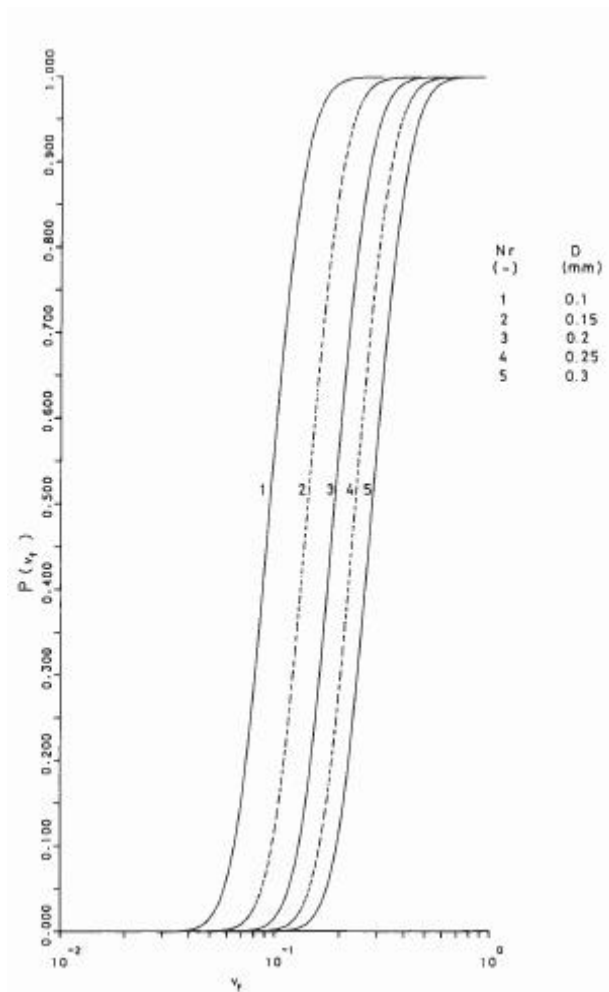


Figuur 4.3 Gemeten en berekend transport van potentieel minder instabiele materialen (T5-T6: mijnsteen, toenemend grover), berekening slechts voor T2 weergegeven

Verder is uit experimenten gebleken dat als de meetfaciliteit langer dan 1m is, de massa van het getransporteerde materiaal onafhankelijk is van de lengte van de opstelling. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat de opname capaciteit van water voor korrels beperkt is. Het schone water raakt binnen een afstand van 1m verzadigd met basismateriaal en kan dan netto geen materiaal meer opnemen. Dit houdt in, dat als er stroomopwaarts erosie plaatsvindt, waardoor het water verzadigd raakt, er verder stroomafwaarts pas weer erosie kan optreden als stroomopwaarts de erosie voldoende is afgenomen.

In Figuur 4.4 zijn de (kwalitatieve) resultaten van een stochastisch model gegeven (Klein Breteler, 1992):

Zoals toegelicht moet voor inhomogeen basismateriaal feitelijk het transport per klasse van diameters berekend worden (elke klasse met karakteristieke korreldiameter). Totaal transport is dan de som over alle klassen. Voor iedere korrel uit een bepaalde klasse geldt een ander watersnelheid voor die de korrel in beweging komt (afhankelijk van de ligging van de korrel). Dit te bepalen is technisch niet haalbaar in de praktijk. In Klein Breteler (1992) is een stochastisch gedachten model opgezet gebaseerd op kansdichtheidsfuncties voor verschillende korreldiameters. Uit dit gedachtenmodel is de relatieve fractie  $P(v_f)$  van korrels bepaald die in beweging kan komen als functie van de watersnelheid, zie Figuur 4.4. Voor meer informatie over het stochastisch model is verwezen naar Klein Breteler (1992).



Figuur 4.4 Kans op transport bij gegeven diameters als functie van de filtersnelheid

Samenvattend kan geconcludeerd worden:

- Het transportmodel blijkt geschikt om het transport (orde van grootte) te beschrijven. De waarde van het voorspelde transport is van dezelfde orde van grootte als het gemeten transport.
- Het transportmodel is alleen geldig voor turbulente stroming en homogeen basis materiaal

### 4.3 Macroscopisch transportmodel van Den Adel (1992)

#### 4.3.1 Algemeen

Het transport model van Den Adel (parallele stroming) is ontwikkeld voor horizontaal (bodem-) transport van basis materiaal in niet geometrisch stabiele filters. Het model is niet geschikt voor suspensietransport ( $v_f > 1,5 v_{f,cr}$ ).



Sommige delen van het onderzoek van Adel et al. (1992) hebben hun betrouwbaarheid verloren. Dit heeft te maken met het feit dat de theorie gebaseerd is op deeltjes transport (één voor één), dwz. onafhankelijk van elkaar. De onderzoeksresultaten hebben echter laten zien dat de korrelbeweging collectief is voor stroming loodrecht op het scheidingsvlak tussen basis en filter. Voor loodrecht transport is de theorie dus niet bruikbaar. Dit geldt echter niet voor het transportmodel voor parallelle stroming, omdat in dit geval de onderzoeksresultaten de theorie van deeltjes transport ondersteunen.

Er is (voor bodemtransport) geobserveerd dat, als er eenmaal korrels bewegen, deze langs het grensvlak tussen basis en filter lopen en zich niet door het filter verspreiden, ze blijven langs de basis lopen.

Het zijn steeds de basiskorrels die aan het filter grenzen die in beweging komen (bovenste laag, laagje één basiskorrel dik). Dieper liggende korrels spelen bij het transport geen rol, totdat zij door erosie de bovenste korrels zijn geworden.

#### 4.3.2 Het transportmodel

Het model bestaat uit twee hyperbolische differentiaalvergelijkingen met twee onbekenden

- de dichtheid  $\rho$  (lees aantal korrels per volume-eenheid) van het totaal aantal korrels (stilstaand en bewegend)
- dichtheid  $\mu$  van alleen de stilstaande korrels

en drie (middels formules) berekende grootheden

- snelheidsvector van de korrels  $\underline{v}$
- frequentie om stilstaande korrels in beweging te brengen (losfrequentie  $\nu_1$ )
- frequentie om bewegende korrels tot stilstand te brengen (vangfrequentie  $\nu$ ).

De vergelijkingen zijn hier nader toegelicht:

##### 1) Continuïteitsvergelijking

De eerste vergelijking is de continuïteitsvergelijking voor korrels:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \{ \underline{v} (\rho - \mu) \} \quad (4.4)$$

Fysisch gezien houdt deze vergelijking in dat in een punt de toename per tijdseenheid van de dichtheid van het totaal aantal korrels gelijk is aan het verschil in dichtheid van de korrels die naar het punt toestroomt en uit het punt wegvloeit.

##### 2) Impulsvergelijking

De tweede vergelijking is de impulsvergelijking. Deze beschrijft de verandering in bewegingstoestand van korrels:

$$\frac{d}{dt} \{ \underline{v} (\rho - \mu) \} = \underline{v} \cdot \mu \cdot \nu_1 - \underline{v} \cdot (\rho - \mu) \cdot \nu \quad (4.5)$$

Door vergelijking (4.4) in (4.5) in te vullen volgt:

$$v \frac{\partial \mu}{\partial t} - (\rho - \mu) \frac{\partial v}{\partial t} = v \{ \rho v - \mu (v + v_1) \} \quad (4.6)$$

Omdat bij het onderzoek steeds is aangenomen dat de watersnelheid constant in de tijd is (stationair), vereenvoudigt dit tot:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = \{ v (\rho - \mu) - v_1 \mu \} \quad (4.7)$$

Er staat niets anders dan: de toename per tijdseenheid van de dichtheid van de stilstaande korrels is gelijk aan de dichtheid van de bewegende korrels die per tijdseenheid tot stilstand worden gebracht, vermindert met de dichtheid van de stilstaande korrels die per tijdseenheid in beweging komen.

### Transportvergelijkingen voor parallelle stroming

Als de boven genoemde vergelijkingen worden toegepast voor parallelle stroming volgt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \{ v_d (\rho - \mu) \} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = \{ v (\rho - \mu) - v_1 \mu_0 \} \quad (4.9)$$

met:

$v_d$  = korrelsnelheid; onafhankelijk van de watersnelheid is de gemiddelde korrelsnelheid ongeveer de helft van de watersnelheid (=  $v_w/2$ ).

