

waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

Jachtensluizen Philipsdam

Bestortingen in voorhavens, omarmend zoet en bij gemaal

Notitie

R 1650-2

december 1981

INHOUD

blz.

<u>1</u>	<u>Inleiding</u>	1
<u>2</u>	<u>Uitgangspunten</u>	3
2.1	Scheepsafmetingen, vaarsnelheden en motorvermogens	3
2.2	Ledigen kolk via deurschuiven	3
2.3	Nivelleren en uitwisselen via gemaal	5
2.4	Toegepaste formule bepalen steengrootte (D_{50}) bodembescherming .	6
<u>3</u>	<u>Bepalen karakteristieke steengrootte ten behoeve van varende schepen</u>	7
3.1	Retourstroomsnelheden	7
3.2	Schroefstraalsnelheden	9
3.3	Samenvatting resultaten	13
<u>4</u>	<u>Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van ledigen kolk via deurschuiven</u>	14
4.1	Bepalen maatgevend debiet respektievelijk maatgevende bodemsnelheid	14
4.2	Bepalen steengrootte	15
<u>5</u>	<u>Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van vullen en ledigen via riolen</u>	18
<u>6</u>	<u>Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van vullen en ledigen kolk via kolkwandriolen</u>	20
6.1	Bestorting omarmend zoet ten behoeve van gelijkmatige stroming .	20
6.2	Kolklediging (kalamiteitssituatie)	24
<u>7</u>	<u>Bepalen afmetingen van bestortingen</u>	26
7.1	Voorhaven Zoommeer en Zijpe bij sluishoofden	26
7.2	Gemaal (voorhaven Zijpe)	28
7.3	Omarmend zoet (voorhaven Zoommeer)	32

LITERATUUR

APPENDIX A - Bepalen maximum debiet bij ledigen kolk via deuropeningen

APPENDIX B - Verschillende straaltheorieën en hun toepassingsgebieden

1 Inleiding

In deze notitie wordt een advies gegeven over de bodembescherming bij de jachtensluizen in de Philipsdam.

De volgende aspecten spelen normaliter een rol bij de benodigde bodembescherming bij een Nederlandse sluis met deurvulling:

- retourstroomsnelheden, veroorzaakt door de waterbeweging rondom een varend schip
- schroefstralen, veroorzaakt door de waterbeweging ten gevolge van scheepsschroeven
- watersnelheden veroorzaakt door het ledigen (vullen meestal niet maatgevend) van de kolk (via deuropeningen).

In het geval van de jachtensluizen in de Philipsdam moet er ook nog aandacht besteed worden aan:

- watersnelheden bij het gemaal veroorzaakt door het nivelleren en uitwisselen van de kolk via de riolen (c.q. het gemaal)
- watersnelheden in het omarmend zoet veroorzaakt door het uitwisselen van de kolk (vullen van de kolk met zoet water).

Bovengenoemde aspecten worden behandeld in de paragrafen 3 t/m 7. De uitgangspunten van deze studie zijn vermeld in paragraaf 2. De randvoorwaarden voor wat betreft de hydraulische processen zijn grotendeels overgenomen uit de notities R 1650-0 [1] en R 1650-1 [2].

De randvoorwaarden voor wat betreft de bodemligging bij de sluishoofden, het gemaal en het omarmend zoet zijn afgegeven door Rijkswaterstaat. Hierbij dient te worden aangetekend dat tijdens deze studie de bodemligging van de voorhavens gewijzigd is. Dit is niet in de studie opgenomen daar de precieze bodemligging bij de sluishoofden nog niet bekend was. De bodemligging bij het gemaal is wel aangepast daar dit vrij grote konsekventies had op het verloop van de snelheden achter het gemaal.

Opgemerkt wordt dat bij de in deze notitie uitgevoerde berekeningen wordt uitgegaan van een bovenlaag van de bodembescherming bestaande uit losse stenen.

Alleen de grootte van de D_{50} (de afmeting van die steen die door 50% van de stenen wordt onder- respektievelijk overschreden) van de stenen in de bovenste laag van de bodembescherming wordt bepaald. De opbouw van de bodembescher-

mingslaag wordt niet in deze notitie behandeld. Deze notitie is opgesteld door ir. D. Ludikhuize.

2 Uitgangspunten

2.1 Scheepsafmetingen, vaarsnelheden en motorvermogens

De jachtensluizen zijn in eerste instantie bedoeld voor pleziervaart. De bodembescherming ten aanzien van retourstroomsnelheden en schroefstraalsnelheden wordt dan ook in principe op dit type schepen gedimensioneerd.

In het geval van incidentele schuttingen met grotere schepen dienen nader te bepalen criteria ten aanzien van vaarsnelheid en motorvermogen niet te worden overschreden.

De scheepstypen waarbij retourstroomsnelheden en schroefstraalsnelheden zijn bepaald zijn opgenomen in tabel 2.1.1. De gegevens met betrekking tot het in tabel 2.1.1 genoemde grote jacht zijn overgenomen uit het rapport M 1394 [3]. De gegevens met betrekking tot het als maatgevend beschouwde grotere schip, waarvoor in overleg met de opdrachtgever een Dortmund-Eemsschip is gekozen, zijn overgenomen uit een inventarisatie van binnenvaartschepen [10].

scheepstype	afmetingen [m ³] lengte, breedte, diepgang	vaarsnelheid [m/s]	motorvermogen [kW]
groot jacht (kotter)	10 . 3,5 . 1,8	1,5	200
Dortmund-Eems	67 . 8,2 . 2,5	nader te be- palen	nader te be- palen

Tabel 2.1.1 Gegevens scheepstypen

Zoals hierboven reeds vermeld wordt de maximum invaarsnelheid en het maximum te gebruiken motorvermogen van het Dortmund-Eemsschip afgeleid uit de op het grote jacht gedimensioneerde bestorting. Het maximum motorvermogen van het Dortmund-Eemsschip is ongeveer 370 kW (500 pk).

2.2 Ledigen kolk via deursluizen

In R 1650-0 [1] is genoemd dat in verband met zout/zoetoverwegingen de kolk bij schutten in de laagwatersituatie van Zoommeer naar Zijpe wordt geleidigd (neerwaarts nivelleren) via deurschuiven. Bij het uitvoeren van deze studie naar bestortingen bij de jachtensluizen bleek echter dat het ledigen via deurschuiven problemen gaf, en wel ten aanzien van de bestortingen en ook

ten aanzien van snelheden in de voorhaven indien er schepen invaren naar de andere kolk (grote langs- en dwarsnelheden). Om bovengenoemde redenen is het ontwerp van de jachtensluizen gewijzigd. De deurschuiven zijn weggelaten, er zal (toch) neerwaarts worden genivelleerd via de riolen. Een oplossing voor de optredende zout/zoetproblematiek (aanzuigen zoet water in riool) is nog in studie (zie [12]).

Het ledigen van de kolk via deurschuiven is echter wel in dit rapport opgenomen, dit om de achtergrond achter bovengenoemde beslissing vast te leggen.

De afmetingen van de deuropeningen en de hefsnelheid van de deurschuiven is in het verleden bepaald uitgaande van een kolk met een (geperforeerde) vloer op NAP -3,70 m. Deze geperforeerde vloer is in het huidige ontwerp weggelaten (zie [1]), waardoor de sluis 3,20 m dieper is geworden (sluisvloer op NAP -6,90 m).

Deze verdieping van de sluis is ten aanzien van langskrachten op schepen gunstig. Deze langskrachten zullen namelijk afnemen.

Uit enkele berekeningen met het rekenprogramma TROS (bepaald langskrachten op schepen bij sluisvul- en ledigingen) voor de oude situatie werd bij een hefsnelheid van de deurschuiven van 0,005 m/s een maximum langskracht van 1°/oo gevonden, en wel onder de volgende omstandigheden:

- scheepstype: groot jacht (zie tabel 2.1.1)
- voorhaven waterstand: NAP -2,20 m
- kolkwaterstand (t=0): NAP +0,75 m
- maximale deuropening: 2 maal 2,0 bij $0,75 \cdot m^2 \approx 3 m^2$.

Bovengenoemde hefsnelheid kan worden vergroot en wel om de volgende redenen:

- de kolk is dieper geworden; de hefsnelheid kan theoretisch toenemen proportioneel aan \sqrt{h}
- bij de berekeningen voor de hierboven genoemde oude situatie is uitgegaan van een langskrachtcriterium voor jachten van 1°/oo; dit criterium is in R 1650-0 [1] echter op 3°/oo gesteld.

De konsekventies ten aanzien van nivelleertijd, maximum debiet, ect. zijn vermeld in hoofdstuk 4 en Appendix A. Het maximum debiet door de deuropeningen kan ongeveer $15 m^3/s$ worden; de maximum snelheid in de straal door de opening is dan ongeveer 7,1 m/s (zie hfdst. 4).

2.3 Nivelleren en uitwisselen via gemaal

Voor wat betreft het nivelleren en uitwisselen via het gemaal zijn de volgende situaties mogelijk:

- nivelleren van Zijpe- naar Zoommeerpeil door middel van pompen:

* normale omstandigheden debiet 4 à 5 m³/s (pompkapaciteit)

* kalamiteitsomstandigheden (terugstromen door de pomp)

laagwatersituatie: 8,3 m³/s (verval 3,1 m; $\xi_{\text{pomp}} \approx 48$)

hoogwatersituatie: 7,0 m³/s (verval 3,75 m; $\xi_{\text{pomp}} \approx 85$).

De gegevens omtrent de pomp zijn vermeld in R 1650-0 [1]

- neerwaarts uitwisselen door middel van pompen:

hiervoor geldt hetzelfde als voor neerwaarts nivelleren door middel van pompen, dat wil zeggen

* normale omstandigheden debiet 4 à 5 m³/s

* kalamiteitsomstandigheden debiet 8,3 m³/s (zie boven)

- neerwaarts uitwisselen onder vrij verval:

* normale omstandigheden debiet 4 à 16 m³/s

(grensvlaksnelheden 0,005 à 0,02 m/s)

* kalamiteitsomstandigheden: maximum debiet door riool van 23 m³/s (uitgaande van een maximum zaksnelheid/stijgsnelheid van de kolkwaterstand bij nivelleren van 0,03 m/s; zie R 1650-0 [1])

- opwaarts nivelleren (naar Zijpe-peil) onder vrij verval:

* normale omstandigheden: debiet 4 à 15 m³/s (afhankelijk van het verval varieert de stijgsnelheid van het wateroppervlak in de kolk van 0,005 tot 0,02 m/s)

* kalamiteitsomstandigheden: debiet 23 m³/s (zie boven).

De situatie neerwaarts nivelleren naar Zijpe-peil onder vrij verval komt onder normale omstandigheden niet voor. Hierbij is ervan uitgegaan dat er neerwaarts wordt genivelleerd via deurschuiven. Als gevolg van de reeds in paragraaf 2.2 genoemde wijziging in het ontwerp, waarbij de deurschuiven zijn weggelaten, wordt dus ook neerwaarts genivelleerd naar Zijpe-peil via het gemaal. Daar het maximum debiet zowel bij uitwisselen als nivelleren is gelimiteerd tot 23 m³/s heeft deze wijziging op zich geen konsekventies voor de bestorting bij het gemaal.

In het geval van kalamiteitsomstandigheden zou de kolk ook neerwaarts kunnen nivelleren en wel via terugstromen door de pomp. Het maximum debiet is dan echter beperkt tot $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie boven).

Het uitstromen van het gemaal geeft de maatgevende situatie voor de bestorting bij het gemaal (geconcentreerde straal, turbulentie). Het maximum uitstroomdebiet is $23 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit treedt op bij kalamiteiten bij neerwaarts nivelleren of uitwisselen.

2.4 Toegepaste formule bepalen steengrootte (D_{50}) bodembescherming

De karakteristieke afmeting (D_{50}) van de stenen in de toplaag van de bodembescherming kan worden bepaald als de snelheid, in feit het snelheidsprofiel, ter plaatse van de bodem bekend is. Er zijn verschillende formules ontwikkeld om uit de gemiddelde snelheid of de bodemsnelheid de steengrootte van de bestorting te bepalen. In deze notitie is de door het U.S. Bureau of Reclamation en Isbash [4] ontwikkelde formule toegepast.

$$D_{50} \geq \frac{\alpha \cdot \bar{v}^2}{2 \cdot g \cdot \Delta} \quad (2.4.1)$$

$\alpha = 1,4$ (turbulente stroming) $[-]$
 \bar{v} = gemiddelde snelheid (bij de bodem) $[\text{m/s}]$
 Δ = relatief onder water gewicht stenen

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = 1,65 \quad [-]$$

ρ_s = soortelijk gewicht stenen $[\text{kg/m}^3]$
 ρ_w = soortelijk gewicht water $[\text{kg/m}^3]$

In figuur 1 is de grootte (diameter) en gewicht (kg) van de D_{50} uitgezet tegen de snelheid \bar{v} .

× Opmerking: In [11] zijn gegevens van een onderzoek achter een stuw gegeven waarbij de α -faktor 1,1 was; in dit onderzoek werd echter een schade van orde 1 à 2% aan het steenpakket geaccepteerd en was de turbulentie-intensiteit geringer.

3 Bepalen karakteristieke steengrootte ten behoeve van varende schepen

Varende schepen veroorzaken door verschillende fenomenen erosie van de bodem of bodembescherming. Er kunnen worden onderscheiden:

- de retourstroomsnelheid onder (respektievelijk naast) het varende schip. Deze retourstroomsnelheid is afhankelijk van de vaarsnelheid, verhouding scheepsdoorsnede (grootspant) en kanaaldoorsnede en de waterstand. Dit is verder behandeld in paragraaf 3.1
- de schroefstraalsnelheid veroorzaakt door schroefwerking. De schroef verplaatst een hoeveelheid water in de vorm van een straal welke erosie kan veroorzaken van de bodem, dit wordt behandeld in paragraaf 3.2.

De resultaten van de berekeningen uit paragraaf 3.1 en 3.2 ten aanzien van de steengrootte van de bestorting ten behoeve van retourstroomsnelheden en schroefstraalsnelheden zijn in paragraaf 3.3 samengevat. De lengte en precieze plaats van deze bestorting is behandeld in hoofdstuk 7.

3.1 Retourstroomsnelheden

Door Schijf [5] is een relatie gelegd tussen de sloopssnelheid en de retourstroomsnelheden van schepen in beperkt vaarwater^{*}. Dit is weergegeven in figuur 2. Met behulp van deze grafiek kan uit de sloopssnelheid, de scheepsafmetingen en de kanaalafmetingen de retourstroomsnelheid worden bepaald. Het is duidelijk dat lage waterstanden maatgevend zullen zijn, daar dan het doorstroomprofiel naast en onder het schip gering is.

×Opmerking: In deze theorie wordt uitgegaan van een schip in een oneindig lang kanaal; hier vaart het schip echter een vernauwing binnen. De retourstroomsnelheden worden met de theorie van Schijf conservatief afgeschat; dit is gecontroleerd aan de hand van [17].

De maatgevende waterstand voor een sloopstype wordt bepaald uitgaande van een bepaalde kiel-clearance boven de drempel(s) van de sluis. Voor het grote jacht (zie par. 2.1) is een kiel-clearance van 0,40 m aangehouden.

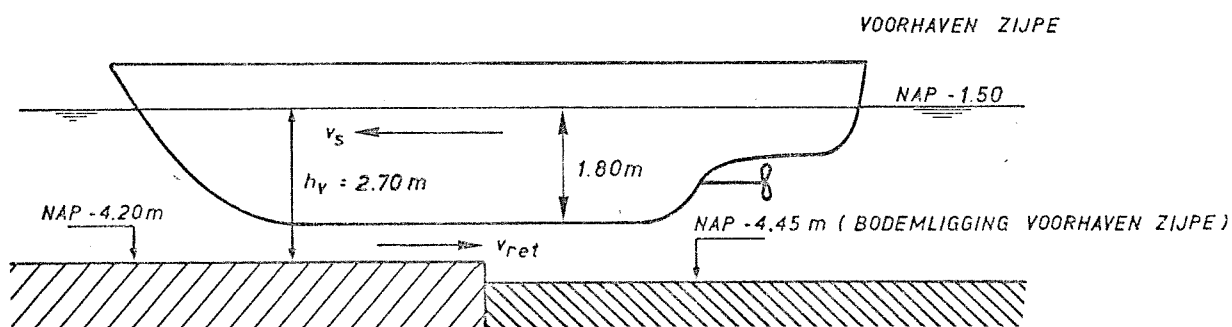
Dit leidt tot de volgende waterstanden op de voorhavens:

- voorhaven Zijpe: drempel op NAP -3,70 m
- diepgang jacht: 1,80 m + 0,40 m kiel-clearance [13]
- waterstand Zijpe (minimaal): NAP -1,50 m

- voorhaven Zoommeerzijde: drempel op NAP -2,70 m
- diepgang jacht: 1,80 m + 0,40 m kiel-clearance
- waterstand (Zoommeer) minimaal: NAP -0,50 m.

Bovengenoemde waterstanden aan Zijpe- en Zoommeerzijde vallen binnen de range van te verwachten waterstanden. Daar de vormgeving van Zoommeer en Zijpezijde gelijk is behoeft slechts één van de zijden van de sluis te worden bekeken, de andere is (wat dit betreft) identiek. Er is gekozen voor het doorrekenen van de retourstroomsnelheden en de schroefstraalsnelheden (zie par. 3.2) aan de Zijpezijde.

