

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

duwvaartsluizen in de Philipsdam

translatiegolfberekeningen kanaal Slaak

verslag onderzoek

R 1225 - II

december 1978

duwvaartsluizen in de Philipsdam

translatiegolfberekeningen kanaal Slaak

verslag onderzoek

R 1225 - II

december 1978

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Lijst van symbolen

<u>1. Inleiding</u>	1
1.1 Opdracht	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Samenvatting en konklusies	3
1.4 Gebruikte notaties	8
<u>2. Het wiskundig rekenmodel</u>	9
2.1 Het rekenmodel ten opzichte van vroeger uitgevoerde handbe- rekeningen	9
2.2 De werking van het rekenprogramma	10
2.3 Schematisering	14
2.4 Randvoorwaarden	18
<u>3. Gevoeligheidsonderzoek</u>	22
3.1 Schema totale model	22
3.2 Schematisatie riool	24
<u>4. Verifikatie van de handberekeningen</u>	33
4.1 Situatie	33
4.2 Resultaten en konklusies	34
<u>5. Onderzoek van de ontwerpsituatie</u>	37
5.1 Aanpassingen in vormgeving	37
5.2 Verschillende begin- en randvoorwaarden	43
5.3 Doorslingeren kolkwaterstand	48
5.4 Invloed verondieping Slaak en kanaal Slaak	50

INHOUD (vervolg)

LITERATUURLIJST

TABELLEN

FIGUREN

BIJLAGEN

BIJLAGE I Schematisatie riool

BIJLAGE II Vergelijking formules voor een open en gesloten leiding

LIJST VAN FIGUREN

1. Situatie volgens RWS tek. C6 76.10332
2. Schematisatie van het rekenmodel
3. Schematisatie kanaal Slaak
4. Geschematiseerde dwarsprofielen kanaal Slaak
5. Schuifverliescoëfficiënt als functie van schuifopening/rioolhoogte
6. Waterstanden, behorende bij proefberekening P1
7. Waterstanden, behorende bij proefberekening P2, waarin verhoogde weerstand in de takken in rekening is gebracht
8. Waterstanden, behorende bij proefberekening P3, waarin kortsluitingen tussen de takken op het Zijpe zijn aangebracht
9. Waterstanden, behorende bij proefberekening P4, waarin de bergende breedte van het riool (breedte standpijp) is gehalveerd
10. Waterstanden, behorende bij proefberekening P5, waarin de bergende breedte van het riool (breedte standpijp) tot een kwart van de oorspronkelijke breedte is teruggebracht
11. $Q(t)$ en $h(t)$ lijnen, behorende bij proefberekening P6, welke is uitgevoerd met het rekenprogramma VLKOLK
12. $Q(t)$ en $h(t)$ lijnen, behorende bij de proefberekeningen P6 en P7
13. $Q(t)$ en $h(t)$ lijnen, behorende bij de proefberekeningen P6 en P8
14. Waterstanden, behorende bij berekening S1; situatie volgens figuur T8 met als wijziging een vertikaal talud en een langzaam oplopende bodemhelling op het smalle kanaalgedeelte
15. Waterstanden, behorende bij berekening S2; situatie volgens figuur T8
16. Waterstanden, behorende bij berekening S3; situatie volgens figuur T8 met als wijziging een vertikaal talud op het smalle kanaalgedeelte
17. Waterstanden, behorende bij berekening S4; situatie volgens figuur T8 met als wijziging een vertikaal talud op het smalle kanaalgedeelte en de bodembreedte van het brede deel versmald tot 120 m
18. Waterstanden kanaal Slaak, behorende bij berekening S1 en S2
19. Waterstanden kanaal Slaak, behorende bij berekening S3 en S4
20. Waterstanden, behorende bij berekening S5; situatie volgens figuur T9

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

met als wijziging een horizontale bodem (NAP ÷ 8,00 m) van de uitstroomkonstruktie

21. Waterstand kolk en debiet per riool, behorende bij berekening S5
22. Waterstanden kanaal Slaak en debiet mond voorhaven, behorende bij berekening S5
23. Waterstanden, behorende bij berekening S5A
24. Effekt lengte smalle kanaalgedeelte op waterstanden; behorende bij berekening S5, S6 en S7
25. Effekt breedte kanaal Slaak op waterstanden; behorende bij berekening S5, S8 en S9
26. Waterstanden, behorende bij berekening S10; situatie volgens figuur T9
27. Waterstanden, behorende bij berekening S11 waarbij nivelleren plaatsvindt van kolk II
28. Waterstand kolk en debiet per riool, behorende bij berekening S5 en S11
29. Waterstanden, behorende bij berekening S12A, met getij op de afbreekrand (zonder nivelleren)
30. Waterstanden, behorende bij berekening S12, waarbij naast het nivelleren de getijbeweging in rekening is gebracht
31. Waterstanden, behorende bij berekening S13, waarbij nivelleren plaatsvindt in de vloedfase
32. Waterstand kolk en debiet per riool, behorende bij berekening S13
33. Waterstanden kanaal Slaak en debiet mond voorhaven, behorende bij berekening S13
34. Opgelegd debiet bij begin kanaal Slaak, behorende bij berekening S14
35. Waterstanden, behorende bij berekening S14
36. Waterstanden kanaal Slaak en debiet mond voorhaven, behorende bij berekening S14
37. Effekt doorslingeren kolkwaterstand op waterstanden; behorende bij berekening S5 en S14
38. Waterstanden, behorende bij berekening S5
39. Waterstanden, behorende bij berekening S15; bodem gebied I (figuur 1)

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

op NAP \div 5,00 m

40. Waterstanden, behorende bij berekening S16; gebied I geheel afgedamd
41. Waterstanden, behorende bij berekening S17; bodem gebied I en III op NAP \div 5,00 m
42. Waterstanden, behorende bij berekening S18; bodem gebied I, II en III op NAP \div 5,00 m
43. Waterstanden, behorende bij berekening S19; bodem gebied I, II en III op NAP \div 3,00 m

LIJST VAN TABELLEN

1. Gegevens geschematiseerde kanaalvakken
2. Schuifverliescoëfficiënt als functie van d/D
3. Uitgevoerde berekeningen
4. Beginvoorwaarden voor berekeningsvariant S12

LIJST VAN SYMBOLEN

A	natte doorsnede (leidingdoorsnede)	m^2
b	bergende breedte; breedte aan de waterspiegel	m
B_1	breedte aan de waterspiegel op het smalle kanaalgedeelte bij waterstand NAP \div 2,00 m	m
B_2	breedte aan de waterspiegel op het brede kanaalgedeelte bij waterstand NAP \div 2,00 m	m
c_{dr}	voortplantingssnelheid drukgolf in gesloten leiding	m/s
c_{tr}	voortplantingssnelheid translatiegolf	m/s
C	Chézy-koëfficiënt ($18 \log 12 R/k$)	$m^{1/2}/s$
D	afmeting één zijde van het vierkante doorstromingsprofiel	m
e	wanddikte van de leiding	m
E	traagheidscoëfficiënt ($L/g A$)	s^2/m^2
E'	elasticiteitsmodulus van het leidingmateriaal	N/m^2
F	bergend oppervlak van de aangrenzende halve takken 0,5 ($F_j + F_{j+1}$)	m^2
$f(A)$	stijfheidsparameter, afhankelijk van de vorm van de leidingdoorsnede	N/m^2
Fr^2	Froude-getal in het kwadraat ($Q^2 b/gA^3$)	-
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
h	waterstand	m
h_0	waterstand in ongestoorde toestand	m
h_1	waterstand kolk	m
h_2	waterstand buitenwater	m
\hat{h}_{max}	maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste positieve golf	m
\hat{h}_{min}	maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste negatieve golf	m
h_{gem}	gemiddelde waterdiepte	m

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

Δh	waterstandsverschillen door wind	m
ΔH	drukverlies	m
I	bodemhelling	-
k	Nikuradse ruwheidsmaat (= ϕ zandkorrel)	m
K	kompressiemodulus van water	N/m ²
L	taklengte	m
L_s	maatgevende strijklengte	m
O_1	halve kolkoppervlak	m ²
O_2	oppervlak van het buitenwater	m ²
p	druk	N/m ²
p_n	piëzometrisch niveau	m
Q	debiet	m ³ /s
Q_o	debiet in ongestoorde toestand	m ³ /s
\hat{Q}_{max}	maximaal debiet tijdens nivelleren	m ³ /s
\hat{Q}_{min}	maximaal debiet tengevolge van het doorslingeren van de kolkwaterstand	m ³ /s
dQ/dt	versnelling van het debiet	m ³ /s ²
R	hydraulische straal	m
t	tijd	s
Δt	tijdstapgrootte van het rekenprogramma	s
v	snelheid van het water in de leiding	m/s
dv/dt	versnelling van het water	m/s ²
w	windsnelheid	m/s
x	plaatscoördinaat	m
α	helling talud smalle kanaalgedeelte; kanaal Slaak	-
α'	schuifspanningscoëfficiënt	-
η	translatiegolfhoogte	m
d η /dt	toename van de translatiegolfhoogte	m/s

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

θ	rekenniveau van het rekenprogramma	-
ξ	wrijvingscoëfficiënt ($L/C^2 A^2 R$)	s^2/m^5
ξ_r	weerstand riool (niet aangegroeid)	-
ξ_{schuif}	schuifverliescoëfficiënt	-
$\xi_{\text{ingevoerd}}$	ingevoerde schuifverliescoëfficiënt	s^2/m^5
ρ	soortgelijke massa van het water	kg/m^3
τ	periode van de randvoorwaarde	s

1. Inleiding

1.1 Opdracht

Op de werkbespreking van 21 september 1976 te Bergen op Zoom gaf de hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht om na te gaan of binnen een gebruikelijk tijdsbestek gelijkwater kan worden gemaakt tussen de schutkolk en de zoute voorhaven van de Philipsdamsluizen.

De eerste berekeningen toonden aan dat er bij het gelijkwater maken problemen konden ontstaan als gevolg van translatiegolven. Dit leidde er toe dat de opdracht in de loop van het onderzoek werd uitgebreid en dat het effect van een aantal maatregelen ter verkleining van deze translatiegolven werd onderzocht. Deze maatregelen betroffen de vormgeving van het kanaal Slaak. Dit geheel is beschreven in het verslag R 1225 deel I "Philipsdamsluizen - translatiegolfberekeningen kanaal Slaak", dat in mei 1977 werd uitgebracht.

Aangezien de berekeningen in deel I bestonden uit een aantal handberekeningen, waarin alleen het kanaal Slaak was opgenomen, werd besloten om de resultaten van het onderzoek te verifiëren met behulp van een wiskundig rekenmodel. Dit rekenmodel geeft niet alleen een nauwkeuriger beschrijving van de hydraulische condities, maar biedt tevens de mogelijkheid tot uitbreiding van het te beschouwen gebied.

Het onderhavige verslag behandelt de resultaten van de berekeningen met het wiskundig rekenmodel.

De opzet van het rekenmodel is verricht in samenwerking met de wiskunde afdeling van het Waterloopkundig Laboratorium in de Voorst, waarbij de berekeningen zijn uitgevoerd in de periode van maart tot december 1977 door ir. R.G. Haas, die tevens dit verslag heeft samengesteld.

1.2 Probleemstelling

In de toekomstige Philipsdam, welke een scheiding vormt tussen de Oosterschelde (zout) en het Zoommeer (zoet) komt een sluizencomplex bestaande uit twee duwvaartsluizen en een jachtensluis.

De werking van het zout/zoet bestrijdingssysteem van de duwvaartsluizen is

gebaseerd op het gebruik van een tweetal bekkens, een hoog en een laag bekken, waarvan de peilen in een vaste verhouding staan tot de waterstand van het Zoommeer. Om tussen de kolk en de zoute voorhaven een gelijke waterstand te krijgen (nodig om de deuren daarna zonder verval te openen) zijn verbindingsriolen tussen kolk en buitenwater aangebracht.