$\mu_0$  = dichtheid van korrels die beschikbaar zijn om te worden losgemaakt (dus korrels in bovenste laag die direct aan filter grenst, niet dichtheid van alle stilstaande korrels):

$$\mu_0 = \frac{6(1-n)}{\pi D^3} \quad (4.10)$$

Basiskorrels worden nauwelijks ingevangen tijdens de beweging in het filter (anders voor loodrechte stroming waar de vangfrequentie bepalend is). De vangfrequentie hoeft dus niet te worden gekwantificeerd en  $v(\rho - \mu)$  kan verwaarloosd worden. Door aftrekken van (4.9) van (4.8) volgt:

$$\frac{\partial(\rho - \mu)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho - \mu)}{\partial x} v_d = v_1 \mu_0 \quad (4.11)$$

Hulp parameter  $y$ :  $y = \rho - \mu$

Met beginvoorwaarde  $t=0$ ,  $y=0$  en als randvoorwaarde  $x=0, y=0$  kan een analytische oplossing gevonden worden. Daaruit kan het transport berekend worden. Het transport is de dichtheid van de bewegende korrels die uit de opstelling (lengte  $L$ ) stromen, vermenigvuldigd met de snelheid waarmee de korrels uit de opstelling stromen:

$$T(L, t) = \int_{p=0}^t y(L, p) \cdot v_d \cdot dp \quad (4.12)$$

zodat:

$$T(L, t) = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot v_1 \cdot v_d \cdot t^2, \quad t < L/v_d \quad (4.13)$$

$$T(L, t) = \mu_0 \cdot v_1 \cdot L \cdot t - \frac{1}{2} \mu_0 \cdot v_1 \cdot L^2 / v_d, \quad t > L/v_d \quad (4.14)$$

De vergelijking voor  $t < L/v_d$  is van weinig belang omdat het transport nog niet in evenwicht is.

Omdat een afscherming van onderliggende korrels door reeds bewegende korrels te verwachten is wordt vergelijking (4.11) uitgebreid tot:

$$\frac{\partial(\rho - \mu)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho - \mu)}{\partial x} v_d = v_1 \mu_0 - c_{11} y \quad (4.15)$$

met  $c_{11}$ =evenredigheidsconstante.

Voor het transport ( $t > L/v_d$ ) volgt dan:

$$T(L, t) = \frac{\mu_0 \cdot v_d}{c_{11}} \left[ \frac{L}{v_d} + \left[ t - \frac{L}{v_d} - \frac{1}{c_{11} \cdot v_1} \right] \cdot \left[ 1 - \exp \left[ -\frac{c_{11} \cdot v_1 \cdot L}{v_d} \right] \right] \right] \quad (4.16)$$

*Let op:* Voor  $D_{15,t}/D_{50,b} = 9-10$  (bijna geometrisch dicht) zijn aparte transportvergelijkingen afgeleid met een extra term (zie Den Adel, 1992).

### 4.3.3 Bepaling van losfrequentie en loskans

#### *Losfrequentie*

Het losmaken van de korrels gebeurt door wervels. De tijdsduur van de langst durende wervels  $T_t$  (aanname: Prandtl spectrum van drukfluctuaties in open waterloop) kan worden afgeschat uit het quotiënt van de grootste lengteschaal  $L$  (=korrelgrootte filtermateriaal) en de watersnelheid  $v$  (gemiddelde watersnelheid):

$$T_t = D_{15,f} / v_w \quad (4.17)$$

De losfrequentie, uitgaand van een lognormaalverdeling, kan beschreven worden met:

$$v_1 = -\left\{ v_w / D_{15,f} \right\} \cdot \ln \{ 1 - P_{los} \} \quad (4.18)$$

*Loskans*

$$P_{los} = \phi \left[ \frac{\ln(v_w / m_l)}{\sigma'} \right] \quad (4.19)$$

met

$m_l$  = mediane liggingsnelheid ('gemiddelde locale snelheid')

$v_w$  = gemiddelde watersnelheid

$\sigma'$  = effectieve spreiding, afhankelijk van spreidingen watersnelheid en

$$\text{liggingsnelheid } \sigma' = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_l^2}$$

$\phi$  = Gaussische integraal

$$\phi(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^q dx \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2}$$

$x$  = plaats in het filter (m), gerekend parallel langs stromingsrichting

$m_l = c_{13} \cdot v_{f,cr} = 4 \cdot v_{f,cr}$  en met invloed taludhelling:

$$m_{l,\alpha} = m_l \cdot \left[ \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} \right]^{1/2} \quad (\text{tot dusver niet geverifieerd})$$

De relatie voor  $m_{l,\alpha}$  is tot dusver niet geverifieerd. Uit proeven blijkt echter dat met toenemende helling de kritieke filtersnelheid toeneemt. Er wordt verondersteld dat de correctie kan worden gebruikt omdat de gemeten correctie eerder kleiner dan groter is dan de door het model voorspelde.

Voor  $v_{f,cr}$  kan volgende relatie gebruikt worden:

$$v_{f,cr} = \left[ \frac{n_f}{c_{10}} \left[ \frac{D_{15,f}}{v_w} \right]^{c_9} \sqrt{\psi_s \cdot \Delta \cdot g \cdot D_{50,b}} \right]^{1/(1-c_9)} \quad (4.20)$$

met

$v_w$  = kinematische viscositeit van water

$\psi_s$  = Shieldsparameter

$c_9, c_{10}$  = evenredigheidsconstanten

*Kritieke snelheid*

De parameters ter bepaling van de kritieke snelheid kunnen uit volgende tabel genomen worden:

$D_{50,b}$ [m]	$c_9$ [-]	$c_{10}$ [-]	$\psi_s$ [-]
0.0001	0.25	1.18	0.11
0.00015	0.2	0.78	0.073
0.0002	0.18	0.71	0.055
0.0003	0.15	0.56	0.044
0.0004	0.11	0.45	0.038
0.0005	0.07	0.35	0.036
0.0006	0.04	0.29	0.034
0.0007	0	0.22	0.034
0.0008	0	0.22	0.034
0.001	0	0.22	0.035

Andere evenredigheidsconstanten:

$$c_{11}=0,4 \pm 0,1$$

$$c_{13}=4,0 \pm 0,25$$

$$\sigma'=0,4 \pm 0,05$$

Tabel 4.2 Parameters voor de berekening van de kritieke filtersnelheid

#### 4.3.4 Zakking

De hoeveelheid korrels per lengteenheid, die per tijdseenheid op een plaats  $x$  wordt verwijderd, wordt gegeven door  $\dot{n}$ . De hoeveelheid materiaal die is verwijderd is dan:

$$N(x,t) = \int_{p=0}^t \dot{n}(x,p) dp \quad (4.22)$$

$$N(x,t) = \frac{\mu_0}{c_{11}} \left[ 1 + \{c_{11} \cdot v_1 \cdot (t - t') - 1\} e^{-c_{11} \cdot v_1 \cdot t'} \right] \quad (4.23)$$

met  $t' = x / v_k$ ,  $v_k$ =korrelsnelheid op tijdstip  $t$ .

Totale hoeveelheid uit de basis verwijderd materiaal:

$$E(t) = \int_{x=0}^L N(x,t) dx \quad (4.24)$$

$$E(t) = \frac{\mu_0 \cdot v_k}{c_{11}} \left[ \frac{L}{v_k} + \frac{1}{c_{11} \cdot v_1} \left[ 1 - e^{-c_{11} \cdot v_1 \cdot L / v_k} \right] \right] + T(t) \quad (4.25)$$

De zakking (zonder vangfrequentie) en vorm van de erosiekuil wordt bepaald met:

$$h(x,t) = N(x,t) \cdot D_{50,b} / \mu_0 \quad (4.26)$$

$$h(x,t) = \frac{D_{50,b}}{c_{11}} \left[ 1 + \{c_{11} \cdot v_1 \cdot (t') - 1\} e^{-c_{11} \cdot v_1 \cdot t'} \right] \quad (4.27)$$

$$h(x,t) = \frac{1}{2} \frac{D_{50,b}}{c_{11}} \left[ 1 + \{c_{11} \cdot v_1 \cdot (t - t') - 1\} e^{-c_{11} \cdot v_1 \cdot t'} \right] \quad (4.28)$$

Het is onzeker waar de factor  $\frac{1}{2}$  in (4.28) vandaan komt. In andere verslagen van Den Adel is deze factor weggelaten:

$$h(x,t) = \frac{D_{50,b}}{c_{11}} \left[ 1 + \{c_{11} \cdot v_1 \cdot (t - t') - 1\} e^{-c_{11} \cdot v_1 \cdot t'} \right] \quad (4.29)$$

De vergelijking kan voor het begin van de erosiekuil en grote waarden van  $t$  ( $t \gg 1/(c_{11} \cdot v_1)$ ) worden vereenvoudigd om de maximale zakking na een dag te bepalen:

Maximale zakking na een dag:

$$h_{\max} = \frac{M}{B} \frac{1}{\rho_b (1 - n_b) \lambda} \quad (4.30)$$

met  $n_b$  = porositeit basismateriaal,  $\rho_b$  = volumieke massa van het basismateriaal,  $M$  = massa van het getransporteerde materiaal,  $B$  = breedte van opstelling,  $\lambda$  = karakteristieke lengte van de zakkingskuil,  $h_{\max}$  = maximale zakking na een dag.