De breedte van de vaarweg voor de sluizen is ongeveer 50 à 60 m. Ter plaatse van het sluishoofd treedt een vernauwing van de vaarweg op tot ongeveer 10 m. De retourstroomsnelheid, die in dit vernauwde gedeelte optreedt, zal de bestorting direkt achter het sluishoofd kunnen aantasten (zie fig. 3.1.1). Deze bestorting dient hierop gedimensioneerd te worden



Figuur 3.1.1 Invaren groot jacht Zijpe-zijde

Zoals in bovenstaande figuur (3.1.1) is aangegeven is de waterstand in de maatgevende doorsnede 2,70 m (breed 10 m). Uitgaande van deze gegevens volgt voor een groot jacht (grootspant 3,5 x 1,5) met een invaarsnelheid van 1,5 m/s:

$$f/F = \frac{b_s \cdot d_s}{b_v \cdot h_v} = \frac{3,5 \cdot 1,8}{10,0 \cdot 2,7} = 0,23$$

$$\frac{v_s}{\sqrt{gh_v}} = \frac{1,50}{\sqrt{9,81 \cdot 2,7}} = 0,29$$

} uit figuur 2
volgt

$$\frac{v_{\text{ret}}}{\sqrt{gh_v}} \approx 0,12 \rightarrow v_{\text{ret}} = 0,62 \text{ m/s}$$

waarin: f	= oppervlak grootspant schip	[m ²]
	f = b _s · d _s	b _s = breedte grootspant [m]
		d _s = diepgang bij grootspant [m]
F	= doorstroomprofiel	[m ²]
	F = b _v · d _v	b _v = breedte [m]
		d _v = waterdiepte [m]
v _s	= scheepssnelheid	[m/s]
v _{ret}	= retourstroomsnelheid	[m/s]

Uitgaande van de aanname dat deze retourstroomsnelheid ook de bodem achter de sluisvloer treft, volgt er uit figuur 1 (vgl. [2.4.1]) een karakteristieke steengrootte (D₅₀) van de bestorting van:

$$D_{50} \geq 0,02 \text{ m}$$

Uitgaande van bovengenoemde steengrootte respectievelijk retourstroomsnelheid, kan voor een incidenteel groot schip de invaarsnelheid worden bepaald. Voor het Dortmund-Eemsschip met een grootspant van 8,2 · 2,5 m² en een kiel-clearance van 0,50 m volgt:

waterdiepte: h_v ≈ 3,50 m (Zijpe: NAP -0,70, Zoommeer NAP +0,30 m)

retourstroomsnelheid: v_{ret} ≈ 0,60 m

$$\frac{v_{\text{ret}}}{\sqrt{gh_v}} \approx 0,105 \quad f/F = \frac{8,2 \cdot 2,5}{10,0 \cdot 3,5} \approx 0,586 \quad \text{uit figuur 2 volgt}$$

$$v_s / \sqrt{gh_v} \approx 0,10 \rightarrow v_s \approx 0,60 \text{ m/s}$$

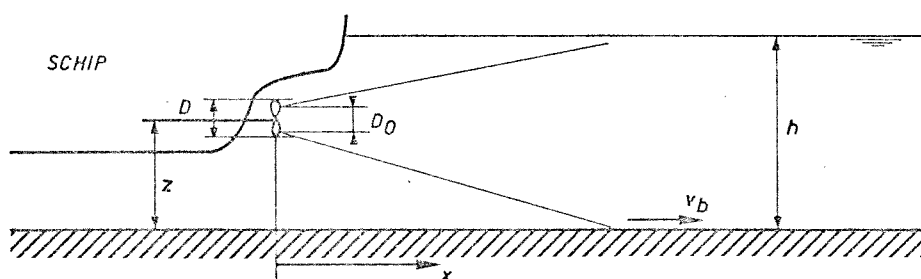
De maximale snelheid van het Dortmund-Eemsschip is (in eerste instantie) dus beperkt tot bovengenoemde waarde.

3.2 Schroefstraalsnelheden

In WL-publikatie 202 [6] worden aan de hand van theorieën en metingen de schroefstraalsnelheden bepaald. De snelheid ter plaatse van de bodem kan

worden uitgedrukt in de volgende formule (zie ook fig. 3.2.1):

$$v_b = 2,78 \cdot v_o \cdot \frac{D_o}{x} \cdot e^{-15,43 \cdot z^2/x^2} \quad (3.2.1)$$



Figuur 3.2.1 Schroefstraalsnelheden bij een schip

v_b = gemiddelde bodemsnelheid [m/s]

v_o = axiale watersnelheid ter plaatse van de schroef [m/s]

Deze wordt bepaald uit:

$$v_o = \alpha \cdot \left(\frac{P_d}{D^2} \right)^{1/3} \quad (3.2.2)$$

P_d = vermogen op de schroefas [kW]

D = diameter schroef [m]

α = koëfficiënt, $\alpha = 1,17$ schroef in tunnel

$\alpha = 1,48$ schroef niet in tunnel [-]

D_o = diameter schroefstraal bij de schroef [m]

$D_o = 0,71 D$ voor schroef zonder tunnel

$D_o = D$ voor schroef in tunnel

x = afstand vanaf de schroef [m]

z = afstand schroefas tot de bodem [m]

De in bovengenoemde formule (3.2.1) genoemde bodemsnelheid is gerelateerd aan een stilliggend schip. In het geval van varende schepen mogen de bodemsnelheden niet worden verminderd met de scheepssnelheid; dit blijkt uit aanvullend onderzoek op WL-publicatie 202.

Uitgaande van de in paragraaf 3.1 genoemde maatgevende waterstanden voor het grote jacht (NAP -1,50 m resp. NAP -0,50 m op Zijpe respectievelijk Zoommeer) volgt een waterdiepte in beide voorhavens van ongeveer 2,95 m. Ten aanzien van het grote jacht gelden de volgende maten:

schroefdiameter : $D = 0,50$ m (schroef niet in tunnel) op $0,75$ m onder water-
lijn

vermogen : $P_d = 200$ kW

afstand tot bodem: $z \approx 2,95 - 0,75 \approx 2,20$ m.

De bodemsnelheid kan worden bepaald uit formule (3.2.1) en (3.2.2), uit deze formules volgt:

$$v_b = 2,78 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{P_d}{D^2}\right)^{1/3} \cdot \frac{D_o}{x} \cdot e^{(-15,43 \cdot z^2/x^2)} \quad (3.2.3)$$

De enige onbekende in bovenstaande vergelijking is de afstand x , de afstand tussen de schroef en de plaats waar de bodemsnelheid wordt bepaald. De bodemsnelheid bereikt een maximum of minimum als geldt dat:

$$\frac{dv_b}{dx} = 0 \quad ; \quad \text{differentiëren van (3.2.3) geeft:}$$

$$\frac{dv_b}{dx} = 2,78 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{P_d}{D^2}\right)^{1/3} \cdot D_o \cdot \left(-\frac{1}{x^2} + \frac{2 \cdot 15,43 \cdot z^2}{x^4}\right) \cdot e^{-15,43 \cdot z^2/x^2} = 0$$

dit geeft:

$$x_m = \sqrt{2 \cdot 15,43 \cdot z^2} \quad (3.2.4)$$

Uitgaande van het verloop van dv_b/dx geldt dat voor bovengenoemde waarde van x (3.2.4) een maximum wordt bereikt ($dv_b/dx > 0$ voor $x_m < x$; $dv_b/dx < 0$ voor $x > x_m$).

Uit vergelijking (3.2.3) en (3.2.4) volgt in het geval van het grote jacht een maximum bodemsnelheid van:

$$v_b^{\max} = 2,78 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{P_d}{D^2}\right)^{1/3} \cdot \frac{D_o}{\sqrt{2 \cdot 15,43 \cdot z^2}} \cdot e^{-0,5} \approx 0,75 \text{ m/s}$$

Uitgaande van bovengenoemde bodemsnelheid kan voor een stilliggend jacht de steengrootte worden bepaald.

In [6] is een andere formule toegepast om de D_{50} te bepalen; de D_{50} bepaald met vergelijking (2.4.1) dient met ongeveer 20% te worden vergroot ($\alpha = 1,6$). De karakteristieke steengrootte wordt dan:

$$D_{50} > 0,03 \text{ m}$$

Ten aanzien van het (incidenteel groot schip) geldt dat het maximaal te gebruiken vermogen in eerste instantie wordt afgeleid uit de bodemsnelheden voor het grote jacht.

De gegevens voor zijn:

schroefdiameter : $D = 1,25 \text{ m}$ (schroef niet in tunnel)

maximum vermogen : $P_d^{\max} = 400 \text{ kW}$

afstand tot bodem: $z \approx 3,75 + 1,75 \approx 2,00 \text{ m}$ (Zijpe NAP $-0,70 \text{ m}$, Zoommeer NAP $+0,30 \text{ m}$) (schroefas $0,75 \text{ m}$ boven bodem schip).

Uitgaande van bovenstaande gegevens en de maximale bodemsnelheid bij het grote jacht volgt:

$$v_b^{\max} \approx 0,75 \text{ m/s} \rightarrow P_d < 80 \text{ kW}$$

Dit maximaal te gebruiken vermogen is slechts 20% van het maximale vermogen en dat is waarschijnlijk te klein voor een goed manoeuvreergedrag. Toelaten van een groter vermogen is slechts mogelijk als:

- de waterdiepte wordt vergroot waarbij deze schip mag invaren
- het toepassen van een zwaardere bestorting.

Ten aanzien van het eerste punt geldt dat de waterdiepte aan Zoommeerszijde niet veel meer kan worden vergroot daar dan deze sluis voor lange tijden onbereikbaar wordt voor dit type schepen.

Wordt er uitgegaan van het maximale vermogen van het Dortmund-Eemsschip en een waterstand van NAP $-0,70 \text{ m}$ (Zijpe) respectievelijk NAP $+0,30 \text{ m}$ (Zoommeer) dan geldt:

$$v_b^{\max} \approx 1,25 \text{ m/s} \rightarrow D_{50} \geq 0,085 \text{ m}$$

* Opmerking: Dit dient in feite ook in relatie te worden gezien tot de maximum retourstroomsnelheid (zie par. 3.3)

In het bovenstaande is alleen de karakteristieke steengrootte van de bestorting (voor retourstroom- en schroefstraalsnelheden) afgeschat. De precieze plaatsing van de bestortingen wordt behandeld in paragraaf 7.

3.3. Samenvatting resultaten

De resultaten van de berekeningen van de karakteristieke steengrootte (D_{50}) voor retour- en schroefstraalsnelheden zijn in de onderstaande tabel samengevat:

scheepstype	retourstroom			schroefstraal		
	waterstand (tov NAP m)	v_s [m/s]	D_{50} [m]	waterstand (tov NAP m)	motorvermogen [kW]	D_{50} [m]
groot jacht	-1,50	→ 1,5	→ 0,02	-1,50	→ 200	→ 0,030
Dortmund-	-0,70	→ 0,6	← 0,02	-0,70	→ 80	← 0,030
Eemsschip	-0,70	→ 0,75	← 0,085	-0,70	→ 370	→ 0,085

Tabel 3.3.1 Samenvatting resultaten

In bovenstaande tabel is met behulp van pijlen aangegeven van welke aannamen (waterstanden, vaarsnelheden etc.) zijn uitgegaan om bepaalde parameters (D_{50} , maximum vaarsnelheid of motorvermogen) te bepalen.

Als er wordt uitgegaan dat een beperking van het motorvermogen van het Dortmund-Eemsschip tot 80 kW (60 pk) mogelijk is dan kan de karakteristieke steengrootte (D_{50}) beperkt blijven tot 0,030 m. Wordt er uitgegaan van het maximum motorvermogen van het Dortmund-Eemsschip dan wordt de karakteristieke steengrootte 0,085 m. De invaarsnelheid van dit schip dient dan beperkt te blijven tot 0,75 m/s (zie tabel 3.3.1).

4 Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van ledigen kolk via deurschuiven

4.1 Bepalen maatgevend debiet respektievelijk maatgevende bodemsnelheid

Voordat er iets over de uitstroomsnelheden achter de ledigopeningen in de draaideur aan Zijpezijde kan worden gezegd, moet eerst het ledigen van de sluis worden geanalyseerd. Bij het ledigen (vullen) van een sluis spelen de volgende aspecten een rol:

- de nivelleertijd van de kolk
- de maximale langskrachten op schepen
- het maximale debiet (uitstroomsnelheid) in verband met de bestorting achter de ledig/vulopeningen.

Er kan een relatie worden gelegd tussen de hefsnelheid van de deurschuiven en de nivelleertijd, de maximum langskrachten op schepen respektievelijk het maximum debiet uit de ledig(/vul)openingen. Dit is in appendix A uitgewerkt.

De maatgevende situatie voor wat betreft de langskrachten op schepen treedt op bij maximum verval. In het geval van ledigen van de kolk is dit tevens de maatgevende situatie voor de bestorting, daar er dan een minimale waterstand heerst op de voorhaven (Zijpe). Dit is een waterstand van NAP -2,35 m. Het maximale verval over de draaideur is in dat geval 3,10 m (Zoommeer op NAP +0,75 m).

Uitgaande van het hierboven gegeven maximum verval en de in appendix A gegeven vergelijkingen volgt voor verschillende heftijden respektievelijk hefsnelheden:

hefsnelheid [m/s]	heftijd [s]	t_{\max} [s]	Q_{\max} [m ³ /s]	v_{\max} [m/s]	t_{niv} [s]	$(dQ/dt)_{\max}$ (pos) [m ³ /s ²]	$(dQ/dt)_{\min}$ [m ³ /s ²]
0,005	150	174	12,3	4,4	375	0,109	-0,054
0,010	75	123	14,3	6,8	337 ⁵	0,218	-0,054
0,015	50	100	15,0	7,1	325	0,328	-0,054
∞	0	0	16,4	7,8	300	∞	-0,054

Tabel 4.1.1 Maximale debieten (etc.) als functie van de hefsnelheid van de deurschuiven

De in bovenstaande tabel gegeven waarde voor de verandering van het debiet per tijdseenheid (dQ/dt) zijn een maat voor de langskracht op de schepen ten gevolge van translatiegolven. Tevens zal er op de schepen een langskracht worden uitgeoefend ten gevolge van de stroming langs het schip. Dit is in appendix A verder uitgewerkt.

Uitgaande van de in appendix A berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven ($\Xi dQ/dt$) en stroming (ΞQ) volgt een maximale langskracht op het maatgevende jacht (zie tabel 2.1.1) van $1^0/00$ in het geval van een hefsnelheid van $0,015$ m/s. Het in R 1650-0 [1] geschatte criterium ten aanzien van langskrachten op jachten van $3^0/00^*$ wordt hierbij niet overschreden. De gebruikte berekeningsmethode van de maximale langskracht is echter vrij grof, zodat enige veiligheid ten opzichte van het criterium wel gewenst is. Tevens blijkt dat bij het verder opvoeren van de hefsnelheid de nivelleertijd niet veel meer afneemt (zie tabel 4.1.1), en het maximum debiet, respectievelijk de uittreesnelheid niet veel meer toeneemt.

Er is dan ook in het vervolg uitgegaan van een hefsnelheid van $0,015$ m/s met de bij het maximum verval behorende uittreesnelheid van $7,1$ m/s en debiet van 15 m³/s.

Opmerking: In bovenstaande analyse is uitgegaan van een groot jacht. In het geval van incidentele schuttingen met grotere schepen (b.v. Dortmund-Eemsschip) is het gehanteerde criterium voor de langskrachten op de schepen ($3^0/00$) niet meer juist; dit criterium dient dan orde 1 à $1,5^0/00$ te zijn. Dit betekent dat bij het incidenteel schutten van grote schepen de schuifsnelheid van de deurschuiven verlaagd dient te worden.

4.2 Bepalen steengrootte

De situatie bij de ledigopeningen van de kolk aan de Zijpe-zijde is weergegeven in figuur 3.

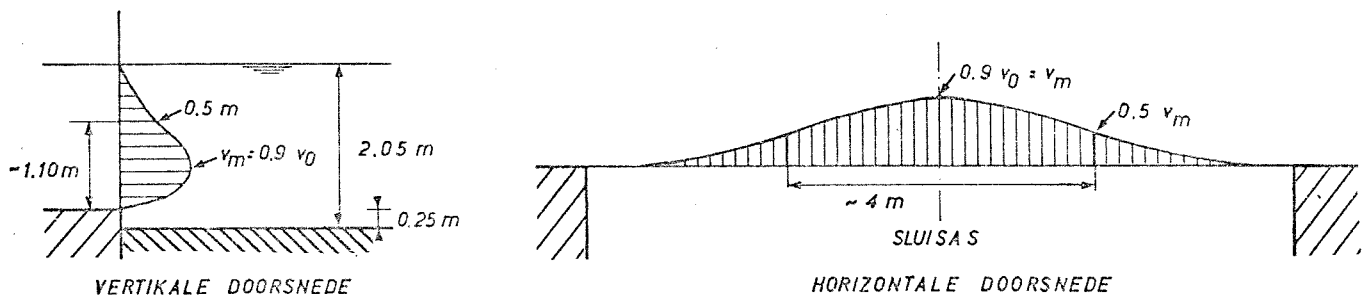
Achter de openingen is nog ongeveer een 12 meter betonvloer (op NAP $-4,20$ m) voordat het te bestorten gedeelte (op NAP $-4,45$ m) volgt.

*Opmerking: In R 1650-4 wordt nader op het langskrachtcriterium ingegaan.