Deze verbindingsriolen monden echter niet uit in de voorhaven, maar in een afleidingskanaal, in dit verslag "kanaal Slaak" geheten, dat tussen de beide bekkens doorloopt en via het Slaak in open verbinding staat met de voorhaven (figuur 1).

Het uitmondingspunt in het kanaal Slaak wordt doorlaatwerk genoemd.

Na iedere schutting vanaf het zoete pand naar het zoute pand dient er gelijkwater te worden gemaakt tussen schutkolk en zoute voorhaven.

Daarbij doen zich de volgende problemen voor:

1. Door de aanwezigheid van de verbindingsriolen schiet de kolkwaterstand door als gevolg van de traagheid van het water in deze riolen. Hierdoor ontstaat een langzaam uitdempend slingerverschijnsel. Maatregelen hier tegen hebben vooral betrekking op manipulatie met de rioolschuiven. In dit rapport zal hierop slechts zijdelings (voor zover er verband bestaat met de optredende translatiegolven) worden ingegaan.
2. In het hiervoor beschreven systeem wordt er primair gelijkwater gemaakt tussen schutkolk en kanaal Slaak. Indien er momentane waterstandsverschillen optreden tussen de zoute voorhaven en het doorlaatwerk, dan kan het voorkomen dat, alhoewel er gelijkwater is gemaakt tussen schutkolk en kanaal Slaak, er over de sluisdeuren nog een ontoelaatbaar verval aanwezig is. Bij het openen van de deuren kunnen dan in de kolk te sterke translatiegolven ontstaan.

Als mogelijke oorzaken van deze momentane waterstandsverschillen tussen doorlaatwerk en zoute voorhaven kunnen genoemd worden: - translatiegolven

- getij (seiches)

- wind

Daarbij dient te worden aangetekend dat translatiegolven op het kanaal Slaak opzich toelaatbaar kunnen zijn, maar dat het effect ervan op de momentane waterstanden van voorhaven en sluis kolk ontoelaatbaar is.

Verder kunnen er waterstandsvariatiën worden veroorzaakt in de vorm van seiches. Op dit verschijnsel wordt hier niet ingegaan, er wordt slechts gekeken naar de beïnvloeding van de translatiegolven door het getij.

Het nagaan van de kans van optreden van seiches, alsmede een juiste afschatting van de waterstandsvariatiës die hierdoor veroorzaakt worden, vergt een verdergaand onderzoek, welke niet direkt is in te passen in deze studie. In R 1225 deel I is verder al afgeleid dat de gevolgen van wind in de normale situatie verwaarloosbaar zijn, zodat hierop niet verder wordt ingegaan. Wel is nog gekeken naar de gevolgen van wind in geval van verondieping van het Slaak en kanaal Slaak.

1.3 Samenvatting en konklusies

Dit verslag vormt een voortzetting van het rapport "Translatiegolfberekeningen kanaal Slaak". R 1225-I.

De berekeningen zijn uitgevoerd met een wiskundig model, dat is gebaseerd op de vergelijkingen voor een open leiding. De twee riolen (dus gesloten leidingen) tussen kolk en kanaal Slaak zijn daarbij via een speciale schematisatie in het rekenmodel opgenomen. In verband hiermee zijn in hoofdstuk 3 een aantal proefberekeningen weergegeven, waarbij wordt ingegaan op de te behalen nauwkeurigheid bij toepassing van deze schematisatie.

Het gebied waarover het model zich uitstrekt bestaat uit kanaal Slaak, Slaak, Zijpe en de voorhaven. De getijbeweging is niet in rekening gebracht. Het nivelleren is ten opzichte van de getijperiode een dermate kort verschijnsel dat voor de periode, waarin het nivelleren plaatsvindt, mag worden uitgegaan van een konstante waterstand. Uitgangspunt hierbij vormt de aanname dat, voor een willekeurige situatie, het totale golfbeeld (getij + translatiegolf) kan worden verkregen door superpositie van de afzonderlijke golfbeelden; hetgeen in paragraaf 5.2 met berekeningsvariant S12 wordt aangetoond. Bij de berekeningen is uitgegaan van de werking van één sluiskolk, maar wel in de meest ongunstige situatie, de ebfase, met een verval tussen kolk en buitenwater van 2,00 m.

In het geval dat er twee sluizen tegelijk werken, of dat er andere debieten per sluis aanwezig zijn (kleiner verval door hogere waterstand in kanaal Slaak), moet bedacht worden dat de translatiegolfhoogte nagenoeg lineair is met het debiet.

Verder geldt dat de golfhoogte zal afnemen bij een grotere waterdiepte (dus bij een hogere waterstand in kanaal Slaak).

Uitgaande van een gegeven schuifprogramma (heffen van de rioolschuiven ter plaatse van het doorlaatwerk met een konstante hefsnelheid van 2 cm/sec) wordt de hoogte van de translatiegolven mede bepaald door de vormgeving

van kanaal Slaak.

Samenvattend kan uit de berekeningen het volgende worden gekonkludeerd; hierbij is uitgegaan van een konstante buitenwaterstand tijdens nivelleren:

1. De waterstandsvariatiës in de zoute voorhaven (max. 0,6 cm) zijn dermate klein dat voor het gelijkwaterkriterium, wat betreft de momentane waterstandsverschillen tussen voorhaven en kanaal Slaak, de translatiegolven in kanaal Slaak maatgevend zullen zijn. Met de translatiegolfberekeningen is daarom gezocht naar verlaging van deze golven door aanpassingen in de vormgeving van het kanaal Slaak.
2. De onder deze omstandigheden maximaal voorkomende stroomsnelheden in de mond van de voorhaven (0,9 cm/sec) zijn zo klein dat de scheepvaart hiervan geen hinder zal ondervinden.
3. Bij de aanvankelijke vormgeving van kanaal Slaak, volgens de situatie in figuur T8 in paragraaf 4.1 (lengte smalle kanaalgedeelte 200 m), treden er translatiegolven op van + 9,6 cm respektievelijk - 7,9 cm (zie figuur 15).
4. In de situatie volgens figuur T9 in paragraaf 5.1 zijn de golfhoogten gereduceerd tot + 6,7 cm (\hat{h}_{max}) respektievelijk - 5,0 cm (\hat{h}_{min}) (zie figuur T1).

De situatie in figuur T9, die ontleend is aan tekening C6 76.10332 van de Rijkswaterstaat, wordt in dit rapport verder ontwerpsituatie genoemd.

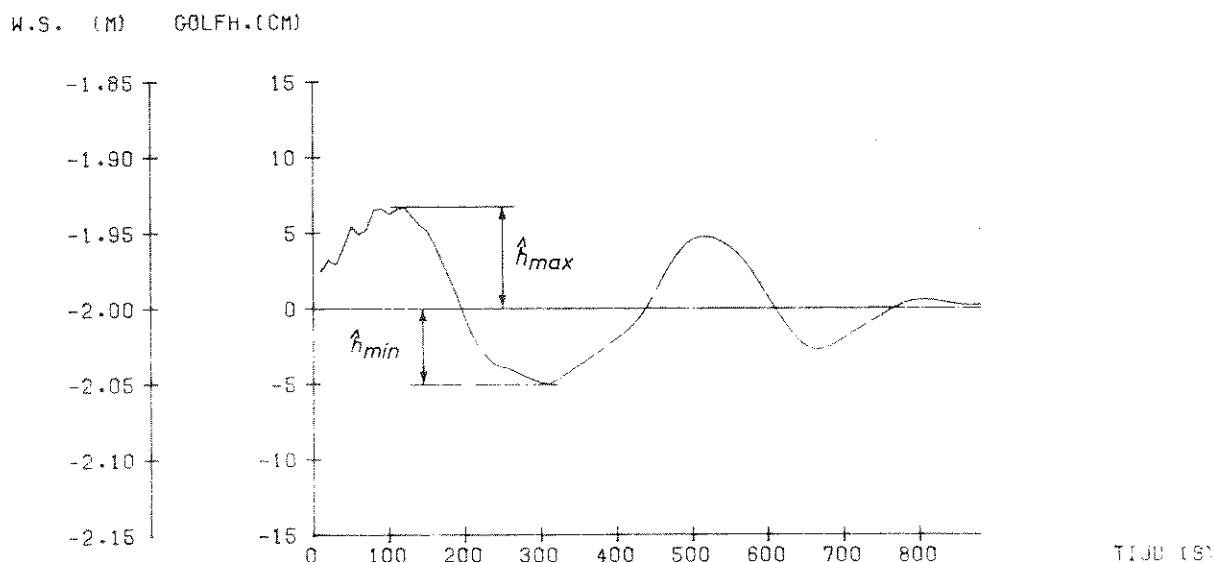


Fig. T1 Translatiegolfhoogten bij doorlaatwerk in ontwerpsituatie

5. Indien nu wordt uitgegaan van het gelijktijdig nivelleren van beide sluiskolken, dan kan grofweg worden uitgegaan van een verdubbeling van het optredende waterstandsverschil tussen voorhaven en doorlaatwerk wat maximaal neerkomt op circa 14 à 16 cm.

Hierbij is dan geen rekening gehouden met eventueel aanwezige lozingen, danwel onttrekkingen; gedacht kan worden aan het lozingsdebiet op kanaal Slaak van overtollig water uit het lage bekken.

Ook eventuele waterstandsverschillen veroorzaakt door het optreden van seiches zijn niet in deze beschouwing opgenomen.

Verder geldt dat het exakt toe te laten waterstandsverschil, dat wordt bepaald door het maximaal toelaatbare verval over de sluisdeur, in het verdere verloop van het onderzoek (met als criterium: troskrachten die ontstaan tijdens het openen van de sluisdeur bij een dergelijk verval) zal dienen te worden vastgesteld.

6. De opbouw van de translatiegolf ter plaatse van het doorlaatwerk kan, aan de hand van figuur T1, als volgt worden gekenschetst:

- Tegelijkertijd met het op gang komen van het debiet vormt zich ter plaatse van het doorlaatwerk een positieve translatiegolf, welke zich voortplant door kanaal Slaak.
- De sprongen in de helling ($d\eta/dt$) van de translatiegolfhoogte ontstaan door heen en weer lopende gereflekteerde golven afkomstig van de overgang van het smalle kanaalgedeelte naar het bredere gedeelte.
- Nadat het debiet zijn maximum waarde heeft bereikt neemt de positieve translatiegolf in hoogte af ($d\eta/dt$ wordt negatief).
- Vrijwel gelijk hiermee beginnen ook de gereflekteerde golven in kanaal Slaak (vooral afkomstig van de overgang kanaal Slaak naar Slaak) een rol te spelen, waardoor er een negatieve translatiegolf ter plaatse van het doorlaatwerk ontstaat.

Voor een uitgebreidere beschrijving van het verloop van de translatiegolven in kanaal Slaak wordt verwezen naar paragraaf 5.1.

7. Ter beoordeling van aanpassingen in de vormgeving van kanaal Slaak zijn de extremen van de eerste positieve (\hat{h}_{\max}) en de eerste negatieve trans-

latiegolf (\hat{h}_{\min}) maatgevend gesteld. De grootte van de eerste negatieve golf is vooral van belang omdat het minimum ca. 5 min na het begin van het openen van de rioolschuiven optreedt, en omstreeks die tijd gelijkwater zou moeten ontstaan (indien het doorslingeren van de kolkwaterstand niet zou plaatsvinden).