#### 4.3.5 Beperkingen transportmodel Adel et al.:

- **$D_{15,f}/D_{50,b} > 12$** : Transportmodel overschat het transport als geen hindering optreedt (hindering:  $D_{15,f}/D_{50,b} < 12$ ), is dus conservatief
- **$D_{50,b} < 10\text{mm}$** : Transportmodel is alleen geverifieerd voor fijnkorrelig basis materiaal
- **$Re > 10$** : Korrels uit basis losgemaakt door drukfluctuaties. Deze zijn gekoppeld aan wervels. Bij laminaire stroming treden geen wervels op waardoor korrels niet kunnen worden losgemaakt. De stroming moet dus niet-laminair zijn ( $Re > 10$ ).
- **$v_f < 1,5v_{f,cr}$** : Transportmodel voor bodemtransport. Voor  $v_f > 1,5v_{f,cr}$  treedt echter ook suspensietransport op. De aanname dat de laag van het uit de basis verwijderde materiaal in het filter maar één korrel dik is, geldt dan niet meer.
- Model is geldig voor stationaire stroming (constante watersnelheid over tijd). Proeven hebben aangetoond dat voor  $T < 5\text{s}$  instationaire stroming kan optreden.
- Model is geldig voor parallelle stroming (geen transport in loodrechte richting)
- Model gebaseerd op proeven met materiaal van:
  - $D_{50,b} = 0,16\text{-}10\text{mm}$
  - $D_{50,f} = 4\text{-}170\text{mm}$  (filtermateriaal niet kleiner, omdat anders stroming niet meer niet-laminair)

#### 4.3.6 Discussie model

Het transportmodel van Den Adel heeft vanwege zijn vele parameters (bv. dichtheiden  $\rho$  en  $\mu$ , korrelsnelheid, los- en vangfrequentie, meerdere evenredigheidsconstanten) veel ruimte voor onzekerheden. Deze onzekerheden zijn helaas niet alle gekwantificeerd in het model. Het transportmodel van Den Adel is evenwel het enige beschikbare model wat op een brede theoretische en fysische aanpak is gebaseerd.

- Het blijkt dat met het model het transport voor parallelle stroming redelijk kan worden voorspeld. De zakking komt echter minder goed overeen met het model.
- Het transport bleek aan sterke fluctuaties onderhevig te zijn. Volgens Den Adel kan het transport over tijd (meer dan) een factor van twee in grootte variëren.

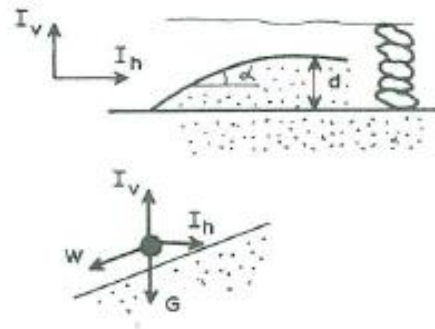
- Parallele transportmodel alleen geverifieerd voor basismateriaal  $D_{b50} < 10\text{mm}$ .
- Verificatie voor hellend talud is negatief uitgevallen en moet nog nader worden onderzocht.
- Slechts stationaire stroming is beschouwd in dit onderzoeksprogramma. Uit proeven blijkt dat de invloed van niet-stationaire verhangen te gering is om er rekening mee te behoeven houden zolang de periode groter is dan 5s.
- Transportvergelijkingen zijn alleen geldig als de dikte van de laag korrels, die wordt getransporteerd, een korrel groot is.
- Een hogere verhouding van  $D_{15,f}/D_{50,b}$  betekent een hogere filtersnelheid, meer turbulentie in het filter en diepere penetratie van het basismateriaal (zand) in het filter. De waarneming is dan dat de laag bewegende korrels iets dikker wordt dan één basiskorrel. Er wordt geconcludeerd dat minder dan 10% van de bewegende basiskorrels zich ook iets hoger in het filter beweegt.
- Indringing basismateriaal in filter is klein en heeft een verwaarloosbare invloed op het transport.
- Bij verlaging van verhouding  $D_{15,f}/D_{50,b}$  van 20 naar 10 valt op dat er geen transport meer optreedt (hinderings). Het filter gedraagt zich dan als zijnde geometrisch dicht (ook bij grote verhangen).
- De geometrische hinderings die optreedt wordt buiten beschouwing gehouden (dit is conservatief omdat het transport overschat wordt)
- De losfrequentie is lastig te kwantificeren. Ze hangt af van de kansverdeling voor de watersnelheid en van 'gunstig' liggende korrels die kunnen worden losgemaakt. Voor de eenvoud is een lognormal-verdeling aangenomen.
- Een grote spreiding van de kritieke snelheden is gevonden. De kritieke snelheid is afhankelijk van de ligging van de korrel en de lokaal variërende watersnelheid.
- Filterkorrels worden buiten beschouwing gelaten in het transportmodel (1-dimensionaal model). Geen interactie met het basismateriaal en geen beweging van de filterkorrels worden in rekening gebracht.
- Invloed van taludhelling: De metingen geven aan dat de theoretisch afgeleide hellingscorrectie niet in overeenstemming is met de metingen. Proeven in andere verslagen geven aan dat de theoretische correctie kwalitatief het gedrag beschrijft. Deze impasse is nog niet opgelost. Er was besloten dit punt niet verder uit te zoeken, omdat de huidige regel niet onveilig was en omdat de te verwachten winst gering was.
- Invloed van aard van het filtermateriaal: De afwijkingen in het transport bij gebruik van grofkorrelig filtermateriaal blijken samen te hangen met de vorming van zandribbels. Ribbels verminderen transport door lokale hellingen (conservatief). Ribbels kunnen worden verwacht bij korrelgrootten van het filtermateriaal van meer dan 50mm (basismateriaal  $< 1\text{mm}$ ). Voor in de praktijk toegepaste filter constructies heeft dit verschijnsel meestal geen relevantie. Voor meer informatie over transport met grootkorrelig basismateriaal is verwezen naar Adel et al. (1992).

#### 4.4 Afschatting zandindringing filter en zakking

Een grove (ontwerp-) schatting van de maximaal toelaatbare zakking kan ook met behulp van Delft Hydraulics (1983, verslag M1925) gemaakt worden. De diepte van de zandindringing in het filter wordt hier afgeschat met de evenwichtshelling  $\alpha$  van het zand in het filter:

(bijlage 1):

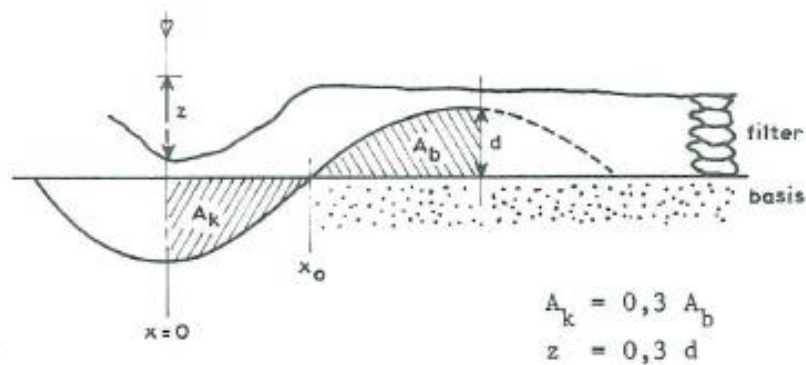
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_h - I_h \operatorname{cr}}{I - I_v + I_v \operatorname{cr}}$$



Figuur 4.5 Evenwichtshelling zandindringing ( $I_h$ =horizontale verhang,  $I_v$ =verticale verhang)

De (ontwerp-) filterlaagdikte moet dan minstens gelijk zijn aan de hoogte  $d$  van de “bult” zodat er geen zand door het grind verdwijnt.

De maximaal toelaatbare zakking wordt geschat met  $z=0.3 \cdot d$  (30% porositeit van filtermateriaal aangenomen).



Figuur 4.6 Bepaling zakking

Het is op te merken dat de voorspelde zakking hier niet te vergelijken is met het model van Den Adel (echte transportmodel, indringing van het basismateriaal in het filter is klein (bodemtransport)). De bovengenoemde afchatting moet als een grove indicatie gezien worden.



## 5 Conclusies

Het doel van deze bureaustudie was een overzicht van de beschikbare informatie over zandtransport in open filters en zettingsverschijnselen te krijgen:

- Twee macroscopische transportmodellen (Klein Breteler 1992 en Den Adel et al. 1992) voor filters zijn gepresenteerd met elk hun eigen beperkingen. Algemene beperkingen van beide modellen zijn stationaire en turbulente stroming en macroscopisch transport. Den Adel's model is alleen voor bodemtransport geschikt (geen suspensietransport).
- Beide macroscopische transportmodellen zijn alleen geschikt om een orde van grote inschatting te maken van het transport.
- De geldigheid voor cyclische stroming wordt verondersteld voor  $T > 2-5s$  maar is niet geverifieerd.
- Het transportmodel van Den Adel is het enige beschikbare model wat op een brede theoretische en fysische aanpak is gebaseerd. Het heeft vanwege zijn vele parameters (bv. dichtheiden  $\rho$  en  $\mu$ , korrelsnelheid, los- en vangfrequentie, meerdere evenredigheidsconstanten) echter veel ruimte voor onzekerheden. Deze onzekerheden zijn niet alle gekwantificeerd in het model.
- Het model van Klein Breteler is vergelijkbaar eenvoudig maar heeft het voordeel van minder parameters en evenredigheidsconstanten.

