

13.14-@

Weerstandsgeul tussen het
Wolderwijd en het Veluwemeer.

juni 1978

1978



VAKGROEP
WATERBOUWKUNDE
Afd. Civiele Techniek
TU Delft

Project "Harderwijk"

Deelontwerp Waterbouwkunde van

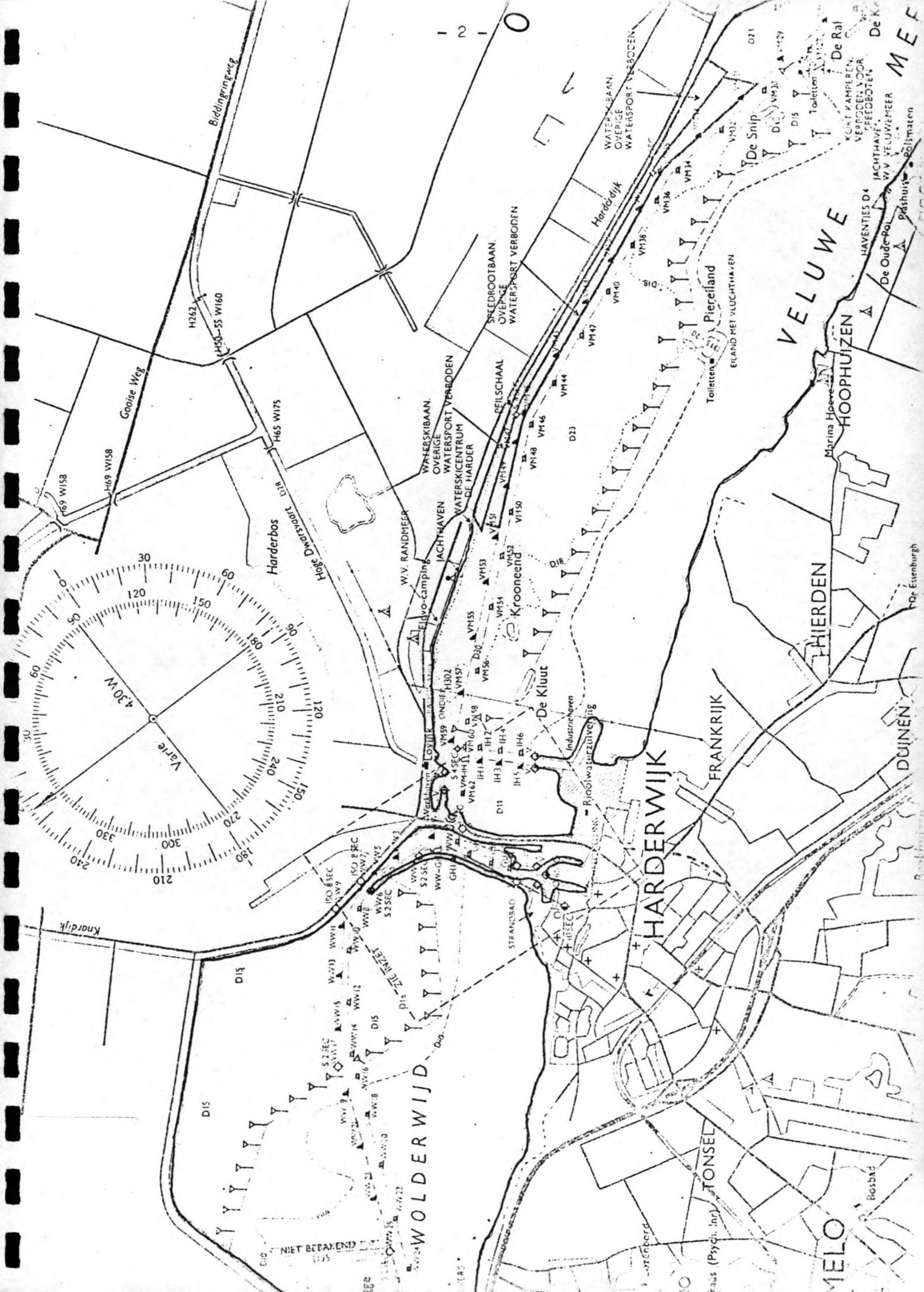
W. van Bentum
A. van Luijen

ten behoeve van de eindstudie
Algemene Civiele Techniek aan
de Technische Hogeschool Delft

Begeleiders: - Prof. ir. P.A. van de Velde
- Ir. G.P. Bourguignon

INHOUDSOPGAVE DEELONTWERP WATERBOUWKUNDE

1. INLEIDING
2. DOELSTELLING
3. PROBLEEMBESCHRIJVING
4. PROBLEEMANALYSE
5. METHODE VAN UITWERKING
6. DEEL-A (voor ontwerp)
 - 6.1. Criteria en randvoorwaarden
 - 6.2. Uitwerking, criteria, randvoorwaarden en doelsellingen
 - 6.3. Schets ontwerpen
 - 6.4. Verwachtingen stromingstechnisch onderzoek
7. DEEL-B (opwaaiings berekening met behulp van de lange golf vergelijkingen)
8. DEEL-C (def. ontwerp)
 - 8.1. Evaluatie deel-B
 - 8.2. Definitief ontwerp met alternatieven
9. EVALUATIE

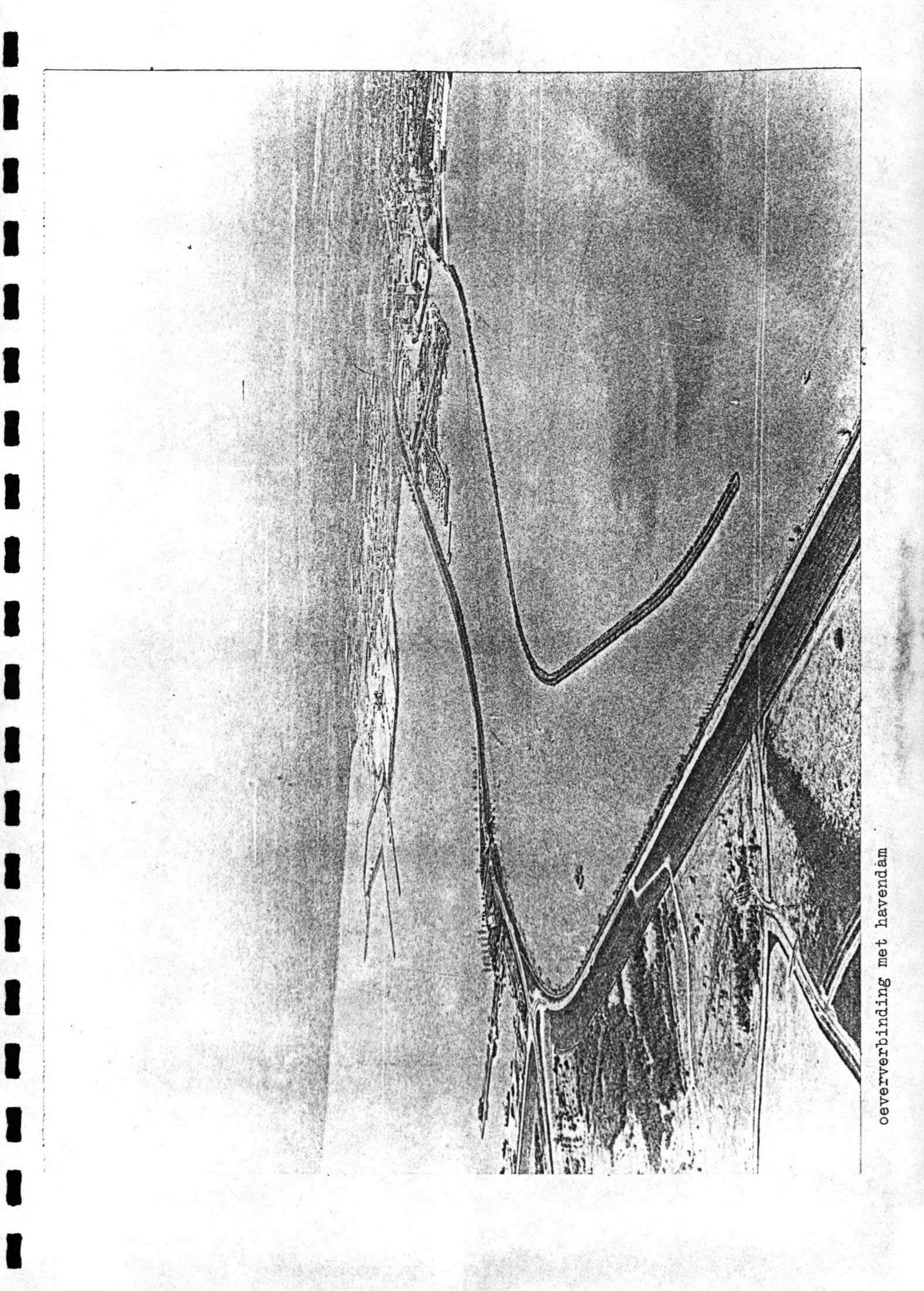


1. INLEIDING

Deze deelstudie omvat de bestudering en ontwerp van een open verbinding voor de scheepvaart tussen het Wolderwijd en het Veluwemeer.

De huidige verbinding bestaat uit een dijk met een sluis (de Hardersluis) bij Harderwijk. De sluis in de Knardijk is gebouwd als tijdelijke oplossing met het doel om tezamen met de Roggebotssluis het peil op het Veluwemeer en het Drontermeer te kunnen beheersen. Door de aanleg van de polder Zuidelijk Flevoland met de waterkeerring te Nijkerk verloor de Knardijk haar waterkerende functie.

Naast de waterkerende functie doet de dijk tevens dienst als oeververbinding. Daar de sluis van tijdelijke aard is en de bestaande oeververbinding het verkeersaanbod niet kan verwerken is gezocht naar een oplossing. In het vooronderzoek is een beschrijving gegeven van de mogelijkheden hiervoor, waarbij gekozen is voor een verbetering van de bestaande situatie uit de alternatieven. Dit houdt in de verbreding van de Knardijk en het bouwen van een kunstwerk ter vervanging van de sluis. Tevens is het de bedoeling dat oeververbinding door te trekken naar Rijksweg A-28. Voor de vervanging van het huidige kunstwerk is gekozen voor een open verbinding tussen de meren met een tunnel voor het wegverkeer. Deze oplossing heeft verscheidene waterbouwkundige consequenties, die in deze studie nader bekeken worden.



oeververbinding met havendam

2. DOELSTELLING

Het onderzoeken van de mogelijkheden van een open verbinding tussen het Wolderwijd en het Veluwemeer en het maken van een ontwerp hiervoor.

Toelichting:

Een open verbinding om tegemoet te komen aan de doelstellingen 2 en 3 uit het vooronderzoek:

- Het verkrijgen van een goede onderlinge verbinding tussen het Wolderwijd en het Veluwemeer, t.b.v. de scheepvaart. (2)
- Zodanig dat tot het jaar 2000 voldoende capaciteit voor de scheepvaart wordt geboden. (3)

3. PROBLEEMBESCHRIJVING

Tengevolge van het peilverschil ter plaatse van de opening als gevolg van het opwaaien van de meren, ontstaan stromingen. Deze stromingen mogen niet te groot worden, daar zij anders een belemmering vormen voor de scheepvaart door de opening. Het verhang in de opening kan verkleind worden door leidammen en een bestorting op de bodem aan te brengen. Er is dan sprake van een zgn. weerstandsgeul, waardoor de schepen van het ene meer naar het andere kunnen varen en waarin de stroomsnelheden voor de scheepvaart acceptabel kunnen zijn. De grootte van het peilverschil tengevolge van de opwaaiing is afhankelijk van de windduur, windrichting en windsnelheid. De stroomsnelheid is dus mede afhankelijk van deze factoren.

In deze waterbouwkundige deelstudie is het de bedoeling deze onderling afhankelijke factoren te onderzoeken en een ontwerp te maken. Bij het ontwerp dient rekening gehouden te worden met de doelstellingen, randvoorwaarden en criteria die in het vooronderzoek en in het ontwerpmethodisch onderzoek m.b.t. dit project aan de orde zijn gekomen.

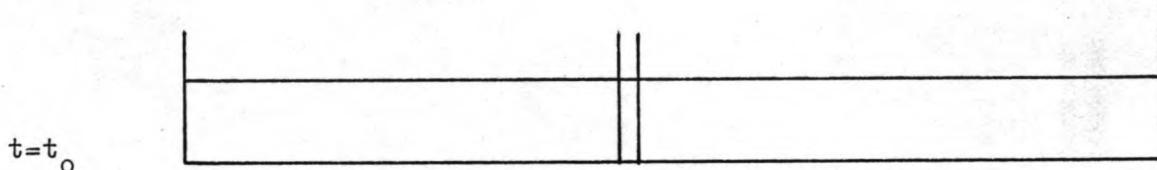
Om een indruk te krijgen welke verschijnselen zich tengevolge van de opwaaiing ter plaatse van de opening zullen voordoen, volgt in de probleemanalyse een schematische beschrijving. In de bijlage van dat hoofdstuk (4.2.) is van dit schematische model een computeruitwerking gegeven. Dit programma is destijds gemaakt als oefening voor het college systeem dynamics en geeft een duidelijk beeld van de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende grootheden als functie van de tijd.

4. PROBLEEMANALYSE

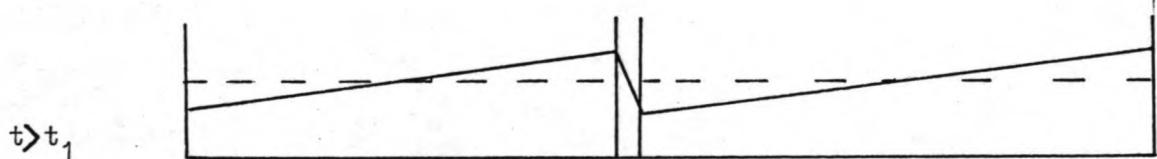
4.1. Principe van de opwaaiing

Het ontwerp van de open verbinding tussen de twee meren zou in principe weinig problemen geven indien het opwaaiingsverschijnsel niet aanwezig was. Dit verschijnsel echter veroorzaakt voor de scheepvaart ontoelaatbare stroomsnelheden. Om een doeltreffend ontwerp te maken om deze stroomsnelheden in de hand te houden, moet eerst een analyse gemaakt worden van wat het verloop in de tijd van dit opwaaiingsverschijnsel is. Om een inzicht te krijgen in het verloop wordt een sterke schematisatie van de situatie gemaakt. De meren worden voorgesteld als rechthoeken (zie kaart) gescheiden door een dijk. In deze dijk is een kleine opening gemaakt om de meren met elkaar te verbinden. Nu wordt nagegaan wat het effect zal zijn van een opstekende storm in de lengterichting van de meren in het verloop van de tijd.

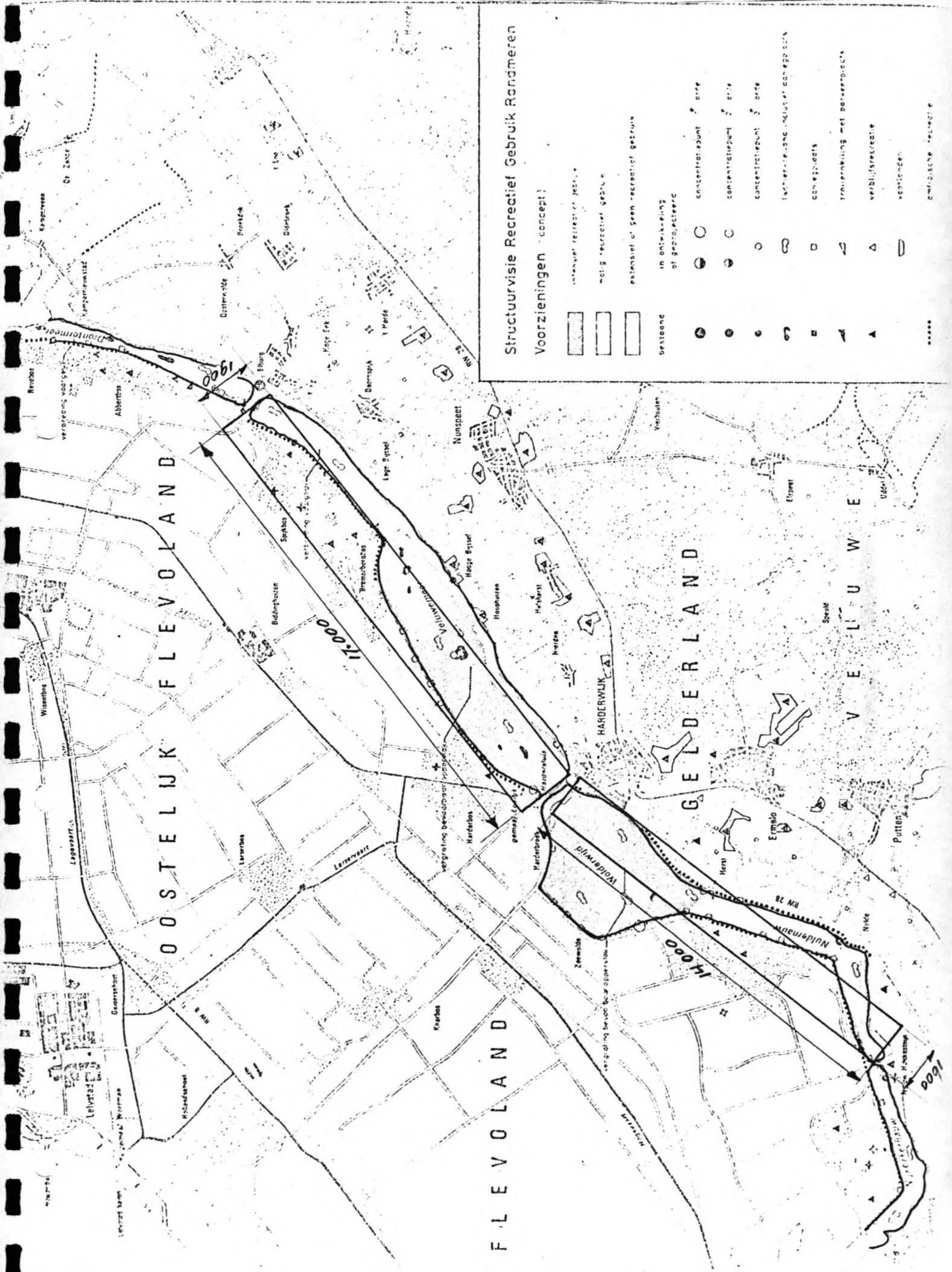
schematisatie van de meren:



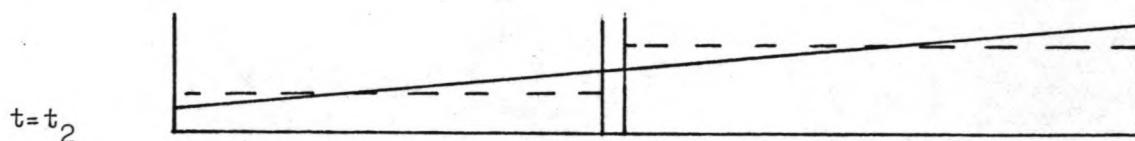
Ten tijde van $t=t_0$ is de waterspiegel in de beide meren horizontaal en is het peil in de beide meren gelijk.



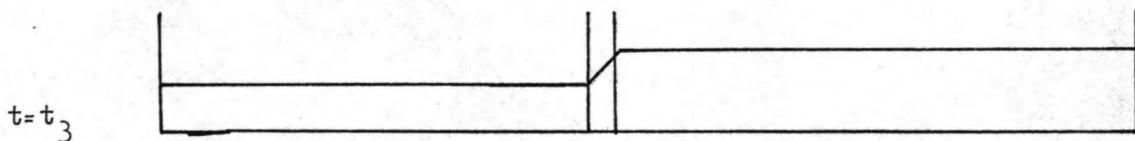
Ten tijde van $t=t_1$ steekt een storm op in de lengte richting van de meren. De waterspiegel zal in beweging komen en er zal zich in beide meren een verhang gaan instellen. Dit verhang veroorzaakt ter plaatse van de opening een peilverschil aan weerszijden van de opening. Ten gevolge van dit peilverschil zal er een stroming plaats vinden van het zuidelijke naar het noordelijke meer. Het gemiddelde peil in het zuidelijke meer zal hierdoor dalen en in het noordelijke meer stijgen.



Indien de storm lang genoeg aanhoudt, zal er zoveel water van het zuidelijk naar het noordelijk meer stromen dat zich ten tijde $t=t_2$ een totaal verhang ingesteld heeft over beide meren.

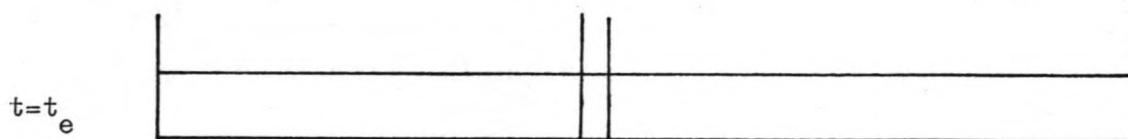
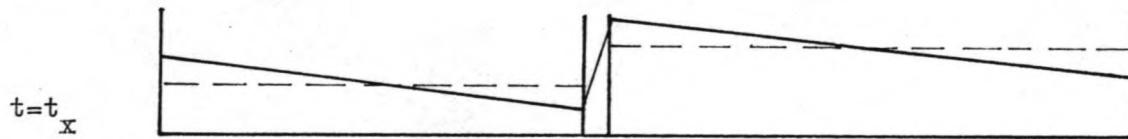


Ten tijde $t=t_3$ gaat de storm liggen en zal het in verhang staande water ten gevolge van de zwaarte kracht in beweging komen om het oorspronkelijke horizontale peil in te nemen. Daar er gedurende de storm water van het zuidelijk naar het noordelijk meer gestroomd is, zal het gemiddelde peil van de twee meren verschillend zijn, met als gevolg een terugstroming van het water van het noordelijk naar het zuidelijk meer.



Daar het water een massatraagheid bezit zal het bij het terugkeren naar de evenwichts toestand door het evenwichtsniveaux heen slingeren en weer in verhang gaan staan. (ten tijde $t=t_x$) Deze slingering zal ten gevolge van de inwendige wrijving en de bodemweerstand uitdampen waardoor de waterspiegel zijn horizontale toestand weer inneemt.

In de uiteindelijke toestand zal het peil in de beide meren weer gelijk zijn. $t=t_e$



In het voorgaande is in het kort geschematiseerd welke verschijnselen zich voordoen ten gevolge van de opwaaiing. De grootheden die hierbij een rol spelen hebben allen een onderlinge afhankelijkheid nl.:

- de stroming in de opening ter plaatse van de dijk is afhankelijk van;

- C-waarde van de bodem van de opening
- de diepte van de opening
- het verhang ter plaatse van de opening

het verhang t.p.v. de opening is afh. van;

- het peilverschil aan weerszijden van de opening
- de lengte van de opening

het peilverschil t.p.v. de opening is afh. van:

- het verschil in peil tussen het noordelijk en het zuidelijk meer
- het waterstandsverschil t.g.v. de opwaaiing of slingering

het peilverschil in de meren is het gevolg van een niveauverandering ten gevolge van de waterstroming van noord naar zuid v.v.

het peilverschil t.g.v. de opwaaiing;

- afh. van de windduur, windhoek en de windsterkte

het peilverschil t.g.v. de slingering:

- de periode (slingertijd)
- massatraagheid
- bodemweerstand en inwendige wrijving

de niveau verandering is afh. van:

- de oppervlakten van de meren
- het debiet door de opening

het debiet door de opening is afh. van :

- de stroomsnelheid door de opening
- de diepte van de opening
- de breedte van de opening

Deze onderlinge afhankelijkheid dient verder onderzocht te worden alvorens tot een waterbouwkundig ontwerp over te gaan.

4.2. Bijlage System-Dynamics

In 4.1. zijn de onderling afhankelijke grootheden beschreven die zich ten gevolge van de opwaaiing zullen voordoen. Deze onderling afhankelijke grootheden kunnen in een Causal Loop Diagram samengesteld worden. (zie blz. 11)

Aan de hand van het Causal Loop Diagram kan een Dynamo Flow Diagram opgesteld worden. (zie blz. 12) Met behulp van het Flow Diagram kan het computer programma opgesteld worden. (zie blz.)