8. De lengte van het smalle kanaalgedeelte is een belangrijke parameter voor de grootte van de optredende translatiegolf (zowel positief als negatief) bij het doorlaatwerk. Door de lengte wordt voor een groot deel het tijdstip bepaald waarop de eerste gereflekteerde golf (vanaf de overgang van het smalle naar het brede kanaalgedeelte) bij het doorlaatwerk arriveert; met andere woorden het tijdstip waarop de afvlakking van de translatiegolf begint.
9. De verhouding dwarsprofiel smalle kanaalgedeelte / dwarsprofiel brede kanaalgedeelte is bepalend voor de grootte van de gereflekteerde golven, dus de mate van afvlakking van de translatiegolf bij het doorlaatwerk.
10. Indien het dwarsprofiel van het brede kanaalgedeelte wijzigt, heeft dit, naast het in punt 9 genoemde effect, tevens invloed op de grootte van de gereflekteerde golven bij de mond van kanaal Slaak.
Bij een kanaal breder dan in de ontwerpsituatie, zullen de gereflekteerde golven kleiner worden, met als gevolg een relatief grotere afname in de grootte van de eerste negatieve translatiegolf bij het doorlaatwerk.
11. Een verder uitsmeren van het debiet in de tijd (lagere hefsnelheid van de schuif of grotere traagheid van het riool als gevolg van een grotere lengte), beïnvloedt het translatiegolfverschijnsel gunstig (de positieve translatiegolf houdt langer aan, terwijl de loopsnelheid van de gereflekteerde golven hetzelfde blijft, met als gevolg een kleinere negatieve translatiegolf).
Wel moet bedacht worden dat bij een grotere traagheid van het riool het doorslingeren zal toenemen (maatregelen in verband hiermee moeten echter toch worden overwogen).
12. De waterstandsvariaties bij het doorlaatwerk (als gevolg van de translatiegolven) hebben een ongunstige invloed op het doorslingereffect van de kolkwaterstand (Na een aantal perioden neemt het doorslingeren plotseling weer toe). Indien wordt gezocht naar middelen om dit doorslingeren

te verminderen, respektievelijk te voorkomen, kan gedacht worden aan:

1. Aan het einde van de nivelleerfase vertragen van het debiet door gedeeltelijk dichtsturen van de rioolschuif (deze werkwijze heeft op zich alweer invloed op de grootte van de translatiegolven; zie punt 11). De optredende waterstandsvariatiës blijven dan wel het systeem beïnvloeden.
 2. Aan het einde van de nivelleerfase het geheel dichtsturen van de rioolschuif. De translatiegolven hebben op dat moment geen invloed meer op het gelijkwaterprobleem.
13. Het tegengaan van het doorslingeren van de kolkwaterstand heeft geen grote invloed op de translatiegolven in kanaal Slaak. Weliswaar treedt er een wijziging qua vorm op, maar de optredende golfhoogten blijven in orde van grootte gelijk; er vindt geen snellere uitdemping plaats (zie paragraaf 5.3).
14. In de vloedfase ontstaat er bij een gelijk verval een kleinere translatiegolf, als gevolg van de hogere loopsnelheden van de golven en de grotere bergende breedte van het dwarsprofiel.
15. In geval van verondieping van het Slaak treedt hetzelfde effect op als genoemd in punt 10 (de partiële terugkaatsing tengevolge van de profielverandering bij de mond van kanaal Slaak neemt af, omdat de sprong in de doorsnede kleiner wordt).
Afdamming van een gedeelte van het Slaak (gebied I, figuur 1) zal om dezelfde reden tot een afname leiden van de translatiegolfhoogte ter plaatse van het doorlaatwerk.
16. Verondieping van kanaal Slaak (gebied II, figuur 1) heeft een ongunstige invloed op de translatiegolven. Door de verminderde waterdiepte neemt de loopsnelheid van de golf af (met als gevolg dat er minder afvlakking van de eerste positieve golf plaatsvindt, waardoor deze hoger wordt), terwijl tevens de partiële terugkaatsing bij de mond van kanaal Slaak toeneemt (met als gevolg een grotere negatieve translatiegolf).
17. Bij verondieping van kanaal Slaak zullen de waterstandsverschillen tussen voorhaven en doorlaatwerk, als gevolg van opwaaiing, toenemen.

Halvering van de gemiddelde waterdiepte (tot 3,00 m) leidt tot een verdubbeling van de waterstandsverschillen (0,034 m)

1.4 Gebruikte notaties

De figuren in de tekst zijn aangeduid met het symbool: T met daarachter het nummer; de figuren behorende bij de tekst zijn alleen aangeduid met een nummer. De berekeningen zijn gesplitst in twee delen:

1. Een serie proefberekeningen welke zijn uitgevoerd voor het gevoeligheids-onderzoek. Deze zijn aangeduid met het symbool: P met daarachter het nummer.
2. De uiteindelijke berekeningen die zijn aangeduid met het symbool: S met daarachter het nummer.

Literatuurverwijzingen zijn weergegeven met vierkante haken en de nummers korresponderen met die uit de literatuurlijst.

2. Het wiskundig rekenmodel

2.1 Het rekenmodel ten opzichte van vroeger uitgevoerde handberekeningen

In het rapport "Translatiegolfberekeningen kanaal Slaak, R 1225 deel I", zijn de resultaten van een aantal handberekeningen beschreven, waarbij verschillende aanpassingen in de vormgeving van kanaal Slaak zijn doorgerekend. De handberekeningen werden uitgevoerd met behulp van de zogenaamde bc-methode. Aan het feit dat de berekeningen met de hand werden uitgevoerd, bleken echter een aantal nadelen te zijn verbonden, waardoor de resultaten een te geringe betrouwbaarheid bezaten.

Om hieraan tegemoet te komen is dan ook besloten om gebruik te maken van een wiskundig rekenmodel, dat gebaseerd is op de lange golfbenadering. De verbeteringen van het rekenmodel ten opzichte van de handberekeningen zijn:

- In het rekenmodel wordt de interactie weergegeven tussen de optredende translatiegolven en het debiet. Hiermee wordt het volgende bedoeld: door het verval, tussen de kolk en kanaal Slaak, ontstaat er een debiet, waardoor een translatiegolf wordt gevormd. Deze veroorzaakt een schommeling in het verval met als gevolg dat het debiet weer varieert. Dit terugkoppelingseffekt van de translatiegolf op het debiet is niet in de handberekening verwerkt.

Het effect zal echter pas een belangrijke rol gaan spelen bij kleine verval- len tussen kolk en het kanaal Slaak.

- De wrijving wordt in rekening gebracht, terwijl deze in de handberekeningen is verwaarloosd.
- De schematisatie kan aanzienlijk nauwkeuriger worden opgezet, omdat een groter aantal rekenpunten bij het gebruik van de komputer geen noemenswaardige bezwaren oplevert. Tevens kan het gebied, waarbinnen de invloed van de translatiegolf wordt bepaald, worden uitgebreid zodat ook het Slaak, het Zijpe en de voorhaven in de berekening kunnen worden opgenomen.

Daarentegen is bij de handberekeningen uitgegaan van een vrij sterke schematisatie omdat bij een te groot aantal vakken de berekening te ingewikkeld wordt. Om dezelfde reden is de handberekening beperkt gebleven tot kanaal Slaak.

- Als randvoorwaarden kan het verval tussen de kolk en het buitenwater worden opgegeven, waarbij door het openen van de rioolschuiven volgens een

bepaald programma een realistisch debietverloop ontstaat. Dit in tegenstelling tot de handberekeningen waarbij als randvoorwaarde een geschematiseerd (driehoekig) debietverloop door de riolen is aangebracht.

Alvorens nu wordt ingegaan op de ingevoerde randvoorwaarden en op de schematisatie van het in de berekening opgenomen gebied zal eerst in het kort de werking van het rekenprogramma worden uiteengezet.

2.2 De werking van het rekenprogramma

De voortplanting van translatiegolven in open leidingen volgt uit een één-dimensionale berekening (lange golfbenadering). Bij deze lange golfbenadering zijn de verticale versnellingen verwaarloosd, zodat het drukverloop lineair met de diepte mag worden aangenomen. Verder wordt, omdat het hier een één-dimensionale beschouwing betreft, uitgegaan van over het dwarsprofiel gemiddelde waarden.

Voor de oplossing van de aldus verkregen vergelijkingen kan gebruik worden gemaakt van verschillende rekentechnieken. In het gebruikte rekenprogramma, NEBAS geheten, is dit gedaan door toepassing van de differentiemethode.

Het uitgangspunt wordt gevormd door de normale basisvergelijkingen voor de stroming in een open leiding met vrije waterspiegel:

Kontinuiteitsvergelijking

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

Hierin is:

A = natte doorsnede	m^2	h = waterstand	m
Q = debiet	m^3/s	C = Chézy-koëfficiënt	$m^{1/2}/s$
t = tijd	s	R = hydraulische straal	m
x = plaatscoördinaat	m	g = versnelling van de zwaartekracht	m/s^2

Met behulp van deze vergelijkingen kan de verandering worden bepaald van de toestand in een bepaald punt van een open leiding, onder invloed van de toestand in de naburige punten. Er ontstaat verder een terugkoppeling doordat de verandering van de toestand in dat punt weer de toestand in de naburige punten beïnvloedt. Teneinde dit tot uitdrukking te kunnen brengen wordt in het model de open leiding geschematiseerd tot een netwerk van kanaalvakken. Daarbij worden de waterstand (h) en het debiet (Q) in verschillende punten berekend. De waterstanden worden ter plaatse van de vakgrenzen bepaald en de debieten in de middens van de vakken. Op deze manier ontstaat een netwerk van knooppunten (vakgrenzen), waarin de berging is gekoncentreerd, verbonden door takken waarin de wrijving, het bodemverhang en de traagheid in rekening worden gebracht.

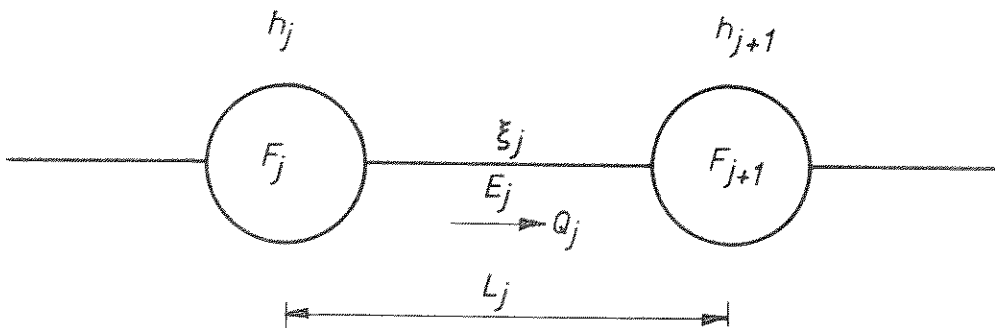


Fig. T2 Netwerk schema

Voor de berekening wordt er vanuit gegaan dat het debiet konstant is over de tak. Door integratie van de vergelijkingen (1) en (2) over de taklengte (L) ontstaan de volgende differentiaalvergelijkingen:

Kontinuiteitsvergelijking

$$F_j \frac{dh}{dt} - Q_{j-1} + Q_j = 0 \quad (3)$$

Bewegingsvergelijking

$$E_j \frac{dQ_j}{dt} - \frac{Q_j L b}{g A^2} \frac{d}{dt} (h_j + h_{j+1}) + (1 - Fr^2) (h_{j+1} - h_j) - I L + \xi_j Q_j |Q_j| = 0 \quad (4)$$

Hierin is:

E	$= L/g A$	de traagheidscoëfficiënt
F	$= 0,5 (F_j + F_{j-1})$	het bergend oppervlak van de aangrenzende halve takken
Fr^2	$= Q_j^2 b/g A^3$	Froude-getal in het kwadraat
ξ	$= L/C^2 A^2 R$	de wrijvingscoëfficiënt
I		bodemhelling

In dit stelsel vergelijkingen zijn de waterstanden en de debieten nog slechts een functie van de tijd. De vergelijkingen kunnen verder worden opgelost door middel van een impliciete differentiemethode met tijdstap Δt .

Dit levert dan de volgende vergelijkingen.