Aannemende dat de uit de openingen komende stralen water afbuigen naar de bodem en vrij snel achter de draaideur zich samenvoegen tot één straal kan aan de hand van Rajarathnam [9] iets worden gezegd over de snelheid in de straal (zie ook appendix B). Als wordt aangenomen dat de straal naar de bodem afbuigt onder een gemiddelde helling van 1:4, raakt de straal 2 m achter de deuropeningen de bodem; het oppervlak van de straal is dan nog ongeveer gelijk aan het netto doorstroomoppervlak (kontraktiecoëfficiënt maal oppervlak deuropeningen $\approx 0,7 \cdot 4 \cdot 0,75$) van ongeveer $4 \cdot 0,6 \text{ m}^2$.

Uitgaande van het bovenstaande volgt:

- ter plaatse van de rand van de beton, op een afstand van ongeveer 12 m van de draaideur is de maximum snelheid in de straal nog ongeveer 0,9 maal de beginsnelheid; dat wil zeggen de snelheid is afgenomen tot ongeveer 6,3 m/s
- het snelheidsprofiel in de as van de straal is ongeveer als volgt:



Figuur 4.2.1 Snelheidsprofielen ter plaatse van einde sluisvloer

Daar de bodem achter de sluisvloer nog ongeveer 0,25 m lager ligt zal de bovengenoemde snelheid van 6,3 m/s nog iets reduceren. Aangenomen wordt dat voor de bepaling van de karakteristieke steengrootte een snelheid van 6 m/s moet worden aangehouden.

Dit geeft echter geen reële steengrootte ($D_{50} \geq 1,56 \text{ m}$, gewicht ongeveer 8 ton). Ten aanzien van de bodembescherming kan worden gekozen uit verschillende alternatieven:

- verder doortrekken van de betonvloer
- het aanbrengen van een drempelconstructie. Deze drempelconstructie heeft twee functies te weten: a) de hydraulische sprong die in deze situatie ontstaat (Froude-getal bij opening is orde 2) treedt op op de sluisvloer, b) de drempel werpt de stroom omhoog zodat er meer spreiding optreedt voordat de straal de bodem weer raakt.

Door WL is een getande einddrempel voorgesteld, hierbij werd afgeschat dat de snelheid net achter de drempel nog ongeveer 4 m/s zou zijn waardoor direkt achter de sluisvloer een bestorting met een karakteristieke steengrootte van 0,70 m of groter noodzakelijk is.

Ten aanzien van de bovengenoemde grote stroomsnelheden kunnen nautische bezwaren worden aangevoerd. In het geval één sluis ledigt via de deuropeningen en er bij de andere sluis schepen in- of uitvaren (Zijpe-zijde) ontstaan er al bij vrij kleine vervallen grote stroomsnelheden in de voorhaven. Het in R 1650-0 [1] genoemde criterium van 0,3 à 0,5 m/s dwars- of langssnelheid wordt dan overschreden.

Zowel uit oogpunt van bestortingen als uit nautisch oogpunt blijkt het nivelleren via de deuropeningen geen optimale oplossing te zijn. Om deze redenen is besloten om (ook) neerwaarts te nivelleren via het gemaal respektievelijk het doorlaatwerk. De gehele argumentatie rondom deze beslissing is verwerkt in [12]. In het vervolg van deze studie wordt geen aandacht meer besteed aan het ledigen van de jachtensluizen door deuropeningen.

5 Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van vullen en ledigen via riolen

In de figuren 4 en 5 is de configuratie bij de uitstroming van het gemaal weergegeven. De maatgevende situatie voor de bestorting direkt achter deze in- respektievelijk uitstroomopening treedt op in het geval van ledigen van de kolk. Dat wil zeggen een kalamiteitssituatie bij het uitwisselen, bij het maximale verval ontstaat er dan een maximum debiet van ongeveer $23 \text{ m}^3/\text{s}$ (ook geldig bij neerwaarts nivelleren).

Het is niet aannemelijk dat er zich in beide sluizen op hetzelfde ogenblik een zelfde kalamiteitssituatie voordoet.

Het tegelijkertijd uitwisselen met maximum debiet (aangehouden op $16 \text{ m}^3/\text{s}$) van beide sluizen is wel een mogelijkheid waarmee rekening dient te worden gehouden. Dit is niet zo zeer maatgevend voor de bestorting direkt achter het gemaal, maar waarschijnlijk wel voor de bestorting op grotere afstand van het gemaal; dit ten gevolge van de grotere straaldikte.

Tevens kan dit een maatgevende situatie zijn uit nautisch oogpunt vanwege de optredende snelheden in de voorhaven ten gevolge van deze uitstroomdebieten.

De snelheid in de uitstroomopening ter plaatse van de needschuifspinning is uitgaande van een debiet van $23 \text{ m}^3/\text{s}$ ongeveer $3,1 \text{ m/s}$ (Q/A_{riool}). De snelheid van het water uit het riool zal niet sterk afnemen, omdat:

- de straal aan één zijde wordt begrensd door een wand, waardoor geen water kan worden aangezogen. De snelheid in de straal breekt dan langzamer af dan bij een vrije straal
- de bodem helt omhoog vlak achter de uitstroming uit het riool. De snelheid in de straal zal hierdoor een nog sterkere tendentie vertonen om konstant te blijven, zelf een kleine toename van met name de bodemsnelheid is niet onmogelijk.

Uit het bovenstaande kon worden afgeleid dat ter plaatse van de overgang tussen beton en bestorting er nog steeds een maximum snelheid in de straal heerst van $3,1 \text{ m/s}$. De bestorting ligt ongeveer $0,50 \text{ m}$ lager dan de betonvloer (zie fig. 5). De straal water die uit de uitstroomopening komt zal echter vrij snel (na 1 à 2 m) de bodem weer raken.

De bodemsnelheid bij het begin van de bestorting (dicht bij de uitstroming) is dan ook aangenomen als $3,1 \text{ m/s}$ dit betekent:

$$D_{50} \geq 0,42 \text{ m (gewicht } \approx 100 \text{ kg)}$$

De lengte van de toe te passen bestorting voor deze situatie wordt behandeld in hoofdstuk 7. Tevens wordt dan de situatie waarin twee sluizen met maximum debiet uitwisselen bekeken.

6 Bepalen karakteristieke steengrootte (D_{50}) ten behoeve van vullen en ledigen kolk via kolkwandriolen

Ten aanzien van de bestorting kunnen de volgende maatgevende situaties worden onderscheiden:

- aantasting van de bestorting ten gevolge van de stroomsituatie bij een kalamiteitssituatie waarbij uitstroming van de kolk door de kolkwandriolen optreedt (bestorting ten behoeve van aantasting taluds door stralen)
- aantasting van de bestorting door stroming in het omarmend zoet naar of uit de kolk (bestorting ten behoeve van gelijkmatige stroming).

Het eerstgenoemde aspect speelt een rol bij kolklediging, dit daar dan een relatief gekoncentreerde straal water uit de kolkwandopeningen het tegenoverliggende talud van het omarmend zoet kan raken. Dit is behandeld in paragraaf 6.2.

Het tweede aspect speelt zowel bij kolkvulling als kolklediging door de kolkwandopeningen een rol. Dit is behandeld in paragraaf 6.1.

6.1 Bestorting omarmend zoet ten behoeve van gelijkmatige stroming

Bij het bepalen van de benodigde steengrootte van de bestorting in het omarmend zoet voor gelijkmatige stroming is de doorsnede ter plaatse van het sluishoofd Zoommeer (doorsnede B-B, fig. 6) maatgevend. Deze doorsnede heeft het geringste oppervlak terwijl het totale vul- of ledigdebiet er moet passeren. De maatgevende situatie wordt hiernavolgend bepaald.

Er kunnen ten aanzien van de maatgevende situatie voor de bestorting in het omarmend zoet twee gevallen worden onderscheiden:

- normale situaties, dat wil zeggen er wordt alleen neerwaarts uitgewisseld, er treedt alleen kolkvulling (met zoet water) op.

De maximum debieten zijn in deze situatie beperkt tot:

* $4 \text{ à } 16 \text{ m}^3/\text{s}$ bij uitwisselen onder vrij verval (laagwatersituatie)

* $5 \text{ m}^3/\text{s}$ bij uitwisselen bij pompen (hoogwatersituatie)

- kalamiteitssituaties, dat wil zeggen tijdens het neerwaarts uitwisselen treden de volgende situaties op:

* bij vrij vervalssituatie wordt de hoofdschuif in het doorlaatwerk te hoog geheven, het maximum debiet dat hierbij kan ontstaan is $23 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie R 1650-0 [1])

* bij pompsituaties kan pompsluitval optreden, het maximum terugstroomdebiet

door de pomp blijft kleiner dan ongeveer $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie par. 6.2).

Daar de debieten in de kalamiteitssituatie bij het neerwaarts uitwisselen onder vrij verval duidelijk het grootst zijn, zal bij deze situatie de maatgevende snelheid optreden voor de bestorting in doorsnede B-B (zie fig. 6) van het omarmend zoet. Het is echter niet noodzakelijk dat de maatgevende snelheid optreedt bij het maximum debiet van $23 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit maximum debiet treedt namelijk op bij hoge omarmend zoetwaterstanden (NAP +0,75 m, Zijpe op NAP -2,35 m), het doorstroomoppervlak van doorsnede B-B is in deze situatie dus maximaal. In het onderstaande is voor een kalamiteitssituatie bij neerwaarts nivelleren onder vrij verval (bij een Zijpepeil van NAP -2,35 m) de snelheid in doorsnede B-B bepaald als functie van de waterstand op het omarmend zoet.

In de hiernavolgende berekening is uitgegaan van:

- Zijpe-waterstand NAP -2,35 m
- het maximum debiet van $23 \text{ m}^3/\text{s}$ treedt op bij een omarmend zoetwaterstand van NAP +0,75 m (3,10 m verval). Voor deze situatie is de weerstand van het riool bepaald voor permanentie waarbij de weerstand van de kolkwandriolen is verwaarloosd. De debieten bij andere omarmend zoetwaterstanden zijn uitgaande van bovengenoemd weerstandskoefficiënt bepaald (permanentie). De hierbij gebruikte vergelijking is:

$$\Delta h = \xi \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2}$$

waarin: Δh = verval [m]

Q = debiet [m^3/s]

A = doorsnede riool (7.5) [m^2]

g = versnelling zwaartekracht (9.8.1) [m/s^2]

ξ = weerstand riool [-]

(bepaald uit maximum debiet $\rightarrow \xi \approx 6,5$)

- Zoommeerwaterstand varieert tussen NAP -1,25 m en NAP +0,75 m
- in het geval van lage omarmend zoetwaterstanden treedt schietend water op in de kolkwandriolen. Het maximum debiet door de kolkwandriolen is dan bepaald met:

$$\Delta H_s = h_{o.z.} - h_{bkwr}$$

ΔH_s = energiehoogte t.o.v. bodemkolkwandriool [m]

$h_{o.z.}$ = waterstand omarmend zoet [m]

h_{bkwr} = peil bodem kolkwandriool (NAP -1,50) [m]

$$Q_s = 2/3 \cdot \Delta H_s \cdot b_{kwr} \cdot n_{kwr} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{1}{3} \cdot \Delta H_s}$$

Q_s = debiet door kolkwandriolen bij schietend water [m³/s]

b_{kwr} = breedte kolkwandriolen (omarmend zoetzijde: 1,6) [m]

n_{kwr} = aantal kolkwandriolen (15) [-]

Bovenstaande vergelijking van Q_s is afgeleid uit het criterium voor schietend water:

$$v = \sqrt{gh} \quad (\text{gaat op tot } h < h_{riool} \approx 1 \text{ m})$$

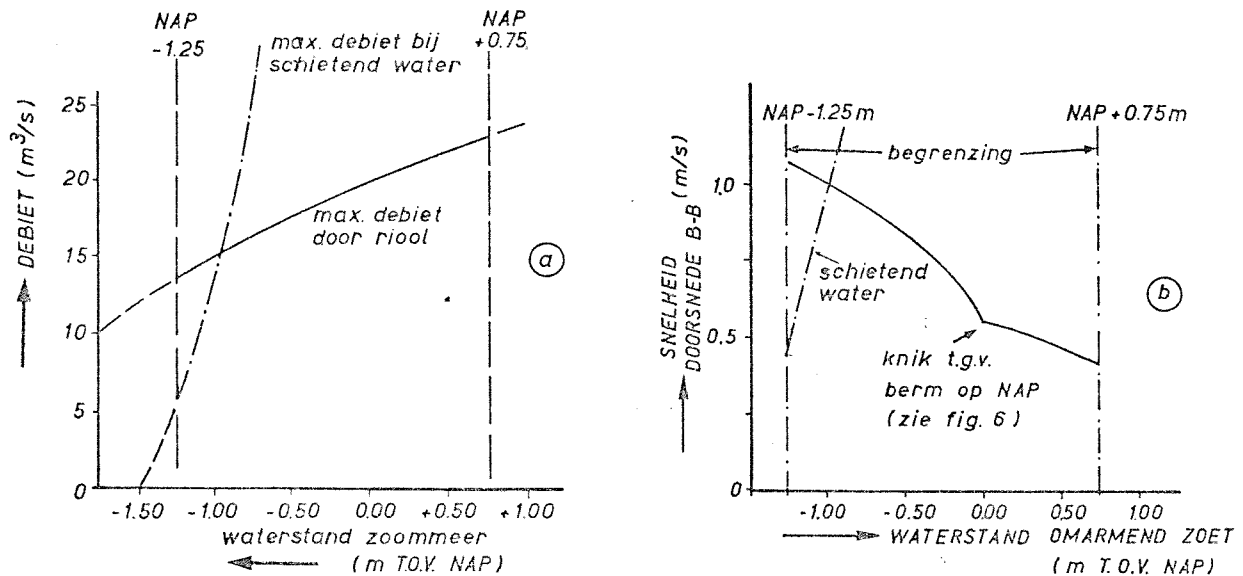
Invullen in de vergelijking van Bernouilli (t.o.v. bodem kolkwandriool) geeft:

$$\Delta H_s = h + \frac{(\sqrt{gh})^2}{2g} \quad \text{zodat } h = \frac{2}{3} \Delta H_s$$
$$\text{en } v = \sqrt{\frac{2}{3} g \Delta H_s}$$

In bovenstaande vergelijking is een mogelijke kontraktie in de instroomopening van het riool niet opgenomen ($\mu = 1$)

- het doorstroomprofiel ter plaatse van doorsnede B-B is afgeleid uit figuur 6.

Uitgaande van bovenstaande aannamen is de snelheid in doorsnede B-B bepaald als functie van de waterstand op het Zoommeer. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 6.1.1. In figuur 6.1.1a is het debiet weergegeven; voor lage Zoommeerwaterstanden (tot orde NAP -1,00 m) is het debiet gelimiteerd ten gevolge van schietend water. Voor hogere omarmend zoet waterstanden kan het debiet in het riool (naar het Zijpe) worden aangehouden. In figuur 6.1.1b is de snelheid in doorsnede B-B weergegeven.



Figuur 6.1.1 Maximum snelheid in doorsnede B-B (fig. 6) bepaald uit maximum debiet bij kalamiteitssituaties

Uit bovenstaande figuur volgt dat de maximum snelheid in doorsnede B-B optreedt bij een waterstand van NAP -1,00 m (debiet ongeveer $15 \text{ m}^3/\text{s}$). Uit deze maximum snelheid ($\approx 1,0 \text{ m/s}$) volgt dat de karakteristieke steengrootte ongeveer $0,043 \text{ m}^*$ dient te zijn.

Daar de bestorting op een helling ligt dient de D_{50} nog met een correctiecoëfficiënt te worden vermenigvuldigd in verband met de verminderde schuifspanning van de stenen. Uit [18] volgt dat de D_{50} moet worden vergroot met $\cos\alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2\alpha}{\tan^2\phi}}$. De hellingshoek α is in dit geval ongeveer 19° (helling 1:4), de wrijvingshoek ϕ van het stortmateriaal is gesteld op 45° . De correctiecoëfficiënt is dan 1,06; de D_{50} wordt 0,046 m.

In het bovenstaande is ervan uitgegaan dat de situatie in doorsnede B-B maatgevend is. In de kolkwandriolen zullen echter vrij grote snelheden optreden (tot orde 2 m/s). Daar er bij de instroming van de kolkwandriolen echter potentiaalstroming mag worden verondersteld zullen de snelheden in de buurt van de bodem niet boven bovengenoemde waarde van 1 m/s komen.

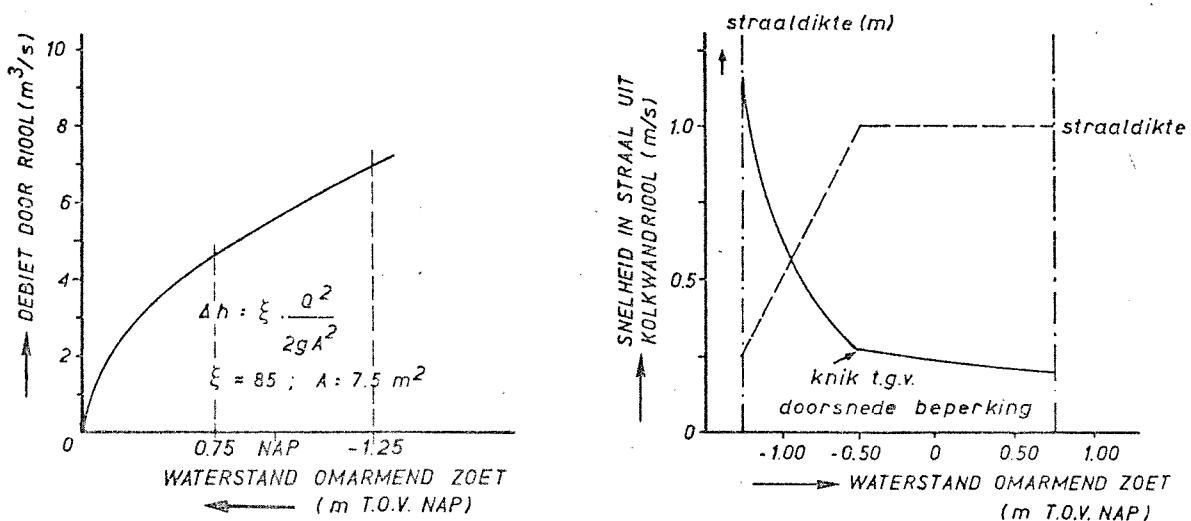
Opmerking: In de toegepaste USBR-formule is de α -waarde 1,4 geldig voor turbulent water. In dit geval is de turbulentiegraad van het water niet groot (instromend, geen straalafbreking); de α -waarde kan dan eventueel worden gereduceerd tot 1,1; D_{50} wordt dan 0,035 m).