Beschrijving van het programma:

De volgende maten zijn bij de schematisatie van de meren aangenomen: lengte noordelijk meer LN=17000 m

lengte zuidelijk meer LZ=14000 m

diepte noordelijk meer DN=1.80 m

diepte zuidelijk meer DZ=1.50 m

oppervlakte n-meer OPVN=32,3 km²

oppervlakte z-meer OPVZ=22,4 km²

het peil van de beide meren PN en PZ is 0 ten tijde t=0

Voor de verbinding tussen de beide meren is uitgegaan van de volgende maten:

breedte van de opening B=100 m

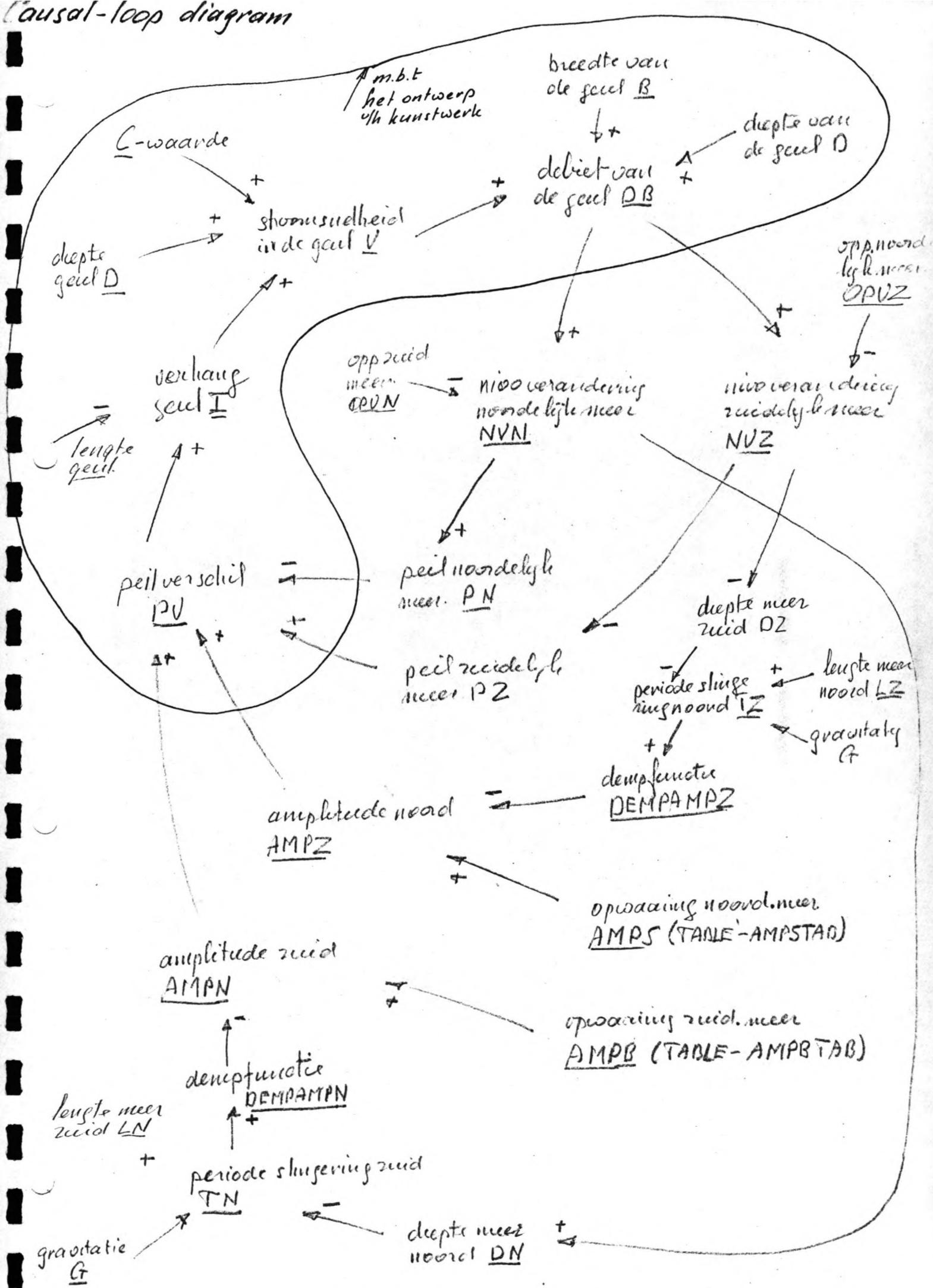
lengte van de opening L=800 m

diepte van de opening D=3.50 m

voor de bodem weerstand is een C-waarde van $40 \text{ m}^{1/2}/\text{sec}$ genomen

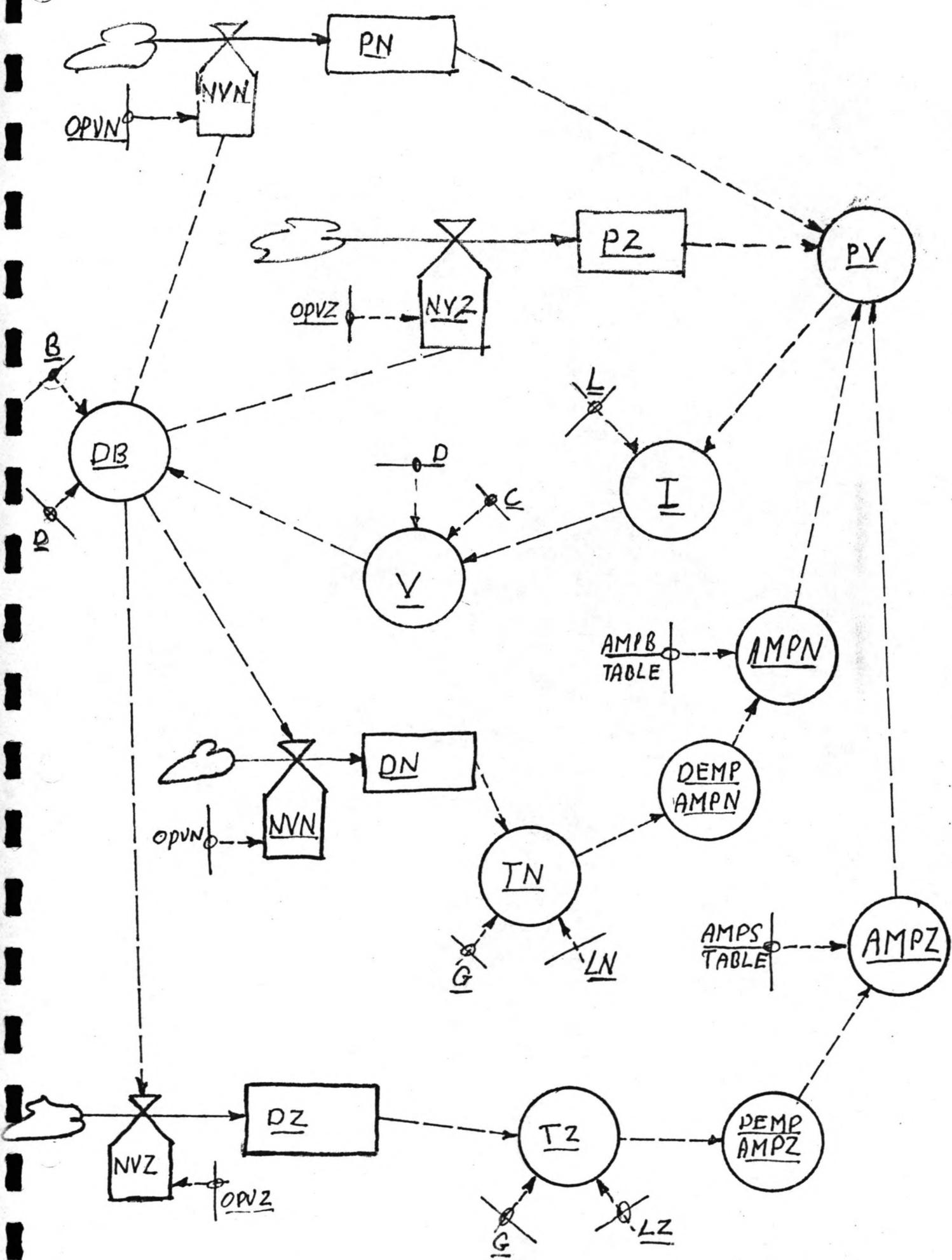
Voor een schatting van de grootte van de opwaaiing is de methode gebruikt uit het boek Shore protection Planning and Design. We komen hier bij een windsnelheid van 20 m/sec aan een opwaaiing van het zuidelijk meer van 0.36 m t.o.v. het peil. Voor de afwaaiing van het noordelijk meer van -0.41 m t.o.v. het peil. Ter plaatse van het kunstwerk geeft dit een waterstandsverschil van 0.77 m. We stellen nu dat het verhang zich in drie uur heeft ingesteld met een tangentieel verloop. Deze waarden zijn als tabellen in het programma ingevoerd. We nemen aan dat de storm na 15 uur gaat liggen, het water zal weer naar de evenwichtstand terug keren. De slingertijd staat eveneens beschreven in voornoemde literatuur, de formule hiervoor is $t=2L/\sqrt{gD}$.

Causal-loop diagram



✓

Dynamo-flow diagram



Deze slingertijd is voor de twee meren verschillend. De formule voor de slingertijd is eveneens in het programma ingevoerd. Dit geldt eveneens voor de dempingsformule: $A=A_0 e^{-0,86n}$, waarbij A_0 de opwaaiing resp de afwaaiing is en $n=tijd/periode$ de dempingsfunctie wordt nu; $A=A_0 e^{-0,86n} \cos 2\pi n$.

Het Causal Loop Diagram, het Flow Diagram en het programma spreken verder voor zich zelf.

Evaluatie van het model

De uitvoer van het programma geeft te zien;

het peil in het noordelijk meer PN

het peil in het zuidelijk meer PZ

de uitwijkingen van de waterspiegel t.o.v. het horizontaal van de beide meren AMPZ en AMPN

niveau verandering in het noordelijk en zuidelijk meer resp. NVN en NVZ

de stroomsnelheid in de opening V

de diepte in het noordelijk meer en het zuidelijk meer resp. DN en DZ

Deze waarden zijn allen uitgevoerd als functie van de tijd.

In de uitvoer is te zien dat 7.5 uur na de aanvang van de storm de stroomsnelheid door de geul 0 is, er heeft zich nu een verhang over beide meren ingesteld.

Tevens is te zien dat de stroomsnelheden in de opening sterk afhankelijk zijn van het peilverschil tussen de meren, daar er bij een peilverschil van enkele centimeters al aanzienlijkestromingen optreden.

Zie de bijgaande computeruitvoer.

5. METHODE VAN UITWERKING

In de probleembeschrijving is reeds duidelijk geworden dat een diepgaandere studie gemaakt moet worden van de stroomverschijnselen die zich voordoen t.g.v. de opwaaiing.

Alvorens echter met een gedetailleerde vloeistofmechanische berekening te beginnen moet er al een idee bestaan hoe het waterbouwkundig ontwerp er uit komt te zien, daar de berekening anders te schematisch van opzet zou worden en naderhand toch aangepast zou moeten worden.

Deze deelstudie is daarom als volgt ingedeeld:

- deel-A
- 1) Een resumé van de randvoorwaarden, doelstellingen en criteria m.b.t. het ontwerp. Deze volgen uit het vooronderzoek en uit het ontwerpmethodisch onderzoek.
 - 2) Uitwerking van de randvoorwaarden, criteria en doelstellingen.
 - 3) Het maken van enkele schets-ontwerpen.
 - 4) Aan de hand van de schetsmatige oplossingen wordt nu uitgezocht welke grootheden nader in een vloeistofmechanische berekenig moeten worden onderzocht.
- deel-B Vloeistofmechanische berekening met behulp van het programma Ices-Flows
- deel-C
- 1) Evaluatie van deel-B
 - 2) Definitief ontwerp + alternatieven

Evaluatie van het onderzoek

6. DEEL-A (voorontwerp)

6.1. Criteria en randvoorwaarden

6.1.1. Inleiding

Betreffende de verbinding voor de scheepvaart tussen het Wolderwijd en het Veluwemeer zijn er in het vooronderzoek criteria ontwikkeld. Deze zijn bepalend voor het hier te maken ontwerp. Deze zullen hier worden genoemd in 6.1.2.

In het ontwerpmethodisch onderzoek zijn factoren ontwikkeld welke bepalend zijn voor de criteria van het ontwerp. Dit zal worden behandeld in 6.1.3.

Een beschouwing betreffende criteria volgend uit de probleemanalyse wordt gegeven in 6.1.4.

6.1.2. Criteria uit het vooronderzoek

- Capaciteit van de verbinding moet voldoende zijn voor de maatgevende intensiteiten gevonden in het recreatie onderzoek. Deze zijn in het jaar 2000: Voor de pleziervaart 50 à 90 schepen per uur. Voor de beroepsvaart 2 schepen per week(grootste te verwachten schip is een Kempenaar).
- De oplossing dient visueel aantrekkelijk te zijn.

6.1.3. Criteria uit ontwerpmethodisch onderzoek

In deze studie zijn de onderlinge afhankelijkheden ontwikkeld, welke bepalend zijn voor het ontwerp en dimensionering van de weerstandsgeul. Verder zijn er nog andere factoren ontwikkeld welke voor het ontwerp van belang zijn.

Randvoorwaarden met bepalende factoren:

- | | |
|-----------------------|------------------------------------|
| - Geulbreedte | bepaald door kruisen zeilboten |
| | correctie mogelijkheid grote boten |
| - Diepte | " " diepgang schepen |
| | peilverandering t.g.v. opwaaiing |
| - Max. stroomsnelheid | " " bodembescherming |
| | scheepvaart |

Uit het logisch model op gesteld in deze studie bleek dat met de volgende punten rekening moet worden gehouden bij dit waterbouw-

bouwkundig ontwerp:

- diepte van de meren en de plaats van de vaargeul
- bereikbaarheid en veiligheid van de havens
- stroming (richting en effect)
- normen wat betreft de stroomsnelheden
- ontgronding aan het begin en het einde van de weerstandsgeul
- visuele aspecten
- economische aspecten

In dit onderzoek werd als gunstigste plaats van het kunstwerk, op het tracé van de oeververbinding, een plaats zo dicht mogelijk bij de polder genoemd.

6.1.4. Criteria aan de hand van de probleemanalyse

Hierin blijkt dat de opwaaiing op de meren afhankelijk is van de windsnelheid en dat de stroomsnelheid in de weerstandsgeul afhankelijk is van de mate van opwaaiing. Er is dus een relatie tussen de stroomsnelheid in de geul en de windsnelheid boven het water. Door de langwerpige vorm van de meren speelt ook de windhoek een grote rol bij de opwaaiing. Een eis betreffende de max. stroomsnelheid in de geul moet dus gerelateerd worden aan een bepaald windsnelheid en hoek.

Hierbij rijzen een tweetal vragen:

- 1) Wat is de maximale windsnelheid boven de meren?
- 2) Varen de schepen nog bij ieder windsnelheid?

Ad 1. Onderzocht moet dus worden welke windsnelheden en uit welke hoek deze boven de meren te verwachten zijn.

Ad 2. Hiertoe dienen criteria te worden opgesteld.

6.2. Uitwerking criteria

6.2.1. Diepte van de geul

Deze is afhankelijk van 1. Diepgang schepen
2. Peil van het water.
3. Peilverandering t.g.v. opwaaiing

Ad. 1: Plezierboten diepgang maximaal 1,50 m.

Beroepsvaart diepgang maximaal 2,50 m + 0,15 m spiegelverlaging t.g.v. retourstroom (deze waarde is geschat en zal

- bij het definitieve ontwerp berekend en verantwoord worden).
- Ad. 2: Winterpeil N.A.P. - 0,40 m
Zomerpeil N.A.P.
- Ad. 3: Volgt uit opwaaiingsberekening.

6.2.2. Breedte van de geul

- Zeilverkeer: Het zeilverkeer moet met tegenwind door de geul kunnen kruisen. Benodigde breedte hiervoor: 100 m.
- Beroepsvaart: Minimaal 20 à 30 m
- Kunstwerk voor oeververbinding: Breedte van de geul zo smal mogelijk i.v.m. de kosten.

6.2.3. Lengte van de geul

Geen normen. De lengte volgt uit de opwaaiingsberekening.

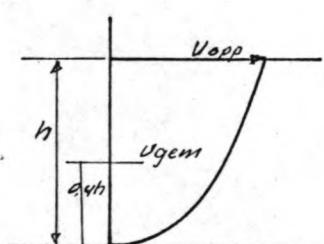
6.2.4. Stroomsnelheden

Hierbij zijn er een tweetal eisen:

- Van uit de gebruiker: plezier- en beroepsvaart.
- Voor de constructie

De stroomsnelheid over het dwarsprofiel van de geul is niet op alle plaatsen even groot.

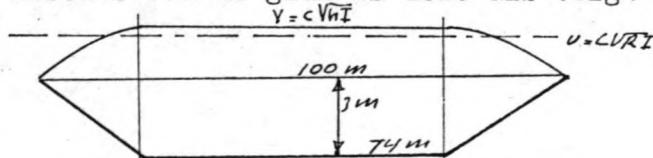
Over de verticaal is deze (uitgegaan van een parabolische verdeling):



Oppervlaktesnelheid = $7/6 V_{gem}$, deze kan als gevolg van de luchtwrijving wat groter of kleiner zijn. Hoeveel is niet bekend derhalve houden we er geen rekening mee.

schuifspanningssnelheid (zie college f8/f10):
 $v_* = \sqrt{ghI}$ met $V_{gem} = C\sqrt{hI}$ volgt $v_* = \frac{\sqrt{g}}{C} V_{gem}$

Over de breedte van de geul is deze als volgt verdeeld:



De snelheid over het diepe deel van de geul is dus iets hoger als de gemiddelde snelheid. Bij de bovenstaande aangenomen maten is

deze: $A = 270 \text{ m}^2$ $R = 1.8 \text{ m}$ $V_{gem} CVRI = C\sqrt{2.8I} = 1.67 C\sqrt{I}$
 $O = 100 \text{ m}$ $V = C\sqrt{VI} = C\sqrt{3I} = 1.73 C\sqrt{I}$

Het verschil is dus praktisch te verwaarlozen. Aangehouden wordt

$$V_{\text{gem}} = C \sqrt{RI}.$$

Relatie gemiddelde stroomsnelheid met eisen betreffende toelaatbare stroomsnelheid.

Aanname diepte geul ongeveer 3,50 m.

a) Van uit de gebruiker

Pleziervaart: De maximale diepgang bedraagt ongeveer 1,50 m.

Dit is echter voor jachten met een kiel of een zwaard. De diepgang van de romp is ongeveer 0,30 m. De oppervlaktesnelheid van het water is dus hier van belang.

$$V_{\text{stroom toel.}} = 6/7 V_{\text{pleziervaart toel.}}$$

Beroepsvaart: De diepgang 0,60 à 2,50 m. (geladen/ongeladen)

De gemiddelde snelheid op dit deel van de verticaal bedraagt ongeveer 1,1 $V_{\text{gem.}}$.

$$V_{\text{stroom toel.}} = 0,9 V_{\text{beroepsvaart toel.}}$$

b) Vanuit de constructie

Volgens Shields geldt dat er geen bodemtransport optreedt indien:

$$\frac{hI}{d} \leq 0.01 \text{ à } 0.03 \quad \Delta = 1.65 \\ \text{aannname } d = 0.30 \text{ m}$$

$$hI \leq (0.01 \text{ à } 0.03) / 1.65 \times 0.30 = 0.010 \text{ à } 0.015$$

$$V_x = \sqrt{ghI} = \sqrt{9.8(0.01 \text{ à } 0.015)} = 0.31 \text{ à } 0.38 \text{ m/sec.}$$

$$\text{aannname } C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{sec.}$$

$$V_x = \frac{\sqrt{g}}{C} \times V_{\text{gem}} = \frac{\sqrt{9.8}}{40} V_g = 0.08 V_g \rightarrow V_{\text{gem}} = 12.5 V_x$$

$$V_{\text{gem}} = 12.5 \times V_x = 12.5(0.31 \text{ à } 0.38) \text{ m/sec.} = 4 \text{ à } 5 \text{ m/sec.}$$

Bepaling max. stroomsnelheid waarbij de schepen nog varen kunnen.

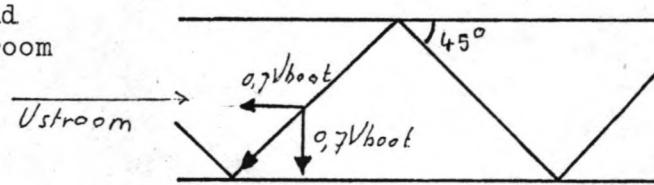
Beroepsvaart: Vaarsnelheid ongeveer 3 m/s.

Toelaatbare stroomsnelheid: 2 m/s.

Pleziervaart:

Zeilverkeer Aanname $v = 2 \text{ m/s}$

- a) tegen wind
tegen stroom



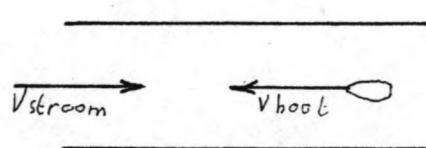
$$V_{\text{stroom}} < (\frac{1}{2} \text{ à } \frac{3}{4}) \cdot 0,7V_{\text{boot}}$$

$$V_{\text{stroom}} < 0,7 \text{ à } 1 \text{ m/sec}$$

- b) voor de wind
tegen stroom

geen beperking

- c) zijwind
tegen stroom



$$V_{\text{stroom}} < (\frac{1}{2} \text{ à } \frac{3}{4}) V_{\text{boot}}$$

$$V_{\text{stroom}} < 1 \text{ à } 1.5 \text{ m/sec}$$

- d) zijwind
voor stroom

geen beperking

- e) voor de wind
voor stroom

geen beperking, wel kan de schipper "geen roer meer geven", dus kans op koersafwijkingen.

- f) geen wind
wel stroom

boot moet motor gebruiken of zich laten slepen.

Motorboten

$V = 8 \text{ km/uur} \approx 2 \text{ m/s}$

Conclusies: Pleziervaart $V_{\text{stroom}} < 0,7 \text{ à } 1 \text{ m/sec}$ $V_{\text{gem}} < \frac{6}{7} (0,7 \text{ à } 1) = 0,6 \text{ à } 0,9 \text{ m/sec}$

Beroepsvaart $V < 2 \text{ m/sec}$ $V_{\text{gem}} < 0,9 \cdot 2 = 1,8 \text{ m/sec}$

Constructie afhankelijk van bestortingsmateriaal

UUR GEMIDDELDEN Gemeten te De Bilt 1931 t/m 1960 AANTALLEN IN UREN

Windkracht klasse	Wind snelheid m/s	Jan	Febr.	Mart	April	Mei	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov.	Dec	Σ	Per jaar	Cumulatief
0	0-1	196	164	185	107	212	120	165	171	206	274	109	210			
1	1-2	1637	1046	1080	743	1287	1269	1400	1739	1354	1225	1145	1145	2977	167	
2	2-3	2064	2486	2722	2382	3430	3792	3992	4723	3989	2402	2873	2797	95		
3	3-4	3402	3165	3859	3658	4772	5057	5175	5185	4967	4739	3769	2429	52		
4	4-5	3780	3229	4181	3784	4575	4497	4184	4225	4182	4322	3863	2566	28		
5	5-6	3186	2806	3414	3267	3311	3124	3072	2702	2855	2919	2907	3123	120		
6	6-7	2414	2298	2538	2407	2243	1955	2063	1657	1735	1890	2143	2469	72		
7	7-8	2907	1701	1660	1660	1308	1040	1145	1001	1028	1278	1504	1987	43		
8	8-9	1648	1311	1103	1176	692	448	650	522	550	924	1219	1438	24		
9	9-10	986	863	694	748	252	168	210	243	305	578	820	880	14		
10	10-11	579	505	398	396	132	72	90	93	129	271	426	521	3612		
11	11-12	393	353	230	234	54	30	34	34	155	155	288	302	2180		
12	12-13	262	172	145	155	22	15	16	14	102	170	196	1303	73		
13	13-14	178	110	43	73	17	5	5	27	54	83	126	126	24		
14	14-15	101	68	34	51	7	4	1	3	25	42	76	76	14		
15	15-16	47	37	14	21	3				12	31	34	34	7		
16	16-17	26	5	5	4	1				8	11	14	14	3		
17	17-18	5	5	7	3	2				2	10	2	2	7		
18	18-19	0	0	0	0	0				1	3	2	2	7		
19	19-20	0	0	0	0	0				1	1	1	1	1		
20	20-21	0	1	1	0	0				1	2	2	2	2		
21	21-22	3	3	2	1	1				1	1	1	1	1		
22	22-23	-	-	-	0	0				1	1	1	1	1		
23	23-24	0	0	0	0	0				1	1	1	1	1		
		22320	20352	22320	20880	22320	21600	22320	21600	22320	21600	22320	21600	22320		

6.2.5. Windhoeken en snelheden

Alvorens deze te onderzoeken eerst een indruk van de betekenis van de windsnelheden aan de hand van de schaal van Beaufort.