Kontinuiteitsvergelijking

$$F_j = \frac{h_j(t + \Delta t) - h_j(t)}{\Delta t} = \theta \{Q_{j-1}(t + \Delta t) - Q_j(t + \Delta t)\} + (1 - \theta) \{Q_{j-1}(t) - Q_j(t)\} \quad (5)$$

Bewegingsvergelijking

$$E_j \frac{Q_j(t + \Delta t) - Q_j(t)}{\Delta t} + \frac{Q_j L b}{g A^2} \frac{h_j(t + \Delta t) + h_{j+1}(t + \Delta t) - h_j(t) - h_{j+1}(t)}{\Delta t} + \theta \left[(1 - Fr^2) (h_{j+1} - h_j) + \xi_j Q_j |Q_j| \right]_{t+\Delta t} + (1 - \theta) \left[(1 - Fr^2) (h_{j+1} - h_j) + \xi_j Q_j |Q_j| \right]_t - I L = 0 \quad (6)$$

Hierbij geeft θ een centraal punt tussen t en $t+\Delta t$ weer, van waaruit de waarden $Q(t+\Delta t)$ en $h(t+\Delta t)$ worden bepaald. Voor de nauwkeurigheid van het rekenproces moet gelden $\theta \approx 0,5$ en voor de stabiliteit $\theta > 0,5$.

De vergelijkingen (5) en (6) kunnen voor iedere knoop respektievelijk tak in een kanaalsysteem worden neergeschreven. De onbekenden zijn de waterstanden in de knopen en de debieten in iedere tak. Er zijn evenveel onbekenden als vergelijkingen, waardoor het geheel kan worden opgelost.

Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een iteratieve oplossingsmethode. De coëfficiënten (F, A , etc.) zijn echter afhankelijk van de waterstanden, wat

inhoudt dat deze koëfficiënten na iedere iteratiestap opnieuw moeten worden berekend. Dit is voorkomen door linearisatie van de vergelijkingen (5) en (6).

Voor $Q(t+\Delta t)$ wordt dan geschreven $Q(t) + \Delta Q$, en voor $h(t+\Delta t)$ wordt dit $h(t) + \Delta h$. Daarbij zijn de termen met ΔQ^2 en Δh^2 (en hogere graad) verwaarloosd. Vervolgens zijn de verschillende koëfficiënten met behulp van een Taylor-reeks ontwikkeling op een zodanige manier uitgeschreven dat ze alleen nog maar worden bepaald door de waterstanden op het tijdstip t . Ze wijzigen dan verder niet gedurende de iteratie, zodat ze per tijdstap slechts éénmaal behoeven te worden berekend.

Het aldus verkregen stelsel vergelijkingen wordt nu voor iedere tijdstap iteratief opgelost met behulp van de methode Gauss-Seidel.

Het rekenproces verloopt nu in grote lijnen als volgt. Bij de start van het programma wordt uitgegaan van een aantal beginvoorwaarden $h(x, 0)$ en $Q(x, 0)$ en verder zijn er één of meerdere randvoorwaarden aangebracht.

Er wordt nu één van de vergelijkingen in beschouwing genomen; neem aan vergelijking (6) voor tak k .

De koëfficiënten worden bepaald uitgaande van de waterstanden op het tijdstip $t = 0$. Voor de onbekende variabele $h_k(t+\Delta t)$ wordt een aannemelijke waarde ingevoerd, maar voor de andere onbekende variabele $Q_k(t+\Delta t)$, het debiet in de tak k op het tijdstip $(t+\Delta t)$, wordt dit niet gedaan. Uit vergelijking (6) volgt nu een waarde voor $Q_k(t+\Delta t)$.

Deze zelfde werkwijze wordt herhaald voor de bepaling van de waterstanden in de omliggende knooppunten, waarbij gelijk gebruik wordt gemaakt van de reeds afgeleide waarde voor $Q_k(t+\Delta t)$. Op deze manier wordt het hele netwerk door-gerekend en is dit voor iedere tak en knoop gebeurd, dan is één stap in het iteratieproces gereed. Dergelijke iteratiestappen worden herhaald tot dat de debieten en waterstanden naar een oplossing konvergeren.

In de voorgaande beschrijving van het wiskundig model is uitgegaan van een kanaalgedeelte. Bij een kruising van waterlopen, waar dus meerdere takken samenkomen, gaat de continuïteitsvergelijking (3) voor het desbetreffende knooppunt over in:

$$F \frac{dh}{dt} - \sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (3b)$$

Hierbij wordt een debiet dat naar het knooppunt stroomt positief gerekend. De bewegingsvergelijking (4) verandert niet, omdat deze wordt opgesteld

per tak.

Voor een uitgebreidere behandeling van het rekenprogramma wordt verder verwezen naar [2].

2.3 Schematisering

Indien bij het doorlaatwerk van het sluizencomplex onder vrij verval genivelleerd wordt tussen kolk en kanaal Slaak, zal op dit kanaal en de daarmee verbonden wateren een translatiegolf ontstaan.

Om nu een indruk te krijgen van het waterstandsverloop bij de riooluitlaat en in de voorhaven ter plaatse van de sluizen moeten ook de watergangen, die beide plaatsen verbinden, in het model worden opgenomen. Het gebied waarover het model zich dan uitstrekt bestaat uit kanaal Slaak, Zijpe en de voorhaven (zie figuur 1).

Bij iedere schutting van zoet naar zout zal er zowel in de vloed- als in de eb fase worden genivelleerd tussen de kolk en kanaal Slaak.

In de vloedfase zal er een debiet gaan stromen van kanaal Slaak naar de kolk (opwaarts nivelleren), waardoor er op kanaal Slaak een negatieve translatiegolf zal ontstaan. In de eb fase daarentegen zal er een tegengesteld debiet ontstaan van de kolk naar kanaal Slaak (neerwaarts nivelleren), waardoor er op kanaal Slaak een positieve translatiegolf gaat lopen.

Deze laatste situatie is voor het translatiegolfverschijnsel het ongunstigst, wat als volgt in beeld kan worden gebracht:

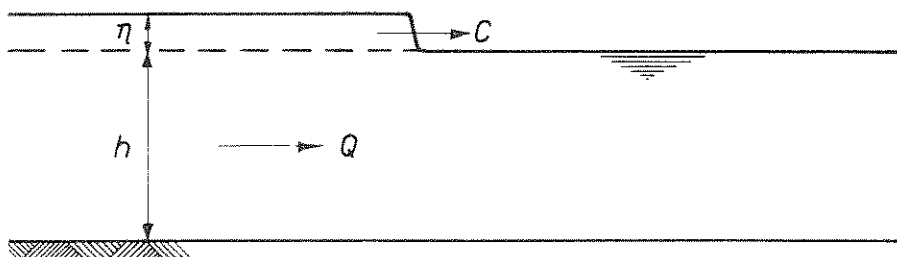


Fig. T3 Translatiegolf

In hoofdstuk 2, R 1225-deel I, is uit de continuïteitsvergelijking, betrekken op een translatiegolf, afgeleid dat geldt:

$$Q = b c_{tr} \eta \quad (7)$$

waarin: η	= translatiegolfhoogte	m
b	= bergende breedte (= breedte aan de waterspiegel)	m
c_{tr}	= voortplantingssnelheid translatiegolf	m/s
Q	= debiet	m^3/s

In de ebfase is de waterstand in kanaal Slaak laag, waardoor de translatiegolfsnelheid (c_{tr}), die afhankelijk is van de waterdiepte ($c_{tr} \approx \sqrt{gh}$), klein zal zijn. Tevens is de breedte (b) aan de waterspiegel, als gevolg van het trapeziumvormig dwarsprofiel van kanaal Slaak kleiner dan bij een hogere waterstand.

Bij een gelijk verval, dus een gelijk debiet, zullen er in de vloedfase kleinere translatiegolven ontstaan dan in de ebfase, zodat deze laatste situatie voor de berekeningen als maatgevend mag worden beschouwd.

Gemakshalve is uitgegaan van de werking van één sluiskolk. Bij gebruik van twee sluizen tegelijk zullen de translatiegolfverschijnselen zich nagenoeg verdubbelen, aangezien het verband tussen debiet en translatiegolf lineair is; er kunnen kleine afwijkingen ontstaan door het verschil in rioollengte. In het tussenliggende geval dat de sluiskolken enige tijd na elkaar werken zullen er translatiegolfhoogten optreden die maximaal even groot worden als bij de werking van twee sluizen tegelijk.

De situatie met één sluis respectievelijk twee sluizen tegelijk fungeert dan ook als beneden- respectievelijk bovengrens van alle tussenliggende gevallen.

In het model is sluis 1 opgenomen met een rioollengte van 200 m; de invloed van de langere rioollengte van sluis 2 is in een aparte berekening S11 vastgesteld.

Voor de riolen, die in dat stadium van de berekeningen nog in de ontwerp-fase waren, is een tussentijds berekende rioolweerstand ($\xi = 2,85$ - betrekken op een doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$; afgeleid voor één van de ontwerp-varianten) ingevoerd. Voor de bepaling van deze waarde zijn de invloeden van de geperforeerde vloer en de in de riolen aanwezige bochten en splitsingspunten omgerekend naar een totaalweerstand voor het desbetreffende riool. Hierbij is uitgegaan van een niet-aangegroeid riool, omdat in die situatie het grootste debiet zal ontstaan.

In een later stadium van het onderzoek zullen de definitieve rioolweerstand worden bepaald.

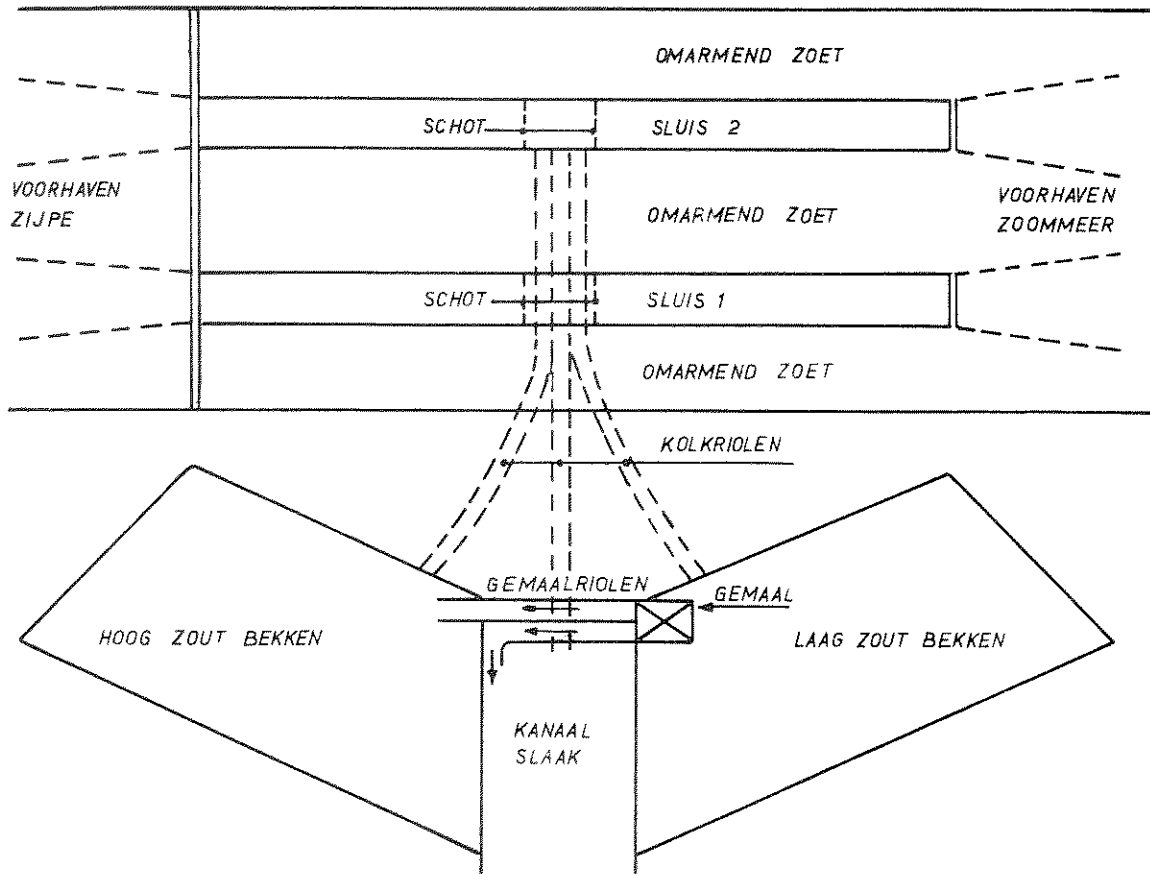


Fig. T4 Schema sluizencomplex

In de figuren 2 en 3 is de schematisering van het model weergegeven. De gegevens voor de kanaalvakken zijn opgenomen in tabel 1. Verder zijn in figuur 4 een aantal dwarsprofielen gegeven voor de ingevoerde takken van kanaal Slaak.