6.2 Kolklediging (kalamiteitssituatie)

In paragraaf 6.1 is aangegeven dat tijdens het neerwaarts uitwisselen via de pomp zich een kalamiteitssituatie kan voordoen waarbij terugstroming door de pomp ontstaat. De kolk wordt dan als het ware weer geledigd, dat wil zeggen het zoete water (of mogelijk zout water) stroomt door de kolkwandriolen naar het omarmend zoet. Uitgaande van de aanname dat het maximum terugstroomdebiet door de pomp (permanentie) wordt bereikt kan voor verschillende waterstanden de snelheid van de straal water uit het kolkwandriool worden bepaald. Deze straal water zal het tegenover het kolkwandriool liggende talud aantasten. Daar de debieten veel geringer zijn dan voor kolkvulling zal er geen maatgevende situatie optreden voor de maatgevende doorsnede B-B (zie fig. 6) in het omarmend zoet.

De in figuur 6.2.1 weergegeven resultaten zijn bepaald uitgaande van de volgende aannamen:

- het debiet door de kolkwandriolen (15 stuks) wordt bepaald bij permanentie, de weerstand van riool en pomp is gesteld op 85 (zie R 1650-0) de weerstand van de kolkwandriolen is verwaarloosd
- de waterstand op het Zijpe is NAP +2,50 (maximale waterstand waarbij nog geschut wordt)
- de einddoorsnede van het kolkwandriool is bij waterstand lager dan NAP -0,50 m (plafond kolkwandriool) aangenomen als de waterdiepte boven de bodem van het kolkwandriool uitgaande van de waterstand op het omarmend zoet maal de breedte van het kolkwandriool aan omarmend zoetzijde (1,6 m).



Figuur 6.2.1 Maximale snelheid en dikte van straal uit kolkwandriool bij verschillende vervallen

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat de grootste snelheid in de straal uit het kolkwandriool optreedt bij minimale omarmend zoet waterstanden (NAP -1,25 m). De straaldikte is dan echter gering (ongeveer 0,25 m) en dus zal de snelheid in de straal sneller afbreken. Uitgaande van de straaltheorie van Rajaratnam [9] volgt:

- bij een waterstand op omarmend zoet van NAP -1,25 m, een uittreesnelheid uit het kolkwandriool van ongeveer 1,1 m/s en een straaldikte van 0,25 m is de snelheid ter plaatse van het talud (10 meter van het kolkwandriool) nog ongeveer 0,60 m/s (zie appendix B, twee-dimensionale wandstraal)*
- bij een waterstand op het omarmend zoet van NAP -1,00 en de in figuur 6.2.1 vermelde snelheid en straaldikte volgt een snelheid ter plaatse van het talud van ongeveer 0,40 m/s.

De maximale stroomsnelheid ter plaatse van het talud is dus orde 0,6 m/s. De maximale snelheid in doorsnede B-B volgt uit het maximum debiet (ongeveer $7 \text{ m}^3/\text{s}$) bij de minimale omarmend zoet waterstand (NAP -1,25 m) en is ongeveer 0,55 m/s (niet maatgevend, zie par. 6.1).

Uitgaande van bovengenoemde gegevens zal de snelheid in het omarmend zoet in de situatie orde grootte 0,60 m worden. De karakteristieke steengrootte (D_{50}) wordt dan:

$$D_{50} \geq 0,016 \text{ m}$$

Daar de bestorting op een talud ligt dient de D_{50} met een korrektiecoëfficiënt te worden vermenigvuldigd.

Uit [18] volgt dat in deze situatie de korrektiecoëfficiënt gelijk is aan $1/(\cos\alpha - \sin\alpha/\tan\phi)$; in dit geval ($\alpha = 14^\circ$, $\phi = 45^\circ$, zie par. 6.1) geeft dit een korrektiecoëfficiënt van 1,37. De D_{50} wordt dus 0,022 m.

Dit betekent dat de vulsituatie, beschreven in paragraaf 6.1 maatgevend is in doorsnede B-B. Slechts in doorsnedes die ver verwijderd zijn van doorsnede B-B (debiet in omarmend zoet neemt af naarmate de afstand tot B-B groter wordt) wordt bovengenoemde situatie maatgevend.

* Opmerking: In dit geval treedt nog geen schietend water op in het kolkwandriool.

7 Bepalen afmetingen van bestortingen

In dit hoofdstuk wordt advies gegeven over de toe te passen afmetingen van de bestortingen bij de jachtensluizen in de Philipsdam. De volgende indeling is hierbij aangehouden:

- bestorting ten behoeve van het tegengaan van erosie door schroefstralen en retourstromingen, paragraaf 7.1.
- bestorting ten behoeve van het tegengaan van erosie bij het ledigen van de sluis via riolen (c.q. het gemaal), paragraaf 7.2.
- bestorting ten behoeve van het tegengaan van erosie in het omarmend zoet, paragraaf 7.3.

Bij de bepaling van de lengte van de bestortingen is meestal uitgegaan van straaltheorieën gegeven in [9]. In appendix B is kort samengevat tot welke toepassingsgebieden de verschillende in [9] genoemde straaltheorieën beperkt zijn.

7.1 Voorhaven Zoommeer en Zijpe bij sluishoofden

In principe kunnen de afmetingen van de bestortingen ten behoeve van schroefstralen retourstroomsnelheden bij de sluishoofden aan Zoommeer en Zijpezijde gelijk zijn. Dit daar de maatgevende omstandigheden (bodempligging, maatgevende waterstanden etc.) voor beide sluishoofden gelijk zijn.

De afmetingen van de bij de sluishoofden aan te brengen bestortingen zijn niet direkt te bepalen. Als belangrijkste uitgangspunt voor de aan te brengen bestortingen geldt dat de bodempligging bij de konstruktie stabiel moet zijn. Daar de schroef- en retourstroomsnelheden zowel naar (uitvaren) als vanaf (invaren) het sluishoofd gericht kunnen zijn, zal bij een onbeschermd bodem het bodemmateriaal in de voorhaven vrij willekeurig worden verplaatst. Er kunnen plaatselijke erosiekuilen ontstaan, maar het is niet te verwachten dat deze gezien grote diepte kunnen ontwikkelen.

Het lijkt voldoende om over een lengte van ongeveer 20 m ^x achter de sluishoofden een bestorting aan te brengen. Er dient dan echter wel aandacht te worden besteed aan de beëindiging van de bestorting.

^x Opmerking: bij de voorhaven Zoommeer ongeveer 25 m in verband met de brugpijler op de as van het sluizencomplex (zie fig 7).

De overgang naar niet bestorte gedeelte van de voorhaven dient dusdanig te worden uitgevoerd dat de optredende erosiekuilen achter de bestorting geen gevaar opleveren voor de stabiliteit van deze bestorting.

De breedte van de bestorting is bepaald uitgaande van de volgende aanname: de retourstroomsnelheden van invarende schepen spreiden zich onder een helling van maximaal 1:4 vanuit de doorstroomopeningen bij het sluishoofd. Uitgaande van de lengte van ongeveer 20 m dient de bestorting dus ongeveer 5 m breder te zijn dan de doorstroomopening te plaatse van het sluishoofd. De richting van de schroefstraal zal normaliter evenwijdig zijn aan de sluisas. Er kunnen echter ook andere richtingen van de schroefstraal voorkomen. Geadviseerd wordt om hierom het totale gebied voor het sluishoofd te bestorten ($D_{50} > 0,085$).

De afmetingen van de bestortingen in de voorhaven Zoommeer zijn weergegeven in figuur 7. De afmetingen van de bestortingen welke dienen te worden aangebracht ten behoeve van het in- en uitstromende water van het omarmend zoet, zijn bepaald in paragraaf 7.3. De afmetingen van de bestortingen in de voorhaven Zijpe zijn weergegeven in figuur 8. De afmetingen van de bestorting achter het gemaal (westzijde) wordt behandeld in paragraaf 7.2. Er wordt geadviseerd om ook op de volgende plaatsen in de voorhaven een bestorting aan te brengen:

- langs de zuidzijde van het gemaal en langs het riool naar de kolk
- langs de sluishoofden waar niet ten behoeve van schroefstralen of retourstroming een bestorting is aangebracht.

Deze bestorting wordt geadviseerd in verband met de stabiliteit van de constructie. Er kan op de aangegeven plaatsen namelijk erosie ontstaan ten gevolge van reststroming ten gevolge van het uit- respektievelijk instromen van het gemaal en ten gevolge van golven. Deze bestorting dient een lengte van ongeveer 10 à 15 m te hebben. De D_{50} van deze bestorting hoeft niet groter te zijn dan de D_{50} welke geadviseerd is voor schroefstraal - en retourstroomsnelheden ($D_{50} \approx 0,085\text{m}$).

7.2 Gemaal (voorhaven Zijpe)

In paragraaf 2.3 is de maatgevende situatie bepaald voor de bestorting direct achter het gemaal. Het debiet in deze situatie is afgeschat op $23 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een Zijpe-waterstand van NAP - 2.35 m. Dit is een kalamiteitssituatie waarbij één van de sluisen ledigt via een riool. Bij de bepaling van de lengte van de bestorting dient ook rekening te worden gehouden met de mogelijkheid dat de twee sluisen simultaan het maximum debiet onder normale omstandigheden spuien, dit is een debiet van tweemaal $16 \text{ m}^3/\text{s}$. In deze situatie kan op grotere afstand achter het gemaal de snelheid groter worden dan in voornoemde kalamiteitssituatie met één sluis. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de straal water uit het gemaal dikker is en daardoor relatief minder snel afbreekt. In deze paragraaf worden beide situaties behandeld.

De configuratie van de voorhaven achter het gemaal is weergegeven in figuur 5. De bodem in de voorhaven achter het gemaal ligt op NAP - 5.50 m.[⊗] Vanuit het gemaal waar de bodem NAP - 6.65 m ligt, wordt via een helling 1:10 het bodemniveau van de voorhaven bereikt. In de voorhaven is ongeveer evenwijdig aan de as van het gemaal een damwandscherm aangebracht. Dit dient om de wachtplaatsen voor de schepen af te scheiden van het gebied waarin hoge snelheden ten gevolge van het ledigen (en in mindere mate vullen) kunnen optreden. De precieze plaats van de damwand is tot op heden nog niet bekend.

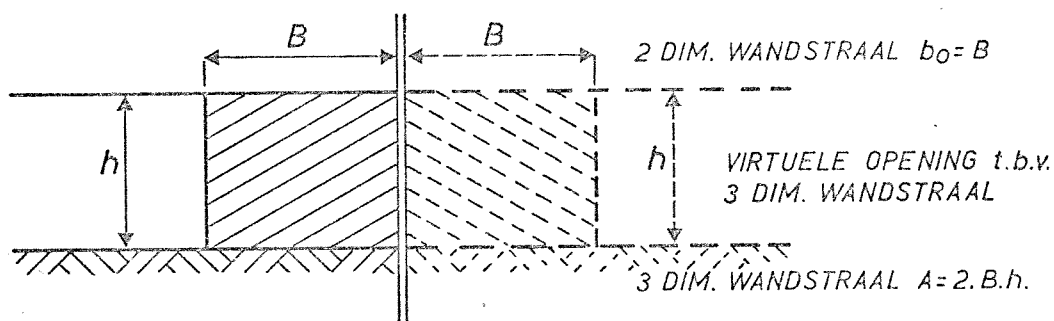
De afname van de snelheid in de straal water uit het gemaal is afgeschat met behulp van literatuurgegevens [7].

Hier bij aangenomen dat:

- de helling direct achter het gemaal geen invloed heeft op de snelheidsafname in de straal. Ten gevolge van deze helling zal de snelheidsafname in de straal iets geringer worden, dit wordt echter gecompenseerd door het feit dat er in het uittreegedeelte van het gemaal (zie fig 4) ook al enige spreiding in verticale zin optreedt.
- de straal direct bij de uittree van het gemaal plakt aan het damwandscherm, dat evenwijdig aan de as van het gemaal is aangebracht.

⊗ Opmerking: de bodemligging is ten opzichte van het eerste ontwerp (bodem op NAP - 4,45 m) verlaagd in verband met de bereikbaarheid van de wachtplaatsen bij lage Zijpe-waterstanden.

- het toepassen van de straaltheorie van wandstralen in een oneindig medium een ondergrens geeft voor de optredende snelheden. Dit door de waterdiepte al snel een beperkende faktor is voor de spreiding van de straal in verticale zin.
- het toepassen van de straaltheorie voor twee dimensionale wandstralen een bovengrens geeft voor de optredende snelheden. Dit door er bij deze theorie wordt uitgegaan van een spreiding in slechts één richting (zie fig 7.2.1).
- ten aanzien van de theorie van de wandstralen in een oneindig medium is gesteld dat het damwandscherm evenwijdig aan de asrichting van het gemaal gezien kan worden als symetrie-as van de straal. Voor het toepassen van de straaltheorie dient het oppervlak van de straal dan te worden verdubbeld. (zie fig 7.2.1)



Figuur 7.2.1 Vooraanzicht gemaal; schematisatie ten behoeve van toepassen straaltheorieën.

Voor beide situaties te weten éénmaal $23 \text{ m}^3/\text{s}$ en twee maal $16 \text{ m}^3/\text{s}$ is uitgaande van bovenstaande aannames het snelheidsbeeld achter het gemaal afgeschat. Dit is weergegeven in onderstaande tabel. In deze tabel is tevens de benodigde karakteristieke steengrootte (D_{50}) aangegeven.

afstand tot gemaal [m]	Kalamiteitsdebiet 23 m ³ /s			2 maal normaal debiet van 16 m ³ /s		
	v [m/s] 2 dim	v [m/s] 3 dim	D ₅₀ [m]	v [m/s] 2 dim	v [m/s] 3 dim	D ₅₀ [m]
10	3,1	3,1	0,43	2,1	2,1	0,19
25	3,1	3,1	0,42	2,1	2,1	0,19
50	2,7	1,95	0,16-0,31	2,1	1,85	0,14-0,19
75	2,2	1,45	0,09-0,20	2,1	1,3	0,07-0,19
100	1,9	1,15	0,06-0,15	1,8	1,1	0,05-0,14
125	1,7	0,85	0,03-0,12	1,6	0,85	0,03-0,11
150	1,5	0,65	0,02-0,10	1,45	0,70	0,02-0,09
200	1,3	0,45	0,01-0,08	1,25	0,55	0,01-0,07

Tabel 7.2.1 Snelheden en benodigde steengrootte achter het gemaal.

Uit bovenstaande tabel blijkt het volgende:

- de bovengrens van de snelheden wordt bepaald door de snelheidsafname volgens de tweedimensionale wandstraaltheorie in het geval van het kalamiteitsdebiet van 23 m³/s. Dit volgt in feite direkt uit de in de literatuur [7] gegeven formule van de snelheidsafname in de straal:

$$v_x = v_o \cdot 3,5 \cdot \sqrt{\frac{b_o}{x}} ; \frac{x}{b_o} > 12,3$$

waarin : b_o = beginbreedte straal [m]

x = afstand tot uittree [m]

v_o = beginsnelheid [m/s]

v_x = snelheid op afstand x tot de uittree [m]

In de situatie met 23 m³/s door één riool is de beginsnelheid (v_o) ongeveer 1,5 maal zo groot, terwijl de beginbreedte twee maal zo klein is als in de situatie van 2 maal 16 m³/s door twee riolen.

De snelheid in de straal is dan in het geval van $23 \text{ m}^3/\text{s}$ ongeveer $1,5/\sqrt{2} \approx 1,1$ maal zo groot (voor $x/b_0 > 12.3$, dus $x > 75 \text{ m}$).

- ten aanzien van de ondergrens van de snelheden geldt dan voor afstanden groter dan 125 m de situatie met twee riolen met een ledig debiet van 2 maal $16 \text{ m}^3/\text{s}$ maatgevend wordt.