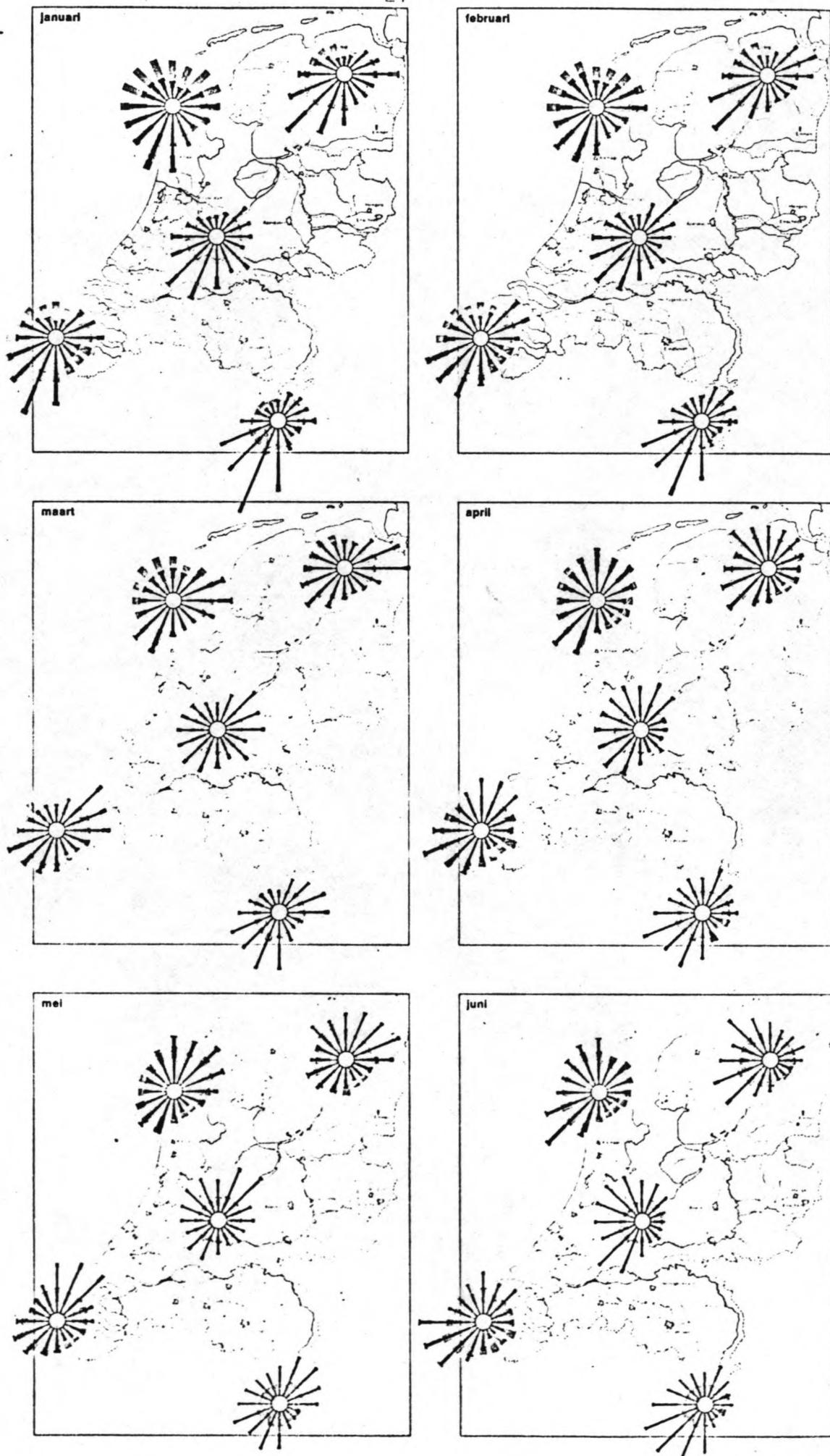
Windkracht	Beschrijving	Snelheden
0	stil	0 - 1 m/s
1	stil en flauw	1 - 2 m/s
2	flauw en koel	2 - 4 m/s
3	lichte koelte	4 - 7 m/s
4	matige koelte	7 - 9 m/s
5	frisse bries	9 - 11 m/s
6	stijve bries	11 - 14 m/s
7	harde wind	14 - 16 m/s
8	stormachtig	16 - 19 m/s
9	storm	19 - 21 m/s
10	zware storm	21 - 24 m/s
11	zeer zware storm	24 m/s

Frequentie van het optreden van windsnelheden.

Hiertoe is geraadpleegd het tabellenrapport van uurgemiddelden naar metingen te De Bilt in de jaren 1931 t/m 1960. Dit meetpunt ligt Zuidwestelijk van de Randmeren en is het meest nabij gelegen en geeft dus het beste beeld van de windsnelheden boven de randmeren. De waarden uit deze tabellen zijn samengevat op de bijgaande tabel. De getallen geven het aantal uren in een bepaalde maand dat gedurende de meetperiode een bepaald uurgemiddelde is waargenomen.

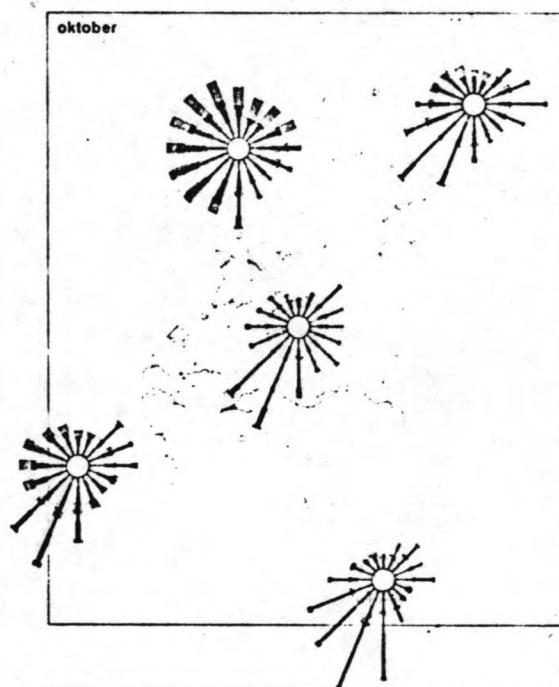
Ook zijn in dit rapport de frequenties van de windhoeken gegeven. Hierbij is echter geen verband gelegd tussen snelheid en hoek. Dit verband is wel gegeven in de klimaatatlas van Nederland. Hier blijkt dat de hoeken waarbij windsnelheden groter dan 14 m/s zijn waargenomen, ongeveer tussen noordwest en zuid liggen. Wat de ongunstigste hoek voor opwaaiing betreft is deze 230° (ongeveer Zuidwest). Dit is de richting van de as van het brede gedeelte van de meren. Volgens de klimaatatlas (zie volgende blz.) dit ook ongeveer de hoek waar uit het het meeste waait.

Het achtereenvolgend aanhouden van windsnelheden is niet in deze tabellen gegeven. Aangenomen wordt dat een wind van beaufort 5 of meer een halve dag aanhoudt (d.i...12 uur).

 Wind Indrozen
Wind uit aangegeven richtingen en binnen aangegeven snelheidsgrenzen (m/s),
% van de tijd
gemiddelde windsnelheid in
m/s uit aangegeven richtingen
1931-1960



Windrozen
Wind uit aangegeven richtingen
en binnen aangegeven
snelheidsgrenzen (m/s),
in % van de tijd
Gemiddelde windsnelheid in
m/s uit aangegeven richtingen
1931-1960



Bekijken wordt nu per maand hoeveel uren in de periode van 30 jaar een windsnelheid van 10 m/sec. of hoger is waargenomen. Dit aantal uren gedeeld door 12 x30 geeft het aantal windvelden met windkracht 5 of meer per maand.

maand	uren	frequentie	kans plots opstekende windvelden met windkr.5 of meer
jan	1600	4.44	5 maal
febr.	1274	3.53	4 maal
maart	883	2.45	3 maal
april	948	2.63	3 maal
mei	238	0.66	1 maal
juni	122	0.34	1 maal
juli	154	0.42	1 maal
aug.	152	0.42	1 maal
sept.	278	0.77	1 maal
okt.	663	1.84	2 maal
nov.	1025	2.84	3 maal
dec.	1275	3.14	4 maal

23.88 = 24 windvelden met een plots opstekende windsnelheid van 10 m/sec. of meer.

zeilseizoen mrt/okt 10 maal een kans op een windveld van 10 m/sec. of meer

zeilseizoen apr/sept 7 maal een kans op vooroemd windveld.

hoogseizoen jun/aug 1 maal een kans op vooroemd windveld.

Criterium windsnelheden m.b.t. de bevaarbaarheid van de geul:

- Pleziervaart; vaart niet meer bij windkracht 6 of meer

($v_{wind\ max} = 10\ m/sec.$)

- Beroepsvaart; vaart niet meer bij storm.

($v_{wind\ max} = 20\ m/sec.$)

Bovenstaande aannamen betekenen dat in het zeilseizoen de schepen 10 maal niet uitvaren

De beroepsvaart kan praktisch ten alle tijde varen.

De constructie dient dus zo te zijn ontworpen dat bij bovengenoemde windsnelheden of minder de toelaatbare stroomsnelheid in de geul niet overschreden wordt. Dit voor de pleziervaart 0,9 m/s en voor de beroepsvaart 1,8 m/s.

6.3. Schets ontwerpen

6.3.1. inleiding

Het kunstwerk moet op de Knardijk liggen, liefst zo dicht mogelijk bij de polder, i.v.m. in- en uitritten van de tunnel.

criteria; minimale breedte van de geul: 100 m

minimale diepte van de geul volgt uit:

diepte voor de scheepvaart; (maatgevend is beroepsvaart) 2.50 m

diepte, t.g.v. de retoustroom van de beroepsvaartuigen 0.15 m

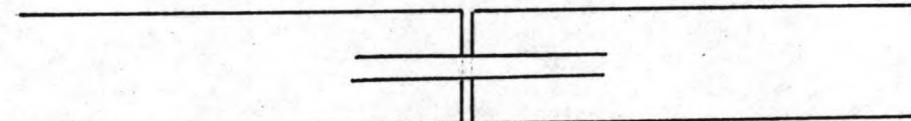
winterpeil t.o.v. N.A.P. 0.40 m

diepte onder het schip: de peilverlaging T.g.v. opwaaiing 1.00 m

het peil van de bodem t.o.v. N.A.P. moet dus zijn; 4.00 m

Principe oplossing:

Opening in de dijk met leidammen. (weerstandsgeul)



Deze oplossing zal aan de situatie moeten worden aangepast, hier toe zullen een aantal alternatieven worden ontwikkeld welke aan de criteria worden getoetst.

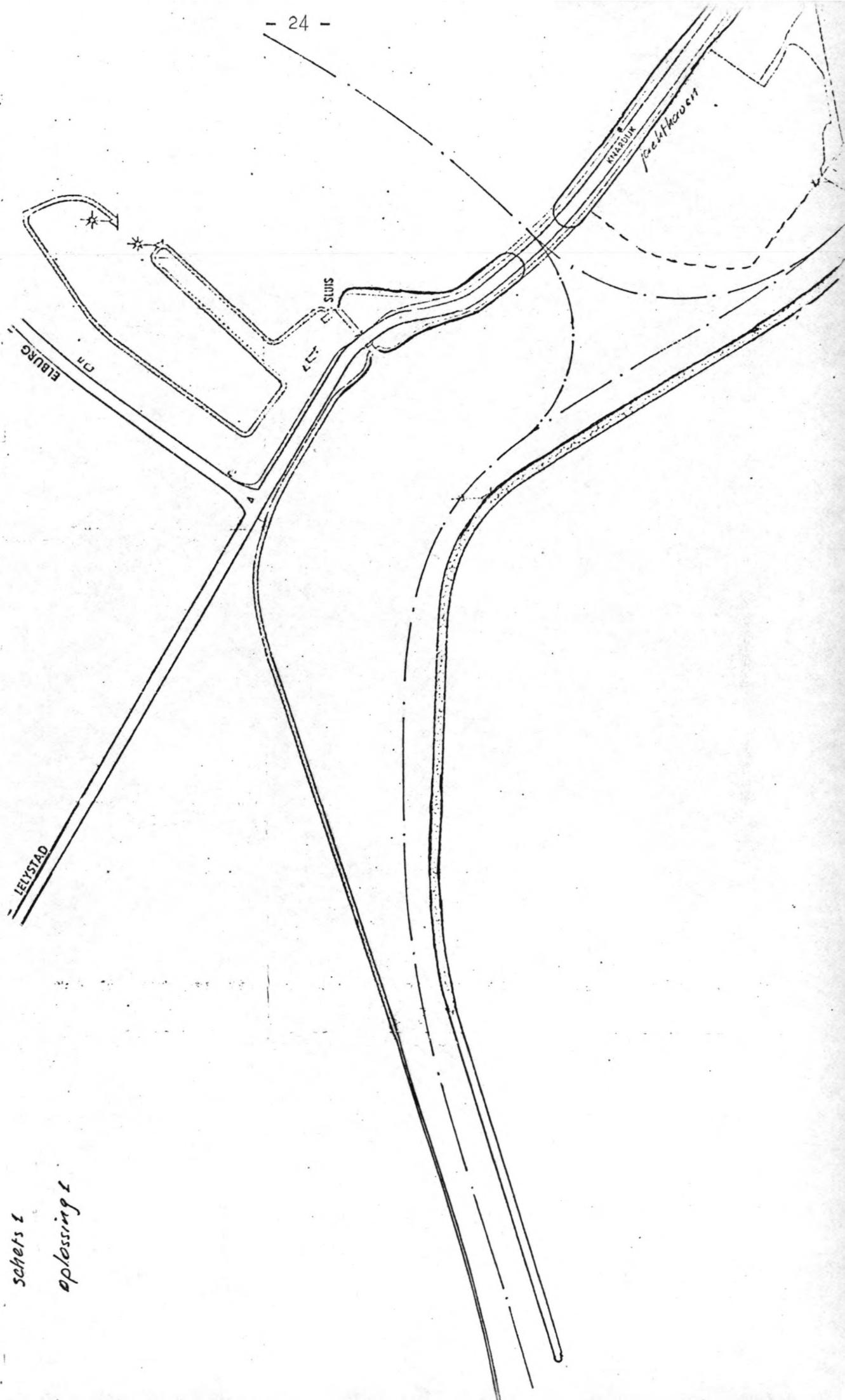
6.3.2. Oplossing 1. (schets 1)

Bij oplossing 1 is een opening in de Khardijk gemaakt, tevens is de havendam verlengd, welke zodoende als weerstandsgeul kan dienen. De voordelen van deze constructie zijn:

- de kosten zijn doordat de havendam verlengd wordt lager dan het geval waarin twee nieuwe geleide dammen voor de geul gebouwd moeten worden.

De nadelen van dit ontwerp zijn;

- De stroming uit het Veluwemeer staat bij het terugstromen loodrecht op de havendam, waardoor aantasting van de verdediging groot is. Tevens ontstaan turbulenties welke hinderlijk zijn voor de havens.
- de mogelijkheden tot uitbreiding van de jachthaven van Harderwijk zijn hier tevens beperkt.
- voor de scheepvaart is deze oplossing mindergoed i.v.m. onberekenbare stromingen.



6.3.2. Oplossing 2. (schets 3)

Deze oplossing is op twee manieren uit te voeren:

- de geul wordt door getrokken (één dam, zie stippellijn)
- of de havendam wordt aan het einde met de dijk verbonden

Afsluiting op één van beide manieren is nodig daar, indien dit niet gebeurt, de weerstands geul zijn functie verliest.

Doortrekken van een van de geleide dammen heeft de voorkeur.

De nadelen van dit ontwerp zijn:

- er moeten twee geleide dammen gebouwd worden
- stromingstechnisch is deze oplossing beter dan opl. 1 alhoewel het in-en uitvaren van de havens problemen zal geven i.v.m. de betrekkelijk grote stroomsnelheden in de geul
- deze oplossing is vrij kostbaar doordat er twee geleide dammen gemaakt moeten worden
- de vaargeul moet sterk aangepast worden om aan te sluiten op de bestaande
- visueel gezien vanuit de stad is deze oplossing minder mooi; tevens kan het gevaarlijk zijn daar het strand ook aan deze kant ligt. Het leggen van de weerstandsgeul aan de andere zijde van de Knardijk geeft bezwaren tenaanzien van de haven aldaar. (zie schets 2)

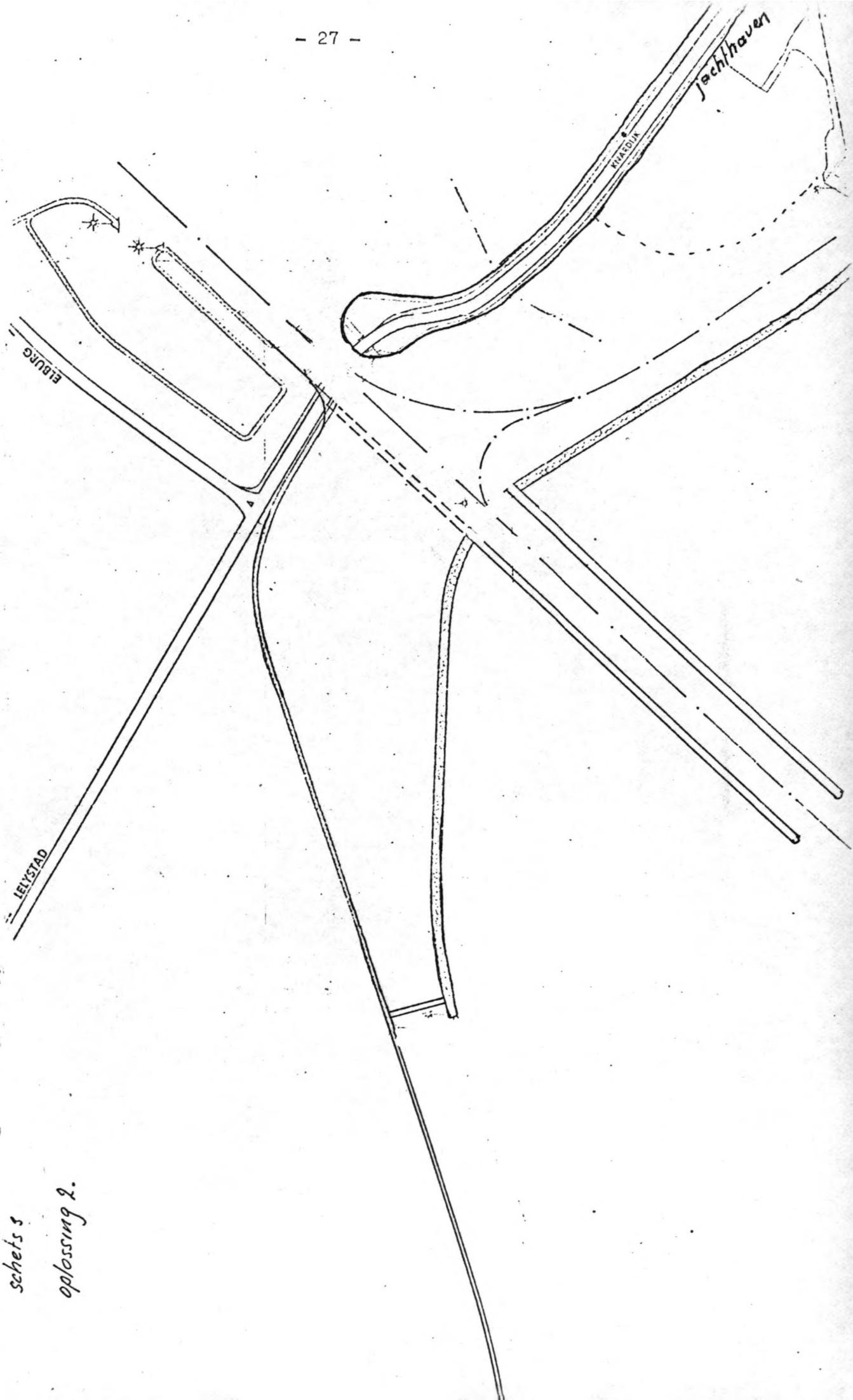
6.3.3. Oplossing 3. (schets 4)

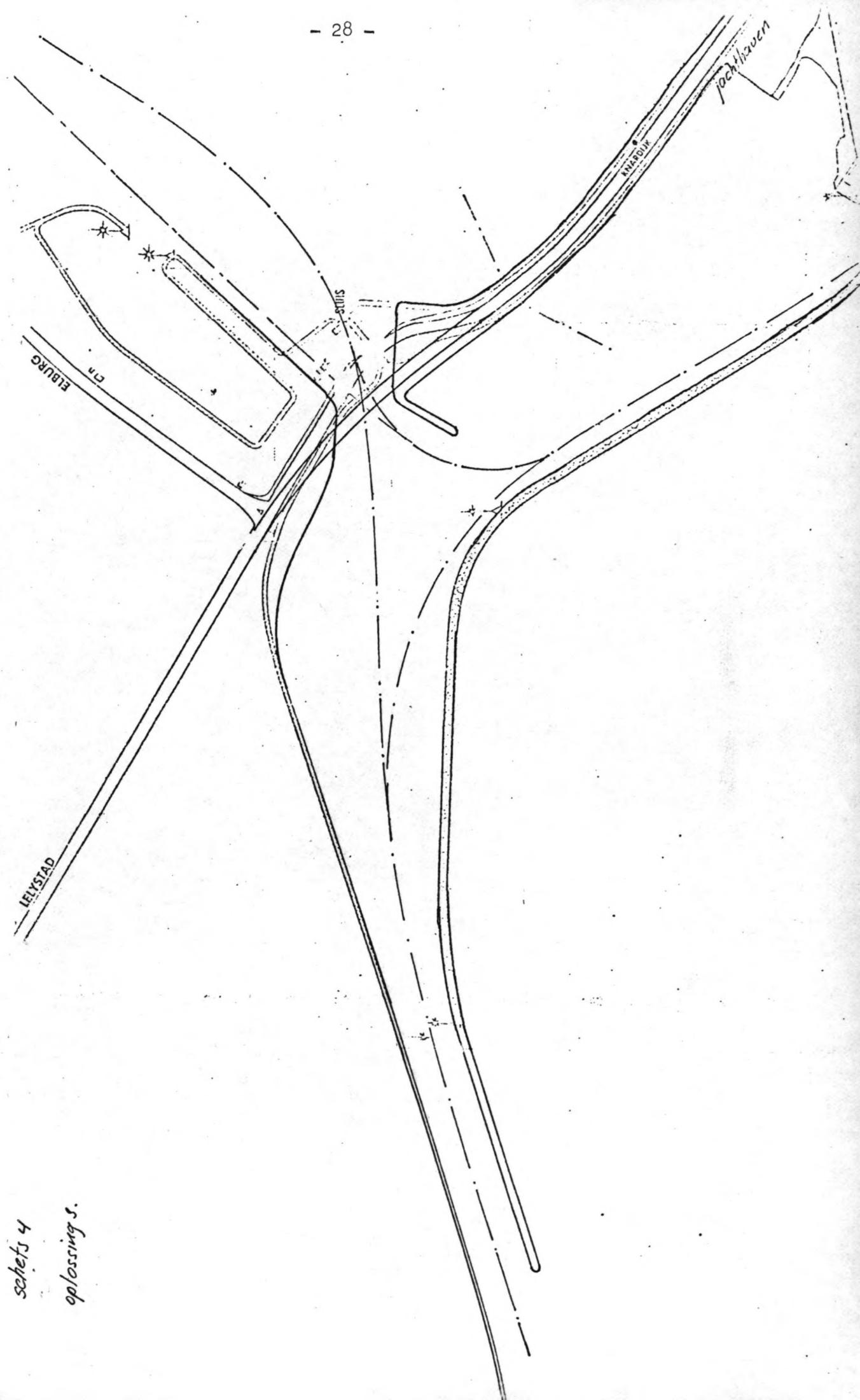
Bij deze oplossing is gebruik gemaakt van de bestaande havendam.

Deze is verlengd waardoor deze als weerstandsgeul kan functioneren. Terplaats van de sluis is nu de tunnel gepland, de opening in de dijk is zoveel mogelijk in het verlengde van de geul gelegd. Het grote voordeel van deze oplossing ten opzichte van de andere oplossingen is de goede bevaarbaarheid. Door de stroomvertraging ter plaatse van het bredere gedeelte kunnen de schepen beter bijdraaien om de haven te bereiken. Tevens is de kans op aanvaringen geringer.