De geplande proeven (huidige modelonderzoek) zijn niet uitgebreid genoeg om het model van Den Adel voor cyclische stroming te verifiëren (vanwege zijn vele parameters). Ze kunnen echter een inschatting geven of het model met succes kan toegepast worden. Een transportaanzet gebaseerd op Klein Bretelers' aanpak lijkt veelbelovender.

Om de nieuwe proeven te kunnen vergelijken met de beschikbare modellen wordt voorgesteld de volgende randvoorwaarden voor de modelproeven te gebruiken:

- Bodemtransport ( $v < 1.5 v_{cr}$ ): Als suspensietransport optreedt moet er op worden gerekend dat in de praktijk een snelle schadeontwikkeling plaatsvindt (bv. voor een teenconstructie van een golfbreker). Daarom wordt het belangrijker geacht op bodemtransport te focussen.
- Turbulente stroming

## 6 Literatuur

Bakker K.J., Verheij H.J., and de Groot M.B. (1994). "Design relationship for filters in bed protection". *J. Hydraulic Eng.*, 120(9), 1082-1088.

Bunt, J.D. van den, 1969, Filteropbouw Havendammen, III Kritieke verhangen, rapport modelonderzoek, verslag M905

CUR 161, 1993  
Filters in de waterbouw

Den Adel H., Koenders M.A., Bakker K.J., 1994, The analysis of relaxed criteria for erosion-control filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, Nr. 6, pp. 829-840

Den Adel H., 1992, Transportmodel voor filters, Deel 1-3, C0-325970/6

Delft Hydraulics, 1983, Stormvloedkering Oosterschelde, Stabiliteit van de granulaire filters van de negatieve overlap, verslag M1925

Dixen, F.H., Sumer, B.M. and Fredsoe, J., 2008, Suction removal of sediment from between armor blocks. II: waves, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol 134, no 10, October 2008, ASCE.

Gent, van M.R.A., 1995, Porous flow through rubble-mound material, *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, May/June 1995

Graauw, de A., T. van der Meulen, M. van der Does de Bye, 1983  
Design criteria for granular filters  
Publication 287 Delft Hydraulics

Klein Breteler, M., 1989, Zandtransport in granulaire filters, horizontale stationaire stroming, meetverslag H869.

Klein Breteler M., H. Den Adel, M.A. Koenders, 1992, Taludbekledingen van gezette steen, Ontwerpregels voor het filter, verslag, M1795/H195 deel XXI,

Ockeloen, W.J., 2007  
Open filters in breakwaters with a sand core  
Msc. Thesis TU Delft

Uelman, E.F., 2006  
Geometrically open filters in breakwaters  
Msc. Thesis TU Delft

Verheij H.J. , G.J.C. M. Hoffmans, H. Den Adel, G.J.Akkerman, 2009 (*in preparation*)  
Interface stability of granular filterstructures (CUR)

Vroeg de J.H. (2009), Bureaustudie MV2 - Sectie HZ-e West, Stabiliteit zand onder open filter, verslag 1001804

Waterloopkundig laboratorium, 1969  
Filteropbouw havendammen, deel III, kritieke verhangen  
M905 Rapport modelonderzoek

Waterloopkundig laboratorium, 1970  
Filteropbouw havendammen, deel II, optredende verhangen  
M905 Rapport modelonderzoek

## A Appendix : Voorbeelden van uitgevoerde transportmetingen

In die hieronder opgenoemde verslagen zijn verschillende historische resultaten van transportmetingen getoond. Een uitgebreide uitwerking of een vergelijking met transportformules was echter niet deel van deze onderzoeken.

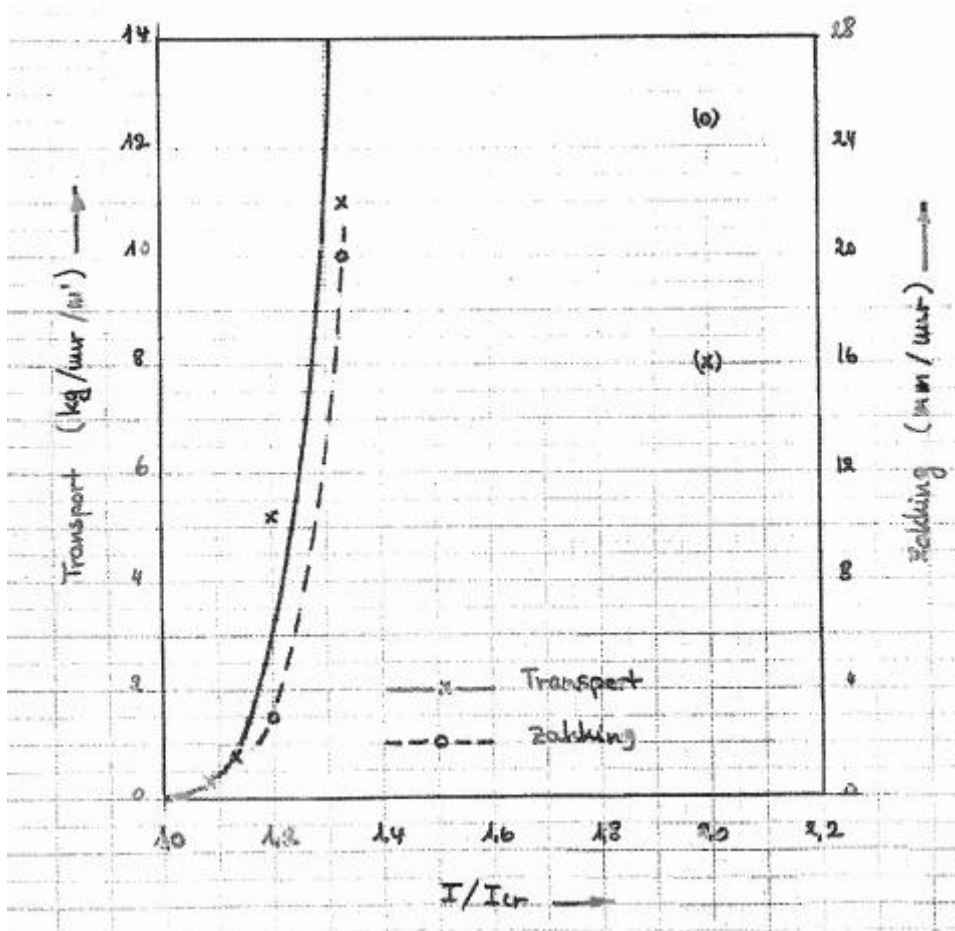
Voor achtergrondinformatie (proefopzet etc.) is verwezen naar de rapporten.

### Stormvloedkering Oosterschelde (Delft Hydraulics,1983)

Dit verslag geeft een grafiek van zandtransport en zakkingen als functie van  $l/l_{cr}$  (als gevolg van verticale cyclische verhangen), zie Figuur A.2.

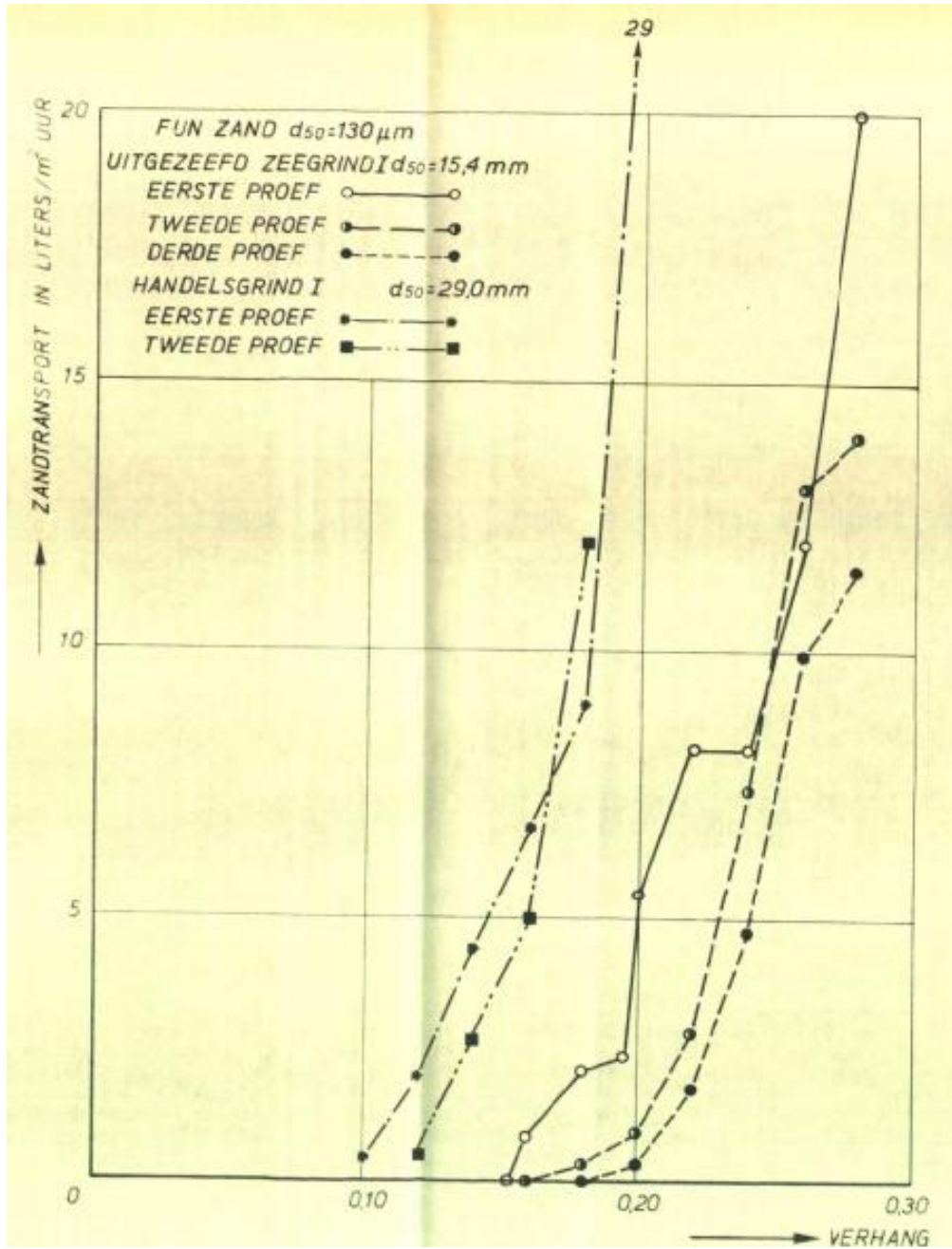
Bron	$D_{50_b}$ (mm)	$D_{15_f}$ (mm)	$n_f$ (-)	$\frac{n_f D_{15_f}}{D_{50_b}}$	$i_{ncr}$ (%)	Z (mm/uur)	T (kg/mm/uur)	$\frac{I}{I_{cr}}$
M1488-I (fig 15)	0,15	3,2	0,38*	8,1	30	-	-0,3	1,08
						-	-0,8	1,13
M1689 (T1)	0,16	5,9	0,30	11,1	25	3	5,2	1,20
M1689 (T6)	0,16	7,6	0,33	15,7	15	20	11	1,33
M1689 (T2)	0,16	8,3	0,33	17,1	15	25**	8,0**	2,00