In figuur 8 is de geadviseerde bestorting aangegeven. De geadviseerde karakteristieke steengrootte (D_{50}) op een bepaalde afstand tot het gemaal is ongeveer het gemiddelde van de voor die afstand gegeven waarden in tabel 7.2.1. Als grens voor bovengenoemde bestorting is ongeveer één lijn onder 1:4 vanuit het gemaal aangehouden; dit is de bovengrens van de spreiding van het randgebied van de straal. Tevens wordt geadviseerd om ook het verdiepte gebied achter het gemaal dat buiten bovengenoemde 1:4 helling valt, te bestorten met een bestorting met een D_{50} groter dan 0,42 m. Dit in verband met het feit dat er snelheden optreden in de richting van het verdiepte gedeelte ten gevolge van het aanzuigen van water door de straal. De steengrootte is hierbij aan de grote kant afgeschat door de precieze snelheid van het aangezogen water niet bekend is een de bestorting op een helling ligt, waardoor de stabiliteit geringer is. In het gebied tussen de bovengenoemde 1:4 helling en de strekdam van de voorhaven is een bestorting met een D_{50} groter dan 0,10 m geadviseerd. Dit in verband met de in dit gebied optredende neer. De snelheid in de neer is afgeschat op de orde de helft van de maximale snelheid in de straal ($\frac{1}{2} \times 3,10 \approx 1,5 \text{ m/s}$).

In het bovenstaande is aangenomen dat de as van de straal ongeveer evenwijdig blijft lopen aan de as van het gemaal c.q. het damwandscherm. Dit is aannemelijk als het damwandscherm aangesloten wordt op het gemaal daar de neer aan de zijde van het damwandscherm geringe breedte heeft dan de neer aan de zijde van het talud. Hierdoor zal de straal eerder "plakken" aan het damwandscherm; dit was ook bij het bepalen van de snelheidsafname in de straal aangenomen. Wordt het damwandscherm niet op het gemaal aangesloten dan kan via de opening tussen gemaal en damwandscherm water uit de voorhaven worden aangezogen. Dit zal het stroombeeld achter het gemaal beïnvloeden. Er is dan zonder schaalmodelonderzoek niet direkt te zeggen naar welke zijde de straal het gemaal zal afwijken.

De totale lengte van het stortebed achter het gemaal kan afgeschat worden met de in M 1573 [19] gegeven schattingsformule voor de straaldoordringingslengte in een kolk. Deze lengte is afgeschat met:

$$L = \frac{2 \cdot V}{A}$$

waarin L = doordringings lengte [m]
 V = te verplaatsen volume [m³]
 A = doorsnede spuikanaal [m²]

Wordt bovenstaande formule in deze situatie toegepast volgt uitgaande van:

- 2 kolken uitwisselen van NAP tot NAP -4,00 m
 $V \approx 2 \times 4 \times 800 = 6400 \text{ m}^3$.
- doorsnede spui kanaal bij NAP; -2,35 m : $\approx 67 \text{ m}^2$.

de doordringingslengte van de straal:

$$L \approx \frac{2 \cdot V}{A} \approx 200 \text{ m}$$

Het doorzetten van de bestorting is dus zinvol tot ongeveer 200 m achter de opening bij het gemaal. Langere lengtes zijn uit het oogpunt van kolklediging niet noodzakelijk.

7.3 Omarmend zoet (voorhaven Zoommeer)

In hoofdstuk 6 is aangegeven dat zich ten aanzien van maximum watersnelheden twee maatgevende situaties kunnen worden onderscheiden:

- neerwaarts uitwisselen bij lage omarmend zoetwaterstanden. De doorsnede van het omarmend zoet bij de sluishoofden (doorsnede B.B., fig. 6) is dan maatgevend: $D_{50} > 0,046 \text{ m}$.
- kalamiteitssituaties waarbij de sluis ledigt via de kolkwandopeningen. Op het talud tegenover de kolkwandriolen dient dan een bestorting met een D_{50} groter dan 0,022 m te worden aangebracht.

Daar de voor beide maatgevende situaties bepaalde steengroottes niet veel van elkaar verschillen, wordt geadviseerd het totale omarmend zoet te bestorten met een steenklasse met een D_{50} groter dan 0,046 m (zie fig. 7). Dit mede gezien het feit dat het precieze stroombeeld in het omarmend zoet bij de verschillende situaties niet goed te bepalen is.

De volgende punten dienen nog te worden behandeld;

- a) de lengte van de bestorting buiten het sluishoofd, dat wil zeggen in de voorhaven; dit in verband met de in- en uittreesnelheden van het omarmend zoet.

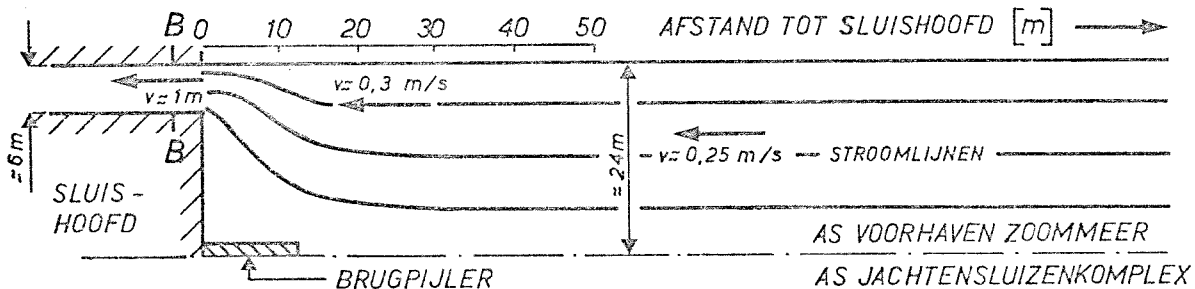
b) de invloed van de brugpijlers welke in het talud van het omarmend zoet zijn gesitueerd ongeveer ter plaatse van het sluishoofd. De pijlers steken op ongeveer NAP -1,00 m door het talud van het omarmend zoet (zie fig 7)

Ad a

Bij het neerwaarts uitwisselen is de maximum snelheid ter plaatse van het sluishoofd (doorsnede B-B; fig. 6) ongeveer 1m/s bij een omarmende zoetwaterstand van ongeveer NAP -1,00 m.

Bij het instromen van het omarmend zoet kan potentiaal stroming worden aangenomen. In onderstaande figuur is de stromings situatie afgeschat uitgaande van:

- beide sluisen wisselen uit met ongeveer $15 \text{ m}^2/\text{s}$; de sluisas c.q. as van de voorhaven Zoommeer kan dan gezien worden als "wand".
- het talud wordt verwaarloosd, de doorsnede wordt geschematiseerd tot een rechthoekig profiel van ongeveer 6 bij $2,5 \text{ m}^2$ (diepte ongeveer 2,5 m, een snelheid van 1 m /s geeft een breedte van ongeveer 6 m).



Figuur 7.3.1 Instromen omarmend zoet

Uit bovenstaande figuur volgt dat de snelheden in de voorhaven vrij gering zullen blijven. Op orde 20 m vanaf het sluishoofd in de snelheid nog ongeveer 0,30 m/s. Geadviseerd wordt op de bestorting van het omarmend zoet door te zetten tot ongeveer 25 m uit het sluishoofd (zie fig. 7). Alleen in het geval van grote debieten bij het neerwaarts uitwisselen zal dan enige ontgronding achter de bestorting ontstaan.

Bij het uitstromen uit het omarmend zoet is het maximum debiet ongeveer $7 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een omarmend-zoet waterstand van NAP -1,25 m; dit geeft een snelheid in doorsnede B-B van ongeveer 0,5 m/s. Gegeven schematisatie van de

in- respektievelijk uitstroming van het omarmend zoet (zie fig. 7.3.1) kan iets gezegd worden over de snelheidsafname in de straal uit het omarmend zoet. Daar de stroomsnelheid gering is (orde 0,5 m/s) en het een kalamiteits-situatie betreft is de voor het instromen aangegeven bodembestorting tot ongeveer 25 m het sluishoofd voldoende. De stroming zal plakken aan het talud en kan hier erosie veroorzaken. Uitgaande van de schematisatie van figuur 7.3.1 en de straaltheorie voor een tweedimensionale wandstaal [9] volgt dat de maximum snelheid in de straal tot orde 35 m achter de uittree blijft gehandhaafd. Indien erosie niet wordt geaccepteerd dient tot ongeveer 100 à 125 m vanaf het sluishoofd een bestorting op het talud te worden aangebracht. ($D_{50} > 0,01 \text{ m}$)^x.

Ad b

Er wordt geadviseerd om ongeveer een pijlerdikte (2,5 m) rond de pijlers een zwaardere bestorting aan te brengen. Dit in verband met de lokaal om de pijler optredende stromingen. De grootte van de D_{50} van deze bestorting is niet zo direkt uit literatuurgegevens af te schatten daar de pijler zich in een gebied met een hellende bodem bevindt, in de literatuur wordt uitgegaan van een horizontale bodem. Uit literatuurgegevens is bekend dat, indien het bodemmateriaal bij de pijler ongeveer een faktor 4 groter is dan volgt uit de formules voor de stabiliteit van stortsteen, er geen erosie optreedt. Dit betekent dat de D_{50} groter moet zijn dan ongeveer 0,20m.

x Opmerking: In dit gebied is waarschijnlijk de bestorting voor windgolven en translatiegolven door schepen maatgevend; in dit rapport wordt dit niet behandeld.

LITERATUUR

- 1 Jachtensluizen Philipsdam, Sturing Schutproces.
WL - notitie R1650-0, april 1981.
- 2 Jachtensluizen Philipsdam, Maximum krachten op hoofdschuiven in de riolen en de afdichtende regelschuiven.
WL - notitie R1650-1, april 1981.
- 3 Waterloopkundig Laboratorium, Zoutbezwaar ten gevolge van scheepsbewegingen in schutsluizen met een onbeschermd grensvlak.
Scheepsvaart nota behorende bij M 1394.
WL - rapport M 1394 (bijlage).
- 4 BREUSERS, H.N.C., SCHUKKING, W.H.P., "Begin van beweging van bodem-materiaal".
WL - rapport S 159 - I, december 1971.
- 5 SCHIJF, J.B., JANSEN, P.P.H., 18th International navigation congress, Rome, 1953.
Section I, communication I.
- 6 BLAAUW, H.G., KAA, F.J. van der, "Erosion of bottom and sloping banks caused by screw race of manouvring ships".
WL - publikatie 202, juli 1978.
- 7 Duwvaartsluize Hansweert, Vul- en ledigings systemen, bodembescherming.
WL - rapport M 1684/R 154, juni 1981 (concept).
- 8 Waterloopkundig Laboratorium, "Langskrachten op schepen in sluizen met vul- en ledigings systemen in de hoofden of deuren".
R 1222/ M 1481 I, februari 1978.
- 9 RAJARATHNAM, N, "Turbulent Jets".
Developments in water science.
Elsevier, 1976.

- 10 KOOMAN, C, "Verkeers waterbouwkunde", Kollediktaat, TH - Delft, afdeling Civiele Techniek,
- 11 DIETZ, J.W., "Kolksicherung am Störsperwerk", Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Nr 33, dec, 1972, pp 35-55
- 12 HILLEN, J, "Waterloopkundige en scheepsvaartkundige aspecten in de Zijpe voorhaven van de jachtsluis", Nota Rijkswaterstaat Deltadient nr DD WT 81.435, aug, 1981.
- 13 Rijkswaterstaat - Deltadienst, afdeling waterbouwkundige werken Oost, "Jachtsluis Philipsdam", Nota, Bergen op Zoom, mrt, 1977
- 14 NAIB, S.K.A., "Surface motion of plane liquid jet", La Houille Blanche, No.6, 1980, pp 377 - 383
- 15 RAJARATHNAM, N, SUBRAMANYA, K, "Plane turbulent reattached wall jets", Proc. of the ASCE, Journ. of the Hydr. Div., nr HY 1, jan, 1968, pp 95 - 112
- 16 RAJARATHNAM, N, MULALIDHAR, D, "Diffusion below submerged rectangular outlets", Journal of hydraulic research, no 2, 1969, pp 252 - 274.
- 17 HEYDRA, G, "Hoogte translatiegolven bij invaren schip in liftbak" WL - notitie R 1518 - 16, aug. 79.
- 18 BREUSERS, H.N.C., "Lecture notes on sediment transport I", International Course on hydraulic engineering, Delft, 1979 - 1980.
- 19 Duwvaartsluizen Philipsdam, "Krachten op schepen tijdens het voortrekken van de roldeur in tijdelijk en definitieve situatie". WL - rapport M1573, februari 1981.

APPENDIX A Bepalen maximum debiet bij ledigen kolk via deuropeningen

In deze appendix wordt een relatie gelegd tussen de schuifsnelheid van de schuiven in de deuropeningen van de sluis en een geschatte maximum langskracht op de schepen in de kolk. Uitgaande van een bepaald langskrachtcriterium volgt de maximum toe te passen schuifsnelheid van de schuiven in de deuropeningen. Bij deze schuifsnelheid kan tevens het debietverloop als functie van de tijd en de nivelleertijd worden bepaald. Het maximum debiet is een randvoorwaarde voor het bepalen van de bestorting achter het sluishoofd.

De maximum langskracht op de schepen wordt afgeschat door middel van een sterk geschematiseerde aanname over de langskracht op de schepen ten gevolge van translatiegolven. De teruggekaatste translatiegolf wordt namelijk niet in rekening gebracht; in feit wordt aangenomen dat de kolk "oneindig" lang is.

De langskracht op de schepen volgt uit het debietverloop; dit debietverloop wordt dan ook eerst afgeschat.

Het debiet door de deuropeningen kan, uitgaande van lineair heffen van de deurschuiven, op de volgende wijze bepaald worden (zie M 1684/R 1543 [7]):

$$Q(t) = \alpha \cdot A_d \cdot \sqrt{2 \cdot g(h_o - z_o)} \cdot \frac{t}{t_h} - \frac{(\alpha \cdot A_d)^2 \cdot g}{2F_k} \frac{t^3}{t_h^2} \quad (A.1)$$

geldt als $t \leq t_h$

$$Q(t) = \alpha \cdot A_d \cdot \sqrt{2 \cdot g(h_o - z_o)} - \frac{(\alpha \cdot A_d)^2}{F_k} \cdot g(t - \frac{1}{2}t_h) \quad (A.2)$$

geldt als $t \geq t_h$

waarin: α	= afvoercoëfficiënt deuropening ($\alpha \approx 0,7$)	$[-]$
A_d	= doorstroomopening ($A_d \approx 3,00$)	$[m^2]$
g	= versnelling van de zwaartekracht ($g = 9,81$)	$[m/s^2]$
h_o	= waterstand kolk op $t = 0$ ($h_o = \text{NAP} + 0,75$)	$[m]$
z_o	= waterstand voorhaven op $t = 0$ ($z_o = \text{NAP} - 2,35$)	$[m]$
F_k	= kolkoppervlak ($F_k = 800$)	$[m^2]$
t	= tijd	$[s]$
t_h	= heftijd	$[s]$

Het maximum debiet kan worden bepaald uitgaande van:

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_k \cdot t_h}{3 \cdot \alpha \cdot A_d \cdot g} \sqrt{2g(h_o - z_o)}} \quad (\text{A.3})$$

waarin: t_{\max} = tijdstip waarop debiet maximaal is [s]

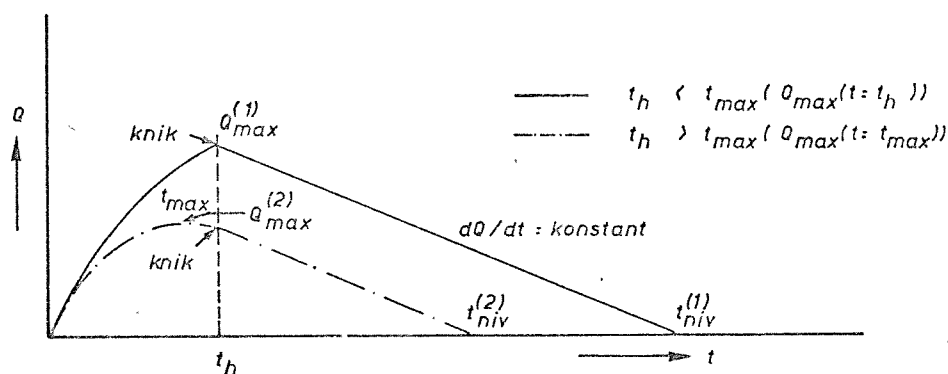
- als geldt dat $t_h > t_{\max}$ dan volgt het maximum debiet uit:

$$Q_{\max} = Q(t = t_{\max}) \quad (\text{vgl. (A.1)})$$

- als geldt dat $t_{\max} > t_h$ dan volgt het maximum debiet uit:

$$Q_{\max} = Q(t = t_h) \quad (\text{vgl. (A.2)})$$

Dit kan geïllustreerd worden aan de hand van de volgende figuur (4.1.1).



Figuur A.1 Ledigdebieten via deurschuiven als functie van de tijd (dezelfde heftijd, ander verval)

De totale nivelleertijd, gedefinieerd als het tijdstip waarop het debiet weer nul wordt (zie fig. A1), kan worden bepaald uit vergelijking (A.2), aannemende dat het debiet op $t = t_{niv}$ gelijk is aan nul:

$$t_{\text{niv}} = \frac{\alpha \cdot A_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_o - z_o)}}{g \cdot (\alpha \cdot A_d)^2} \cdot F_k + \frac{1}{2} t_h =$$

$$= \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_o - z_o)} \cdot F_k}{g \cdot \alpha \cdot A_d} + \frac{1}{2} t_h \quad (\text{als } t_{\text{niv}} > t_h) \quad (\text{A.4})$$

(Als $t_{\text{niv}} < t_h$ volgt t_{niv} uit:

$$t_{\text{niv}} = \frac{2 \cdot F_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_o - z_o)}}{g \cdot \alpha \cdot A_d}). \quad (\text{A.5})$$

Uitgaande van de op bladzijde A-1 genoemde gegevens (in symbolenlijst bij vgl. (A.1) en (A.2)) volgt voor verschillende heftijden respectievelijk hefsnelheden het volgende (hefhoogte 0,75 m):

hefsnelheid [m/s]	heftijd [s]	t_{max} [s]	Q_{max} [m ³ /s]	v_{max} [m/s]	t_{niv} [s]	$(dQ/dt)_{\text{max}}$ (pos) [m ³ /s ²]	$(dQ/dt)_{\text{min}}$ [m ³ /s ²]
0,005	150	174	12,3	4,4	375	0,109	-0,054
0,010	75	123	14,3	6,8	337 ⁵	0,218	-0,054
0,015	50	100	15,0	7,1	325	0,328	-0,054
∞	0	0	16,4	7,8	300	∞	-0,054

Tabel A.1 Maximum debieten, nivelleertijd.etc. als functie van de hefsnelheid van de deurschuiven

In bovenstaande tabel zijn tevens dQ/dt -waarden vermeld; dit zijn de positieve en negatieve maxima in het debietverloop. Deze dQ/dt -waarden treden op bij $t = 0$ (positieve dQ/dt) en op $t > t_h$ (negatieve dQ/dt).