Voordeelen:

- goede bevaarbaarheid
- alleen de havendam moet verlengd worden
- visueel aantrekkelijke oplossing





Schets 4
Exploring S.

- de vaargeul sluit vrij goed aan op de bestaande vaargeul Nadelen zijn;
- de stroming staat nogal vrij sterk op de havendam gericht, waardoor het stromingsbeeld niet geheel bepaald kan worden. Voor de situatie zie schets 5.

6.3.4. Oplossing 4. (zie schets 6)

Deze oplossing is dezelfde als van schets 5. De opening in de dijk is echter stromingstechnisch beter aangepast. De stroming echter blijft nog erg sterk op de havendam gericht.

6.3.5. Oplossing 5. (schets 7)

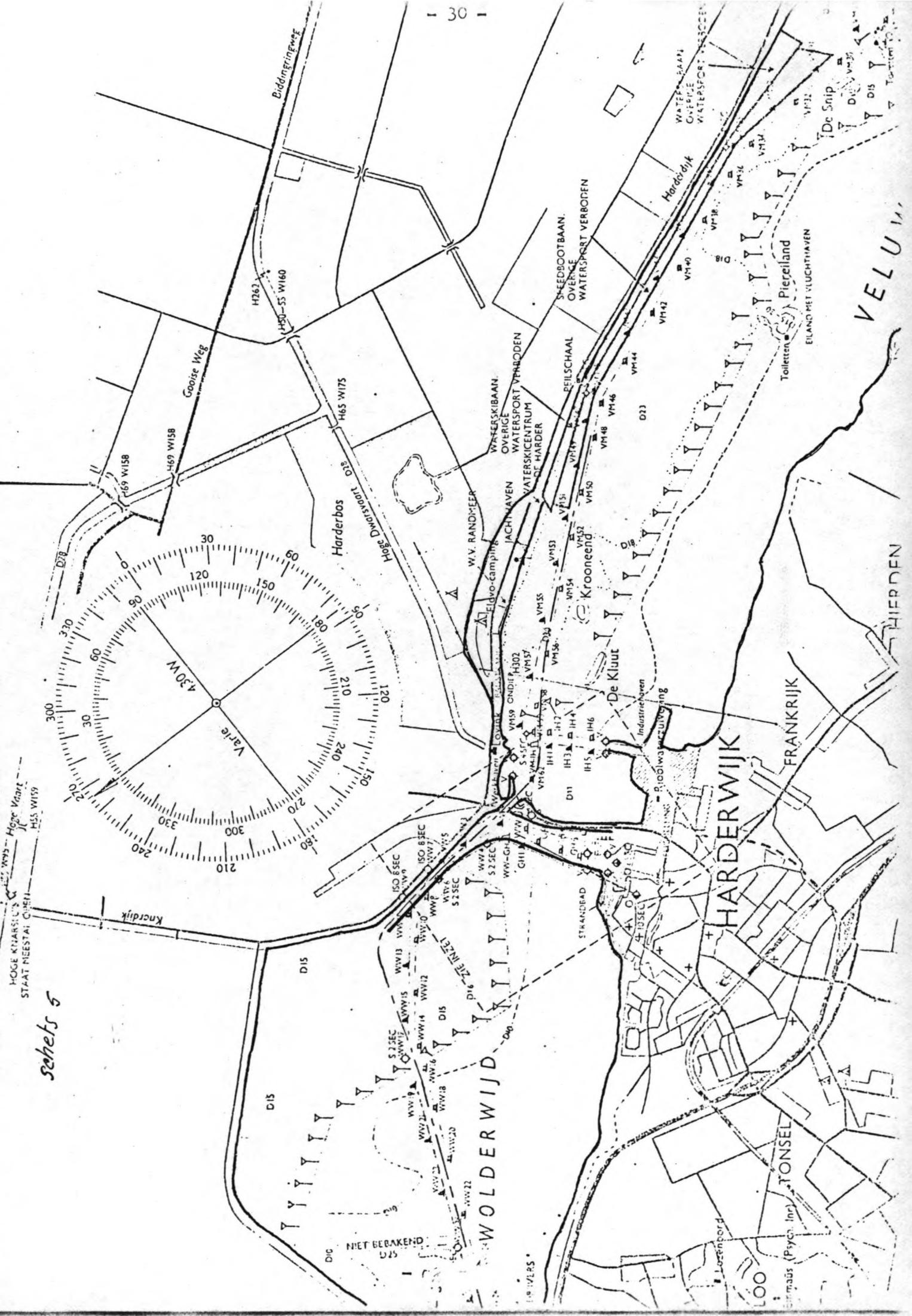
Dit ontwerp is stromingstechnisch beter dan oplossing 4. In de andere opzichten is deze oplossing gelijk aan oplossing 4.

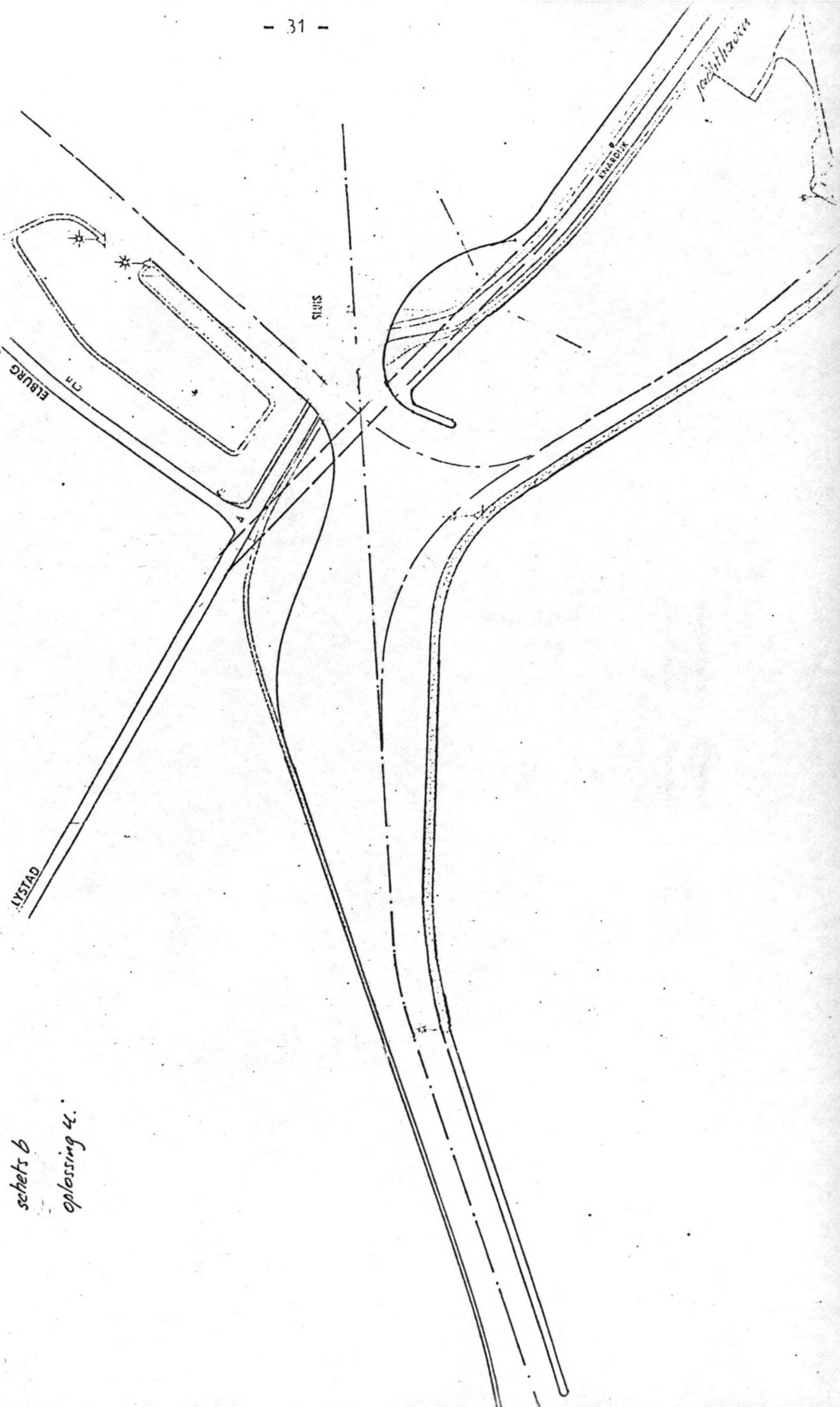
6.3.6. Oplossing 6. (schets 8)

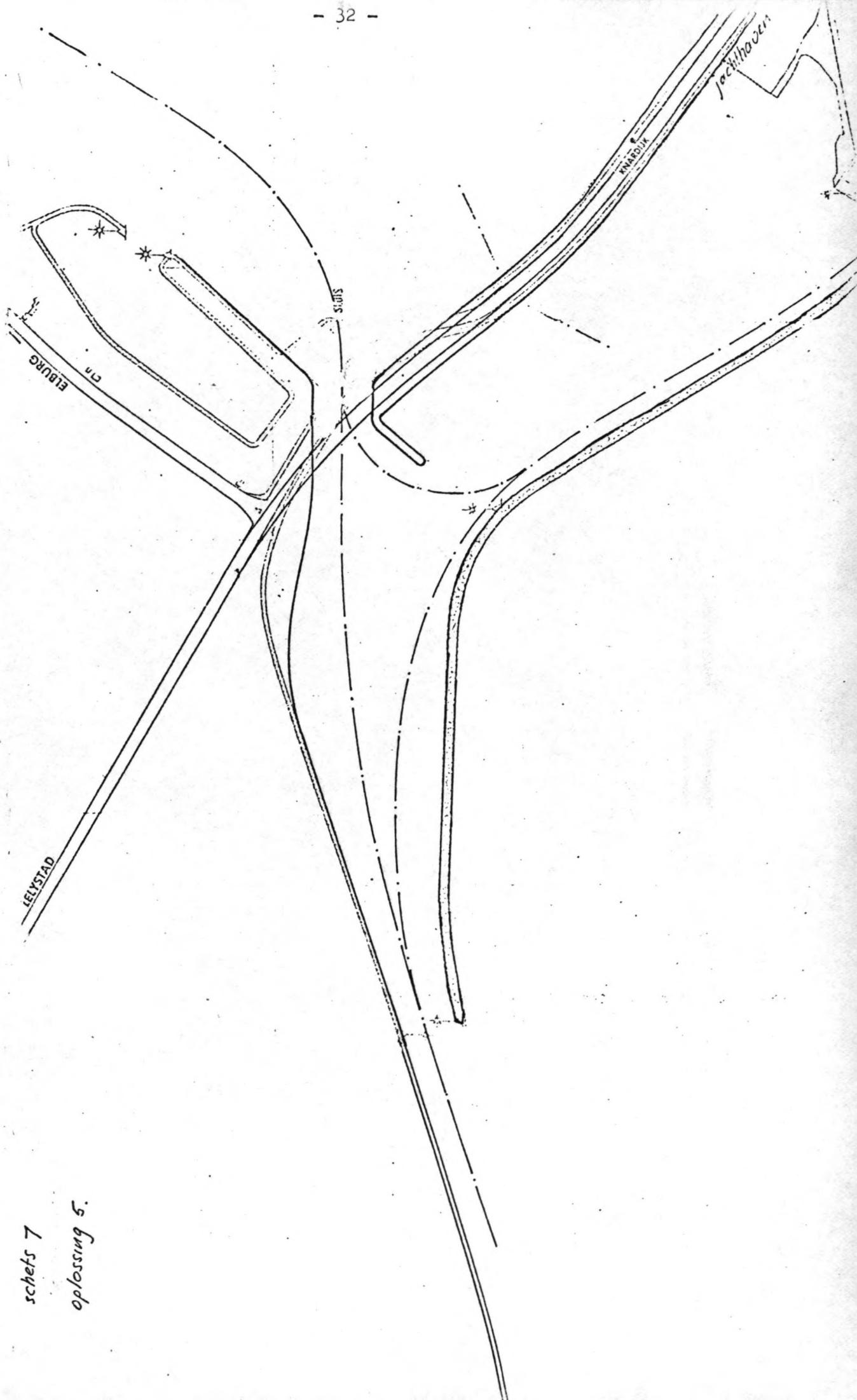
Dit is hetzelfde ontwerp als 5 maar stromingstechnisch beter uitgewerkt. Ontwerp 5 en 6 zijn beide voor de scheepvaart minder gunstig t.o.v. ontwerp 3 en 4, doch beter als in de voorgaande oplossingen.

In de ontwerpen 1,3,4,5en6 is de bestaande havendam verlengd, waardoor een geul is ontstaan. Deze geul is noodzakelijk zoals in het voorgaande reeds verklaard is om de waterstroom te remmen door het verhang tussen de meren te verkleinen en de weerstand te vergroten door de bodem te bestorten. Bij de zojuist genoemde oplossingen is dus alleen het smalle gedeelte bestort ter plaatse van de verlenging en ter plaatse van de opening in de dijk. Het brede gedeelte is niet bestort, daar dit te weinig effect zal hebben aangezien de stroomsnelheid hier te laag is. Door de bodem niet te bestorten zal de bodem kunnen gaan uitschuren, waardoor de waterdiepte groter zal worden, met als gevolg dat door de vergroting van het dwarsprofiel de stroomsnelheid nog lager zal worden. Dit optredende verschijnsel is nog gunstiger voor de scheepvaart dan wanneer geen ontgronding optreedt.

Sheets 5

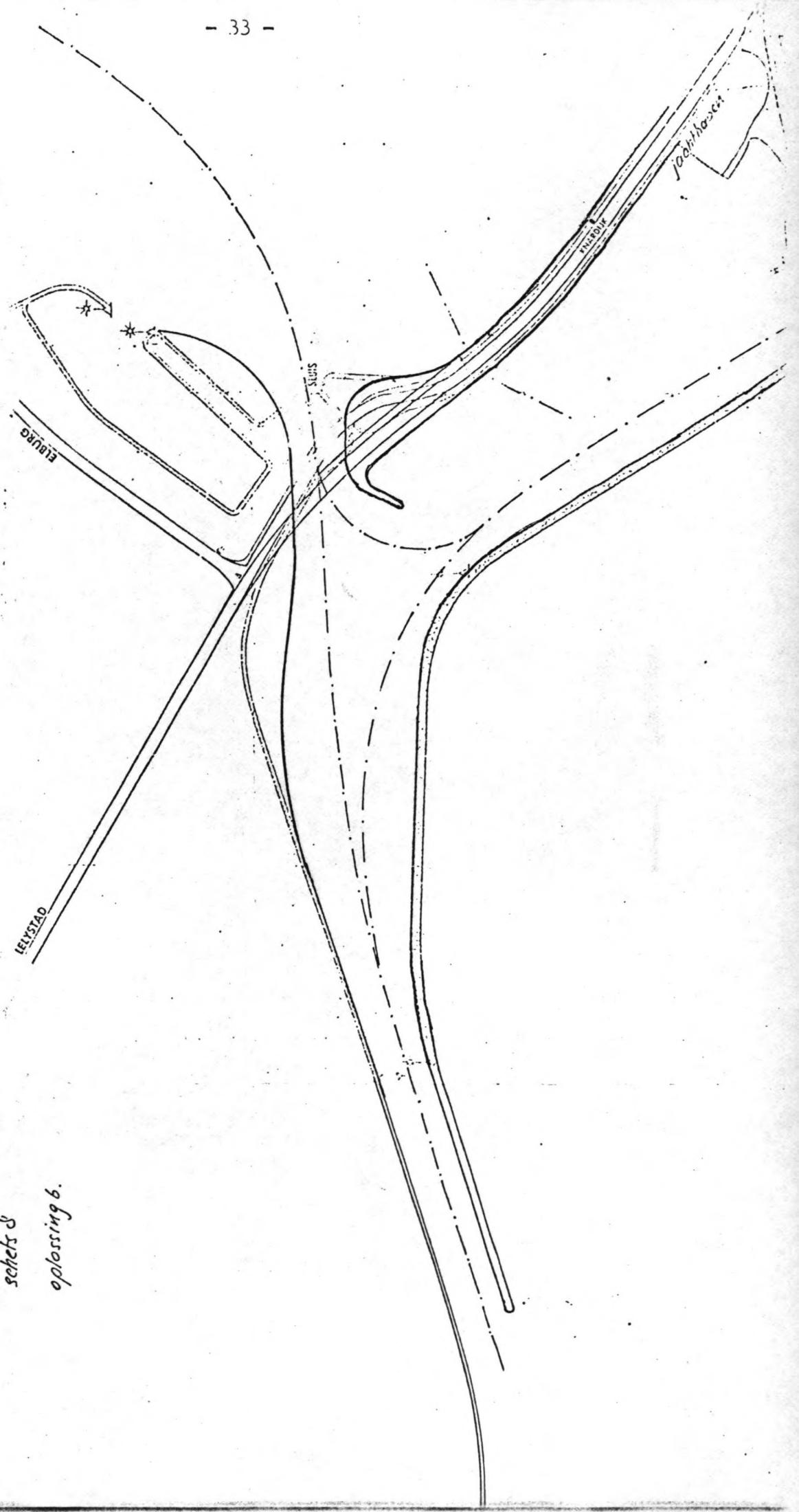






schems 7
oplossing 5.

schets 8
oplossing 6.



6.3.7. Oplossing 7

Dit is dezelfde oplossing als 6. Hier is de havendam echter niet verlengd. Het brede gedeelte wordt hier als weerstandsgeul beschouwd en dien ten gevolge geheel van een bestorting voorzien. Het stromingsbeeld gezien langs het lengte profiel is sterk variabel. Het voordeel van deze oplossing is, indien deze voldoet, dat hier in het geheel geen geleidende dammen behoeven te worden gebouwd. De grootste stromingen zullen optreden aan het einde van de havendam (het smalste gedeelte van de geul) en ter plaatse van de opening in de dijk. Wel moet een groter oppervlak bestort worden in vergelijking met de andere oplossingen.

6.3.8. Nadere beschouwing schetsontwerpen

De ontwerpen 6 en 8 voldoen het best aan de gestelde eisen, echter alternatief 8 is stromingstechnisch beter dan alt. 6, terwijl alt. 6 scheepvaartverkeerstechnisch beter dan alt. 8. Bij een eventueel definitief ontwerp zou dus een combinatie van deze twee schetsontwerpen geoptimaliseerd moeten worden.

Wordt gekozen voor oplossing 7 i.v.m. eventuele verdere berekeningen moet er wel aan gedacht worden dat, als deze oplossing toch te grote stroomsnelheden te zien geeft, het geen zin heeft de bestaande havendam te gaan verlengen, daar dit gedeelte smal is ten opzichte van de verwijding en dus een grotere weerstand heeft dan het brede gedeelte waardoor het verhang zich zal verplaatsen naar dit gedeelte, met als gevolg dat de stroomsnelheden weinig veranderen.

6.4. Verwachting opwaaiingsberekening in deel B

In deel B wordt het verband onderzocht tussen de vorm van de geul (lengte, breedte, diepte, weerstand t.g.v. bodemruwheid) en de stroomsnelheid hierin t.g.v. een bepaald windveld.

In de probleemanalyse is het verband hiertussen op een sterk vereenvoudigde manier benaderd. De verbanden tussen o.m. verplaatsing van de waterspiegel in de tijd als functie van een bepaalde windsnelheid en de demping en amplitude van de hierdoor ontstane golfbeweging zijn echter niet zonder meer vast te leggen.

Een nauwkeuriger benadering van de verschijnselen t.g.v. opwaaiing is mogelijk met de vergelijkingen voor lange golven. Door de langwerpige vorm van de meren is het mogelijk om dit als een één-dimensionaal probleem te zien.

Deze langegolfvergelijkingen zijn:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q|Q|}{c^2 A_s R} + \frac{k \cdot w^2 \cdot \cos \psi}{\rho g h} - \frac{2b}{gA_s^2} Q \frac{\partial h}{\partial t}$$
$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -b \frac{\partial h}{\partial t}$$

Als in een rekenmodel gebaseerd op deze vergelijkingen de vorm en de ruwheid van de meren en weerstandsgeul worden ingevoerd, dan kan bij een bepaald windveld (V_{wind} als functie van de tijd) de grootheden als debiet en waterstand als functie van plaats en tijd berekend worden.

Als doelstelling voor in het deel B te plegen onderzoek wordt dan door ons gesteld.

"Inzicht te krijgen in het gedrag en de grootte van de waterstrooming tengevolge van opwaaiing in een relatief smalle verbinding tussen twee meren; ten behoeve van het ontwerp van een open verbinding tussen het Veluwemeer en het Wolderwijd."

Inhoudsopgave Deel B

- 7.1. Inleiding
- 7.2. Wiskundige beschrijving van het probleem
- 7.3. Verantwoording gebruikte lange golfvergelijkingen
- 7.4. Het wiskundig model
- 7.5. Ingevoerde gegevens
- 7.6. Berekening van de bestaande situatie
- 7.7. Berekening verschillende oplossingen
- 7.8. Beschouwing verschillende mogelijkheden
- 7.9. De gekozen oplossing

7. DEEL B DE OPWAAIINGSBEREKENING

7.1. Inleiding

Een redelijk nauwkeurige berekening van de verschijnselen tengevolge van opwaaiing op meren is mogelijk met behulp van de vergelijkingen voor lange golven. Dit is gebleken o.m. uit opwaaiingsberekeningen voor het IJsselmeer^x. In deze berekening werden de vergelijkingen opgelost m.b.v. differentiemethoden. Voor het te verrichten rekenwerk werd er gebruik gemaakt van een computer.

Omdat deze oplossingswijze het mogelijk maakt om op snelle en nauwkeurige wijze verschillende situaties door te rekenen (d.w.z. verschillende oplossingen voor de openverbinding en verschillende stormen) is hiervoor gekozen.

7.2. Wiskundige beschrijving van het probleem

Het verwachte beeld van de opwaaiing bij twee meren die onderling verbonden zijn met een relatief smalle verbinding is reeds beschreven in hoofdstuk 4.1. Principe van de opwaaiing.

Er kan hier dus gesproken worden van twee min of meer onafhankelijke bekens verbonden door een geul.

Op het verhang van de waterspiegel voor ieder bekken opzich (als functie van de tijd) is van invloed:

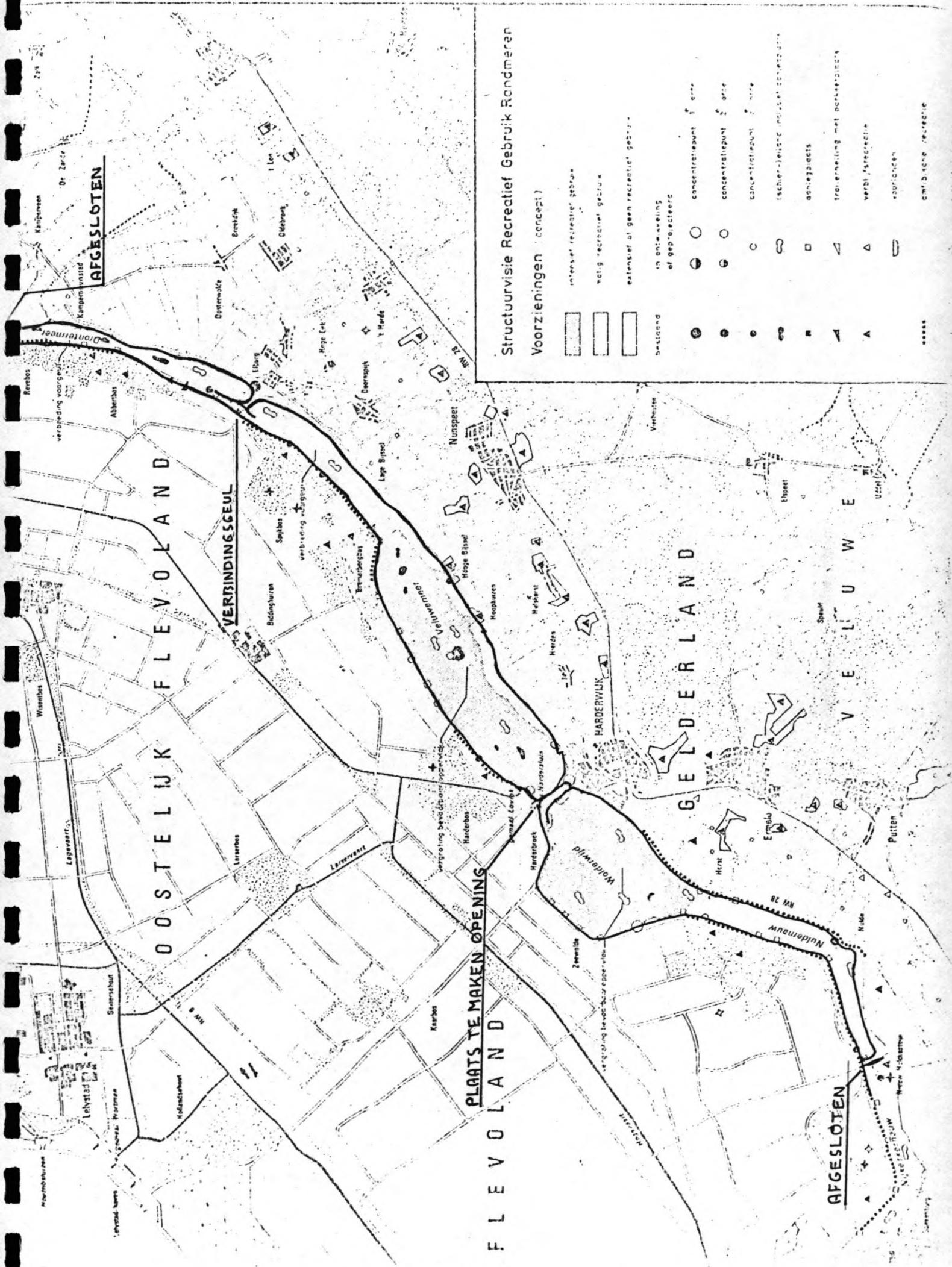
- Windsnelheid als functie van tijd. Dit geeft een wrijvingskracht over het water waardoor dit een nieuw evenwichtsverhang zoekt.
- De weerstand in het bekken (uitgedrukt in de C-factor, die omgeevenredig met de weerstand is).
- Traagheid (indien deze de weerstand overheerst kan er een slingerende beweging van de waterspiegel onstaan).
- Debiet door de geul. Dit verandert de gemiddelde waterstand en het verhang tengevolge van opwaaiing want deze is afhankelijk van de waterdiepte (zie 7.3.)