Figuur A.1 Meetparameters

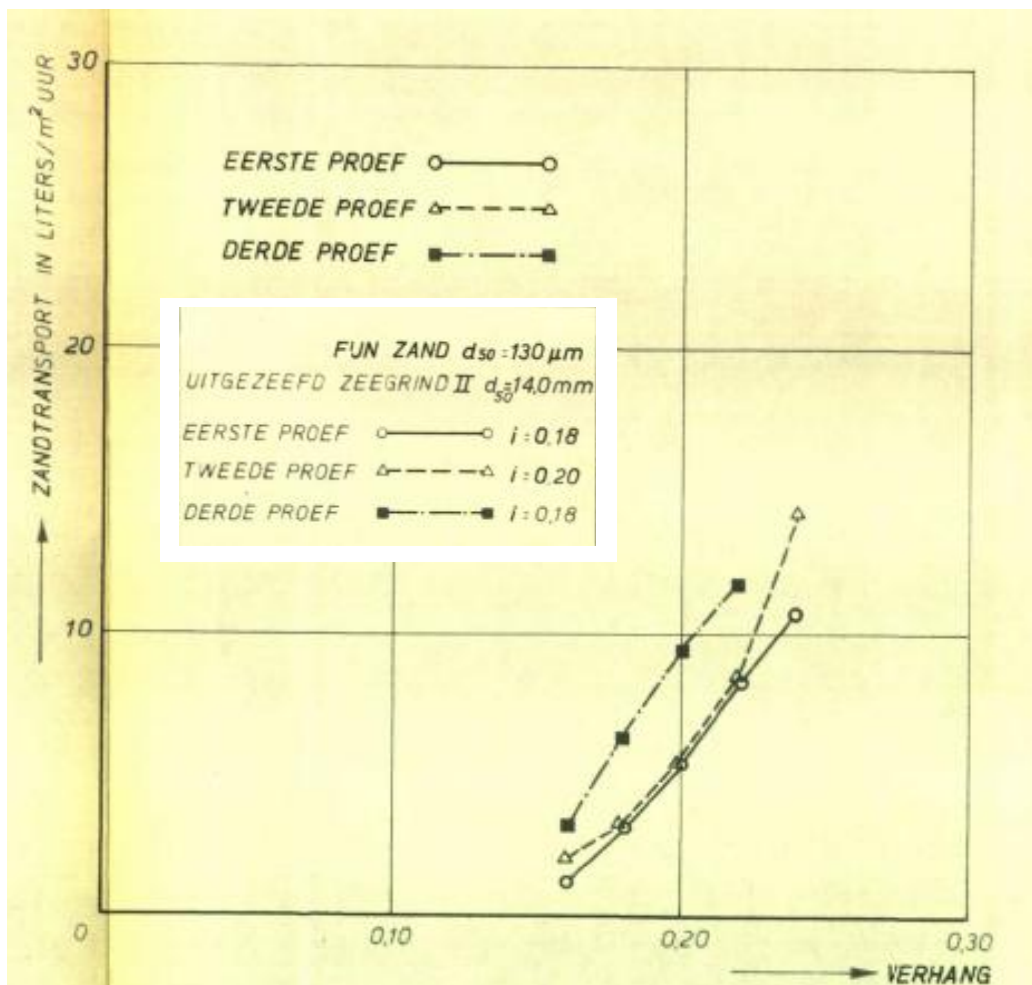


Figuur A.2 Transport en zakking bij overschrijding horiz. krit. verhang,  $D_{50b}=150-160\mu m$

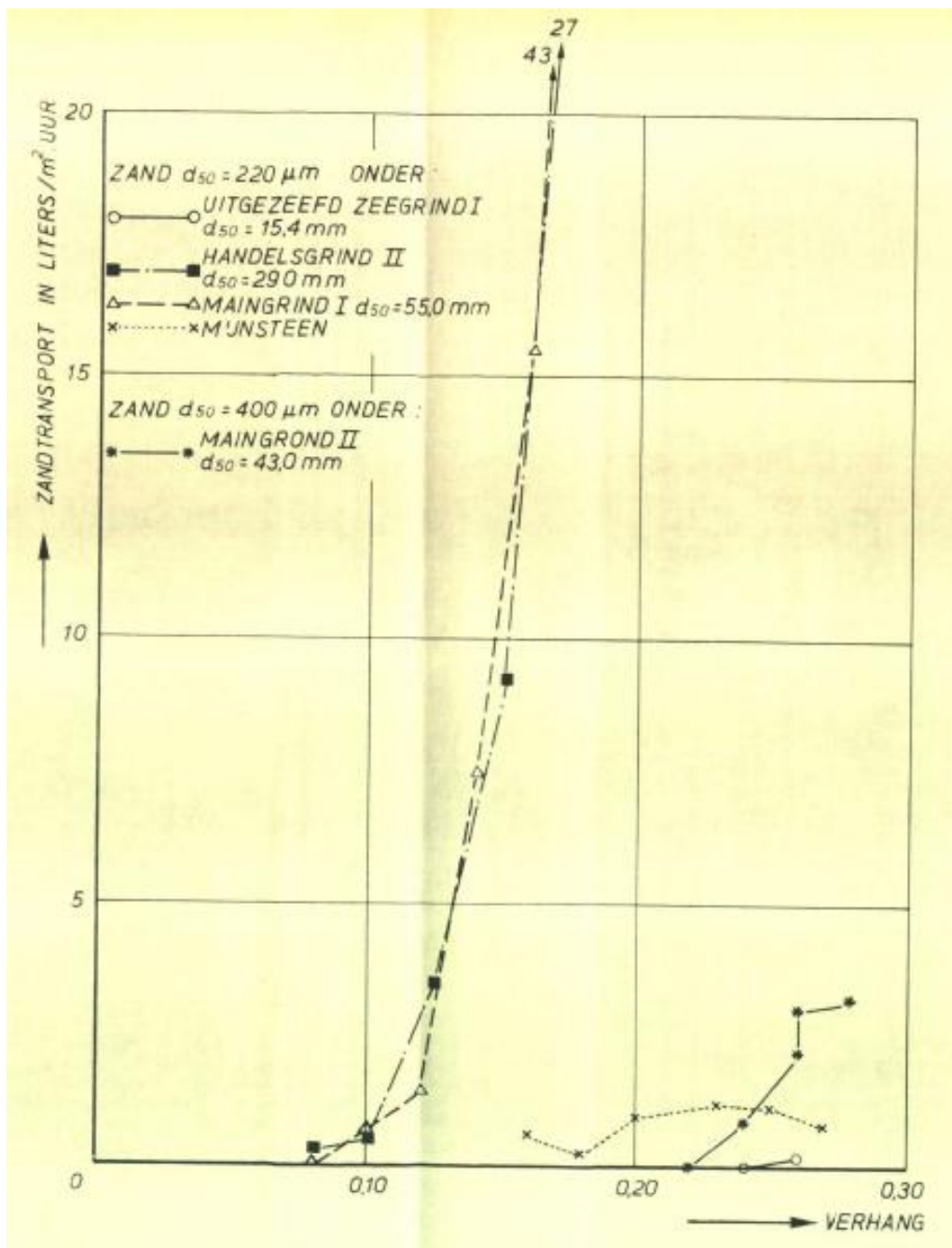
Filteropbouw Havendammen (Van den Bunt, 1969)