Deze dQ/dt -waarden zijn een maat voor de langskrachten ten gevolge van translatiegolven. Uit bovenstaande tabel volgt dat de positieve dQ/dt -waarde maatgevend is. De langskracht op een schip kan, zoals ook in R 1650-0 [1] is aangegeven, waarden afgeschat met:

$$F_s = \frac{dQ/dt}{g \cdot A_k} \times 1000 \quad [^{\circ}/\infty] \quad (\text{A.6})$$

waarin: F_s = langskracht in promillen $[^{\circ}/\text{oo}]$
 dQ/dt = verandering van debiet in de tijd $[\text{m}^3/\text{s}^2]$
 A_k = verticale kolkdoorsnede $[\text{m}^2]$

Bij de maximum dQ/dt -waarde is de kolkwaterstand NAP +0,75 m; de bodem van de kolk ligt op NAP -6,90 m, de kolkdoorsnede (vertikaal) is dus ongeveer 70 m^2 (breedte kolk $\approx 9,1 \text{ m}$). De langskracht ten gevolge van translatiegolven is dus orde grootte $0,56^{\circ}/\text{oo}$, bij een hefsnelheid van $0,015 \text{ m/s}$. Tevens moet er rekening worden gehouden met stroomkrachten op de schepen. Zoals in R 1222/M 1481 [8] is aangegeven worden deze bepaald uit:

$$F_{\text{str}} = \left\{ \frac{c_D \cdot A_s(1) \cdot v(1)^2}{g \cdot V_s} + \frac{c_F \cdot A_s(2) \cdot v(2)^2}{g \cdot V_s} \right\} \times 1000 \quad [^{\circ}/\text{oo}] \quad (\text{A.7})$$

$A_s(1)$ = oppervlak grootspant schip $[\text{m}^2]$
 $A_s(2)$ = natte omtrek schip $[\text{m}^2]$
 $v(1)$ = snelheid t.p.v. boeg of hek van het schip $[\text{m/s}]$
 $v(2)$ = snelheid t.p.v. het schip $[\text{m/s}]$
 V_s = waterverplaatsing schip $[\text{m}^3]$
 c_D = vorm- of restweerstandskoefficiënt ($\approx 0,5$ à $1,0$) $[-]$
 c_F = wrijvingskoefficiënt scheepshuid ($\approx 0,006$) $[-]$

De in bovengenoemde formule genoemde koefficiënten c_D en c_F zijn in modelonderzoek [8] bepaald.

De c_F koefficiënt is vrij konstant en orde $0,006$. De c_D koefficiënt is niet konstant en sterk afhankelijk van de scheepsvorm en het blokkeringspercentage. Uitgaande van een c_D -koefficiënt van maximaal $1,0$ volgt bij maximum debiet:

$$v(1) \approx v(2) \approx \frac{Q_{\text{max}}}{A_k} \quad (Q_{\text{max}} = 15 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ hefsnelheid } 0,015 \text{ m/s})$$

$$F_{\text{str}} \approx 0,5^{\circ}/\text{oo} \quad (\text{groot jacht})$$

Uitgaande van bovenstaande gegevens volgt dat in het geval van een hefsnelheid de maximum langskracht op een groot jacht ongeveer $1^{\circ}/\text{oo}$ wordt. Het criterium ten aanzien van langskrachten op jachten is ongeveer $3^{\circ}/\text{oo}$ [1]. Het criterium wordt dus nog niet bereikt, maar de gebruikte methode is vrij groot (geen beïnvloeding tussen schepen en translatiegolven), een veiligheid

ten opzichte van het criterium is dus gewenst. Tevens volgt uit tabel A.1 dat er niet al te veel schuttijd meer te winnen is bij het vergroten van de hefsnelheid van de schuiven. Uitgaande van bovenstaande berekeningen en het criterium van 3⁰/oo zou een hefsnelheid van orde 0,05 m/s nog mogelijk zijn; dit geeft slechts een verkorting van de nivelleertijd (bij maximum verval) van 17,5 seconden.

Aan de hand van bovenstaande analyse wordt geadviseerd om de hefsnelheid van de deurschuiven orde 0,015 m/s te maken. Het maximum debiet wordt dan ongeveer 15 m³/s en de maximum snelheid in de straal door de deuropeningen ongeveer 7,1 m/s.

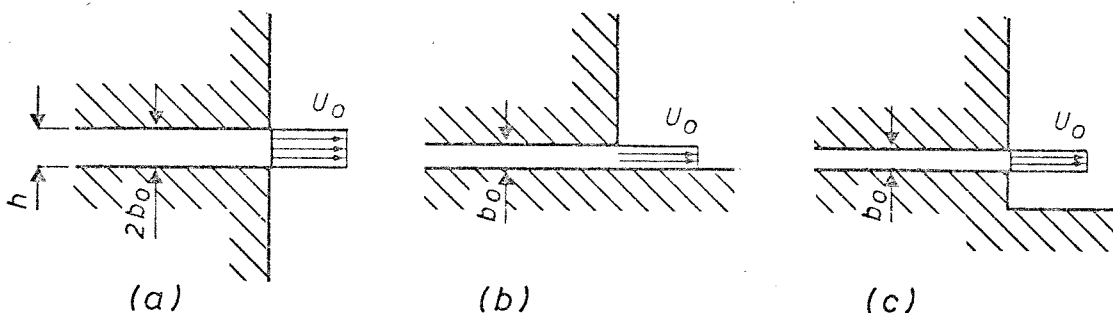
APPENDIX B Verschillende straaltheorieën en hun toepassingsgebieden

In deze appendix wordt een overzicht gegeven van de in dit rapport toegepaste straaltheorieën. Bij al de hier gepresenteerde literatuurgegevens is uitgegaan van een stagnant ontvangend water; dat wil zeggen naast de door de straal geïnduceerde snelheden zijn er geen andere snelheden in het water aanwezig. De uittree-openingen zijn rechthoekig, in sommige gevallen zijn ook andere vormen (cirkel) vermeld.

Bij stralen kan onderscheid gemaakt worden tussen twee- en driedimensionale stralen. Tweedimensionale stralen hebben in theorie een oneindige breedte. Bij driedimensionale stralen heeft de derde dimensie invloed op de snelheidsafname in de straal; bij grote breedte-hoogte verhoudingen van een driedimensionale straal kan deze echter weer als een tweedimensionale straal worden opgevat.

Er kan ook onderscheid gemaakt worden in:

- a) vrije stralen, dat wil zeggen geen wanden of bodem die belemmerend werken op de spreiding van de straal (fig. B.1, (a))
- b) wandstralen, bij een bodem of wateroppervlak (fig. B.1, (b))
- c) een wandstraal bij een sprong in de bodem (fig. B.1, (c)).



Figuur B.1 Stralen in verschillende configuraties van het ontvangende water

In het hiernavolgende worden voor twee- en driedimensionale stralen de verschillende theorieën voor deze configuratie behandeld:

Tweedimensionale stralen

ad a)

In [9] zijn de volgende onderzoeksresultaten gegeven:

- de snelheidsafname van de maximum snelheid op afstand x van de uittree kan worden benaderd met:

$$\frac{u_m}{U_o} \approx C \cdot \sqrt{\frac{b_o}{x}} \quad (\text{zie [9], blz. 23})$$

waarin: u_m = maximum snelheid in de straal op afstand x [m/s]
 U_o = uittreesnelheid straal [m/s]
 b_o = halve hoogte van de uittredende straal
 $(b_o = \frac{1}{2}h)$ (zie fig. B.1 (1)) [m]
 x = afstand tot uittree [m]

De waarde van C varieert in de verschillende onderzoeken tussen 3,12 en 3,78, er wordt geadviseerd om voor C de waarde 3,5 aan te houden.

ad b)

In [9] zijn de volgende onderzoeksresultaten gegeven:

- de snelheidsafname in de straal volgt uit

$$\frac{u_m}{U_o} \approx 3,5 \sqrt{\frac{b_o}{x}} \quad (\text{zie [9], blz. 218/219})$$

b_o = hoogte uittredende straal (zie fig. B.1 (b)) [m]

De afname van de snelheid in deze straal is dus ongeveer gelijk aan die van de vrij straal als bij de vrije straal de halve hoogte van de uittrede wordt ingevuld

- de spreiding van het punt met de helft van de maximum snelheid van de straal is ongeveer

$$b = 0,068 x \quad \text{voor} \quad x > 10b_o$$

b = hoogte tussen bodem en punt met $v = \frac{1}{2}u_m$ [m]
 $(v = \text{snelheid})$

- in het geval de straal aan het oppervlak uittreed treedt een soortgelijke situatie op als in het geval van een uittrede bij de bodem.

De snelheidsafname is, zoals gegeven in [14], ook ongeveer gelijk aan die

van een wandstraal tot $x/b_0 \approx 40$ ($u_m/u_0 \approx 0,5$).

Daarna wordt de waarde van de "konstante" C een functie van x/b , de snelheidsafname in de straal geschiedt dan sneller dan bij een wandstraal ($C < 3,5$).

In [14] wordt aangegeven dat C afneemt tot orde 2 bij $x/b = 56$; hierna zijn er geen modelresultaten meer gegeven.

Het bovenstaande is toegepast bij de straal uit de kolkwandriolen bij kalamiteitssituaties (par. 6.2); hier geldt $x/b < 40$.

Tevens is deze theorie voor een bodemstraal toegepast bij de uittree van het gemaal (par. 7.2.).

ad c)

In [15] zijn bij deze configuratie onderzoeksresultaten gegeven. Uit de resultaten volgt dat voor zeer kleine bodemdalingen ($y \approx b_0$) dat de snelheidsafname ongeveer gelijk is aan die van de tweedimensionale wandstraal; dit was natuurlijk ook te verwachten.

Driedimensionale stralen

ad a)

In [9] zijn voor verschillende breedte-hoogteverhouding gegevens opgenomen over driedimensionale vrij stralen. Deze gegevens zijn te vinden in de figuren 13.2 t/m 13.4 en 13.12 van de hierboven genoemde literatuuropgave. Indien figuur 13.2 en figuur 13.3 met elkaar worden vergeleken blijkt er tussen de meetpunten een goede overeenstemming (vergelijken Yerdjevich (1966) en Trentacoste and Sforza (1966)). Figuur 13.4 is uit figuur 13.2 afgeleid, de lijn voor B/h naar oneindig (welke voor kleine x/h verhoudingen ook geldt voor de kleine B/h verhoudingen) ligt echter lager dan de in figuur 13.2 en 13.3 gegeven meetpunten. De in figuur 13.12 weergegeven resultaten zijn geldig voor $1 < B/h < 10$, zowel ook voor driehoekige en elliptische ($B/h < 10$) openingen.

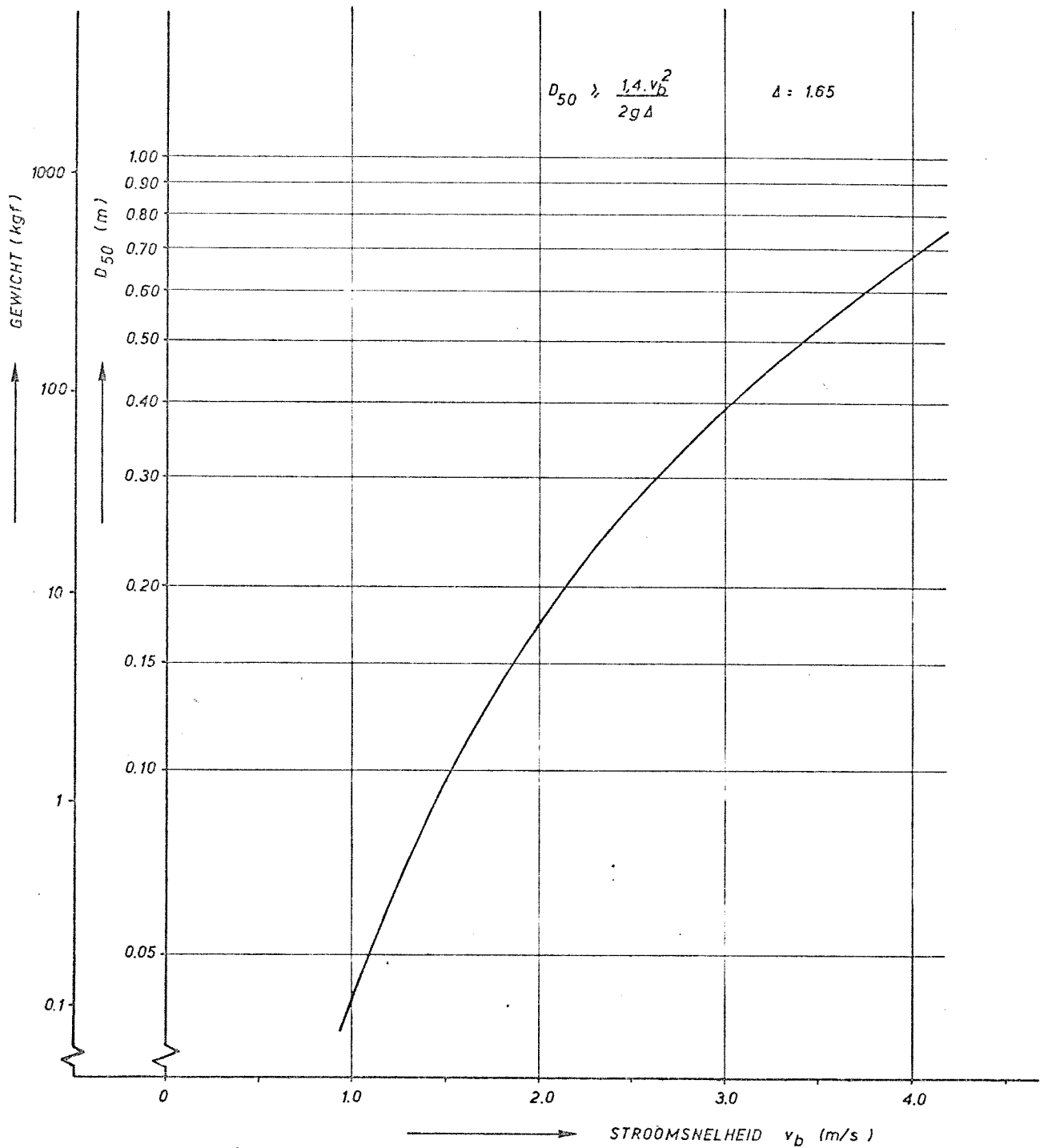
ad b)

In de figuren van 13.24 t/m 13.26 van literatuuropgave [9] zijn gegevens te vinden over driedimensionale wandstralen. Deze gegevens zijn geldig voor $0,4 < B/h < 1,5$ en voor cirkelvormige, driehoekige en elliptische uittreeopeningen.

Bovenstaande gegevens zijn toegepast bij de uittree van het gemaal (zie par. 7.2.).

ad c)

In [16] zijn onderzoeksresultaten gepresenteerd van stralen uit een rechtehoekige opening over een sprong in de bodem, waarbij de breedte van het ontvangende water tot 6 maal de straalbreedte kan worden. Voor kleine bodemsprongen ($y/b_0 \approx 1,4$) en kleine verhoudingen straalbreedte en breedte ontvangende water (orde 1,15) is de snelheidsafname in de straal weer ongeveer gelijk aan die van de tweedimensionale wandstraal.