Het verhang in beide bekens kan dus een verval over de geul veroorzaken. Dit verval is dus ook weer tijdsafhankelijk.

Op het debiet in de geul is van invloed:

- Het verval over de geul.
- De weerstand (C-factor).
- De traagheid, aangenomen wordt dat deze te verwaarlozen is.

^x) Zie : Van Dijken "Windinval op meren"



- Het vertragingsverlies bij uitstroming
- De lengte en het dwarsprofiel
- De waterstand.

De bekkens beïnvloeden elkaar dus door het debiet in de geul en het verval over de geul.

Stel dat de opening tussen de meren minimaal is (smalle spleet) en het debiet naar nul nadert, dan is het verval over de geul onafhankelijk van het debiet in de geul. Het debiet in de geul bepaalt dus uiteindelijk de mate van beïnvloeding.

Het verband tussen het peilverschil tussen de beide meren als gevolg van het debiet in de geul:

Als de opening maximaal is dan kunnen de beide bekkens als één groot bekken beschouwd worden. Het debiet zal dan het grootst zijn en van peilverschil is er dan geen sprake meer. Bij een minimale opening is het verval het grootst en nadert het debiet tot nul.

Het verband tussen het debiet en het verval in de geul zelf is:

Verval: Δh Debiet: Q

Verval tengevolge van de weerstand:

$$\text{Chezy } v = C \sqrt{R} \frac{\Delta H}{L} \rightarrow v = C \sqrt{R} \frac{A H}{L} \rightarrow \Delta H = \frac{C^2 R}{A} v^2$$

Verval tengevolge van vertragingsverliezen:

$$\Delta H = \frac{(Av)^2}{2g} \alpha \quad \begin{aligned} &\text{Aannamen: 1) } \alpha = 1 \text{ (volledige vertraging)} \\ &\quad 2) \text{ stroomsheldheid voorbij de geul veel en veel kleiner dan in de geul} \\ & \Delta H = \frac{v^2}{2g} \end{aligned}$$

Totaal verval

$$\Delta H = \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{C^2 R} \cdot L$$

$$\Delta H = v^2 \left(\frac{1}{2g} + \frac{L}{C^2 R} \right)$$

$$\Delta H = \frac{Q^2}{A_s^2} \left(\frac{1}{2g} + \frac{L}{C^2 R} \right)$$

$$Q = \sqrt{\frac{A_s}{\frac{1}{2g} + \frac{L}{C^2 R}}} \cdot \sqrt{\Delta H}$$

$$\text{stel } \sqrt{\frac{A_s}{\frac{1}{2g} + \frac{L}{C^2 R}}} = g^* \quad \Rightarrow \quad g^* = \sqrt{\frac{A_s}{\frac{1}{2g} + \frac{L}{C^2 R}}}$$

$$Q = g^* \sqrt{\Delta H}$$

De factor g^x kan de "geulfactor" genoemd worden. Het blijkt hieruit dat de variatie van de lengte L, stroomvoerend dwarsprofiel A_s , hydraulische straal R en de C-factor alleen zinvol is indien daardoor ook de geulfactor g^x varieert.

Bij een zeer smalle spleet is de geulfactor bijna nul en bij een volledige opening is deze maximaal (men zou van oneindig kunnen spreken).

Gesteld kan nu worden: (omdat reeds verklaard is dat bij een groter opening A_s kleiner wordt en Q groter wordt) dat bij een grotere geulfactor de Q groter en A_s kleiner zal zijn.

In hoofdstuk 7 zal dit a.d.h. van een aantal berekening bevestigd worden.

7.3. Verantwoording van de gebruikte lange golfvergelijkingen

De lange golfvergelijkingen (1,2) genoemd in 6.4. zijn die zoals die gegeven worden in het collegedictaat "lange golven in leidingen", waarbij aan de bewegingsvergelijking de windterm $\frac{\rho \omega \cos \varphi}{\rho g h}$ als volgt is toegevoegd:

De termen in het rechterlid van (1) zijn in feite de krachten welke gedeeld zijn door $\rho A_s \cdot dx \cdot g$. De krachten - resp. traagheidskracht, wrijvingskracht en windschuifkracht - werken op een mocht water welke het gehele doorstromingsprofiel A_s omvat en een lengte L heeft.

De wrijvingskracht van wind over water is uit te drukken in de formule: $\tau = K \cdot \omega^2 \cos \varphi$. Hierin is K een nader te bepalen wrijvingscoëfficiënt tussen lucht en water, ω de windsnelheid en φ de hoek van de wind met de richting van de beschouwde stroming.

De term voor de windschuifkracht, die werkt op een mocht ter breedte b_s en ter lengte L is dus in (1) onder te brengen door deze schuifkracht te delen door de factor $\rho A_s \cdot dx \cdot g$.

Omdat $A_s = b_s \cdot h$ wordt de term:

$$\frac{K \cdot \omega^2 \cos \varphi}{\rho g h}$$

7.4. Het wiskundig model

7.4.1. Keuze oplossingsmethode

Om de langeolfvergelijkingen op te kunnen lossen m.b.v. differentiemethoden zijn er verschillende mogelijkheden.

Gekozen is voor een impliciete differentiemethode, dit omdat de keuze van de vaklengte hierbij geheel vrij is en omdat hiervoor een programma (ICES-FLOWS) beschikbaar was.

7.4.2. De oplossingsmethode

Het principe van de oplossingsmethode gebruikt in het computerprogramma ICES-FLOWS wordt uitgebreid beschreven in "Flows in networks" door ir. N. Booij.

In dit programma worden de langeolfvergelijkingen (1) en (2) (hier iets anders geschreven):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q_{-i}}{\partial x} + g \cdot A_s \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f u / Q}{R} - \frac{b \cdot K \omega^2 \cos \varphi}{\rho} = 0 \quad (3)$$
$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

opgelost met een impliciete differentiemethode. In deze vergelijkingen (3) en (4) is het totale oppervlak van het dwarsprofiel en A_s het stroomvoerende deel ervan. De hiervoor benodigde gediscretiseerde vergelijkingen zijn als volgt afgeleid:

De partiële afgeleiden uit de langeolfvergelijkingen (3) en (4) $\frac{\partial Q}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial x}$ en $\frac{\partial Q}{\partial x}$ worden benaderd door differentiequotiënten. Bij deze methode is het dan niet meer mogelijk om h en Q voor ieder punt te bepalen, maar wel in discrete punten. Het tijds verschil tussen de discrete waarden van Q zowel als van h bedraagt voor elk punt Δt . Het plaatsverschil tussen de discrete punten is de gekozen vaklengte l . Deze vaklengte kan voor ieder vak dus vrij gekozen worden.

Discretisatie van de partiële afgeleiden:

De indices $+$ en $-$ geven aan dat de waarden betrekking hebben op het nieuwe resp. oude tijdstip.

In de lengterichting worden de gediscretiseerde partiële afgeleiden:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_i^+ + Q_i^- - Q_i^+ - Q_i^-}{2l}$$

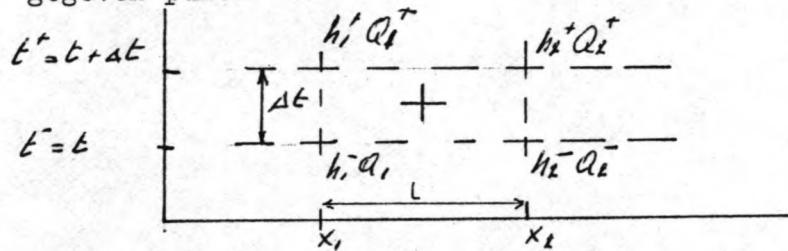
$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_i^+ + h_i^- - h_i^+ - h_i^-}{2l}$$

In de richting van de tijd worden deze:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_2^+ + h_2^- - h_1^+ - h_1^-}{2\Delta t}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_1^+ + Q_2^+ - Q_1^- - Q_2^-}{2\Delta t}$$

De gediscretiseerde vergelijkingen gelden dan voor het met + aangegeven punt:



Aldus wordt de bewegingsvergelijking:

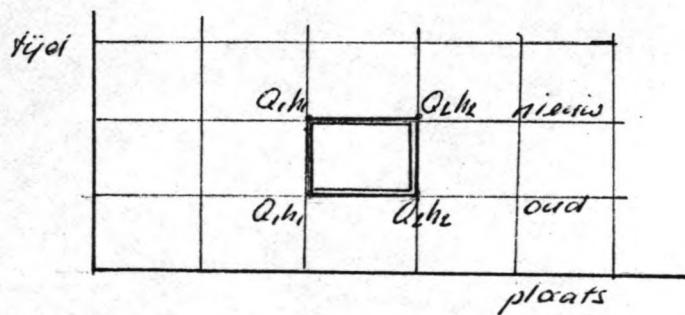
$$\frac{Q_1^+ + Q_2^+ - Q_1^- - Q_2^- + v_1^- \cdot Q_2^+ - v_2^- \cdot Q_1^- + g A_1 + A_2 \cdot \frac{h_2^+ + h_2^- - h_1^+ - h_1^-}{2}}{2\Delta t} + \left(\frac{v_1^- \cdot l_1 \cdot Q_1^+ + v_2^- \cdot l_2 \cdot Q_2^+}{R_1 + R_2} \right)$$

De continuïteitsvergelijking:

$$b. \frac{h_1^+ + h_1^- - h_2^+ - h_2^-}{2\Delta t} + \frac{Q_1^+ + Q_2^+ - Q_1^- - Q_2^-}{2l} = 0$$

$$\frac{-b \cdot k_o \omega^2 \cos \varphi}{l} = 0.$$

Het rekenmolecuul is voor de beide vergelijking gelijk en als volgt voor te stellen:

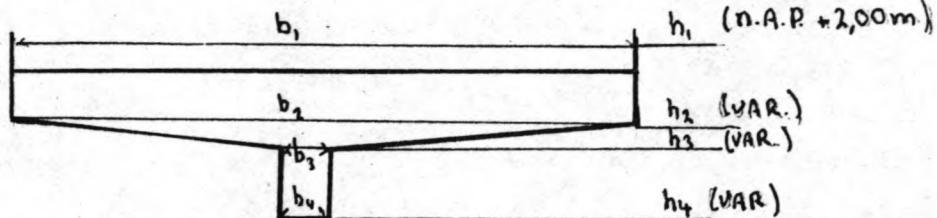


Uit de oude waarden voor h en Q worden dus op impliciete wijze de nieuwe waarden voor h en Q bepaald.

7.4.3. Schematisatie van de meren

De meren worden verdeeld in rechthoekige vakken zoals deze op de kaart zijn ingetekend. Tussen alle vakken is steeds een punt gegeven, waarvan de coördinaten in het programma zijn ingevoerd (dit t.b.v. de ligging van de vakken t.o.v. de windrichting).

Voor iedervak is een representatief dwarsprofiel ingevoerd als volgt:



Van dit dwarsprofiel wordt op verschillende hoogten de bijbehorende breedte ingevoerd. In het programma wordt de breedte van het wateroppervlakte indien dit tussen twee gegeven hoogten ligt rechtlijnig geïnterpolateerd. In ons geval is de gehele breedte als stroomvoerend genomen. Het stroomvoerend oppervlak wordt nu berekend door het oppervlak te berekenen tussen de waterstand en de laagstegegeven hoogte, op gelijksoortige wijze wordt de hydraulische straal bepaald.

7.4.4. Gebruikte eenheden in het model

vaklengte	$l = 1000 \text{ m}$
breedte	$b = 100 \text{ m}$
diepte, waterpeil	$h = 1 \text{ m}$
tijd	$t = 1000 \text{ s}$

Na keuze van deze eerste vier eenheden volgen uit de modelregels voor langegolfvergelijkingen (zie college b 73) de schaal voor de overige grootheden. Het verband met de schaal van de eerste vier grootheden is tussen de haakjes weergegeven.

snelheid	$v = 1 \text{ m/s}$	$(1/t)$
wrijvingscoëff. $f = g/c^2$	$= 0,001$	(h/l)
debiet	$Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$	$(h \cdot b \cdot l/t)$
gravitatieversn.	$g = 1 \text{ m/s}^2$	$(l^2/(h \cdot t^2))$
windfactor	$= 0,001$	(h/l)

De gebruikte schaal wordt in het programma aanbevolen om van een goede uitvoer verzekerd te zijn.

L M E E R



7.5. Ingevoerde gegevens

7.5.1. C-factor

Voor getijde berekeningen op het IJsselmeer wordt meestal de formule $C = 38 \sqrt[6]{h}$ gebruikt (zie het in 7.1 genoemde verslag).

Daar de randmeren vroeger ook een deel geweest zijn van het IJsselmeer lijkt het ons gerechtvaardigd om deze formule hier ook te gebruiken.

De gemiddelde diepte op de randmeren bedraagt ongeveer 1.50 m. Dit geeft een C-waarde van $40 \sqrt[6]{h}/s$. In het programma wordt deze wrijvingswaarde ingevoerd als $f = g/C^2$. Voor de meren wordt deze waarde nu $f = 0,006$ (gewone schaal) en $f = 6$ (modelschaal).

Voor de te berekenen verbindingsgeul bij Harderwijk is voor de C-factor uitgegaan van de formule van Strickler. Deze is $C = 25 \sqrt[6]{R/k}$ Waarin R de hydraulische straal en k de diameter van de korrels van het bodemoppervlak. Deze wordt in het programma ingevoerd als $f' = f/(R/k)^{2/p}$. In ons geval is $f = g/25^2 = 9.8/25^2 = 0,01568$. Ingevoerd volgens de modelschaal op $f = 15,68$. De ingevoerde waarde voor $p = 6$.

7.5.2. Wrijvingscoëfficiënt lucht-water.

In het algemeen wordt hier voor de formule $\tau = K w^2 \cos \varphi$ gebruikt. Hierin is w de snelheid van de wind in m/s, φ de hoek van de wind t.o.v. de lengte as van de beschouwde stroming.

Voor de waarde van K wordt hieraangenomen $0.0036 \text{ N.s}^2/\text{m}^4$.

Voor de opwaaiingsberekeningen op het IJsselmeer werd hiervoor een waarde aangehouden van 0.00353 en voor de berekening van de windinvloed op de Oosterschelde werd uitgegaan van 0.0036 (zie Het berekenen van windinvloed op meren met behulp van differentie methoden van J. van Dijken Rijkswaterstaat Nota W 71.013 II okt. 74); De waarde die aangenomen is is als default waarde in het programme reeds ingevoerd. (Dit is een waarde, die automatisch wordt aangenomen, indien geen waarde gegeven wordt).

7.5.3. Waterstand

Ingevoerd is het gem. peil: N.A.P. + 0.00 m.

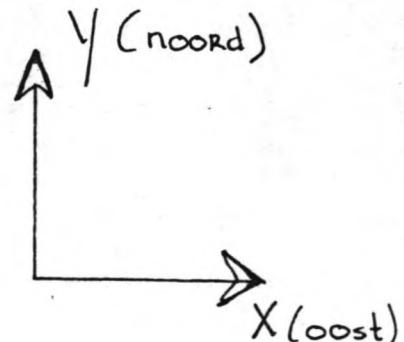
7.5.4 De gegevens van de vakken [maten in meters]

Nuldernauw / Walderwijd

		h_1	b_1	h_2	b_2	h_3	b_3	h_4	b_4
Vak 1	$P = 2 \text{ km}$	2,00	600	-1,40	600	-1,60	120	-6,00	120
Vak 2	$P = 2 \text{ km}$	2,00	680	-1,20	680	-1,60	120	-5,70	120
Vak 3	$P = 2 \text{ km}$	2,00	670	-0,50	670	-1,60	120	-5,00	120
Vak 4	$P = 2 \text{ km}$	2,00	710	-0,50	710	-1,10	120	-5,00	120
Vak 5	$P = 2 \text{ km}$	2,00	825	-0,40	825	-1,00	120	-4,50	120
Vak 6	$P = 2 \text{ km}$	2,00	2400	-0,70	2400	-1,40	120	-4,00	120
Vak 7	$P = 2 \text{ km}$	2,00	4000	-0,60	4000	-1,80	120	-5,00	120
Vak 8	$P = 2 \text{ km}$	2,00	2600	-0,70	2600	-1,80	120	-4,00	120

Coördinaten knooppunten*

nr	X / km	Y / km
1	5,90	11,65
2	7,75	12,25
3	9,76	12,80
4	10,55	14,67
5	11,20	16,57
6	11,80	18,47
7	12,27	20,35
8	13,50	21,75
9	14,85	23,25



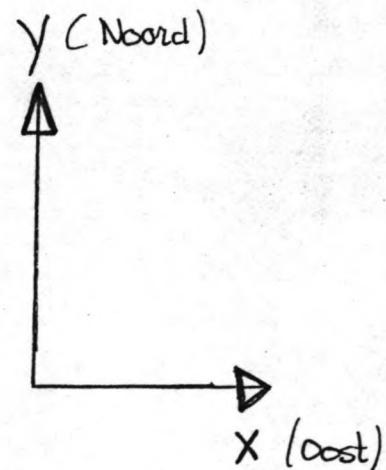
* T.o.v. assenstelsel
peilkarten Randmeren
van de Rijkswaterstaat.

Veluwe meer

		h_1 b_1	h_2 b_2	h_3 b_3	h_4 b_4
vak 20	$P=3 \text{ km}$	2,00 2250	-0,60 2250	-2,20 100	-3,40 100
vak 21	$P=3 \text{ km}$	2,00 2550	-0,60 2550	-2,40 80	-3,40 80
vak 22	$P=3 \text{ km}$	2,00 2550	-0,50 2550	-2,40 70	-3,40 70
vak 23	$P=3 \text{ km}$	2,00 1550	-0,50 1550	-1,20 70	-3,40 70
vak 24	$P=2,5 \text{ km}$	2,00 1050	-0,60 1050	-0,90 70	-3,40 70
vak 25	$P=2,8 \text{ km}$	2,00 780	-0,50 780	-0,70 70	-3,40 70

Coördinaten knooppunten

<u>NR</u>	<u>X / km</u>	<u>Y / km</u>
20	15,90	22,70
21	18,25	24,55
22	20,85	26,00
23	23,65	27,45
24	25,95	29,20
25	27,85	30,90
26	29,28	33,35



Geul tussen Veluwemeer en Wrontermeer

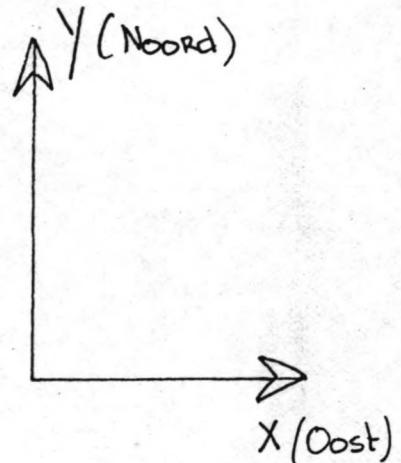
		h_1 b_1	h_2 b_2	h_3 b_3	h_4 b_4
Vak 30	$P=1,200 \text{ km}$	3,20 140	-3,20 -100		

Drontermeer

		h_1	b_1	h_2	b_2	h_3	b_3	h_4	b_4
Vak 31	$\ell = 3 \text{ km}$	2,00	730	-0,70	730	-1,00	80	-3,40	80
Vak 32	$\ell = 3 \text{ km}$	2,00	400	-0,60	400	-0,70	80	-3,40	80
Vak 33	$\ell = 3 \text{ km}$	2,00	370	-0,40	370	-0,60	80	-3,40	80

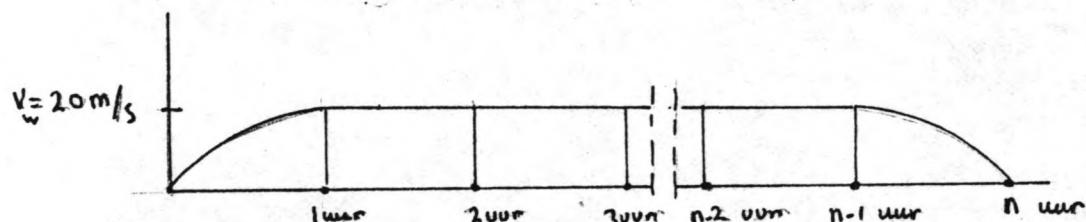
Coördinaten vakgrenzen

<u>NR</u>	<u>X / km</u>	<u>Y / km</u>
31	30,20	34,92
32	31,55	37,65
33	32,10	40,47
34	31,90	43,45



7.5.5. Het verloop van de windsnelheid in de tijd.

Gerekend wordt met een constante windsnelheid in de tijd, met een snelheid van 20 m/s. Voor deze windsnelheid (zware storm) is het aannemelijk dat deze niet binnen een uur bereikt wordt. Derhalve laten we de windsnelheid in een uur tijd haar constante waarde bereiken, volgens een parabolisch verloop. ($w = x\sqrt{t}$)



De gegevens betreffende de windsnelheid en de windrichting moeten in het programma voor alle te berekenen tijdstippen ingevoerd worden. Het is mogelijk om tijdstippen over te slaan. In het programma wordt dan de schuifkracht t.g.v. de wind op het water tussen de gegeven tijdstippen rechtlijnig geïnterpoleerd.