Figuur A.3 Metingen met fijn zand onder grind, horiz. zandbed (M905)

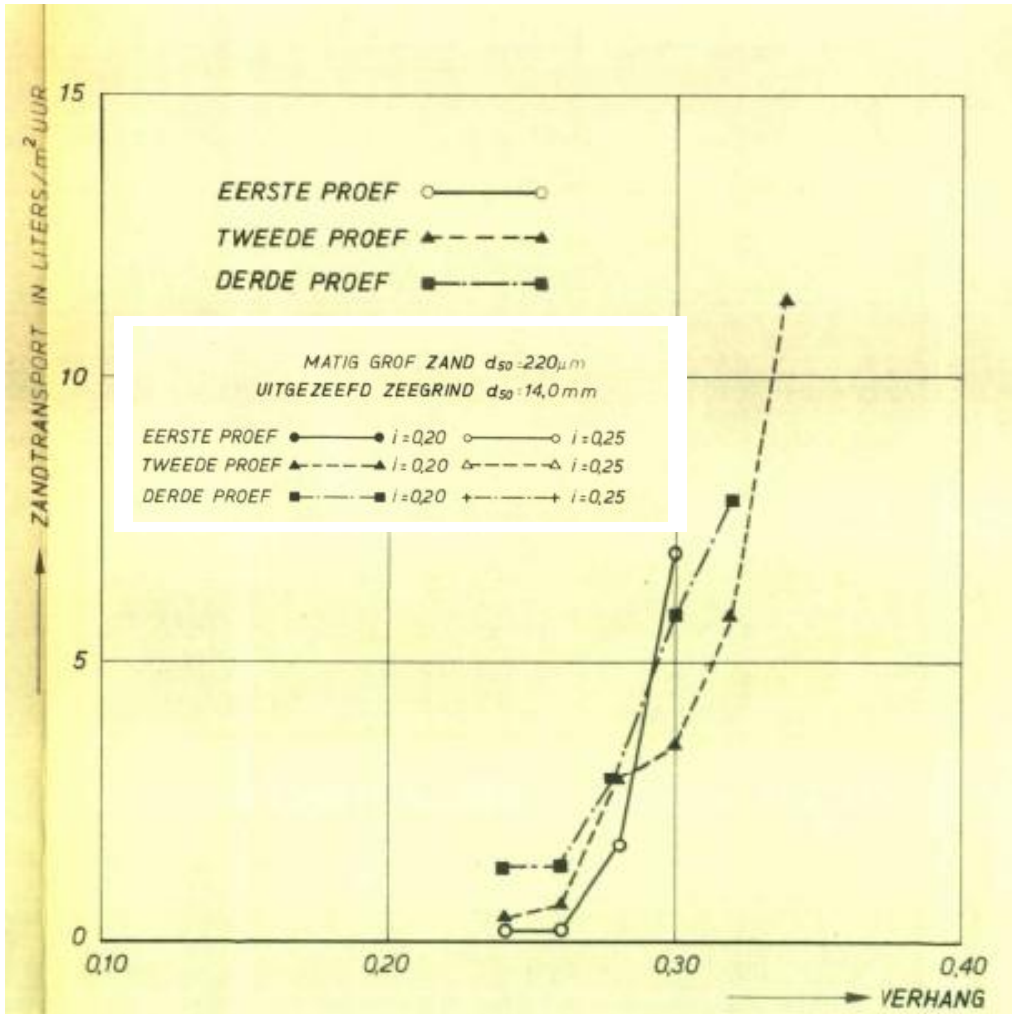


Figuur A.4 Metingen met fijn zand onder grind, horiz. zandbed (M905), herhaling

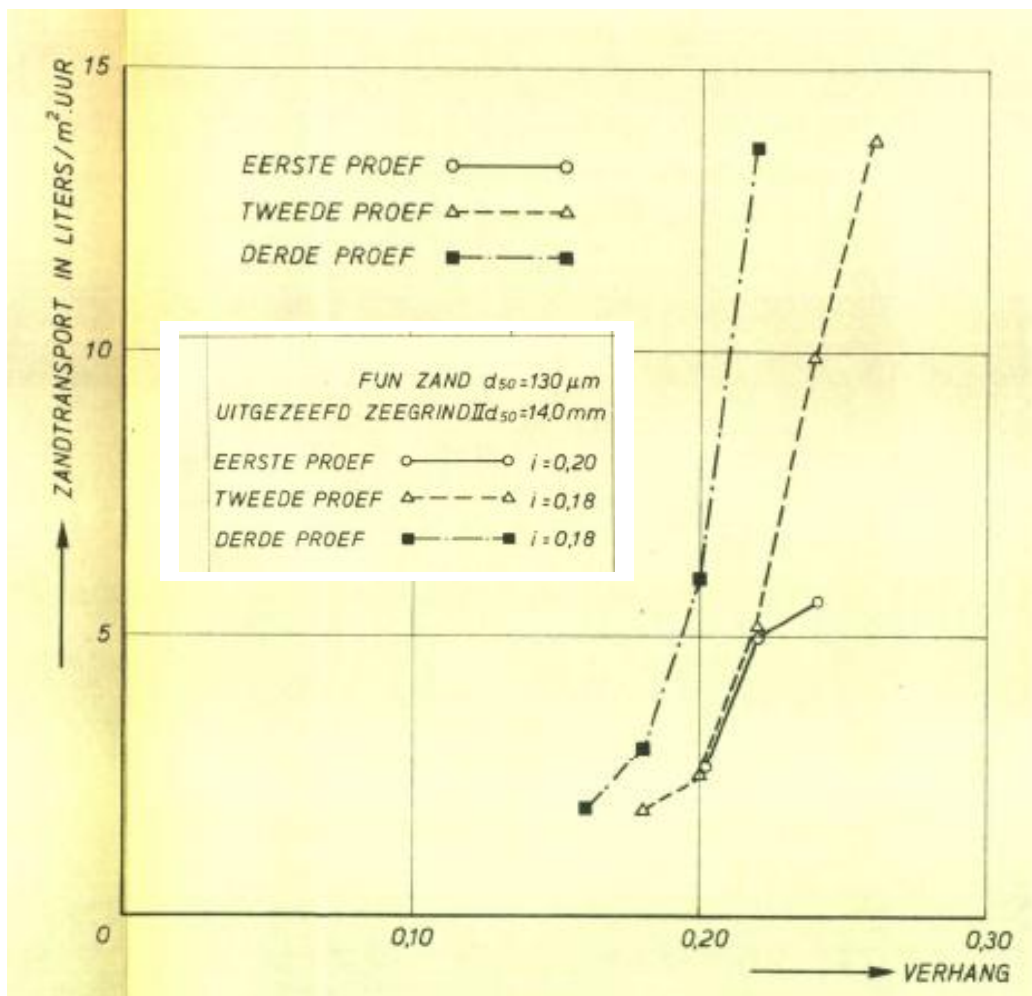


Figuur A.5 Metingen met matig fijn en matig grof zand onder grind, horiz. zandbed (M905)