Voor de sluis (knooppunt 1) is een bergend oppervlak ter grootte van de kolkafmetingen (7500 m^2) in rekening gebracht.

De schematisatie van de riolen leverde wel enige problemen op, omdat het rekenmodel is gebaseerd op de lange golfvergelijkingen voor een open leiding. Dit betekent dat er in iedere geschematiseerde tak een bergende breedte aanwezig dient te zijn. In het model is het juiste dwarsprofiel van het riool opgegeven, waarbij op het dak van het riool een soort standpijp met een zeer kleine bergende breedte is aangebracht.

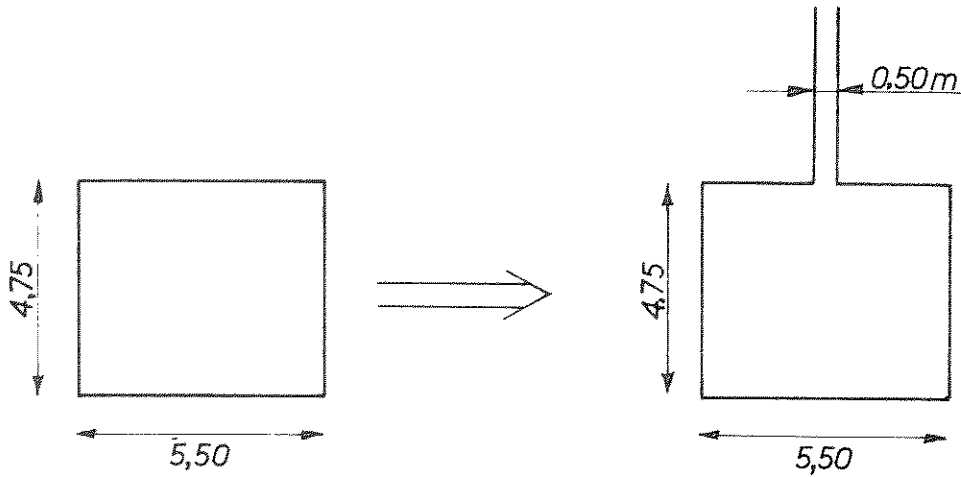


Fig. T5 Geschematiseerd riool

De in te voeren breedte b is daarbij bepalend voor de nauwkeurigheid van het verloop van het riooldebiet. Voor de schematisatie van het riool wordt verder verwezen naar bijlage I. Verder zal in paragraaf 3.2 en bijlage II nader worden ingegaan op de consequenties van deze schematisatie.

Omdat in het model de weerstand per tak moet worden opgegeven via de Nikuradse ruwheidsmaat k ($= \varnothing$ zandkorrel), is deze weerstand afhankelijk van de waterstand. Voor de beide riolen (tak 1 en 34) is deze variabele weerstand nogal bezwaarlijk, zodat hier het volgende heeft plaatsgevonden. Om programmeer-technische redenen moet er een k -waarde worden ingevoerd. Daarom is voor de riolen een zeer lage k -waarde ($k = 0,0001$ m) ingevoerd, wat bij de gekozen schematisatie neerkomt op een weerstand $\xi = 0,523$. De resterende weerstand ($\xi = 2,85 - 0,523 = 2,327$) is als een konstante waarde bij de schuifweerstand opgeteld. Voor de overige takken is verder van $k = 0,02$ m uitgegaan. Met behulp van de formule $C = 18 \log 12 R/k$ bepaald het programma daarna zelfstandig de Chézy-waarde per tak.

Tenslotte is in het model een functie ingebouwd die het mogelijk maakt om in de riolen de ξ -waarden in de tijd te laten variëren. Met behulp daarvan kan de manipulatie met de rioolschuiven worden gesimuleerd.

Gezien het feit dat de berekeningen op gang zijn gekomen tijdens de ontwerp-fase van het sluizencomplex, zijn er in de loop van de tijd een aantal wijzigingen in het netwerk aangebracht.

Deze wijzigingen bestonden uit aanpassingen in de vormgeving van kanaal Slaak, terwijl verder ook een aantal verfijningen in het model werden aangebracht. Door deze tussentijdse verfijning en aanpassingen van het model, alsmede doordat na een aantal berekeningen werd overgegaan op een ander tracé voor de Philipsdam, ontstond er een verschil tussen de berekeningen voor hoofdstuk 4 en die voor hoofdstuk 5. Dit heeft aanleiding gegeven tot het herhalen van de berekeningen in hoofdstuk 4 met de aangepaste schematisatie. Door deze handelwijze kan voor het rapport nu verder worden uitgegaan van één schematisatie die, zoals al reeds is vermeld, wordt weergegeven in de figuren 2 en 3. Het gevolg van dit alles is wel dat alle tussentijds verschenen berekeningsresultaten als vervallen dienen te worden beschouwd.

2.4 Randvoorwaarden

Binnen het gebied waarover het model zich uitstrekt wordt alleen gekeken naar de gevolgen van het nivelleringsdebiet op kanaal Slaak. Andere lozingen danwel onttrekkingen die gelijktijdig kunnen voorkomen worden niet in rekening gebracht: gedacht kan daarbij worden aan het lozingsdebiet op kanaal Slaak van overtollig water uit het lage bekken.

De waterstanden op het zoute pand variëren als gevolg van de getijbewegingen. Het nivelleren is ten opzichte van de getij-periode echter een dermate kort verschijnsel (zie figuur T6), dat voor de periode waarin het nivelleren plaatsvindt mag worden uitgegaan van een konstante waterstand. Verder is het debiet op dat moment (laag water) nagenoeg nul, maar de helling van het debietverloop (dQ/dt) is dan maximaal.

De invloed van deze dQ/dt op het translatiegolfverloop is echter minimaal, zodat het getij niet in de berekening behoeft te worden meegenomen, maar apart kan worden gesuperponeerd. Om dit wat duidelijker te demonstreren is in paragraaf 5.2 voor berekeningsvariant S12 de getijbeweging in rekening gebracht, zodat voor verdere bijzonderheden hiernaar wordt verwezen.

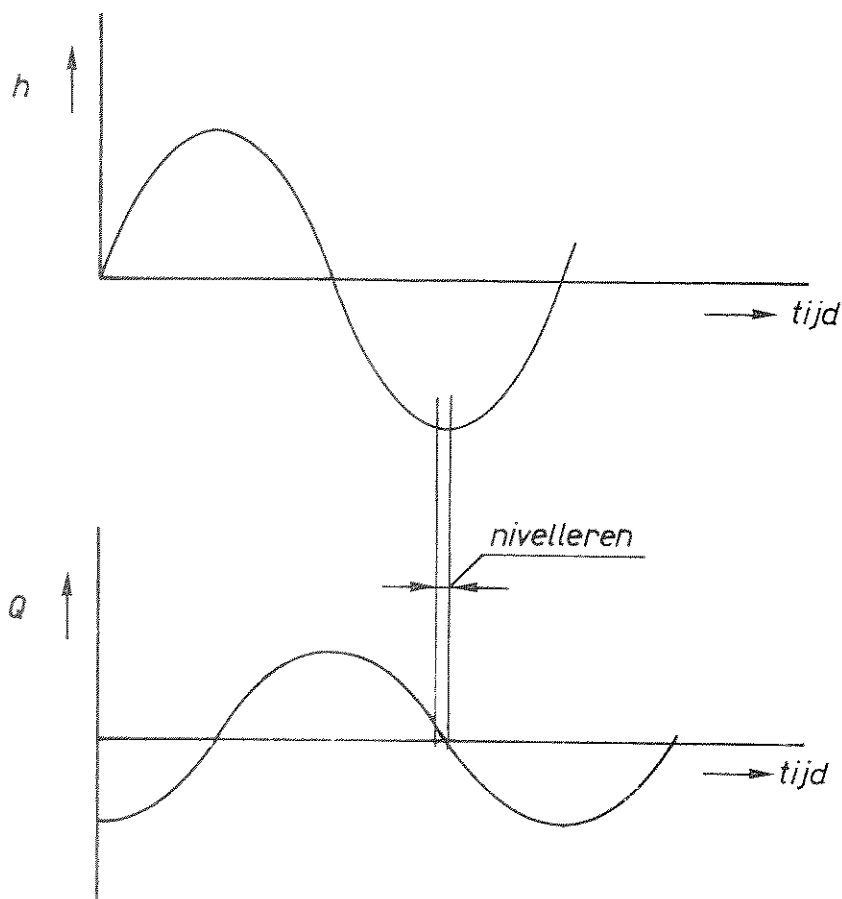


Fig. T6 Verband debietverloop/waterstandsverloop bij getijbeweging

Op de plaats waar het Zijpe in het model is afgebroken, is voor de overige berekeningsvarianten geen getij-beweging ingevoerd. Aangenomen wordt dat op deze plaats een oneindig lang wrijvingsloos kanaal volgt. Dat wil zeggen, golven die op deze plaats aankomen, lopen zonder reflectie naar buiten. Daartoe wordt als randvoorwaarde het debiet als functie van de waterstand gegeven.

De vergelijking hiervoor luidt:

$$h - h_o = - c_{tr}/g A (Q - Q_o) \quad (8)$$

Hierin is:	A	= natte doorsnede kanaal	m ²
	c _{tr}	= voortplantingssnelheid (= $\sqrt{g A/b}$)	m/s
	g	= versnelling van de zwaartekracht	m/s ²
	Q _o	= debiet in ongestoorde toestand	m ³ /s
	h _o	= waterstand in ongestoorde toestand	m
	b	= breedte aan de waterspiegel	m

Omgewerkt ontstaat dan de vergelijking:

$$h - h_o = \frac{-1}{b c_{tr}} (Q - Q_o) \quad (9)$$

Voor de faktor $b c_{tr}$ zijn daarvoor de waarden van tak 36 ingevoerd, terwijl verder geldt $h_o = \text{NAP} \div 2,00 \text{ m}$ en $Q_o = 0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Voor de in het model opgenomen functie waarmee de rioolschuifbeweging kan worden gesimuleerd, is er in de berekeningen vanuitgegaan dat de denkbeeldige schuif zich in de nauwste doorsnede ($4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$) bevindt.

De schuif wordt met een konstante hefsnelheid van 2 cm/sec geheven, wat betekent dat de gehele schuifbeweging zich, inclusief het loskomen uit de sponning (12,5 sec), in 250 sec afspeelt. Voor deze hefbeweging is in figuur 5 de schuifverliescoëfficiënt op logaritmische schaal uitgezet tegen de verhouding van de schuifopening (d) en de rioolhoogte (D). In tabel 2 zijn verder de opgegeven waarden voor de schuifverliescoëfficiënt, welke zijn ontleend aan het modelonderzoek voor de Kreekraksluizen [7], vermeld die in het model zijn ingevoerd.

Deze schuifverliescoëfficiënt (ξ_{schuif}) is echter niet zonder meer in het programma ingevoerd. Om programmatechnische redenen is deze coëfficiënt vermenigvuldigd met een konstante $(2 g A^2)^{-1}$, waardoor een nieuwe schuifverliescoëfficiënt ($\xi_{\text{ingevoerd}}$) ontstaat. Deze laatste waarde is als verliescoëfficiënt in het programma ingevoerd.