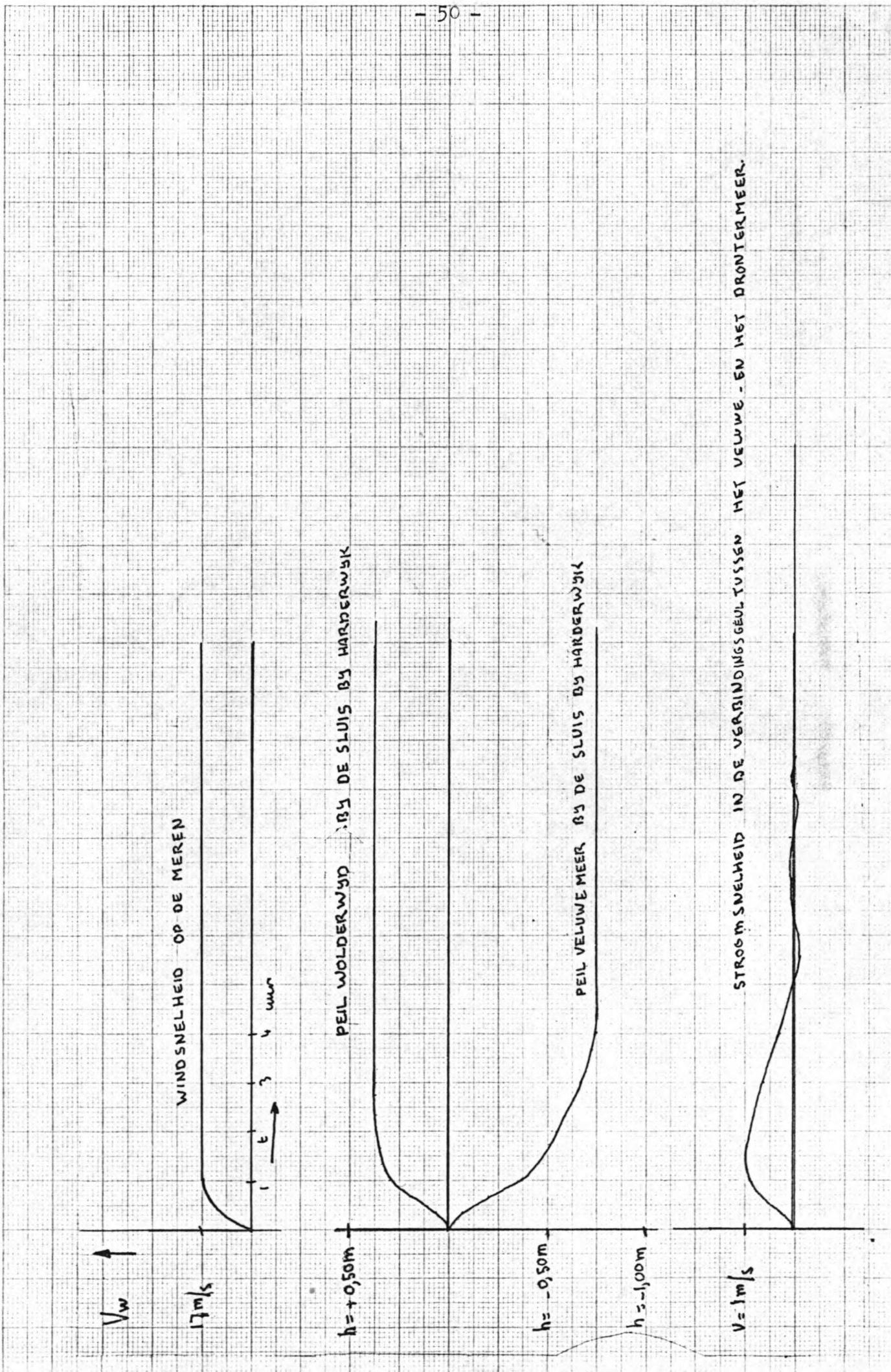
7.6. Berekening van de bestaande situatie

Om een beter inzicht te krijgen in het verloop van de opwaaiing en de huidige situatie te kunnen vergelijken met de situatie na de realisering van de open verbinding, is eerst de bestaande situatie doorgerekend. Hierbij worden de beide meren dus nog gescheiden door de dijk bij Harderwijk. Eigenlijk is er sprake van drie meren, nl. het Drontermeer voorbij Elburg, dit meer is uiteraard ook in de berekening betrokken, want het belangrijk te weten of door de opening bij Harderwijk de snelheden in de geul bij Elburg zullen wijzigen.

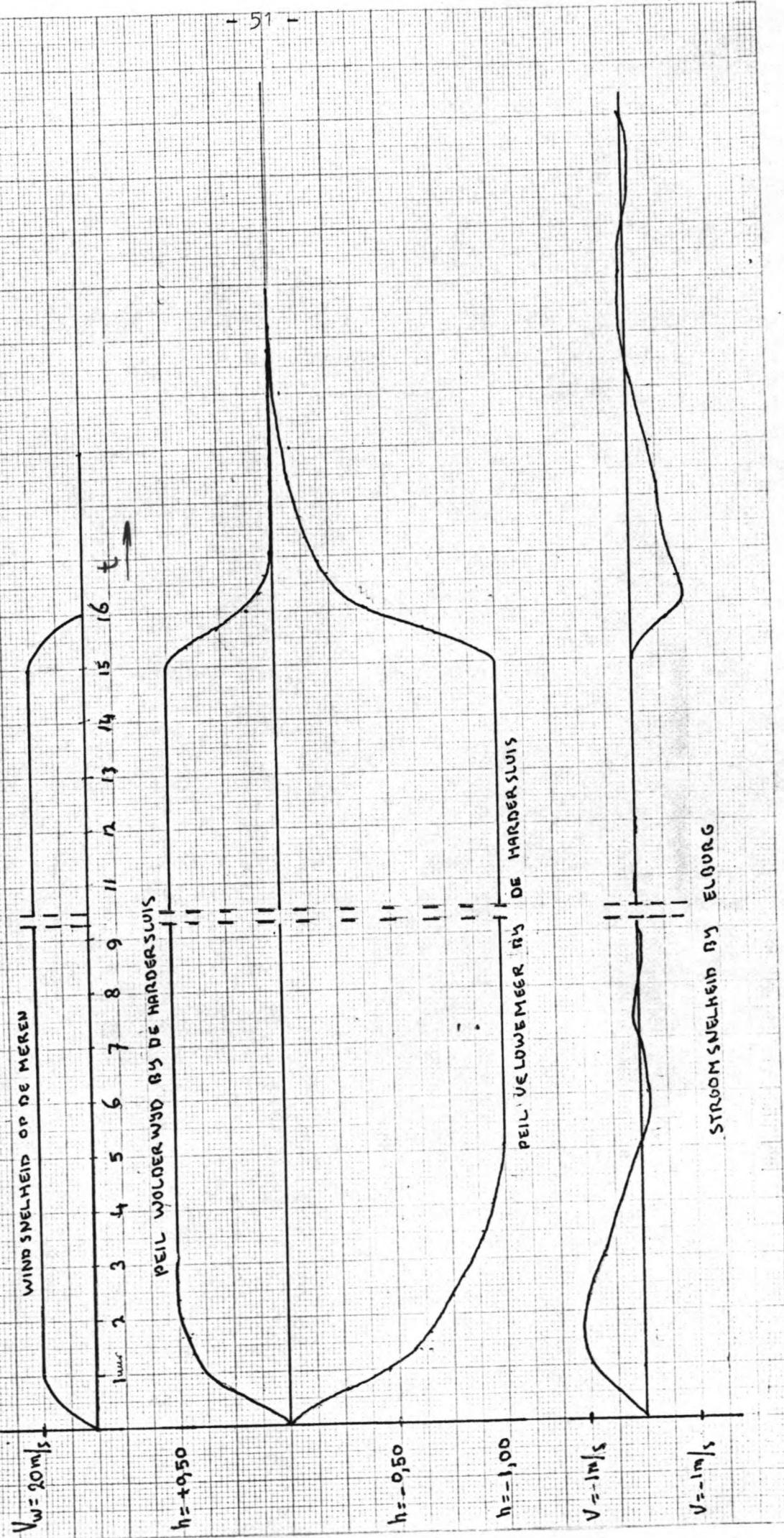
De berekening is uitgevoerd voor windsnelheden van 17 en 20 m/s verlopen volgens het in 7.5.5. gestelde. De wind is voldoende lang aangehouden om een stationaire toestand van de opwaaiing te verkrijgen. De hoek van de wind is 210° (ongeveer zuidwest), dit is voor de opwaaiing de ongunstigste hoek, want dit is de gestrekte richting van het brede deel van de meren.

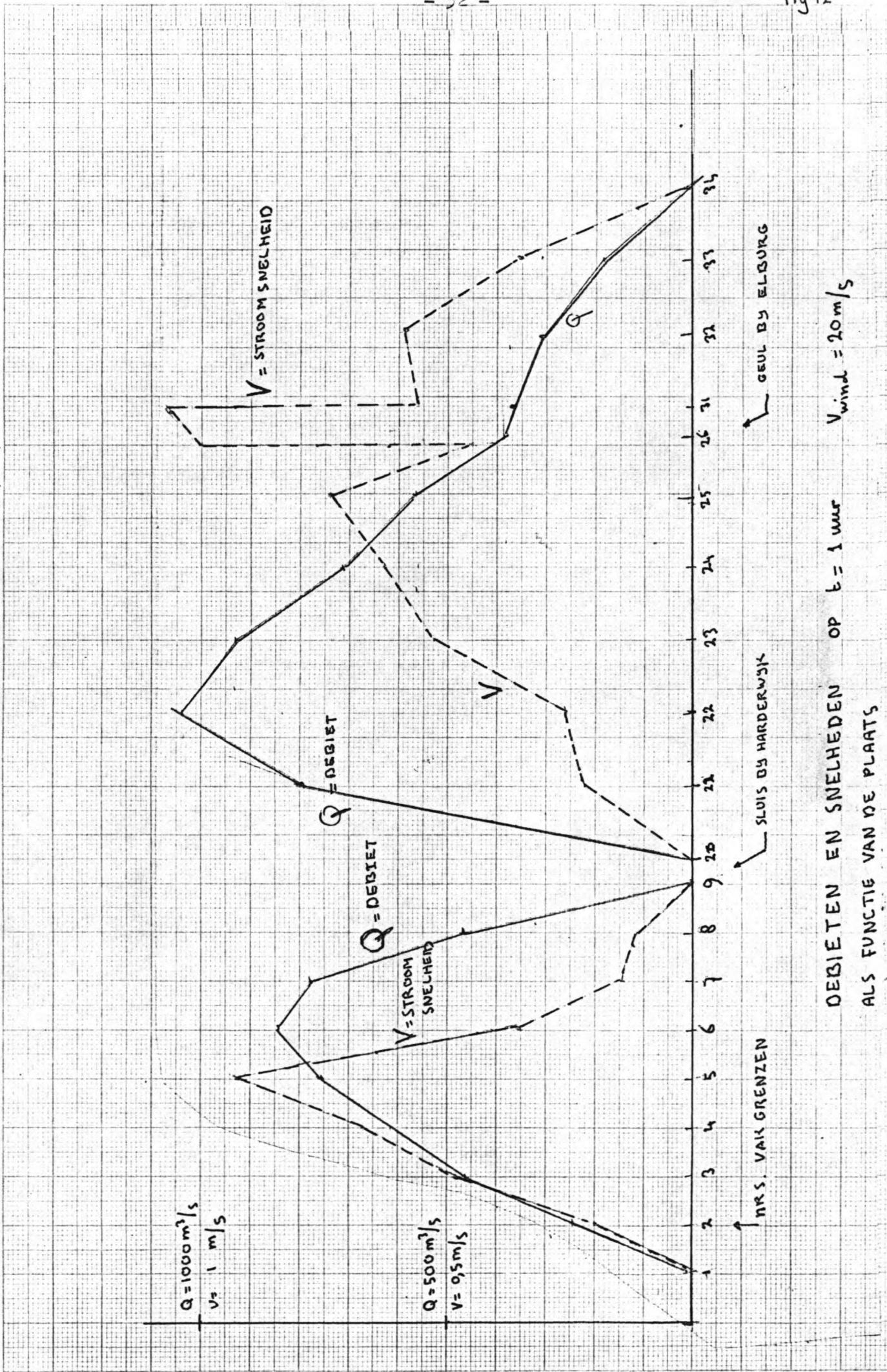
Op de figuren¹² ^{A en B} is het verloop van het waterpeil wederzijds van de dijk bij Harderwijk gegeven (in de figuren aangeduid als de Hardersluis) en het snelheidsverloop van de stroom in de geul bij Elburg. De maximum stroomsnelheid in deze geul is bij het opsteken van de wind van 20 m/s ongeveer 1,10 m/s en bij het gaan liggen van deze wind iets lager ongeveer 1,00 m/s. Bij een windsnelheid van 17 m/s (hier is alleen het opwaaien berekend) is deze bij het opsteken ongeveer 1 m/s. Voorts is te zien dat de opwaaiing op het Nuldernauw/Wolderwijd in ongeveer 3 uur voltooid is en op het Veluwemeer/Drontermeer in ongeveer 5 uur. Dit laatste meer is ook langer en moet er dus meer water verplaatst worden. Bij een open verbinding tussen beide meren zal de uiteindelijke opwaaiing dus waarschijnlijk na veel langere tijd bereikt worden.

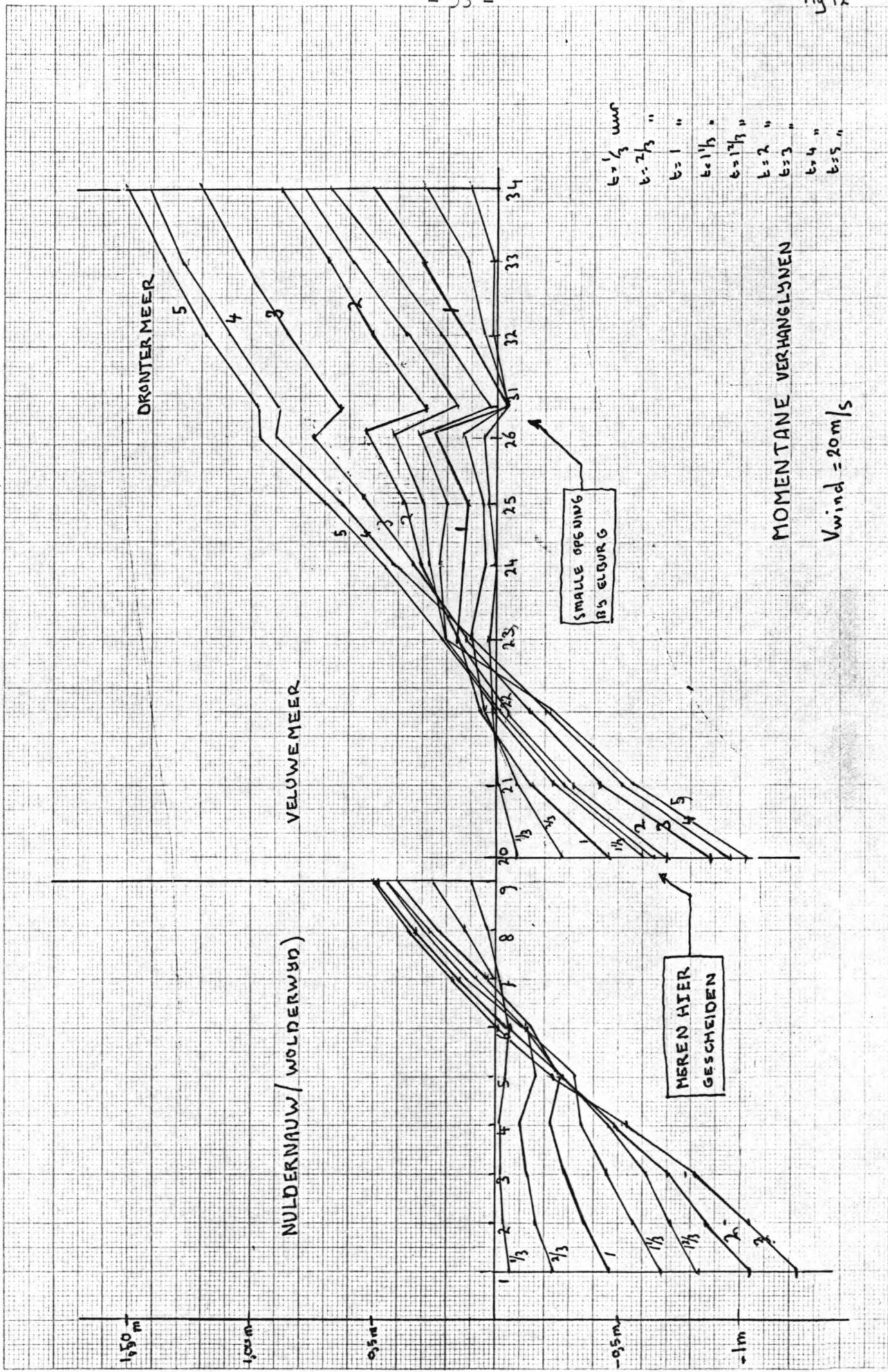
De stand van de waterspiegel verandert het snelst na het moment dat de wind op volle kracht is gekomen. Dit wordt geïllustreerd in het figuur met de momentane verhanglijnen. Het is te begrijpen dat hoe sterker het verhang wordt, de resulterende stuwend kracht op het water kleiner wordt, derhalve neemt de snelheid van de verandering van het verhang weer af.



- 51 -







Slingering van de waterspiegel is te verwaarlozen. De stroomsnelheid in de geul bij Elburg slingert wel, maar dit is gering t.o.v. de maximum daarin voorkomende snelheid.

Het debiet (zie fig 12^c) is het grootst op de knooppunten van de verhanglijnen (dit is de plaats, waar het waterpeil onveranderd blijft). Dit is logisch want langs dit punt moet alle watermassa stromen, die bij de afwaaiing vrij komt en benodigd is voor de opwaaiing.

Het stuwend effect van de smalle geul bij Elburg is duidelijk waar te nemen. Deze geeft weerstand aan de watermassa komende van het Veluwemeer. Hier door is bij het opsteken van de wind nog zelfs even een peilverlaging waar te nemen aan de zijde van het Drontermeer.

De opwaaiing is ongeveer evenredig met het kwadraat van de windsnelheid (immers $\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{K w^2 \cos \gamma}{\rho g h}$).

Bij $w = 20$ m/s werd een peilverschil bij de Hardersluis gevonden van 1,50 m en bij $w = 17$ m/s een peilverschil van 1,10 m.

$$\frac{17 \times 17}{20 \times 20} = 0,72$$

$$\frac{1,10}{1,50} = 0,73$$

Deze evenredigheid gaat dus vrij goed op.

7.7. Berekening van een aantal mogelijkheden voor een open verbinding

7.7.1. Inleiding

Berekend zijn een aantal verschillende mogelijkheden. Het verloop van de windsnelheid is zoals aangegeven in 7.5.5. en de maximum windsnelheid is 20 m/s. De windrichting is 240° - 60° (ongeveer zuidwest, dit is de ongunstigste richting om dat dit in de gestrekte richting van het brede deel van de meren is).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een geul met een breedte van ongeveer 150m en een diepte van ongeveer 3 m (de juiste maten zijn bij de resultaten weergegeven).

7.7.2. De resultaten

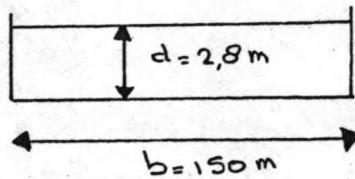
Per berekende situatie worden nu de belangrijkste gegevens hieronder weergegeven

Berekening Nr I

Geul lengte: 1200 m

C waarde: $40 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$

Windhoek: $(220^\circ - 40^\circ)$



Berekende waarden bij maximum stroomsnelheid door de geul

$t = 1.20 \text{ uur}$

$h_1 = 0,351 \text{ m}$ [kant v. Harderwijk] $V_1 = 1,35 \text{ m/sec}$

$h_2 = 0,37 \text{ m}$ [kant v. Veluwemeer] $V_2 = 1,77 \text{ m/sec}$

$Q_1 = 637 \text{ m}^3/\text{s}$

$\Delta h = 0,72 \text{ m}$

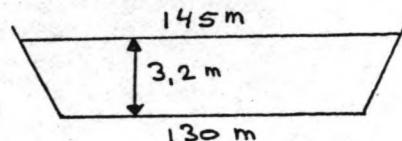
$$g' = \frac{Q}{V\Delta H} = \frac{640}{1,072} = 755$$

Berekening NR II

Geul lengte: 500 m

C waarde: $40 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$

Windhoek: $(220^\circ - 40^\circ)$



Maximum stroomsnelheid door de geul

$t = 1.20 \text{ uur}$

$h_1 = 0,28 \text{ m}$

$V_1 = 1,97$

$h_2 = 0,28 \text{ m}$

$V_2 = 2,37$

$Q_1 = 947 \text{ m}^3/\text{s}$

$\Delta h = 0,56 \text{ m}$

$$g' = \frac{g \cdot 48}{\sqrt{0,56}} = 1266$$

Voor deze berekening zijn de momentane verhanglijnen en de snelheden bij Harderwijk en Elburg in tekening gebracht. Zie bld. 17 A,B,C.

Berekening NR III

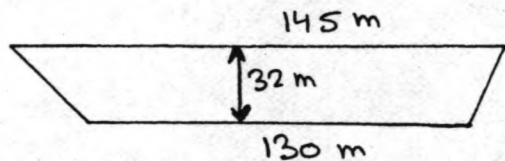
Geulbreedte 500 m

Windhoek ($220^\circ - 40^\circ$)

$R = 3 \text{ m}$ diepte weerstandsgeul

$$C = 25 \sqrt[6]{\frac{R}{k}} \quad k = \text{diameter van de bestorting}$$

De maximale stroomsnelheid trad steeds op ten tijde van
 $t = 1 \text{ uur en } 20 \text{ min}$



	k	(C)	h_1	h_2	Δh	Q	V_1	V_2	g^*
A	0,02	(58)	0,23	-0,22	0,45	1157	2,45	2,83	1725
B	0,05	(50)	0,25	-0,25	0,50	1067	2,24	2,64	1508
C	0,10	(44)	0,27	-0,27	0,54	998	2,09	2,50	1358
D	0,15	(41)	0,28	-0,28	0,56	959	2,00	2,40	1280
E	0,20	(39)	0,28	-0,29	0,57	930	1,93	2,34	1231

Berekening NR IV

Geulbreedte 500 m

Windhoek ($240^\circ - 60^\circ$)

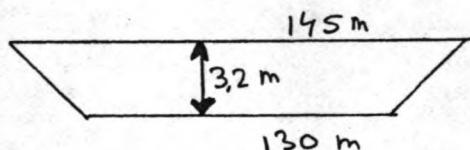
$$C = 25 \sqrt[6]{\frac{R}{0,20}}$$

maximum opwaaiing op $t = 1,20 \text{ uur}$

$$h_1 = 0,27 \quad V_1 = 1,95$$

$$h_2 = 0,35 \quad V_2 = 2,39 \quad g^* = 1188$$

$$\Delta h = 0,62 \quad Q = 936$$



Berekening NR V

Windhoek ($240^\circ - 60^\circ$)

Geul lengte 2000 m met verschillende dwarsprofielen en
ruwheden

Max. stroomsnelheid als $t = 2$ uur en 20 min.

$$h_1 = 0,35 \text{ m} \quad Q = 516 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$h_2 = 0,577 \text{ m}$$

$$\Delta h = 0,93 \text{ m}$$

$$g^* = 535 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

7.7.3. Vergelijking van de berekeningen

Een aantal berekeningen (I/III) is met een iets andere windhoek uitgevoerd. De resultaten er van zijn echter wel zeer goed bruikbaar voor een onderlinge vergelijking.

Gesteld was (in 7.2.) dat hoe ruimer de opening is, het debiet er door groter is en het verval weerszijden er van kleiner. Het debiet is echter een functie van de tijd. In de grafiek op blz. 16^A zijn tegen elkaar uitgezet voor de beschouwde berekeningen het verval en het debiet op het moment dat dit maximaal is. Het tijdstip daarvan is niet voor alle gevallen gelijk. De punten liggen ongeveer op een rechte lijn (uitgezonderd de punten berekend bij een andere windhoek, van deze laatste is het aannemelijk dat zij op een andere rechte liggen).

De berekeningen stemmen overeen met de verwachting van Q en Δh . Immer bij een grotere g^x is een kleinere Δh en grotere Q te zien. Deze g^x is in de berekeningen afgeleid uit $g^x = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$; deze g^x moet nu in overeenstemming zijn met de ingevoerde gegevens van de geul, want $g^x = \frac{A_s}{\sqrt{C' R + \frac{L}{2}}}$ in het programma wordt niet met de vertragingsverliezen gerekend. Dus wordt $g^x = \frac{A_s}{\sqrt{C' R}}$.