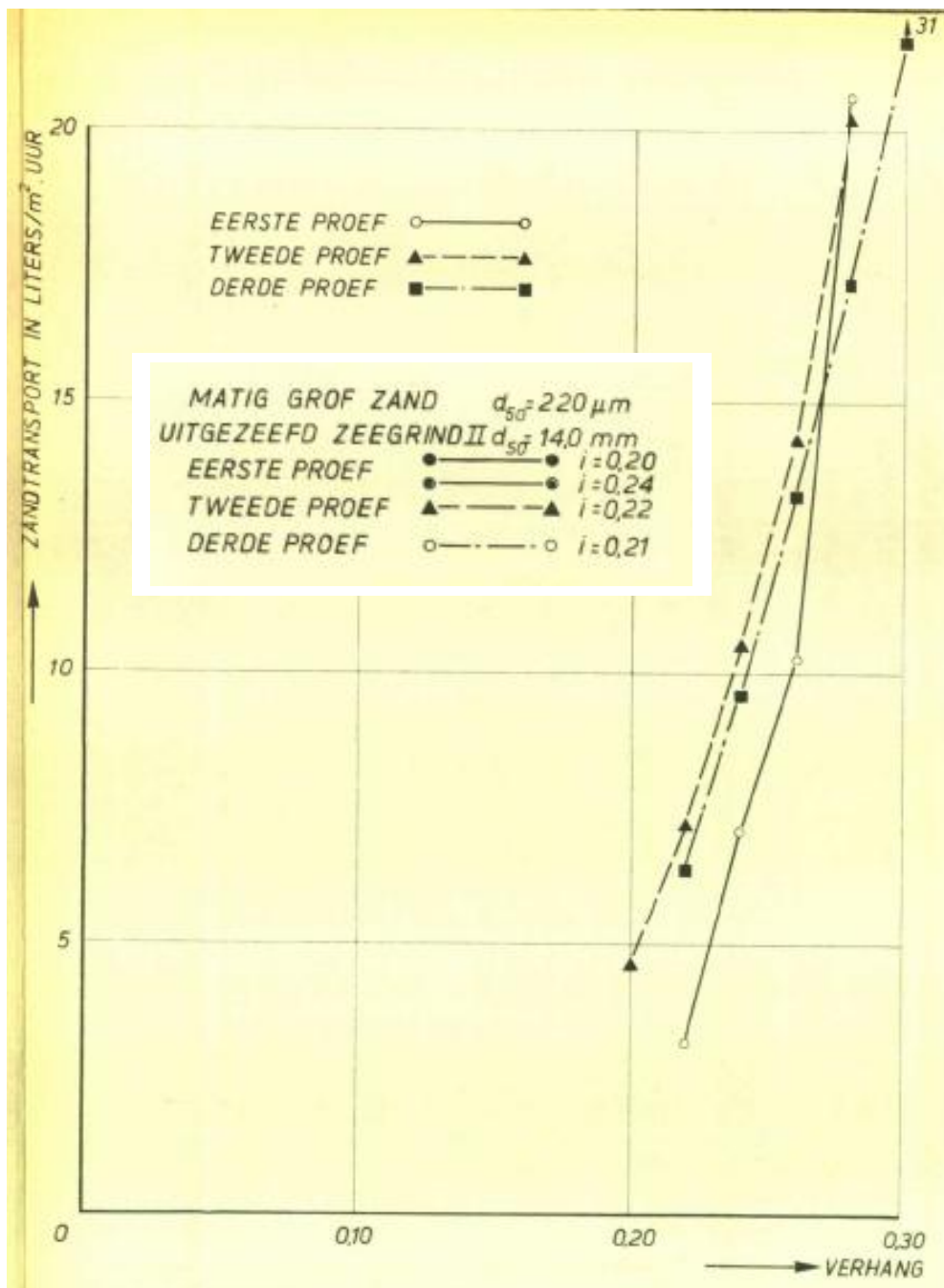




Figuur A.6 Metingen met matig fijn zand onder grind, horiz. zandbed (M905), herhaling



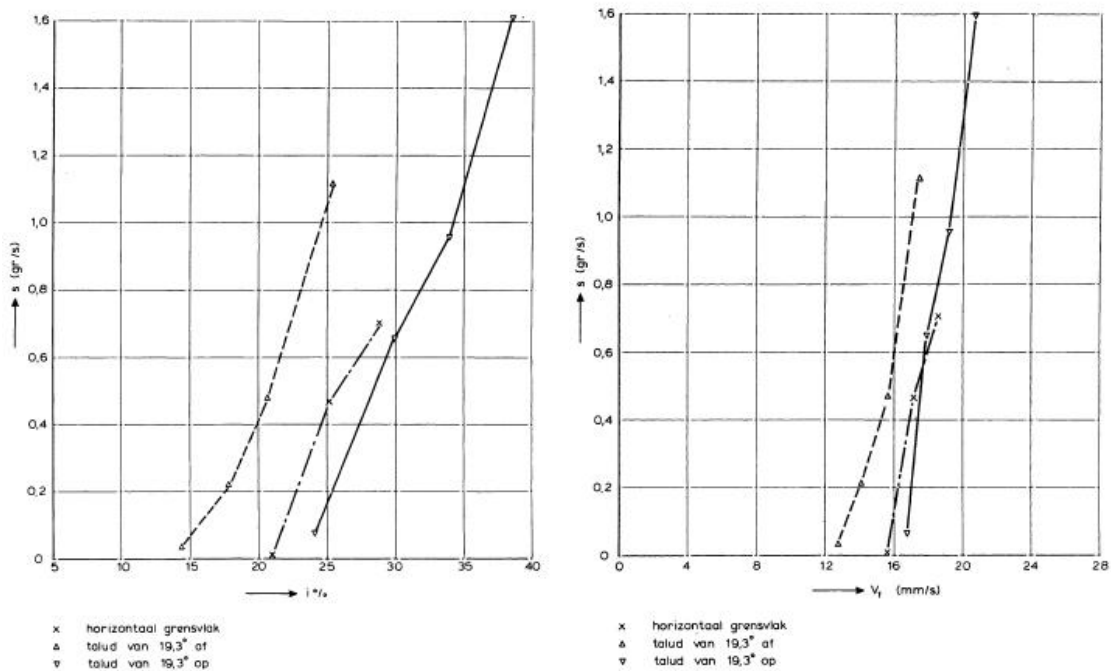
Figuur A.7 Metingen met fijn zand onder grind, zandbed onder helling 1:4,5 (M905)



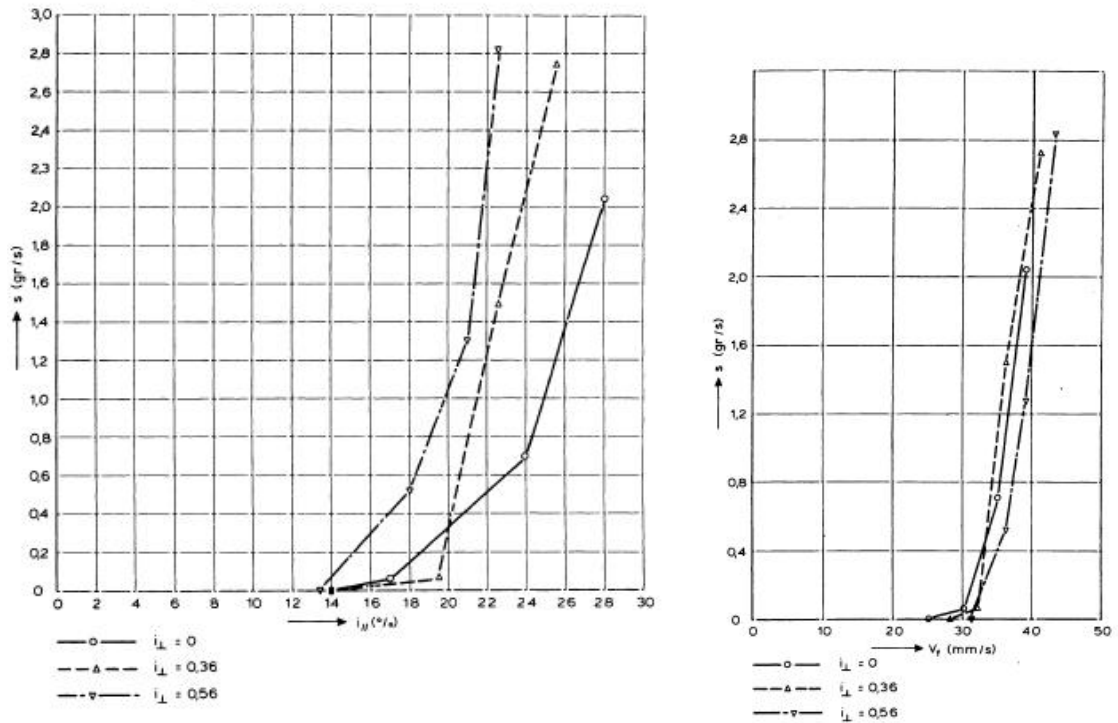
Figuur A.8 Metingen met matig fijn zand onder grind, zandbed onder helling 1:4,5 (M905)

### Taludbekledingen van gezette steen, Ontwerpregels voor het filter (Klein Breteler, 1992)

- Definitie van begin van transport: 0.2 gr/s/m
- $i_{cr}$ /transport testen zijn zonder steenzetting uitgevoerd (stabiliteit grensvlak granulaire filter en zand basis)
- Toepasbaarheidsgrenzen (Globale toetsing van grensvlak tussen granulaire filter en basis, H195):
  - $0,5 < D_{f15} < 15\text{mm}$  (breed gegradeerd filter)  
 $0,2 < n < 0,3$
  - $3 < D_{f15} < 15\text{mm}$  (weinig gegradeerd filter)  
 $0,3 < n < 0,4$
  - $0,15 < D_{f15} < 0,5\text{mm}$  (basis)
  - $0,3 < n_b < 0,4$
  - $\Delta = 1,65$