De relatie tussen beide coëfficiënten kan als volgt worden afgeleid:

Het drukverlies over een schuif kan worden berekend volgens:

$$\Delta H = \xi_{\text{schuif}} \frac{v^2}{2g} = \xi_{\text{schuif}} \frac{Q^2}{2g A^2} \quad (10)$$

In het programma wordt gewerkt met:

$$\Delta H = \xi_{\text{ingevoerd}} Q^2 \quad (11)$$

Hierin is:	ξ_{schuif}	= schuifverliescoëfficiënt	(-)
	$\xi_{\text{ingevoerd}}$	= verliescoëfficiënt, zoals deze is ingevoerd in het programma	(s^2/m^5)
	v	= stroomsnelheid in de leiding	(m/s)
	g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s^2)
	Q	= leidingdebiet	(m^3/s)
	A	= natte doorsnede (leidingdoorsnede)	(m^2)

Uit substitutie van (10) en (11) volgt:

$$\xi_{\text{ingevoerd}} = \frac{\xi_{\text{schuif}}}{2g A^2} \quad (12)$$

Kort samengevat zijn op een tweetal randen in het model speciale randvoorwaarden in rekening gebracht:

1. Kolk/riool

Hier ontstaat door het aanwezige waterstandsverschil (beginwaarde) en de opgelegde schuifbeweging (randvoorwaarde) een debiet.

2. Afbreken van het Zijpe in het model

Hier wordt aangenomen dat op deze plaats een oneindig wrijvingsloos kanaal volgt. Daarbij wordt het debiet opgegeven als functie van de waterstand (randvoorwaarde).

Op de overige drie randen in het model, Zijpe bij Philipsdam, voorhaven bij sluizen en Slaak bij Philipsdam geldt als randvoorwaarde $Q = 0$.

Alle berekeningen (uitgezonderd S13) zijn uitgevoerd bij een waterstand op het zoute pand van NAP $\div 2,00$ m, wat overeenkomt met extreem laag water (onderschreidingsfrequentie 4 maal/jaar [4]); dezelfde waarde is toegepast bij de handberekeningen.

Voor de kolk is als beginvoorwaarde uitgegaan van een waterstand van NAP.

Voor een overzicht van de uitgevoerde berekeningen, welke zijn opgesplitst in een aantal proefberekeningen voor het gevoeligheidsonderzoek en de uiteindelijke translatiegolfberekeningen, wordt verwezen naar tabel 3.

3. Gevoeligheidsonderzoek

3.1 Schema totale model

Het uitvoeren van een ijking van het model is niet mogelijk, omdat er niet kan worden beschikt over meetgegevens voor de nieuwe situatie waarin de Philipsdam is aangelegd.

Om aan dit probleem tegemoet te komen zijn een aantal proefberekeningen uitgevoerd, teneinde de gevoeligheid van het model te onderzoeken.

Het hierbij toegepaste netwerkschema wijkt enigszins af van het netwerk in figuur 2 en 3. Voor deze proefberekeningen is namelijk nog gebruik gemaakt van de "oudere" schematisatie, waarbij de berekeningsresultaten een te gunstig beeld van de situatie ter plaatse van het doorlaatwerk gaven.

Achtereenvolgens zijn de volgende proefberekeningen gemaakt:

- P1 Ontwerpsituatie volgens tekening C7.76 10308 van de Rijkswaterstaat welke in januari 1977 beschikbaar kwam (zie figuur T8, par. 4.1).
Op het smalle kanaalgedeelte is aan weerszijden het talud van 1 : 4 vervangen door een verticale wand.
Verder is uitgegaan van een langzaam oplopende bodem over de gehele lengte van het smalle kanaal vanaf het doorlaatwerk (NAP ÷ 11,75 m) tot aan het begin van de verbreding (NAP ÷ 8,00 m).

Met deze berekening als uitgangspunt zijn een viertal berekeningen uitgevoerd:

- P2 Voor de Nikuradse ruwheidsmaat is een hogere waarde ingevoerd; in plaats van $k_1 = 0,02$ m is overgegaan naar $k_2 = 0,05$ m. Dit houdt in dat als bij $k_1 = 0,02$ m een waarde C_1 wordt gevonden, dat dan $k_2 = 0,05$ m een waarde $C_2 = C_1 - 7,16$ oplevert. De Chézy-koëfficiënt wordt dus kleiner, wat betekent dat de weerstand groter wordt.
- P3 Op het Zijpe waar de meeste takken samenkomen, zijn wat kortsluitingen gemaakt, teneinde interacties tussen de verschillende knooppunten mogelijk te maken. Door deze kortsluiting zullen de looptijden van de translatiegolven zich wijzigen.
- P4 De bergende breedte van het riool (breedte van de standpijp) is hier

gehalveerd tot 0,25 m, om na te gaan wat de invloed hiervan is op de translatiegolven in kanaal Slaak.

P5 De bergende breedte van het riool (breedte van de standpijp) is met een faktor 4 verminderd tot 0,125 m.

Vergelijking van P1 (figuur 6) met P2 (figuur 7) levert op dat bij verhoging van de weerstand in het totale model (uitgezonderd de riolen) geen enkele verandering in de translatiegolven optreedt.

Bij translatiegolfberekeningen is de weerstand dan ook ondergeschikt; voor de meeste translatiegolfberekeningen wordt zelfs aangenomen dat deze golven zich onvervormd voortplanten, waarbij de weerstand in zijn geheel wordt verwaarloosd.

Belangrijker is het feit dat het gemiddelde dwarsprofiel en de bergende breedte op juiste wijze in het model zijn weergegeven, omdat deze bepalend zijn voor de translatiegolfsnelheid en de optredende golfhoogte.

Daarnaast wordt de optredende golfhoogte beïnvloed door de afstand die de translatiegolf moet afleggen. Door veranderde looptijden van de optredende reflekties, kan eventueel een opslinging van de waterstand in kanaal Slaak ontstaan. Het effect hiervan is onderzocht door het aanbrengen van kortsluitingen op het Zijpe.

Vergelijking van P1 (figuur 6) met P3 (figuur 8) maakt duidelijk dat er inderdaad verschillen optreden. Deze verschillen treden op ca. 9 min. na de start van de berekening. In absolute zin verandert er echter weinig, de translatiegolf in kanaal Slaak blijft van dezelfde orde van grootte. Gezien deze toch geringe invloed is besloten de verschillende kortsluitingen op het Zijpe niet te handhaven, maar gewoon het bestaande geulenstelsel als takken aan te houden.

Vergelijking van P1 (figuur 6) met P4 (figuur 9), waar de bergende breedte van de geschematiseerde riolen is gehalveerd, levert een zeer kleine afwijking in het doorslingereffect van de kolkwaterstand op, als gevolg van een iets trager verloop van het riooldebiet. Bij verdere versmalling van deze breedte (P5; figuur 10) zet deze tendens zich voort; de optredende verschillen blijven echter minimaal.

De hoogte van de translatiegolf in kanaal Slaak wordt in het geheel niet beïnvloed door deze verschillen.

Aangezien op dat tijdstip van het onderzoek het inzicht ontbrak met welke waarde voor de bergende breedte het debietverloop in een gesloten riool

het best benaderd kon worden, is gezien de minimale verschillen besloten om uit te gaan van de bergende breedte van 0,50 m.

3.2 Schematisatie riool

Teneinde de juistheid van de schematisatie van het riool aan te tonen en meer inzicht te verkrijgen in de bepalende parameters is de volgende gedachten- gang ontwikkeld:

1. Vergelijking van de toegepaste formules voor een open leiding met de for- mules voor een gesloten leiding (bij verwaarlozing van drukgolven). Aan de hand hiervan kan worden afgeleid welke koëfficiënten in de for- mules voor de open leiding de eventueel optredende afwijkingen beïnvloeden.
2. Daarna is getracht om de grootte van deze afwijkingen wat duidelijker weer te geven door vergelijkende berekeningen uit te voeren met twee verschillende wiskundige programma's. Daartoe is met het toegepaste rekenprogramma voor open leidingen (NEBAS) een klein model opgezet, dat het vullen en ledigen van een schutkolk beschrijft. De resultaten hiervan zijn vergeleken met de resultaten van een ander wiskundig programma (VLKOLK), dat uitgaat van de formules voor een ge- sloten riool (bij verwaarlozing van drukgolven) en dat eveneens het vullen en ledigen van een kolk met traagheid in het riool beschrijft.

ad 1) Vergelijking van de formules voor een open en een gesloten leiding

Voor de beschrijving van het lange golfverschijnsel kunnen de volgende twee algemene vergelijkingen worden afgeleid [1]:

Kontinuiteitsvergelijking

$$\frac{\partial (\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v A)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

Bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin I + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (14)$$

Dit stelsel vergelijkingen is zowel geldig voor een open als voor een geslo- ten leiding. Indien wordt overgegaan tot invoering van de eigenschappen

van de leiding ontstaan twee verschillende stelsels die alléén gelden voor het specifieke geval, waarvoor zij zijn afgeleid. Deze beide stelsels vergelijkingen zijn, in de gebruikelijke vorm waarin ze zijn opgesteld, moeilijk met elkaar te vergelijken.

Door de volgende omwerkingen kan aan dit probleem worden tegemoet gekomen:

- a. Aangezien het hier een probleem betreft waarbij de voortplantingssnelheid van de drukgolven in de gesloten leiding kan worden verwaarloosd, betekent dit dat het stelsel vergelijkingen voor de gesloten leiding sterk kan worden vereenvoudigd.
- b. In de vergelijkingen voor de open leiding worden de termen met de waterdiepte h vervangen door het piëzometrisch niveau (pn); dat wil zeggen de waterstand wordt gedefinieerd ten opzichte van een horizontaal vergelijkingsvlak.

Verder worden in de vergelijkingen voor de gesloten leiding de termen met de druk p eveneens vervangen door het piëzometrisch niveau (pn).

Voor de afleiding van deze omwerkingen wordt verwezen naar bijlage II. Indien nu wordt uitgegaan van een horizontale bodem ontstaan de volgende twee stelsels vergelijkingen:

Gesloten leiding

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (16)$$

Open leiding

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial (pn)}{\partial t} \quad (17)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \left(1 - \frac{Q^2 b}{g A^3} \right) \frac{\partial (pn)}{\partial x} - \frac{2bQ}{A^2} \frac{\partial (pn)}{\partial t} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (18)$$

Waarin: g = versnelling van de zwaartekracht m/s^2 Q = debiet m^3/s
 A = natte doorsnede (leiding doorsnede) m^2 pn = piëzometrisch niveau m
 b = bergende breedte (breedte standpijp) m R = hydraulische straal m
 C = Chézy-koëfficiënt $m^{1/2}/s$

De verschillen tussen beide stelsels zijn nu terug te voeren tot verschillen in berging, welke in de open leiding vergelijkingen worden bepaald door de breedte (b) van de standpijp.

Kontinuiteitsvergelijking van de open leiding:

Door deze breedte voldoende klein te kiezen kan voor deze vergelijking gesteld worden $\partial Q/\partial x \approx 0$. Via een speciale mogelijkheid in het programma NEBAS is het, onder bepaalde voorwaarden, zelfs mogelijk om de gehele bergingsterm ($F_{riool} = b \cdot (pn)/\partial t$) uit te schakelen. Op deze manier wordt volledig voldaan aan de eis $\partial Q/\partial x = 0$. Alhoewel bij deze berekeningen toepasbaar, is deze mogelijkheid in NEBAS te laat onderkend, zodat voor de berekeningen S1 t/m S20 hiervan geen gebruik is gemaakt. Wel is nog een proefberekening (P9) uitgevoerd waarin dit is toegepast.