Voor geval I wordt is gecontroleerd of dit klopt. Bij correctie van het stroomvoerend profiel door de snelheids hoogte bleken de waarden overeen te stemmen

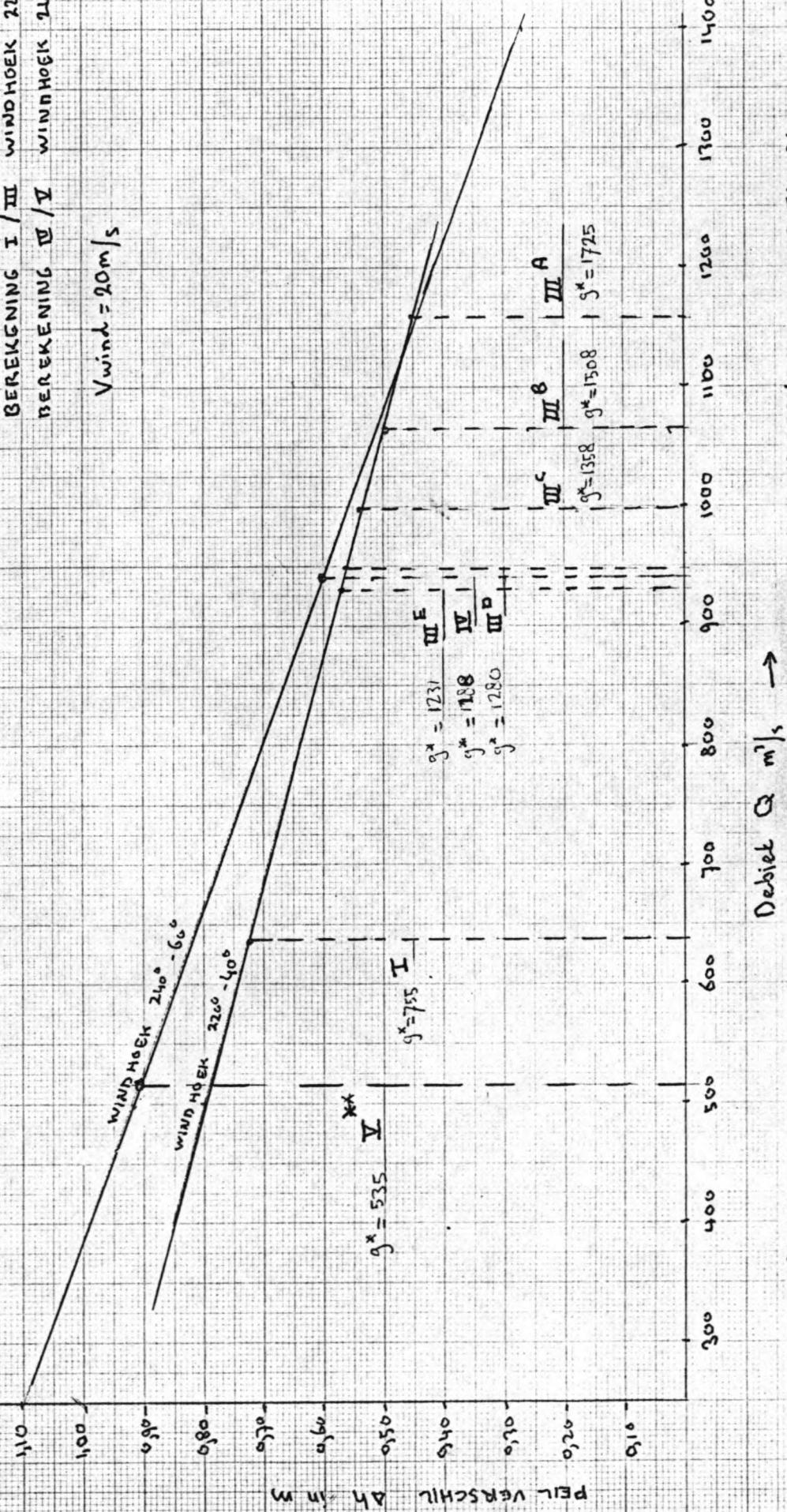
$$g^* = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}} = \frac{640}{\sqrt{0,71}} = 754 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$$

$$g^* = \frac{A_s}{\sqrt{C' R}} = \frac{402}{\sqrt{\frac{1100}{40^2 \cdot 1,58}}} = 745 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$$

Deze figuur kan nu gebruikt worden om andere mogelijkheden voor een opening te beschouwen. Zie 7.8.

BEREKENING I / III WINDHOEK $220^\circ - 40^\circ$
 BEREKENING IV / I WINDHOEK $240^\circ - 60^\circ$

$$V_{wind} = 20 \text{ m/s}$$



**) NR. BEREKENING

Debit $Q \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$

VERBAND TUSSEN Q EN Δh
 IN DE UITGEVOERDE BEREKENINGEN OP HET
 MOMENT DAT DEZE MAXIMAAL ZYN.

7.7.4. Nadere beschouwing van een berekening

Van berekening nr. II is op de figuur op blz. 17^A uitgezet als functie van de tijd:

- verloop van de windsnelheid
- verloop van de waterpeilen weerszijden van de verbindingsgouw
- snelheden door de verbindingsgouw
- snelheden door de gouw bij Elburg.

Hieruit blijkt dat bij het opsteken van de wind de max. stroomsnelheid ongeveer een half uur na het bereiken van de constante windsnelheid bereikt wordt.

Het verloop van de snelheden in de gouw bij het gaan liggen van de wind is vrijwel gelijk aan het verloop bij het opsteken (de snelheden zijn uiteraard wel tegengesteld).

De maximale snelheid in de gouw bij Elburg is nagenoeg gelijk gebleven, indien deze vergeleken wordt met de berekening van de bestaande situatie, alleen duurt het langer voor dat de stroming hier opgehouden is.

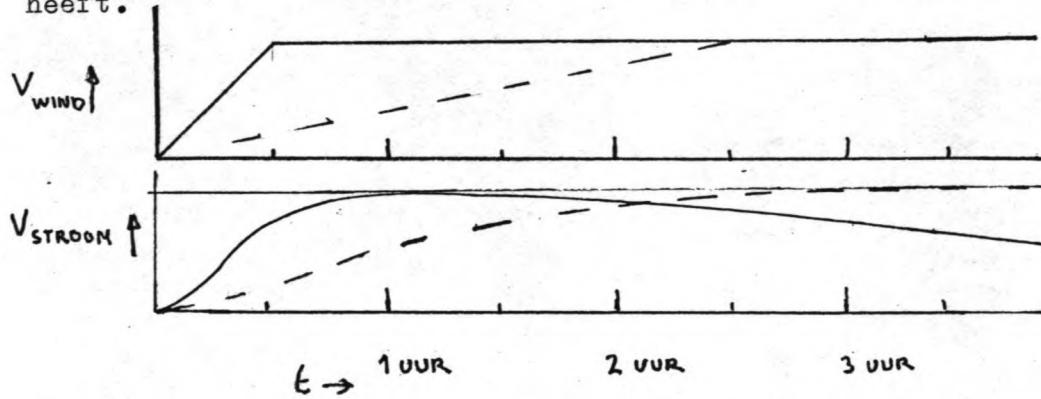
7.7.5. Invloed van de snelheid van het opsteken van de storm.

Steeds is uitgegaan dat de storm in een uur opsteekt. De maximum stroomsnelheid in de verbindingsgouw treedt volgens de berekeningen steeds iets later op dan het tijdstip dat de wind haar constante snelheid bereikt heeft.

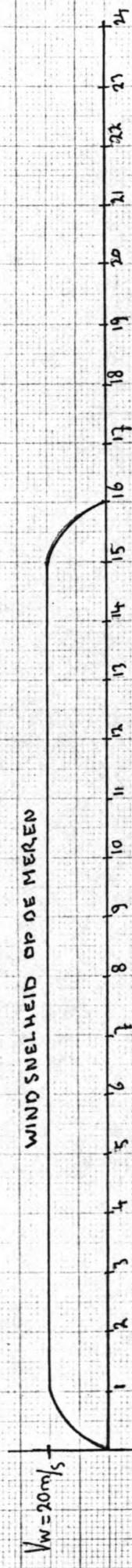
Berekend nu is de invloed van de tijdsduur waarin de wind haar constante snelheid bereikt op het verloop en de maximale grootte van de stroomsnelheid in de gouw.

In de bijgaande figuur zijn de resultaten gegeven van een berekening bij een windsnelheid van 20 m/s, die in een half uur resp. twee-eneenhalve uur opsteekt.

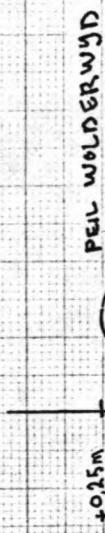
Het blijkt dat dit op de maximale snelheid praktisch geen invloed heeft.



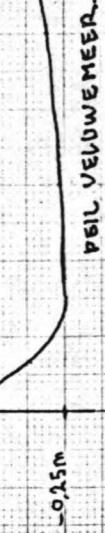
WINDSnelheid op de meren



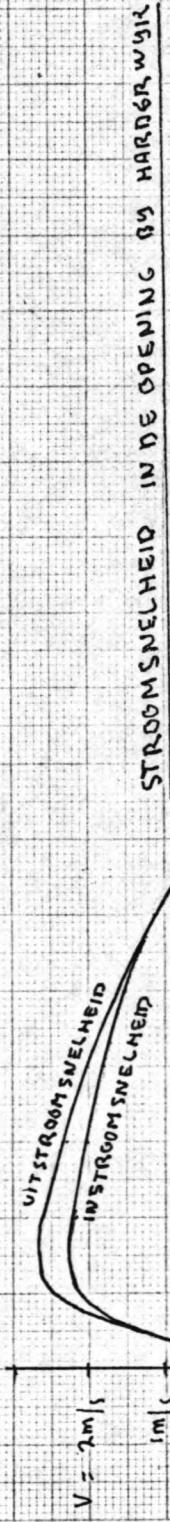
PEIL WOLDERRIJD



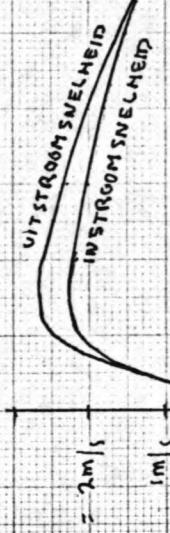
PEIL VELUWE MEER



PEIL WOLDERRIJD



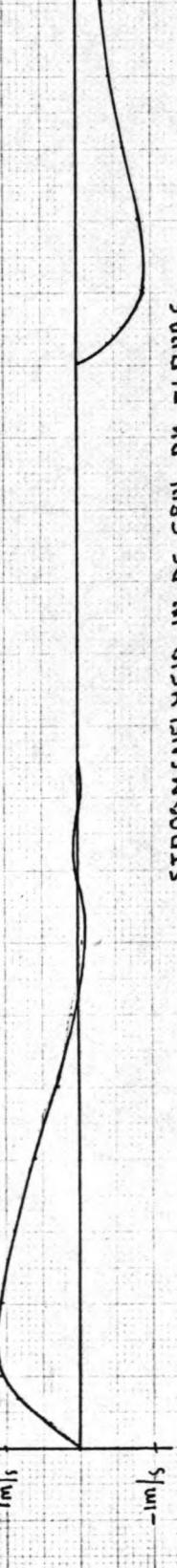
PEIL VELUWE MEER



PEIL WOLDERRIJD

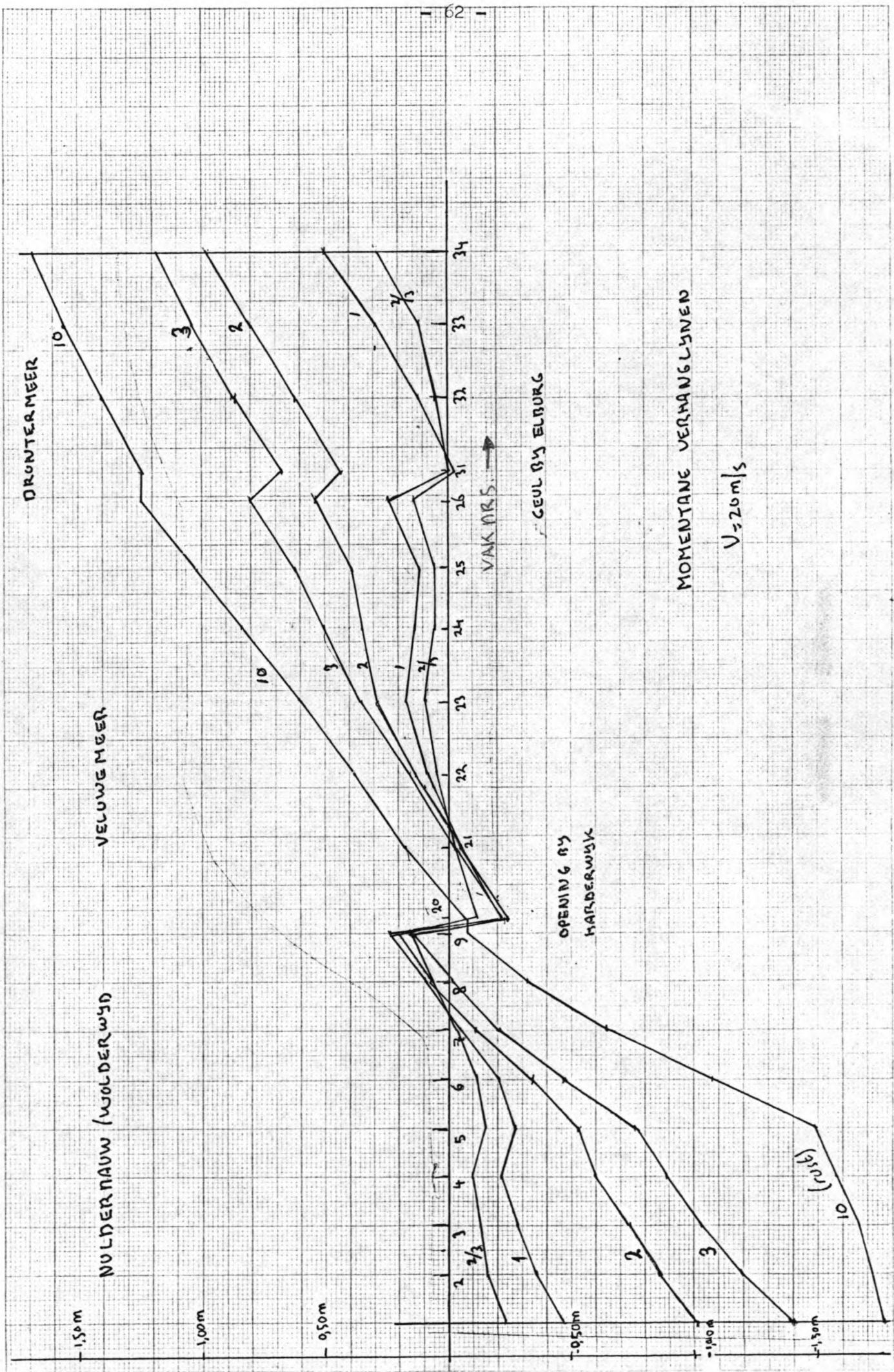


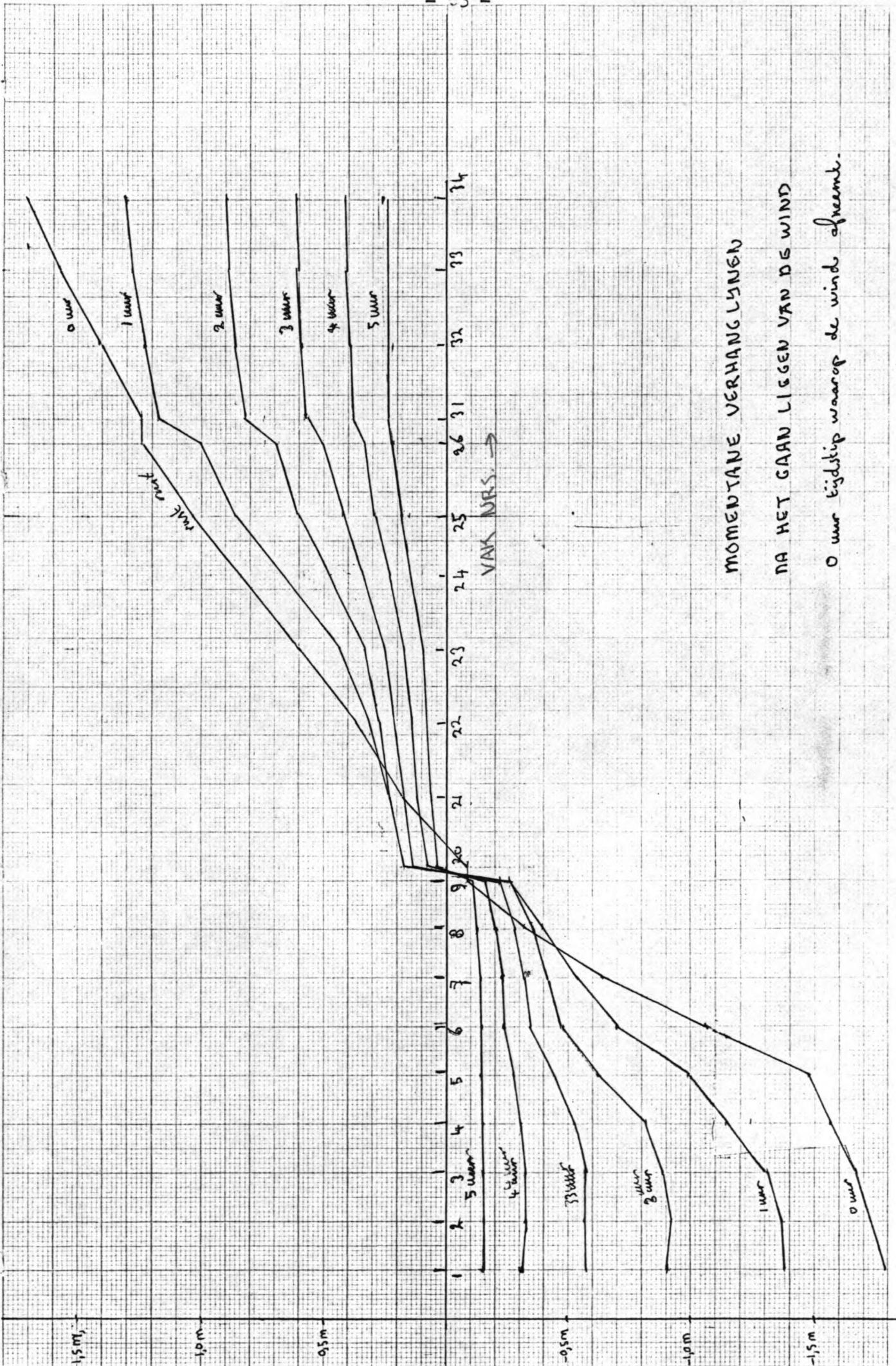
INSTROOMSnelheid
VELUWE MEER



STROOMSnelheid in de opening van Harengruwel

STROOMSnelheid in de groef bij zuring





MOMENTUM TANE VERHANG LUNGEN

NA HET GAAN LIGGEN VAN DE WIND

O uur tijdslijp waarop de wind oefende.

7.8. Beschouwing verschillende mogelijkheden t.b.v. het ontwerp.

7.8.1. Inleiding

Bij de aanvang van de berekeningen waren de exacte criteria wat betreft de geulbreedte en diepte nog niet bekend. Steeds werd er uitgegaan van ongeveer dezelfde maten als de geul bij Elburg. Vastgesteld is nu in de criteria in deel A dat de geul minimaal 100 m breed moet zijn. Voorts is gesteld dat deze om de kosten van de oeververbinding zo laag mogelijk te houden, de verbinding geul zo smal mogelijk moet zijn.

Het kan nu zijn dat door de geul breder en/of dieper te maken, de lengte zodanig bekort kan worden dat de totale kosten (oeververbinding + leidammen en bestorting) lager worden. Om een indruk hier van te krijgen worden in het volgend een aantal mogelijkheden vergeleken.

Als we uitgegaan van een windsnelheid van 20 m/s die verloopt volgens 7.5.5. kan nu met behulp van de grafiek op blz. 16^A een aantal mogelijkheden vergeleken worden.

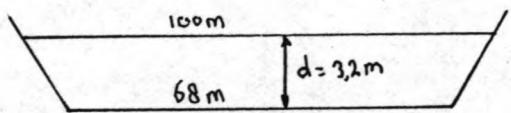
Door te stellen dat de stroomsnelheid in de geul maximaal 2 m/s mag zijn en een bepaal dwarsprofiel aan te nemen ligt het debiet Q in de geul vast. Uit de grafiek is nu Δh af te lezen (het verval over de geul); De geulfactor $g^* = \frac{Q}{\Delta h}$ kan nu berekend worden.

Uit $g^* = \frac{A_s}{\sqrt{\frac{L}{C^2 R} + \frac{1}{2g}}}$ volgt $L = C^2 R \left(\left(\frac{A_s}{g^*} \right)^2 - \frac{1}{2g} \right)$

Bij een bepaalde C-factor kan nu de geullengte bepaald worden.

De maximum snelheid in de geul treedt echter niet in het midden op maar aan het eind met het laagste peil. De snelheid in het midden van de geul moet dus geschat worden of de peilverlaging aan het einde van de geul, waarbij dan aan de hand van het verkleinde dwarsprofiel, het debiet bepaald kan worden.

1^e mogelijkheid



$$A_s = \frac{(100+68) \times 3,2}{2} = 268 \text{ m}^2 \quad R = 2,70 \text{ m}$$

$$V_{\max} = 2 \text{ m/s} \quad Q = 2 \times 268 = 526 \text{ m}^3/\text{s} \quad \xrightarrow{\text{grafiek}} \Delta h = 0,88 \text{ m}$$

$$A_s \text{ aan het einde van de geul: } d_{\text{eind}} = 3,20 - 0,88/2 = 2,78 \text{ m}$$

$$A_s = \frac{(96 + 68) \times 3,2}{2} = 227 \text{ m}^2;$$

$$\text{Op deze plaats mag } V_{\max} = 2 \text{ m/s zijn} \rightarrow Q = 2 \times 227 = 554 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\xrightarrow{\text{grafiek}} \Delta h = 0,95 \text{ m} \quad d_{\text{eind}} = 3,20 - 0,95 / 2 = 2,72 \text{ m}$$

$$A_s = \frac{2,72 \times (68 + 96)}{2} = 223 \text{ m}^2;$$

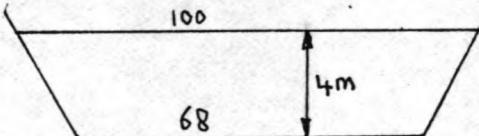
$$Q \text{ wordt nu } 223 \times 2 = 446 \text{ m}^3/\text{s}.$$

In de grafiek heeft dit verschil met de vorige Q praktisch geen invloed op de verandering van Δh .

$$g^x = \sqrt{\frac{Q}{\Delta h}} = \sqrt{\frac{446}{0,95}} = 458 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \quad \text{Stel } C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

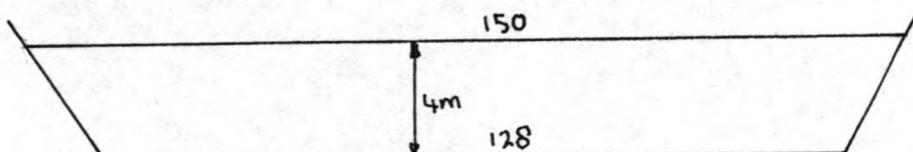
$$L = C^2 R \left(\frac{A_s^2}{g^x^2} - \frac{1}{2g} \right) = 40^2 \times 2,7 \left(\frac{268^2}{458^2} - \frac{1}{19,6} \right) = 1260 \text{ m}$$

2^e Mogelijkheid



Op dezelfde wijze volgt voor dit geval $L = 1200 \text{ m}$

3^e Mogelijkheid



Hier volgt dat $L = 650 \text{ m}$

8.9. De gekozen oplossing

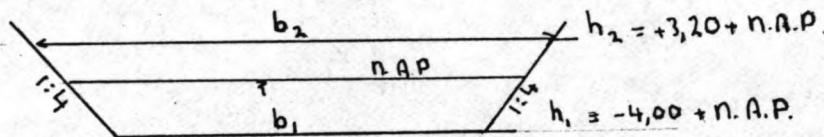
Deze is gegeven tezamen met de vakverdeling in figuur op blz. 67

Gegevens van de vakken (maten in meters):

Voor alle vakken is $h_1 = -4,00$ en $h_2 = +3,20$

Vaknr.	lengte	b_1	b_2	k (bodem-ruwheid)
9-10	700	68	126	0,20
10-11	150	93	151	0,20
11-12	150	143	201	0,08
12-13	660	224	276	0,08
13-20	200	68	126	0,20

Vorm dwarsprofiel:



Deze oplossing is berekend bij:

Windhoek $240^\circ - 60^\circ$ (ongeveer zuidwest)

a) Zomerpeil (N.A.P. + 0,00 m)

$W = 10 \text{ m/s}$ max. snelheid in de geul $1,03 \text{ m/s}$

$W = 20 \text{ m/s}$ max. snelheid in de geul $2,17 \text{ m/s}$

b) Winterpeil (N.A.P. - 0,40 m)

$W = 10 \text{ m/s}$ max. snelheid in de geul $1,00 \text{ m/s}$

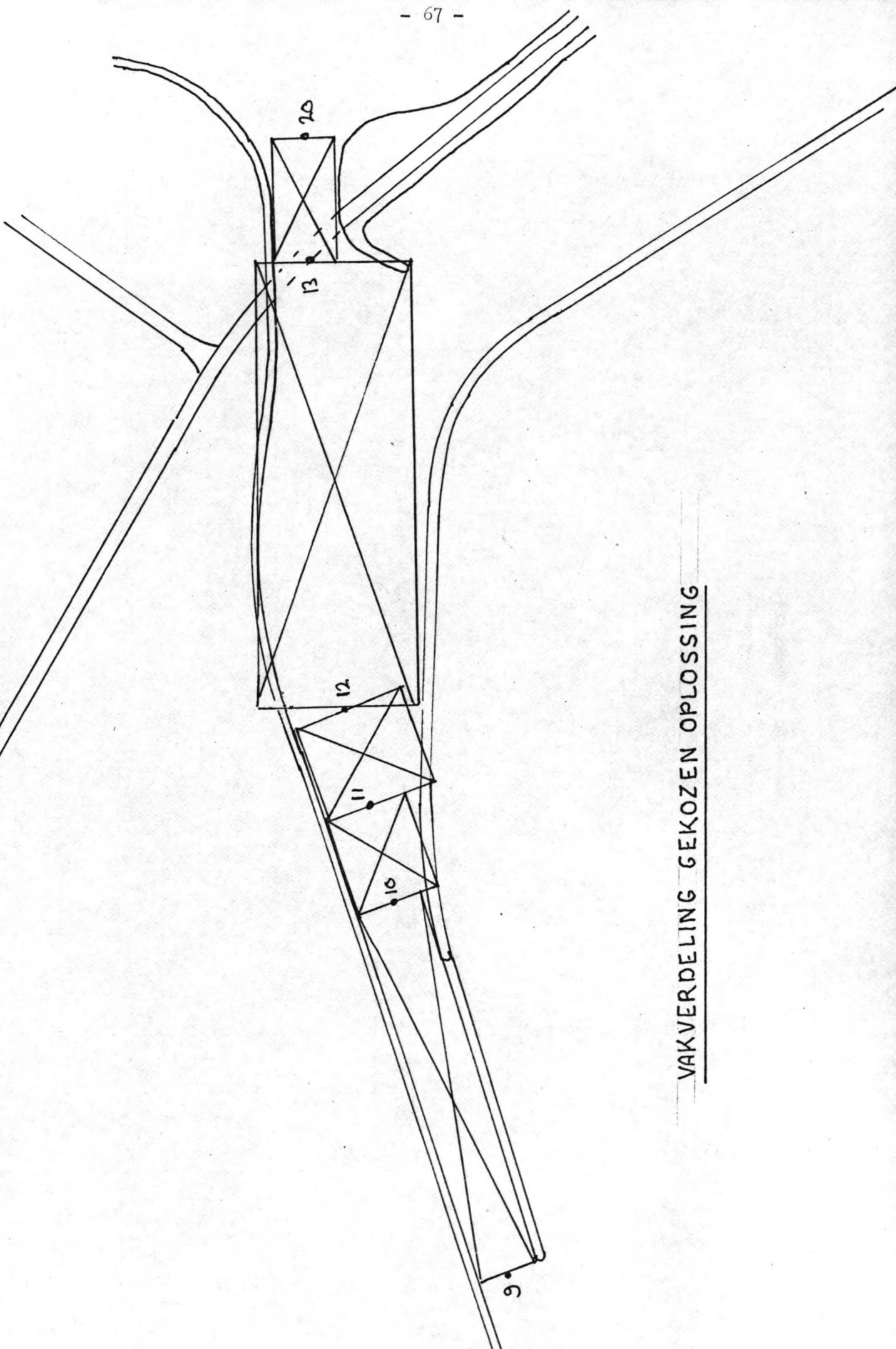
$W = 20 \text{ m/s}$ max. snelheid in de geul $2,20 \text{ m/s}$

Voor de windsnelheid van 20 m/s overschrijdt de snelheid in de geul het criterium. Hier bij is echter de vertraging nog niet in rekening gebracht.