BEPALEN KARAKTERISTIEKE STEENGROOTTE (D_{50}) UIT
 (BODEM)SNELHEDEN MET BEHULP VAN DE USBR-
 FORMULE [1]

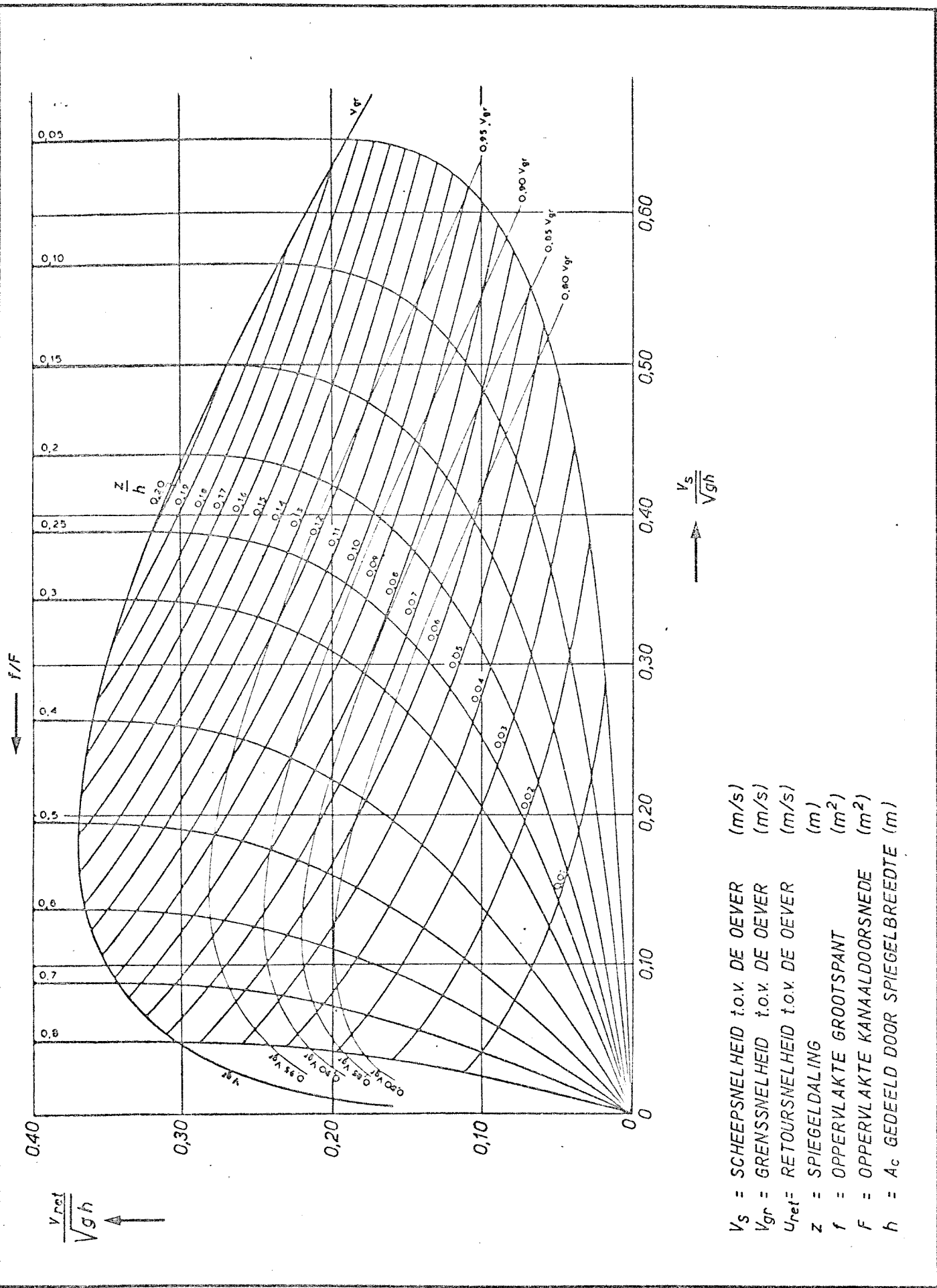
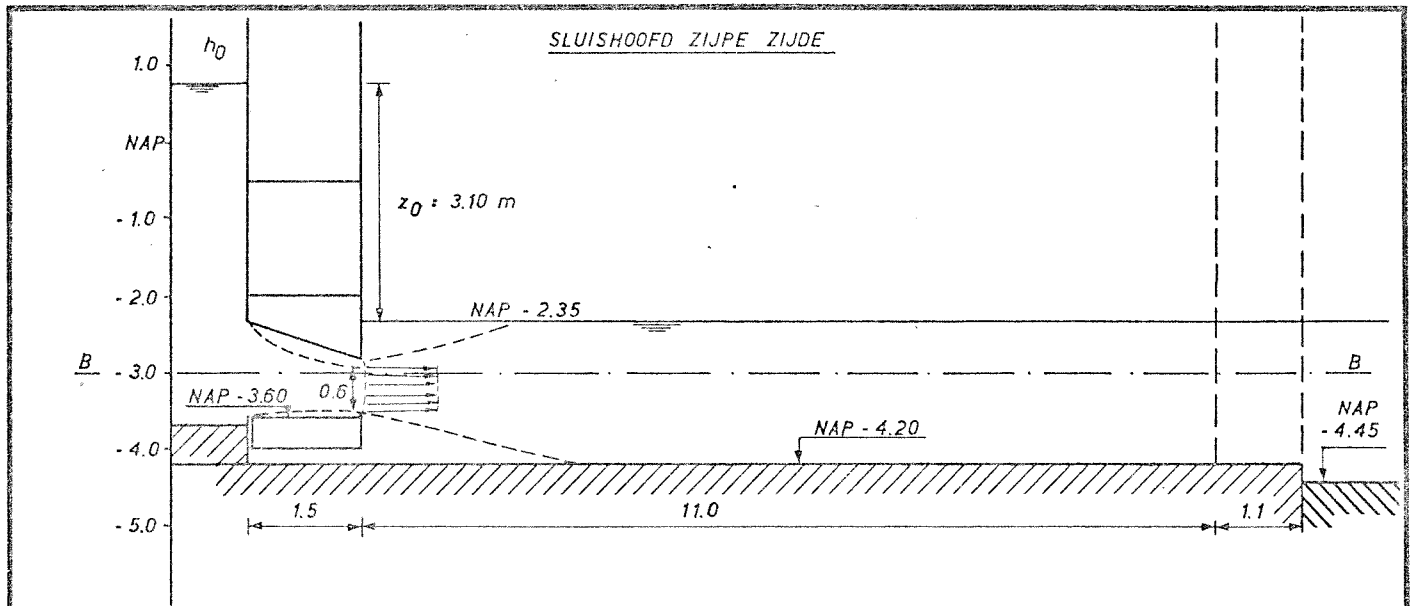
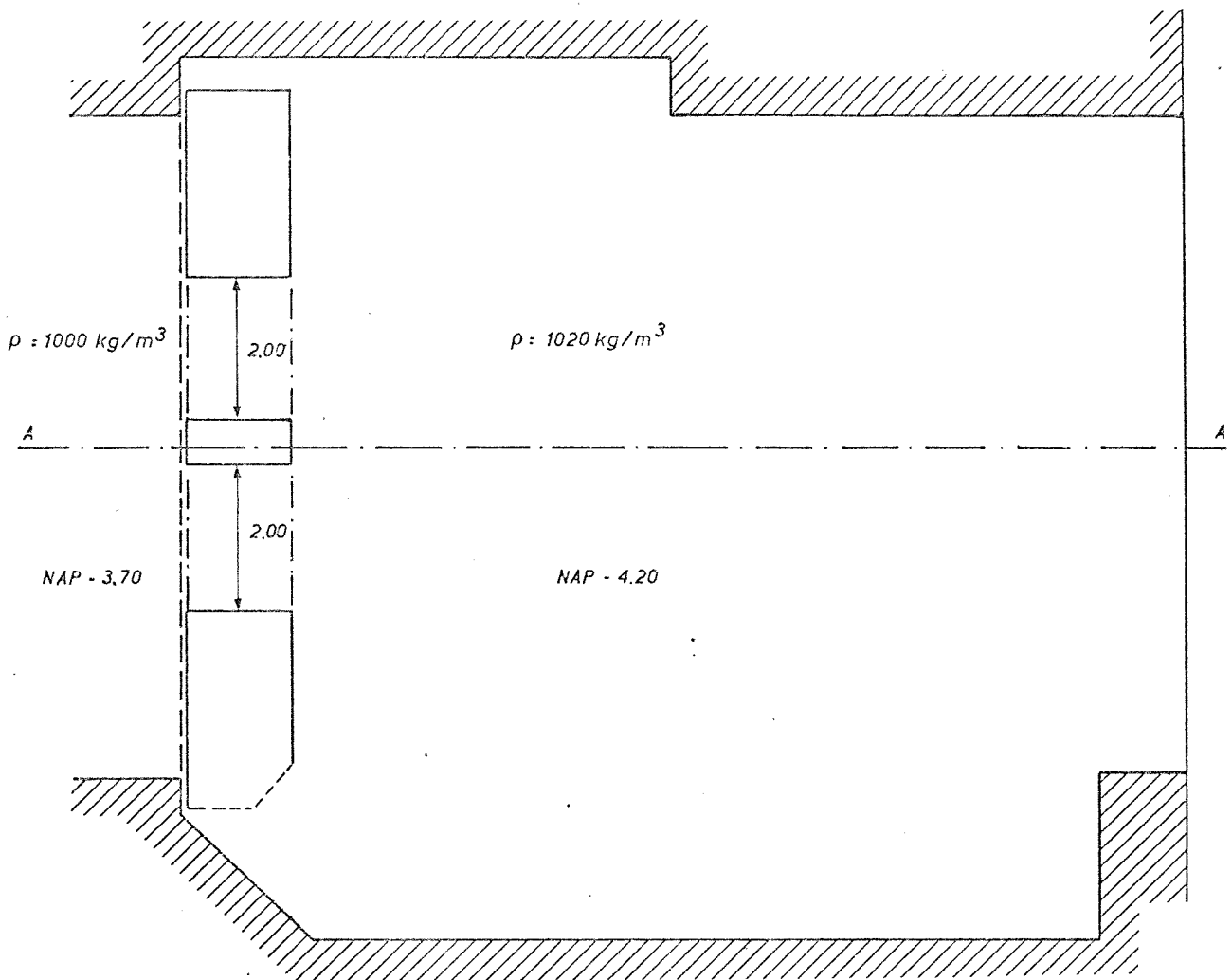


DIAGRAM VAARSNELHEID/RETURNSNELHEID/
WATERSPIEGELDALING ($\alpha = 1,1$)



VERTIKALE DOORSNEDE A-A DOOR SLUISHOOFD ZIJPE ZIJDE



HORIZONTALE DOORSNEDE B-B DOOR SLUISHOOFD ZIJPE ZIJDE

SLUISHOOFD ZIJPE ZIJDE JACHTSLUIZEN PHILIPSDAM
HORIZONTALE EN VERTIKALE DOORSNEDEN

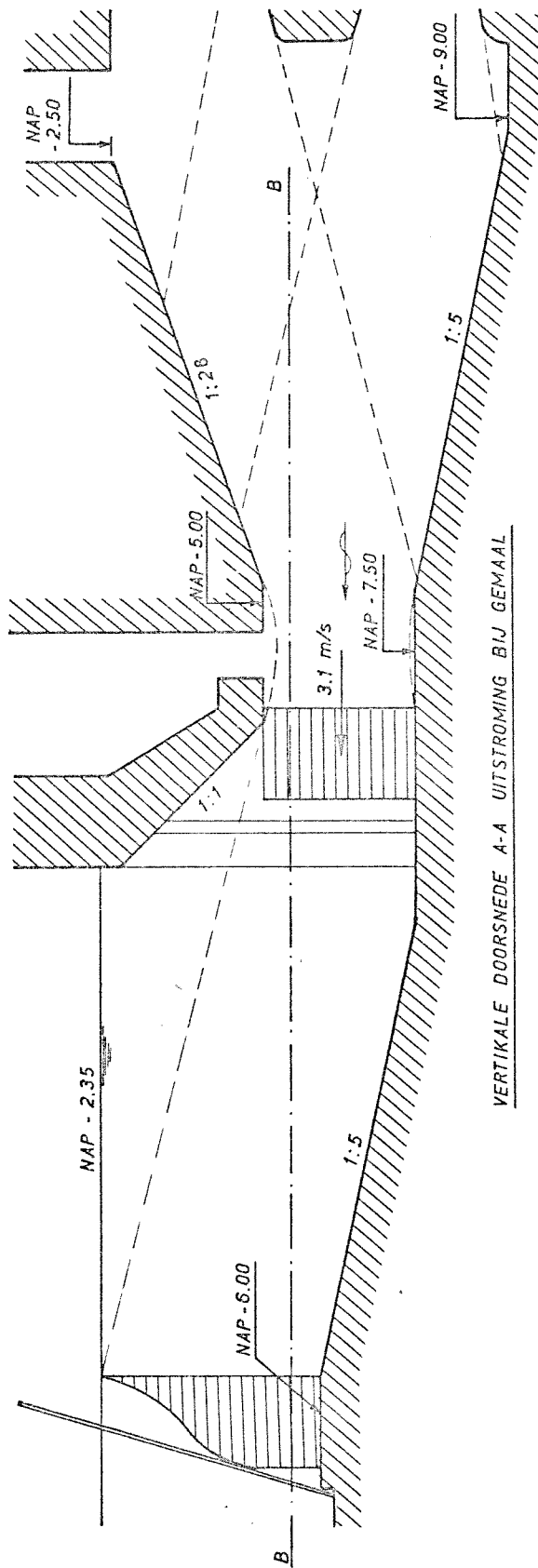
SCHAAL 1:100

A4

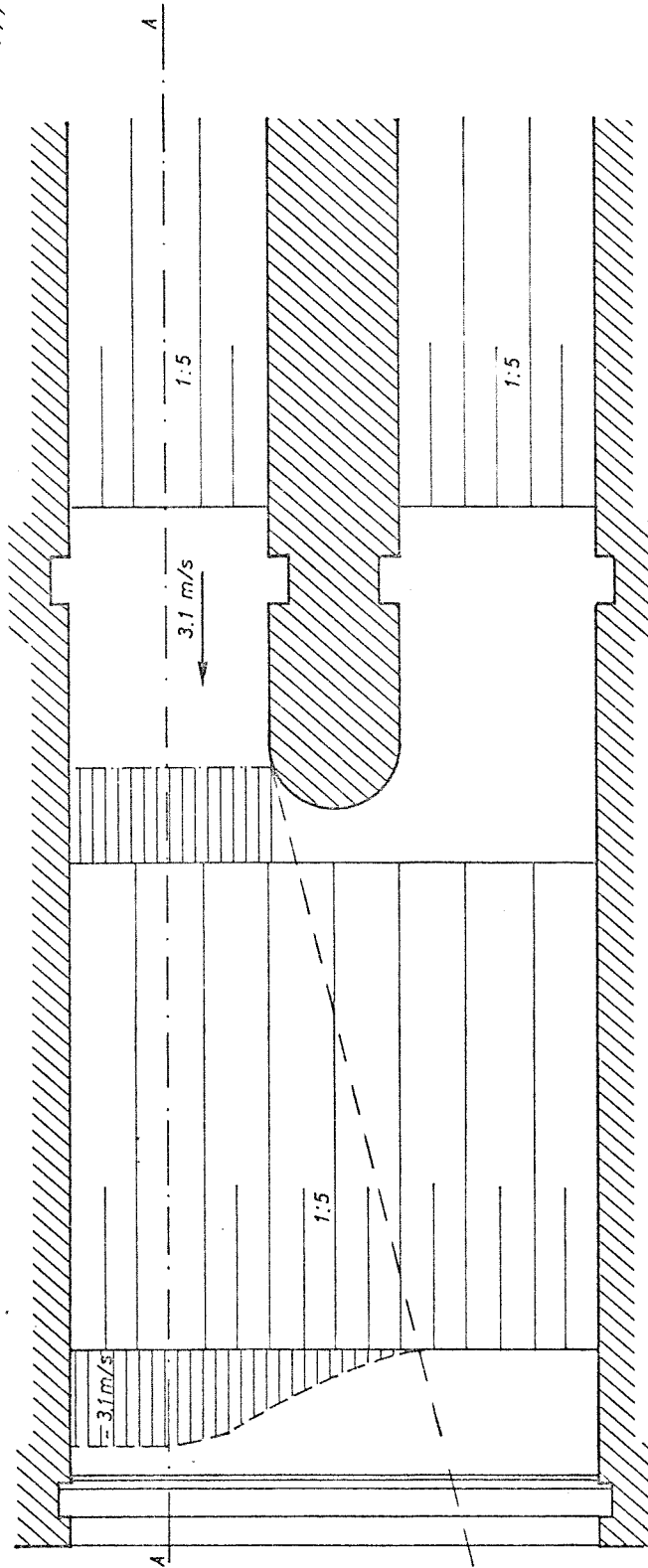
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1650 - 2

FIG. 3



VERTIKALE DOORSNEDE A-A UITSTROMING BIJ GEMAAL



HORIZONTALE DOORSNEDE B-B UITSTROMING BIJ GEMAAL

UITSTROMING BIJ HET GEMAAL;
VERTIKALE EN HORIZONTALE DOORSNEDE

SCHAAL ~ 1:12

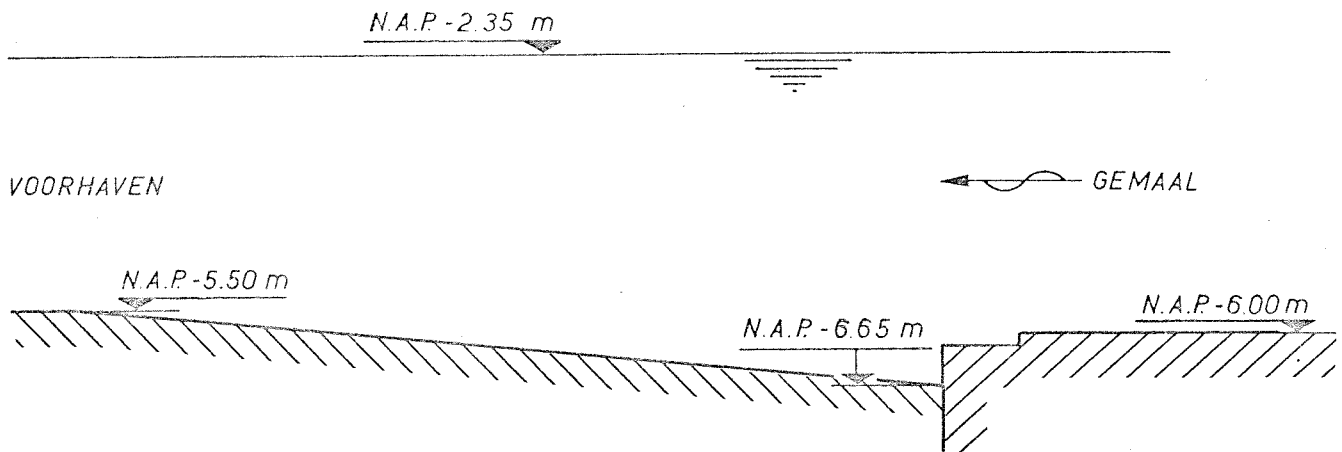
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