Bewegingsvergelijking van de open leiding:

De grootte van de afwijkende termen in deze vergelijking worden eveneens beïnvloed door de breedte (b) van de standpijp. Indien namelijk geldt $Fr^2 \ll 1$ dan is de bijdrage van deze afwijkende termen in de totale vergelijking verwaarloosbaar klein. Door een juiste keuze van b ontstaat een voldoende klein Froude-getal ($Fr^2 = v^2/(gA/b)$), zodat ook aan de bewegingsvergelijking voor de gesloten leiding wordt voldaan.

In principe is het zelfs mogelijk om b gelijk aan nul te stellen, waardoor geheel aan de eisen van een gesloten leiding wordt voldaan; dit vereist dan wel een aanpassing van de weerstandsterm in de bewegingsvergelijking.

Voorwaarde is dat de 'gesloten leiding' een verbinding vormt tussen twee knooppunten met voldoende berging. Indien de 'gesloten leiding' uit meerdere takken bestaat gaat dit niet meer op, want per knooppunt dient een bepaalde berging te worden opgegeven, omdat anders het rekenproces wordt verstoord.

Omdat bij verdere berekeningen met het programma NEBAS, zoals R 1249 "Translatiegolfberekeningen in het omarmend zoet", dit laatste het geval zal zijn is van toepassing van de mogelijkheid (b = 0) afgezien.

In het hierna volgende deel zullen nu enkele proefberekeningen worden gegeven waarin het effect van de standpijpbreedte tot uitdrukking wordt gebracht.

ad 2) Vergelijking resultaten rekenprogramma's

Alvorens op deze resultaten wordt ingegaan volgt in het kort een beschrijving van het toegepaste schema met daarnaast de wijze waarop dit is ingebouwd in de beide rekenprogramma's (NEBAS/VLKOLK).

Het schema beschrijft het vullen en ledigen van een schutkolk. Daartoe is de kolk via een riool verbonden met een buitenwater. In het riool is een schuif

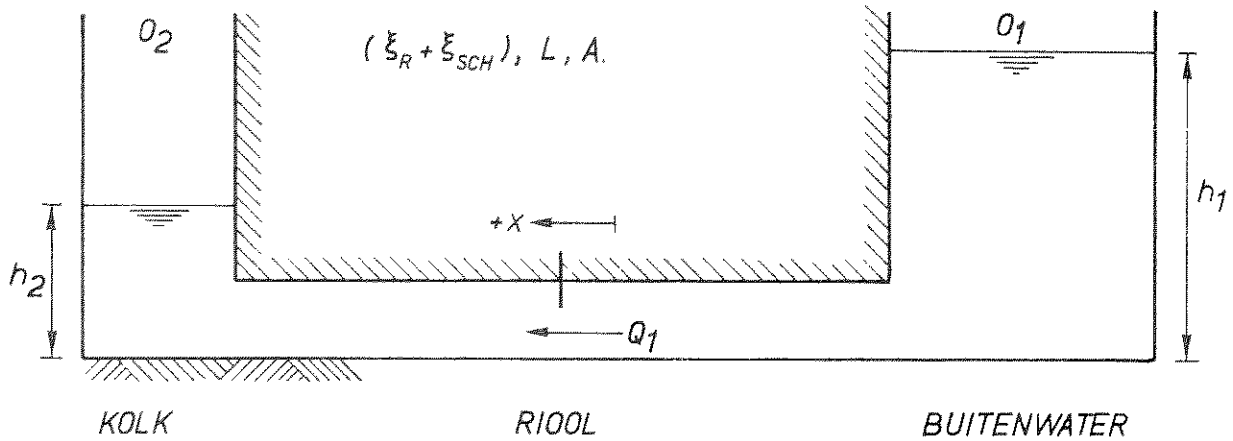


Fig. T7 Schema voor vullen/ledigen schutkolk

aanwezig die met een vastgesteld snelheidsprogramma wordt geheven. Er wordt gestart met een gesloten riool waarbij de waterstanden in kolk en buitenwater als beginvoorwaarden dienen.

In het rekenprogramma NEBAS is dit schema opgebouwd uit twee knooppunten, voorstellende de kolk en het buitenwater. Deze twee knooppunten zijn verbonden door één tak (het riool) dat met behulp van de standpijp geschematiseerd is ingebracht; voor de wijze van schematisatie van het riool wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en bijlage I.

Het rekenprogramma (VLKOLK) [6] gaat uit van de gesloten leiding vergelijkingen, waarbij de voortplanting van de drukgolven is verwaarloosd. Het programma werkt in feite ook met één tak (rioel) en twee knooppunten (kolk/buitenwater), waarbij gebruik wordt gemaakt van de volgende differentiaalvergelijkingen:

- a. de continuïteitsvergelijking voor kolk en buitenwater.
- b. de bewegingsvergelijking voor het rioel.

Als men de stromingsrichting zoals aangegeven in figuur T7 positief definieert, dan worden de vergelijkingen:

$$Q_1 = Q_2 \frac{dh_1}{dt} \quad (19)$$

$$-Q_1 = Q_1 \frac{dh_2}{dt} \quad (20)$$

$$h_1 - h_2 = (\xi_r + \xi_{sch}) \frac{Q_1 |Q_1|}{2g A^2} + \frac{L}{gA} \frac{dQ_1}{dt} \quad (21)$$

Deze vergelijkingen komen overeen met de vergelijkingen van de gesloten leiding zoals is afgeleid in bijlage II. Door nu met behulp van dit rekenprogramma een bepaalde situatie door te rekenen ontstaat een vergelijkingsbasis voor de berekeningen met het rekenprogramma NEBAS.

Voor de berekeningen is daarbij gebruik gemaakt van de volgende waarden:

h_1	waterstand buitenwater (blijft konstant $\rightarrow dh_2/dt = 0$)	NAP
h_2	waterstand kolk	NAP \div 2,00 m
O_1	oppervlakte buitenwater	15.000.000 m ²
O_2	halve kolk oppervlak	3750 m ²
A	leidingdoorsnede	4,75 \times 5,50 m ²
L	lengte riool	200 m
ξ_r	weerstand riool (niet aangegroeid)	2,85
b	bergende breedte "standpijp" (alleen voor NEBAS)	variabel

Verder wordt van dezelfde ξ_{sch} -functie ($v_{sch} = 2$ cm/sec) gebruik gemaakt als bij de translatiegolfberekeningen.

Achtereenvolgens zijn de volgende berekeningen gemaakt:

- P6 Berekening met het programma VLKOLK
- P7 Berekening met het programma NEBAS met een tijdstap $\Delta t = 2$ sec en een bergende breedte $b = 0,50$ m van de "standpijp"
- P8 Berekening met het programma NEBAS met een tijdstap $\Delta t = 2$ sec en een bergende breedte $b = 0,01$ m van de "standpijp"
- P9 Berekening met het programma NEBAS met een tijdstap $\Delta t = 2$ sec en een bergende breedte $b = 0,01$ m van de "standpijp"
Hierbij is de bergingsterm in de continuïteitsvergelijking nul gesteld.

Uitgaande van hetgeen is afgeleid in bijlage II zullen nu eerst voor de standpijpbreedtes $b = 0,50$ m en $b = 0,01$ m de afwijkingen in de formules worden aangegeven. Daarna zal worden ingegaan op de uiteindelijke verschillen in resultaten van de berekeningsvarianten P7, P8 en P9 in vergelijking met berekeningsvariant P6.

De continuïteitsvergelijking voor de open leiding luidt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial (pn)}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

Geïntegreerd over de rioollengte L geeft dit:

$$Q_{in} - Q_{uit} = - b L \frac{\partial (pn)}{\partial t} = - F_{riool} \frac{\partial (pn)}{\partial t} \quad (18)$$

De voorwaarde $\partial Q/\partial x = 0$, welke voortkomt uit de continuïteitsvergelijking (15) betrokken op de gesloten leiding, houdt in dat de berging van het riool (F_{riool}) nul moet zijn.

In het rekenprogramma NEBAS wordt deze berging over de beide randen (knooppunten; kolk en buitenwater) van het riool verdeeld.

Bij de bergende breedte van de standpijp $b = 0,50$ m (zoals is toegepast voor de translatiegolfberekeningen) komt dit neer op een "bergend oppervlak" $F_{riool} = 100 \text{ m}^2$. Deze berging wordt opgeteld bij de opgegeven berging in de knooppunten, zodat de berging van de kolk $F_{kolk} = 3850 \text{ m}^2$ in plaats van 3750 m^2 ; dit geeft een afwijking van ca. 3%.

Een verdere versmalling van de standpijp tot $b = 0,01$ m (variant P8) leidt tot een dusdanige verbetering dat de afwijking dan nog slechts $0,5 \text{ ‰}$ bedraagt. Tenslotte is in berekeningsvariant P9 het bergend oppervlak van het riool nul gesteld, zodat volledig wordt voldaan aan de eis $\partial Q/\partial x = 0$.

Opmerkingen:

- Voor de varianten P7, P8 en P9 is uitgegaan van een bergend oppervlak van het buitenwater $F_{buitenwater} = 15.000.000 \text{ m}^2$, zodat hier de afwijking minimaal is.
- Voor de translatiegolfberekeningen S1 t/m S20 wordt het bergend oppervlak ter plaatse van het doorlaatwerk in kanaal Slaak $F_{doorlaatwerk} = 1600 \text{ m}^2$ in plaats van 1500 m^2 , wat neerkomt op een afwijking van 6,7%. Aan deze rand is $\partial(pn)/\partial t$ in verhouding echter klein zodat ook hier de invloed op $\partial Q/\partial x$ gering is.

Dit wordt nog eens aangetoond door berekeningsvariant P5. Hier is het bergend oppervlak van het riool met een faktor 4 verkleind, waardoor $F_{doorlaatwerk} = 1525 \text{ m}^2$ in plaats van 1500 m^2 . Dit leidt er toe dat ook de afwijking in het bergingsoppervlak met een faktor 4 wordt teruggebracht tot 1,7%. Alhoewel deze wijziging enige invloed op het debietverloop bleek

te hebben, werd de hoogte van de translatiegolf in kanaal Slaak daardoor niet beïnvloed.

De bewegingsvergelijking voor de open leiding luidt:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \left(1 - \frac{Q^2 b}{g A^3} \right) \frac{\partial (pn)}{\partial x} - \frac{2bQ}{A^2} \frac{\partial (pn)}{\partial t} + \frac{g Q |Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (18)$$

De onderstreepte termen zijn verwaarloosbaar klein indien geldt $Fr^2 \ll 1$.

Rekenvoorbeeld:

$$\begin{aligned} b &= 0,50 \text{ m} \\ Q_{\max} &= 47,9 \text{ m}^3/\text{s} \\ A &= 4,75 \times 5,50 + 3,75 \times 0,50 = 28 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad \left\| \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{array} \right. Fr^2 = 0,005 \ll 1$$

(gegevens ontleend aan berekeningsvariant S5)

$$\begin{aligned} b &= 0,01 \text{ m} \\ Q_{\max} &= 48,1 \text{ m}^3/\text{s} \\ A &= 4,75 \times 5,50 + 0,01 \times 1 = 26,135 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad \left\| \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{array} \right. Fr^2 = 0,00013 \ll 1$$

(gegevens ontleend aan berekeningsvariant P8)

Uit dit rekenvoorbeeld komt duidelijk de invloed van de bergende breedte naar voren. Het blijkt daarbij dat de onderstreepte termen in de bewegingsvergelijking reeds voldoende klein zijn, zodat eventuele verschillen in de berekeningsresultaten zijn terug te voeren tot de afwijkingen in de bergings-term van de continuïteitsvergelijking.

In figuur 11 zijn de $Q(t)$ en $h(t)$ -lijnen van berekening P6 (VLKOLK) uitgezet. Daarin zijn h_1 en h_2 de waterstanden van het buitenwater, respectievelijk de kolk. De functies voor h_3 en h_4 geven het drukhoogteverloop voor en achter de schuif weer; deze zijn voor de translatiegolfberekeningen verder niet van belang.