Correctie stroomsnelheid:

Dit kan door de geulfactor g^x te bepalen en deze met het vertragings verlies te corrigeren.

De grootste stroomsnelheid treedt op ^{uur} tweede aanvang van de storm. De volgende waarden voor h en v volgen uit de berekening op dit tijdstip.



vakgrensnr.	waterpeil	V_2	V_1
9	0,34m	0,14	1,68 m/s
10	-0,16m	1,95	1,49 m/s
11	-0,23m	1,52	1,04 m/s
12	-0,25m	1,03	0,71 m/s
13	-0,29m	0,72	2,03 m/s
20	-0,50m	2,17	0,28 m/s
<hr/>			
		h=0,84 m	

V_2 snelheid voorliggende vak.

V_1 snelheid volgende vak.

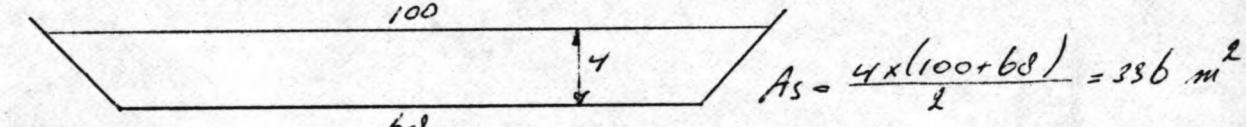
$$Q = 626 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\text{Vertragings verlies is } (2,17 - 0,28)^2 / 19,8 = 0,18 \text{ m t.p.v. 20}$$

De geulfactor zonder vertragingsverlies is nu:

$$g^* = \frac{Q}{\sqrt{A H}} = \frac{626}{\sqrt{0,84}} = 681 \quad \text{dit is gelijk aan: } \frac{A_s}{\sqrt{C_R}}$$

A_s is niet constant in de geul, maar de smalle delen dragen in hoofdzaak bij tot het verval. Voor A_s wordt dus het oppervlak van het dwarsprofiel in het smalle deel genomen.



Dan is

$$As / \sqrt{C_R} = 681 \quad C_R = \frac{As}{681^2} = 0,24 \text{ m}^2$$

Met vertraging wordt g^* nu

$$g^* = As / \sqrt{C_R + \frac{L}{g}} = 681 / \sqrt{0,24 + 0,05} = 629 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$$

Middels de grafiek is nu te berekenen dat $Q=580 \text{ m}^3/\text{s}$ en $h=0,80 \text{ m}$

$$V_{\max} = \frac{580}{625} \times 2,17 = 2,00 \text{ m/s} \quad \text{Voldoet dus aan het criterium.}$$

8.1. Evaluatie deel B (opwaaiingsberekening)

Conclusies voor het ontwerp:

Om aan de gestelde criteria te kunnen voldoen moet de havendam met 550 meter verlengd worden en het gedeelte smaller dan 150 meter bestort worden met stenen rond 20 cm.

Het niet verlengen van de havendam en het bestorten van het brede middengedeelte bleek weinig zinvol. Het werkt nauwelijks op het reduceren van de stroom.

Invloeden van de vorm van de geul:

Breedte: Vereist is minimaal 100 m. Het verbreden tot 150 m kan de lengte van de leidammen met bijna de helft bekorten.

Diepte: Dit heeft nauwelijks invloed op het reduceren van de stroomsnelheid.

Bestorting: Het wel of niet bestorten van het smalle gedeelte heeft een invloed op de stroomsnelheid van ongeveer 10 %.

Windsnelheid: Gebleken is dat de max. stroomsnelheid in de geul ongeveer recht evenredig is met de max. windsnelheid. Bijv:

$$V_{\text{windmax.}} = 20 \text{ m/s} \quad V_{\text{stroommax.}} = 2 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{windmax.}} = 10 \text{ m/s} \quad V_{\text{stroommax.}} = 1 \text{ m/s}$$

8.2. Definitief ontwerp

8.2.1. Inleiding

Voor het definitief ontwerp is oplossing 6 en 8 uit de schetsontwerpen gecombineerd. Deze voldoet zowel stromingstechnisch als scheepvaartverkeerstechnisch aan de gestelde eisen. In het definitieve ontwerp worden alleende gedeelten ter plaatse van het kunstwerk en van de weerstandsgeul (verlengde havendam) van een bodemscherming voorzien. Een bestorting van het brede gedeelte heeft weinig invloed op de stroomsnelheid c.q. op het overwinnen van het verval. Door dit gedeelte niet te bestorten zal hier ter plaatse ontgronding plaats vinden. T.g.v. deze ontgronding wordt het dwarsprofiel vergroot met als gevolg dat de stroomsnelheden lager zijn. Behalve de kosten besparing, die het niet bestorten met zich mee brengt, is deze oplossing tevens gunstig voor de scheepvaart. De verbreding van het profiel ter plaatse waar de scheepvaart afslaat naar Harderwijk is ongeveer twee maal de breedte van de weerstandsgeul, de diepte hier is (evenwichts diepte) bijna tweemaal de diepte van de geul. Het oppervlak van het dwarsprofiel is viermaal zo groot als die ter plaatse van de geul, de stroomsnelheden zullen dus $\pm \frac{1}{4}$ zijn van die welke optreden in de geul (in de meest gunstige situatie). De stroming in de geul is in de extreme situatie wanneer alleen nog beroepsvaarders varen, berekend op 2m/sec snelheid ter plaatse waar moet worden afgeslagen naar de haven is dus 0.5 m/sec. Een gemiddelde van de hier optredende snelheden zal liggen tussen 0.1 en 0.3 m/sec. De snelheidsgradiënt tussen het stilstaande en stromende water is dus acceptabel voor het verkeer dat de haven in en uit vaart. De breedte van de opening is echter zodanig dat er een redelijke koerscorrectie mogelijk is. Aan te bevelen is een waarschuwingssbord aan te brengen, waarop aangegeven staat dat er bij harde wind hoge stroomsnelheden verwacht kunnen worden. Hierbij kan ook gedacht worden aan een automatisch waarschuwingssysteem dat reageert op hogere stroomsnelheden in de opening.

8.2.2. De dimensionering van het ontwerp

- De lengte van de geul is berekend in deel-B. Hieruit volgt dat de havendam met 550 m moet worden verlengd om aan de gestelde criteria met betrekking tot toelaatbare stroomsnelheid te voldoen.
- De geul breedte wordt zoals in deel-A is berekend op 100 m gehouden.
- De diepte van de geul wordt 4.00 m N.A.P. en is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:
 - 1) laagste te verwachten peil
 - 2) de diepgang van het schip
 - 3) de retourstroom
 - 4) vrije diepte onder het schip

ad 1. Uit deel-B volgt het laagste te verwachten peil, d.i.

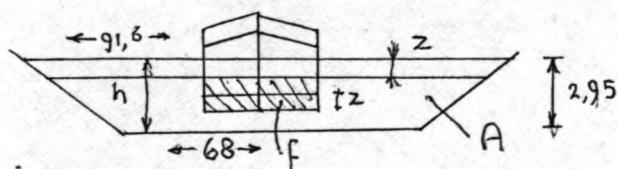
$$N.A.P. -1.05 \text{ m}$$

ad.2. Het grootste te verwachten schip is een Kempenaar met een maximum diepgang van 2.35 m.

ad 3. Deze is bepaald aan de hand van grafieken voor spiegeldaling en retourstroom in "Scheepvaartkanalen" door ir.A. Zanen.

Laagste te verwachten peil treedt op bij een plotseling opstekende wind met een windsnelheid van 20 m/sec. Dit peil is N.A.P.-1.05 m.

Het natte dwarsprofiel is;

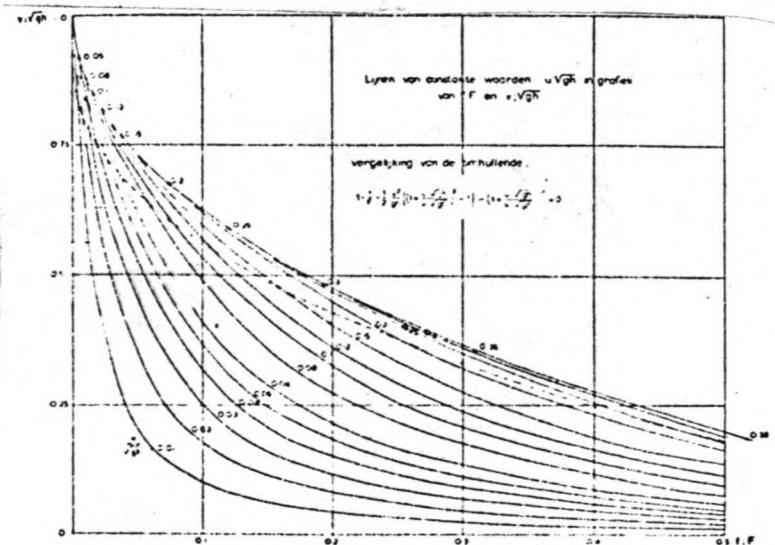
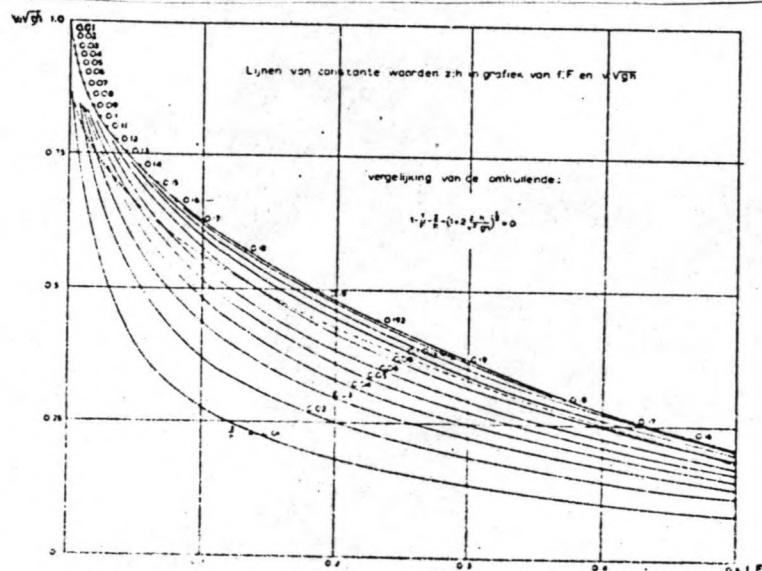
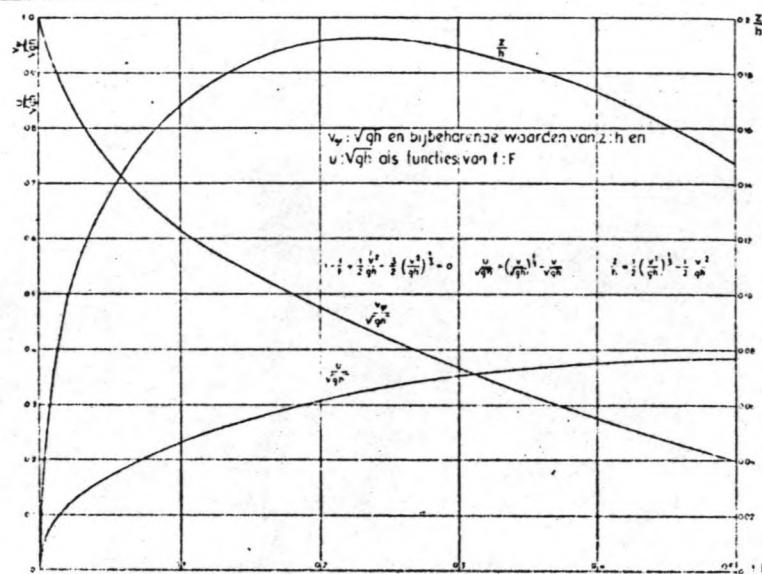


$$\begin{aligned} A &= 2.95 \times 1/2(68 + 91.6) \\ &= 235 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kempenaar;} \quad b &= 6.60 \text{ m} & f &= 15.5 \text{ m}^2 \\ d &= 2.35 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\frac{f}{A} = \frac{15.5}{235} = 0.066 \quad \text{grafiek} \quad \frac{v_{gr}}{\sqrt{gh}} = 0.7$$

$$\sqrt{gh} = 9.8 \times 2.95 = 5.4 \text{ m/sec.}$$



$$v_{gr} = 0.7 \times 5.37 = 3.76 \text{ m/s}$$

$$v_{max} = 0.8 \text{ à } 0.9 v_{gr}$$

$$v_{max} = 0.8 \text{ à } 0.9 \times 3.76 = 3 \text{ à } 4 \text{ m/s}$$

$$\sqrt{\frac{v}{gh}} = \frac{3 \text{ à } 3.4}{5.37} = 0.56 \text{ à } 0.63 \quad \text{grafiek} \quad \frac{z}{h} = 0.035 \text{ à } 0.055$$

$$z = 2.95 \times (0.035 \text{ à } 0.055) = 0.10 \text{ à } 0.16 \text{ m}$$

De retourstroom is volgens de grafiek:

$$\frac{f}{A} = 0.66 \quad \frac{u}{\sqrt{gh}} = 0.07 \text{ à } 0.10$$

$$u = (0.07 \text{ à } 0.10) \times 5.37 = 0.4 \text{ à } 0.5 \text{ m/s.}$$

- ad 4. Wordt de geuldiepte op N.A.P. - 4.00 m aangenomen dan blijft er voor de vrije ruimte onder het schip over:

$$4.00 - 1.05 - 2.35 - 0.15 = 0.45 \text{ m}$$

Dit is acceptabel daar dit alleen in extrema situaties voorkomt.

- De bodembestorting: In 6.2.4. is uitgegaan van een steenbestorting met een diameter van 30 cm voor het berekenen van de stroomsnelheid waarbij het begin van de beweging optreedt. In deel-B is echter gerekend met een steenbestorting van rond 20 cm. Een diameter (k-waarde) van 30 cm zou met betrekking tot de gemiddelde optredende stroomsnelheid in de geul onjuist gekozen zijn. Bij langzaam stromend water zal zich in de geul sediment afzetten, waardoor de grove bodemstructuur in de geul zou verdichten, met als gevolg dat de k-waarde in de normale toestand kleiner zou zijn dan in de berekende toestand. De optredende stroomsnelheden zouden daardoor groter zijn dan de berekende. Door nu met een kleinere k-waarde te rekenen, zoals in deel-B is gebeurd, wordt een betere benadering van de situatie verkregen. Bij lage stroomsnelheden en hoge dichtslibbing zal de k-waarde kleiner worden, dus de snelheden iets groter dan de berekende. Bij hogere stroomsnelheden en hoge dichtslibbing treedt volledige uitschuring op waardoor een groter k-waarde onstaat, dit reduceert dan weer de stroomsnelheid, welke dan kleiner worden als de berekende. Deze verschillen tussen de werkelijke waarde en de berekende liggen in de orde van grootte van 7 %.

8.2.3. Constructieve toelichting

Op de bijgaande tekeningen is de constructieve uitwerking weer-gegeven. De bestaande havendam wordt verlengd. Deze dam bestaat uit een zand lichaam met bekleding. De hoogte van deze dam is 1.60 + N.A.P., waarbij uitgegaan is van de hoogste waterstand tengevolge van opwaaiing, deze is 0.60 + N.A.P. + een overhoogte van 1.00 m. Op de dam is een rijstrook aangebracht i.v.m. even-tueel onderhoud voor deze en voor de bebakening. Het einde van de dam is verbreed uitgevoerd om een betere stroomgeleiding te ver-krijgen tevens is hierdoor een keermogelijkheid ontstaan voor een voertuig en plaatsings mogelijkheid voor bebakening. De dijk is afgewerkt met een steenbekleding (gezet op grind) en een damwand waartegen het kraagstuk is gezet. Voor de plasberm is een breedte van 3.00 m genomen. De kraagstukken zijn op sommige plaatsen lang genomen om eventueel bij uitschuring mee te kunnen zakken.. met de bodem. De kraagstukken en de zinkstukken in de geul hebben een basis van zanddicht nylon weefsel waarop de constructie is opge-bouwd. De zinkstukken hebben afmetingen van 20 bij 30 meter, welke maat echter niet vast ligt.

Bij de in- en uitstroom openingen van de geul zijn eveneens mee-buigende zinkstukken aangebracht, daar hier sterke ontgrondingen te verwachten zijn.

Voor de tunneldekking is 1,50 m genomen voor de spreiding van de druk voor het geval er een schip vastloopt of zinkt in de geul.

Aan het kunstwerk is een dam gebouwd voor een betere stroomgelei-ding. Deze dam is recht aangegeven, een stromingsmodel zal uit-moeten wijzen of deze vorm voldoet of dat deze een ander model moet hebben. De instroomopening aan de noordzijde van het kunst-werk is symmetrisch ontworpen om contractie van de stroming zo-veel mogelijk tegen te gaan.

8.2.4. Toetsing criteria en randvoorwaarden

Gezien de onbeperkte doorvaart en de dimensionering is ruim voldaan aan de gevraagde capaciteit.

Daar de geul zo dicht mogelijk bij de polder is gemaakt en zoveel mogelijk is uitgegaan van de bestaande situatie verandert er betrek op de visuele aspecten weinig. Het huidige kunstwerk vervalt en er komt een opening voor in de plaats. De aansluitende wegen worden iets breder en de verlenging van de geul valt niet op tegen de achtergrond van de dijk.

De bestaande vaargeul sluit goed aan op de nieuwe situatie, wat extra kosten bespaart betreffende het baggerwerk.

De bereikbaarheid en de veiligheid van de havens is in deze situatie optimaal.

Aan de gestelde normen betreffende de stroomsnelheden is m.b.v. de in deel-B gedane berekening voldaan, evenals de criteria m.b.t. de diepte, lengte, breedte en bodembescherming.

Voor de stroomrichting en optredende turbulenties zou van het ontwerp een model gemaakt moeten worden voor een eventuele verfijning.

Aan optredende ontgronding is gedacht door op de plaatsen waar dit plaats zou kunnen vinden meebuigende zink- of kraagstukken neer te leggen.

Aan de criteria betreffende de windsnelheid en de relatie windsnelheid-scheepvaart, hierover is reeds uitgevoerig gesproken in deel-A, is ook voldaan.

9. EVALUATIE

Bij de uitwerking van de criteria en randvoorwaarden is gesteld dat het voor een zeilboot nog mogelijk moet zijn om bij windkracht vijf volgens Beaufort nog door de weerstandsgeul te komen tegen de stroom in, daar er bij deze weersgesteldheid aangenomen mag worden dat er nog gezeild wordt. Tevens is berekend hoeveel maal deze situatie gemiddeld per jaar overschreden wordt. Het ontwerp is gebaseerd op deze waarden.

Dit wil echter niet zeggen dat er boven windkracht 5 niet meer gezeild kan worden vanwege te hoge stroomsnelheden in de geul. Ook het feit dat er beneden windkracht 5 de stroomsnelheden in de geul zo laag zijn dat er altijd gevaren kan worden is zeer discussiebaar. Het geheel hangt af van het verloop van de wind in de tijd. Steekt een wind snel op, ongeveer in een uur tijd, tot de schaal 5 van Beaufort dan zal aan bovengestelde criteria zijn voldaan en kan een zeilboot met deze windsnelheid door de weerstandsgeul komen. Na enkele uren zal de stroming in de geul verminderen daar het watertransport door de geul afneemt vanwege het bijna ingestelde verhang over de twee meren. Neemt de windsnelheid daarna toe van 5 naar 7 dan zal de stroom weer op gang komen, echter niet in die mate als van 0 naar 5. Met andere woorden neemt de windkracht zo langzaam toe dat de meren gelegenheid krijgen in elkaar over te stromen dan zullen de stroomsnelheden in de geul nooit van die grootte worden dat er niet in gezeild kan worden.

Beneden windkracht 5 is het mogelijk dat zeilboten toch niet door de geul kunnen varen. Staat er gedurende enkele uren een wind met windkracht 5 zo, dat zich een verhang over de meren ingesteld heeft en valt daarna de windsnelheid terug naar windsnelheid 2, dan zal er een terugstroming plaats vinden die ongeveer gelijk is als gevolg van windsnelheid 3. De heersende windkracht is echter 2, de zeilboot zal dus niet door de geul komen.

Uit 6.1. is gebleken dat wanneer de geul breder gemaakt wordt deze ook korter kan worden. In dit ontwerp is er van uitgegaan dat de geul i.v.m. de tunnel kosten zo smal mogelijk gehouden moet worden. Een nadere optimalisatie is echter zeer gewenst, waarbij de tunnelkosten afgewogen moeten worden tegen de kosten van de geul.

De open verbinding tussen de meren zal bij opwaaiing een extra peilverhoging bij Elburg veroorzaken. Deze extra verhoging zal ongeveer 15 % bedragen van de huidige bij opwaaiing. Bij een langdurig aanhoudende storm met een windsnelheid van 20 m/s zal de waterstandsverhoging bij Elburg 1.15 m zijn i.p.v. 1.00m. Ditzelfde geldt voor de Roggebotsluis. Dijkverhoging is hier dus niet noodzakelijk.