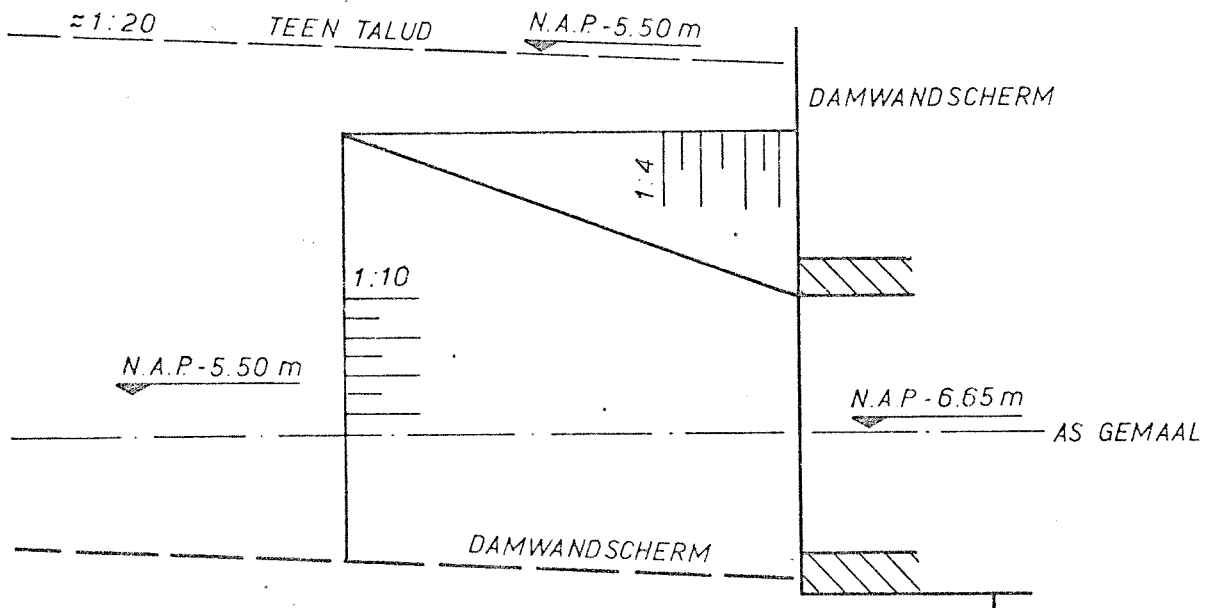
R 1650-2

FIG. 4

VERTIKALE DOORSNEDE UITTREDE GEMAAL
(OP AS GEMAAL). SCHAAL 1:100



BOVENAANZICHT UITTREDE BIJ GEMAAL. SCHAAL 1:200



BOVENAANZICHT EN DOORSNEDE

UITTREDE GEMAAL IN VOORHAVEN ZIJPE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

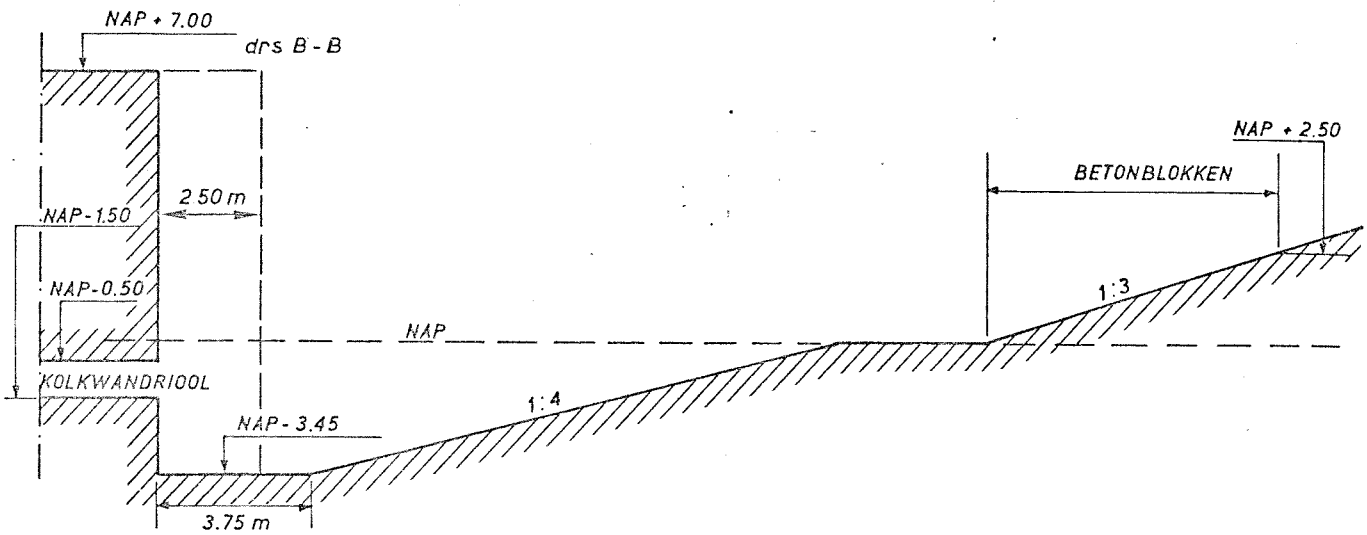
SCHAAL 1:100
EN 1:200

EV

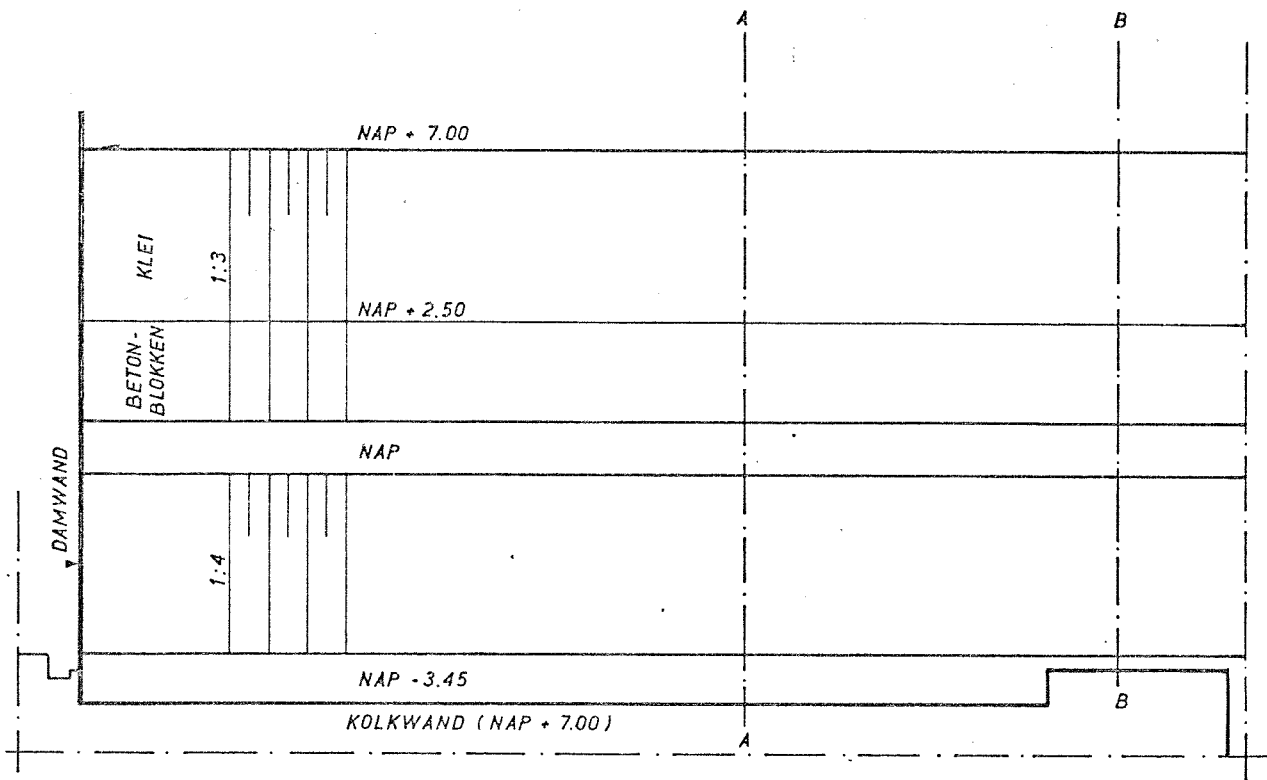
A4

R 1650-1003

FIG. 5



VERTIKALE DOORSNEDE KOLKWAND(RIOOL) EN OMARMEND ZOET
 (DOORSNEDE LOODRECHT OP SLUISAS ; DOORSNEDE A-A)
 SCHAAL 1:200



BOVENAANZICHT SLUIS MET OMARMEND ZOET
 SCHAAL 1:600

BOVENAANZICHT EN VERTIKALE DOORSNEDE
 OMARMEND ZOET BIJ JACHTENSLUIZEN

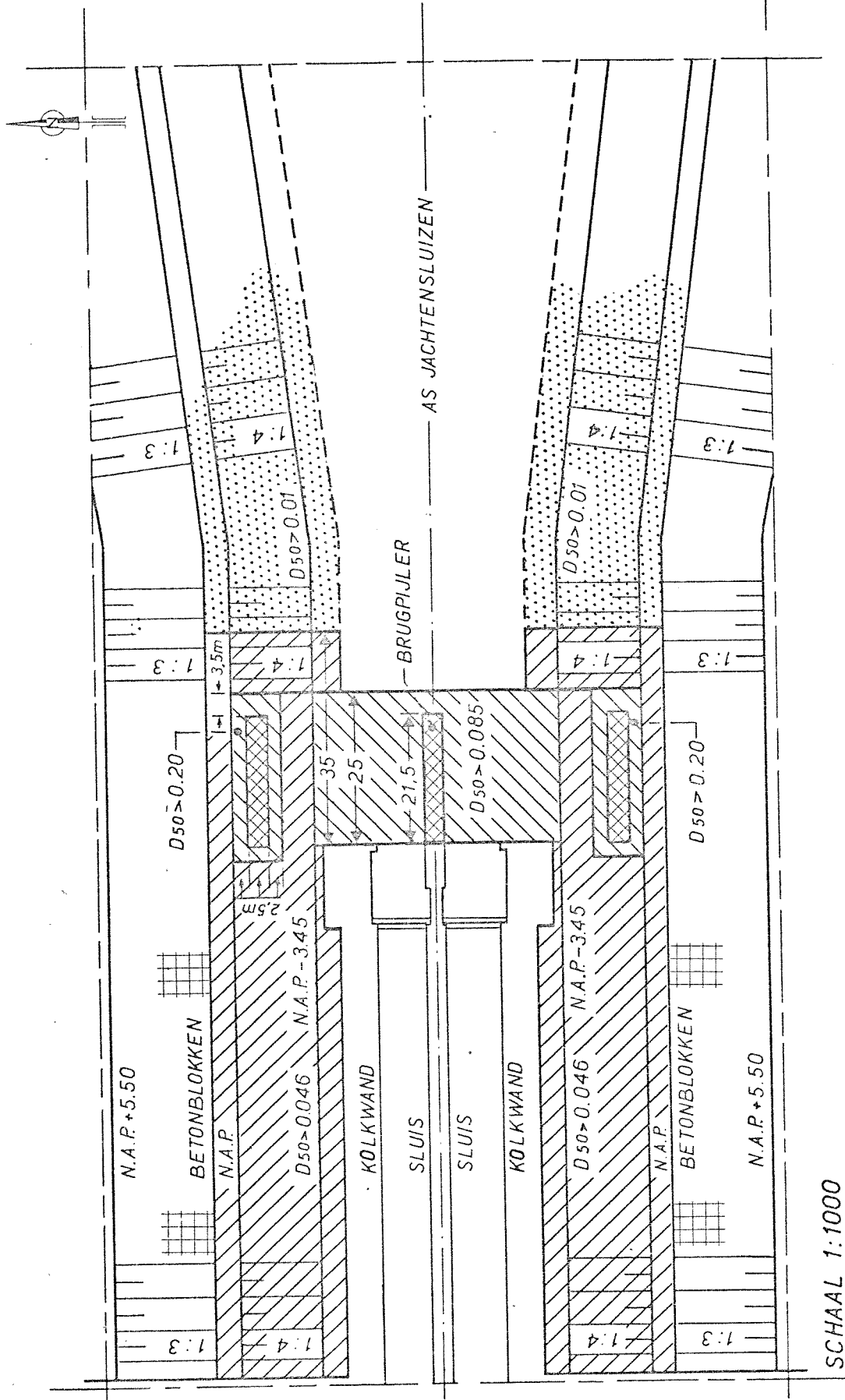
SCHAAL 1:200 EN 1:600

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1650-2

FIG. 6



SCHAAL 1:1000

GEADVISEERDE KARAKTERISTIEKE STEENGROOTTE
(D₅₀) VOOR HAVEN ZOOMMEER

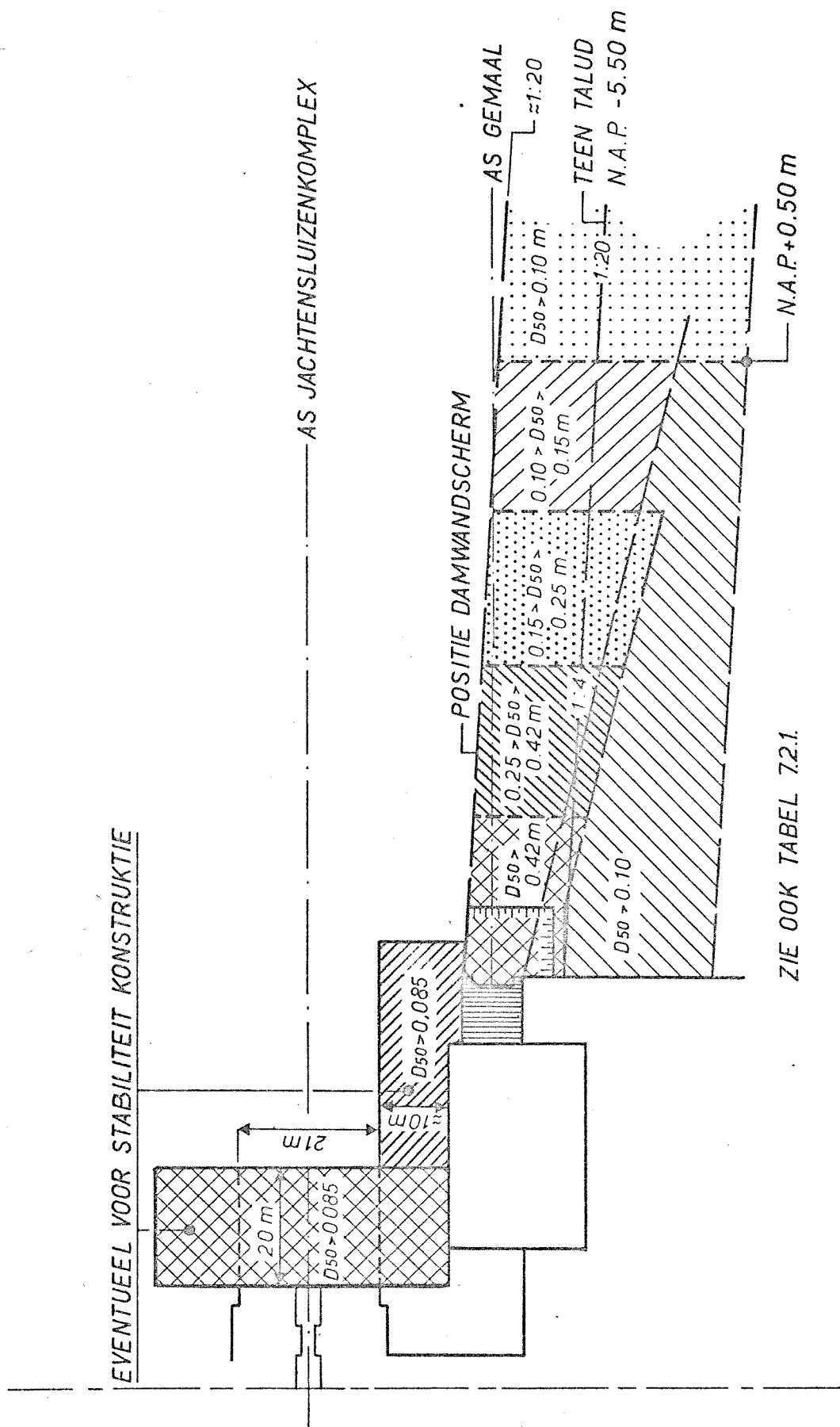
OVERGENOMEN
R.W.S. TEKENING I
PH 234^{de} EN
78.10.534

EV
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1650-1001

FIG. 7



GEADVISEERDE BESTORTING IN VOORHAVEN

SCHAAL 1:1000

EV

ZIJPEZIJDE EN BIJ HET GEMAAL

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1650-1002

FIG. 8