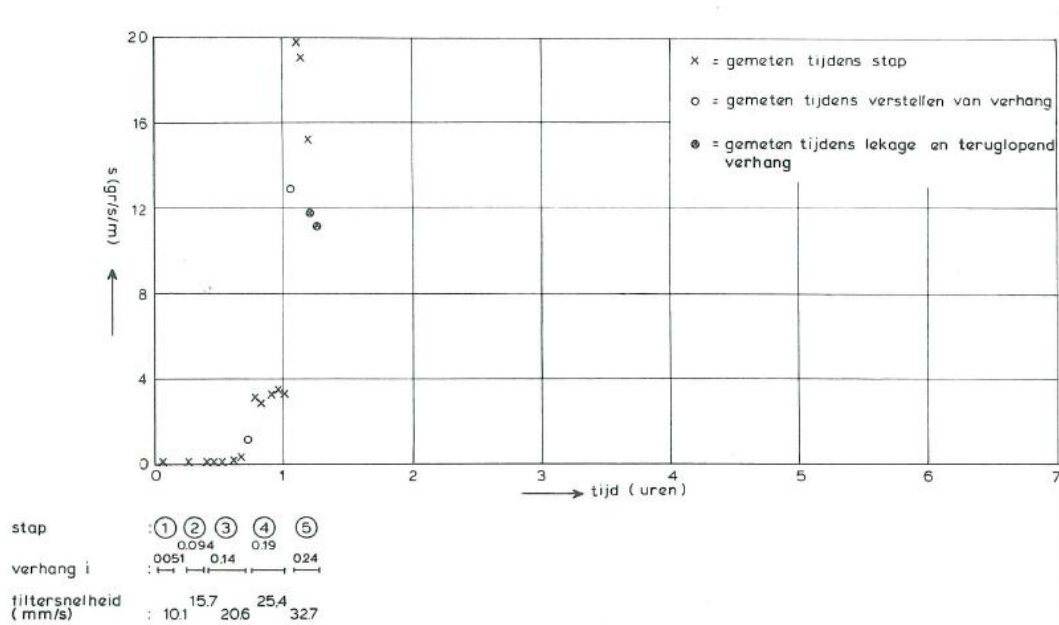


Figuur A.9 Zandtransport als functie van verhang (a) en filtersnelheid (b) (H195) bij: stationaire stroming langs hellend grensvlak

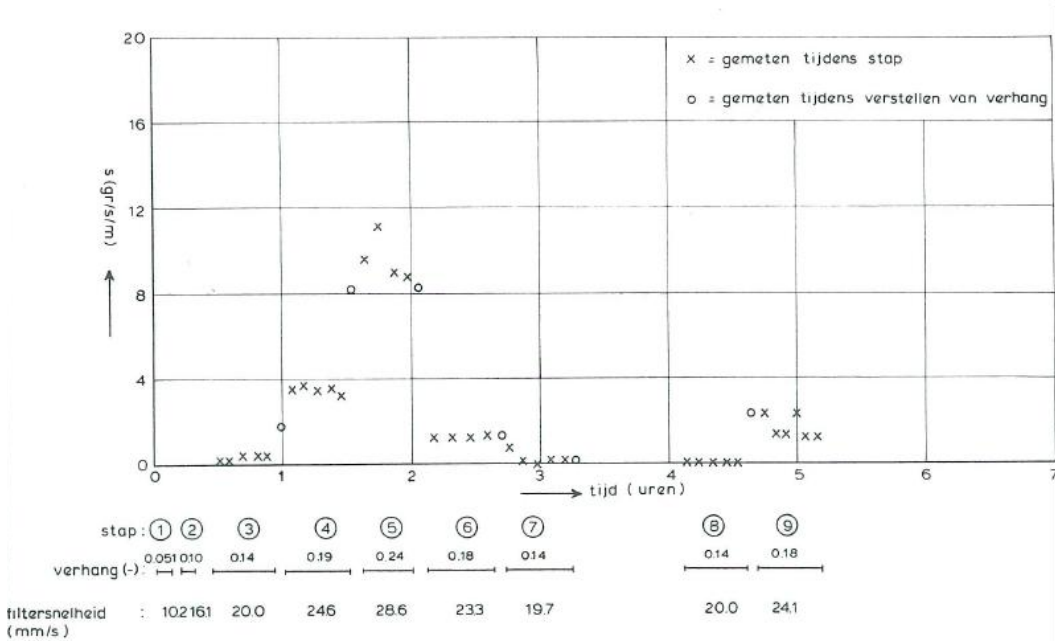


Figuur A.10 Zandtransport als functie van verhang langs grensvlak (a) en filtersnelheid (b) (H195)

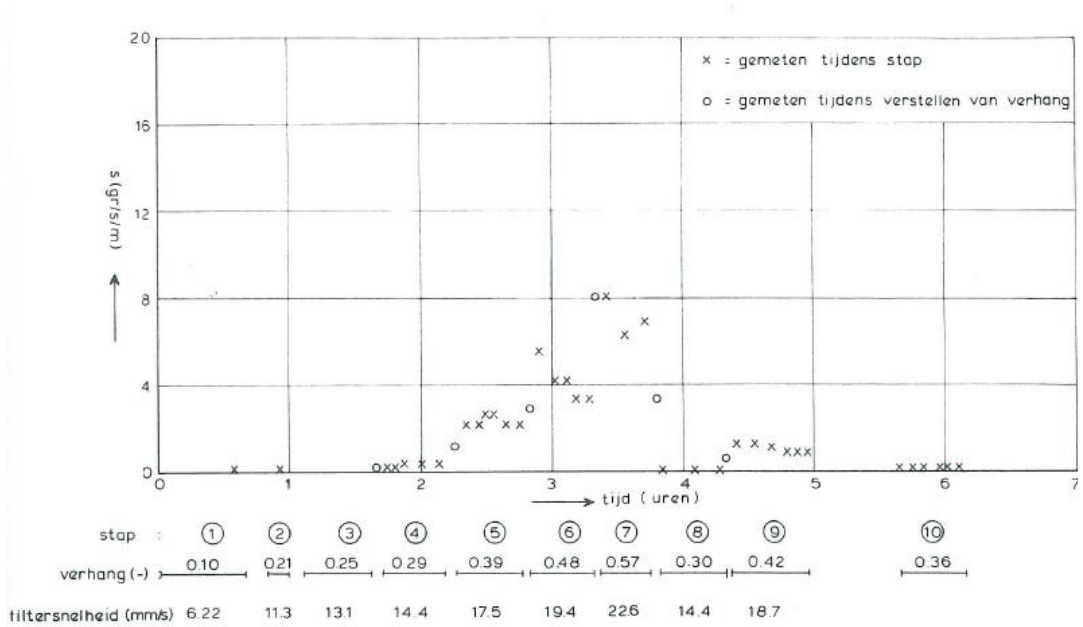
**Zandtransport in granulaire filters, horizontale stationaire stroming, (Klein Breteler, 1989)**



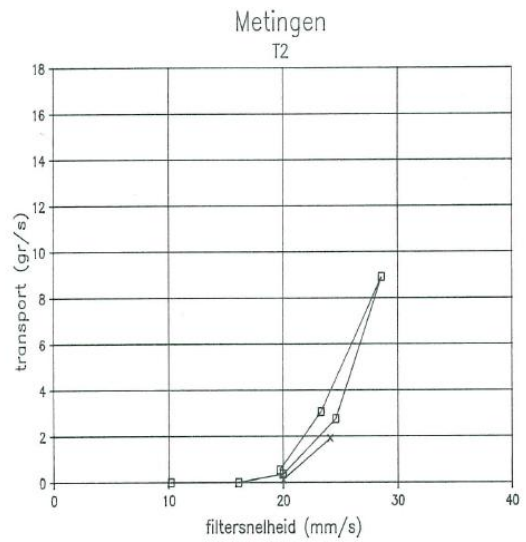
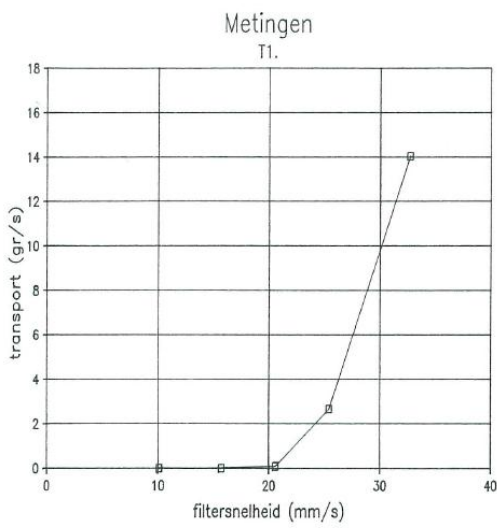
*Figuur A.11 Test 1: Transport als functie van tijd (H869)*

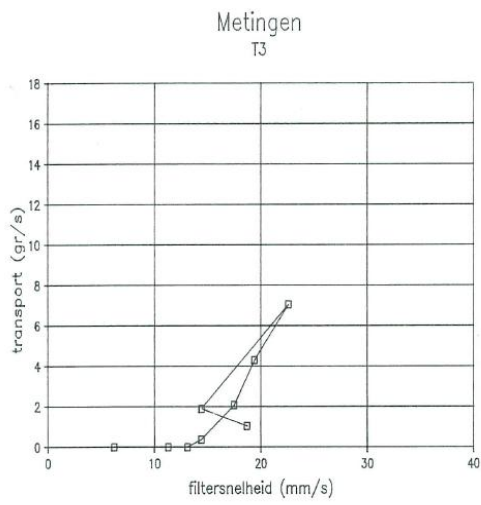


*Figuur A.12 Test 2: Transport als functie van tijd (H869)*



Figuur A.13 Test 3: Transport als functie van tijd (H869)





Figuur A.14 Test 1-3: Transport als functie van filtersnelheid (H869)