De $Q(t)$ en $h(t)$ -lijnen van deze berekening zullen nu verder worden gebruikt als vergelijkingsbasis voor de resultaten van de NEBAS-berekeningen P7, P8 en P9.

Vergelijking van de $Q(t)$ en $h(t)$ -lijnen van P7 ten opzichte van P6 (figuur 12) levert een klein verschil op in het debietverloop. De dQ/dt wordt niet

helemaal juist gereproduceerd. In absolute zin is de dQ/dt iets te groot, waardoor in P7 het nivelleerdebiet ca. 6 sec eerder zijn nul-waarde bereikt. Door deze kleinere traagheid van het systeem wordt ook het doorslingeren van de kolk minder (ca. 1,5%), terwijl het maximum nivelleerdebiet iets te groot is (ca. 1,8%).

In welke mate de situatie kan worden verbeterd blijkt uit berekening P8, waarin de bergende breedte is teruggebracht tot $b = 0,01$ m. Uit deze berekening (figuur 13) volgt dat bij deze smallere breedte de traagheid van het systeem verbetert, het nivelleerdebiet bereikt nu nog maar ca. 2 sec. eerder zijn nul-waarde. Door deze verbetering van de traagheid is ook het verschil in doorslingeren van de kolkwaterstand verminderd tot ca. $0,6^0/00$, terwijl het maximum debiet nog maar een verschil vertoont van 0,3%.

Tenslotte volgt dan nog berekening P9, waarbij voor de continuïteitsvergelijking de berging van het riool nul is gesteld. Uit deze berekening volgt dat nu de traagheid juist wordt weergegeven, zodat ook de doorslingerfrequentie van het systeem kan worden gereproduceerd. De afwijking in het maximum debiet van 0,3% blijft gehandhaafd, maar dit verschil is minimaal; van deze berekening is gezien de minimale afwijkingen geen figuur in het rapport opgenomen.

Voor de translatiegolfberekeningen is uitgegaan van een standpijpbreedte $b = 0,50$ m. Bij de beoordeling van het effect van de aanpassingen in de vormgeving van kanaal Slaak is vooral de maximaal optredende positieve en negatieve golfhoogte van belang.

De dn/dt van de translatiegolf wordt door het verschil in traagheid niet noemenswaardig beïnvloed, terwijl ook het verschil in maximum debiet (1,8%) dermate klein is, dat kan worden gekonkludeerd dat met de standpijpbreedte $b = 0,50$ m de translatiegolven in kanaal Slaak voldoende nauwkeurig worden weergegeven.

Het doorslingeren van de kolkwaterstand wordt dan weliswaar niet helemaal juist weergegeven (het systeem heeft bij $b = 0,50$ m een te kleine traagheid), maar dit heeft op de maximale hoogte van de translatiegolf geen invloed (zie berekeningsvariant S14; paragraaf 5.3).

Indien meer specifiek wordt gekeken naar de relatie tussen het doorslingeren van de kolkwaterstand en de translatiegolven op kanaal Slaak dan dient te worden gekozen voor een kleinere bergende breedte (klein Froude-getal), terwijl in de continuïteitsvergelijking de berging van het riool nul moet worden gesteld.

Om tenslotte een duidelijk verband te kunnen leggen tussen de proefberekeningen P7, P8 en P9, welke met een tijdstap $\Delta t = 2$ sec zijn uitgevoerd, en de uiteindelijke berekeningen, welke zijn uitgevoerd met een tijdstap $\Delta t = 10$ sec is één van de berekeningsvarianten tweemaal uitgevoerd met zowel een tijdstap $\Delta t = 10$ sec (S5) als $\Delta t = 2$ sec (S5A).

Hieruit blijkt dat als gevolg van de kleinere tijdstap het maximum debiet iets anders wordt afgerond, de verschillen blijven echter beperkt tot 0,2%. De dQ/dt , welke bepalend is voor de helling van de translatiegolf wijzigt verder niet.

Samenvattend kan het volgende worden gekonkludeerd:

1. Uitschrijven van beide stelsels vergelijkingen voor een open en een gesloten leiding toont aan dat het, bij de juiste keuze van de bergende breedte van de standpijp, mogelijk is om de waterbeweging door een gesloten leiding (bij verwaarlozing van de drukgolven) te beschrijven met de formules voor een open leiding).
2. Vergelijking van de resultaten van VLKOLK met NEBAS toont aan dat de verschillen in het verloop van het nivelleerdebiet, bij een bergende breedte $b = 0,50$ m van de standpijp van het riool, verwaarloosbaar klein zijn. De translatiegolven op kanaal Slaak in de hierna volgende berekeningen worden dan ook voldoende nauwkeurig weergegeven.
3. Het doorslingeren van de kolkwaterstand vertoont wat grotere afwijkingen. Bij de translatiegolfberekeningen wordt echter voornamelijk gekeken naar de invloed van aanpassingen van de randvoorwaarden (dwarsprofiel, kanaal Slaak, etc.) op de grootte van de eerste optredende golven. Wordt er toe overgegaan om daarnaast ook de relatie tussen het doorslinger-effekt en de translatiegolven in beschouwing te nemen dan dient gekozen te worden voor een kleinere bergende breedte b , terwijl ook in de continueitsvergelijking de berging van het riool nul moet worden gesteld.

4. Verifikatie van de handberekeningen

Na het besluit om, als aanvulling op de uitgevoerde handberekeningen, een aantal berekeningen met behulp van het uitgebreidere wiskundig rekenmodel uit te voeren is getracht om een duidelijke aansluiting te krijgen op het reeds verschenen rapport "Translatiegolfberekening kanaal Slaak" R 1225-deel I. De term verifikatie moet dan ook meer gezien worden als het op één lijn brengen van de beide series berekeningen van waaruit is verder gewerkt met het rekenmodel, dan als een controle op de handberekeningen. De beoogde koppeling van beide series is verkregen door de handberekeningen uit paragraaf 3.5 "Vormgeving begin kanaal Slaak" in het nieuwe berekeningsprogramma op te nemen. Bij de interpretatie van de resultaten is vooral gekeken in hoeverre de gesignaleerde tendenzen, bij aanpassingen in de vormgeving, hetzelfde zijn gebleven. Voor een verklaring van de optredende verschijnselen wordt verder verwezen naar paragraaf 5.1.

4.1 Situatie

Zoals reeds hierboven vermeld hebben de berekeningen betrekking op de vormgeving van begin kanaal Slaak. Met begin kanaal Slaak wordt bedoeld het smalere gedeelte van kanaal Slaak tussen de riooluitlaat (doorlaatwerk) en het gemaal.

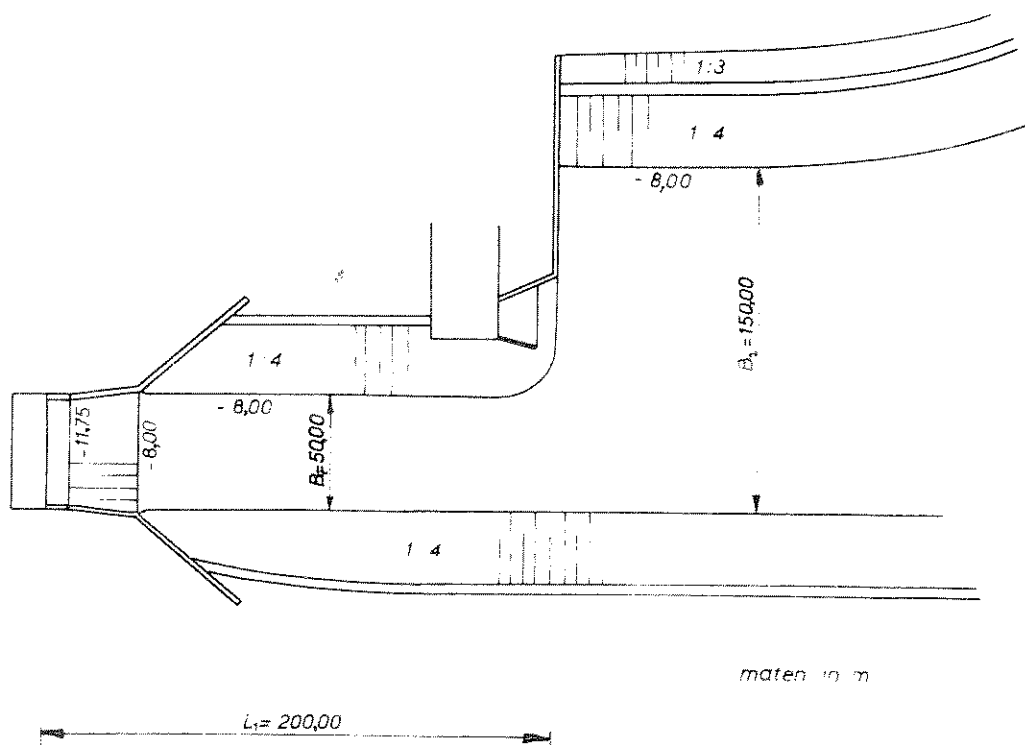


Fig. T8 Situatie begin kanaal Slaak volgens tekening C7 76.10308

In januari 1977 kwam er een nieuwe situatietekening van de Rijkswaterstaat beschikbaar; tekening C7 76.10308. De lengte van het smalle kanaalgedeelte was hierop 200 m.

Van deze situatie zijn een viertal berekeningen uitgevoerd, waarbij S1 t/m S4 overeenkomt met de berekeningsnummers 1 t/m 4 uit paragraaf 2.5; R 1225-I:

- S1 Situatie volgens figuur T8 waarbij als wijziging het talud van 1 : 4 op het smalle kanaalgedeelte vervangen is door een verticale wand; gedacht kan worden aan een damwandkonstructie. Verder is uitgegaan van een langzaam oplopende bodem over de gehele lengte van het smalle kanaalgedeelte vanaf het doorlaatwerk (NAP ÷ 11,75 m) tot aan het begin van de verbreding (NAP ÷ 8,00 m).
- S2 Situatie volgens figuur T8.
- S3 Situatie volgens figuur T8 met als wijziging het talud van 1 : 4 op het smalle kanaalgedeelte vervangen door een verticale wand.
- S4 Situatie volgens figuur T8 met als wijziging het talud van 1 : 4 op het smalle kanaalgedeelte vervangen door een verticale wand. Daarnaast is de bodembreedte van het brede kanaalgedeelte teruggebracht van 150 m tot 120 m.

4.2 Resultaten en konklusies

De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in onderstaand schema:

Ber. no	Fig.	h _{bodem} (m)	α	B ₁ (m)	B ₂ (m)	handberekening		nieuwe berekening	
						ĥ _{max} (cm)	ĥ _{min} (cm)	ĥ _{max} (cm)	ĥ _{min} (cm)
S1	14	variabel	⊥	50	198	11	ca 14	11,7	8,1
S2	15	÷ 8,00	1:4	98	198	11	12	9,6	7,9
S3	16	÷ 8,00	⊥	50	198	12,5	12,5	12,9	9,4
S4	17	÷ 8,00	⊥	50	168	16	14	13,3	10,0

Hierin is: h_{bodem} = bodemligging van het smalle kanaalgedeelte ten opzichte van NAP
 α = helling talud smalle kanaalgedeelte
 B_1 = breedte aan de waterspiegel op het smalle kanaalgedeelte (bergende breedte) bij waterstand NAP \div 2,00 m
 B_2 = breedte aan de waterspiegel op het brede kanaalgedeelte (bergende breedte) bij waterstand NAP \div 2,00 m
 \hat{h}_{max} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste positieve translatiegolf
 \hat{h}_{min} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste negatieve translatiegolf

Konklusies

De met behulp van het rekenmodel verkregen resultaten geven dezelfde tendenzen weer als de resultaten van de handberekeningen, alleen zijn door de meer verfijnde rekentechniek verschillen ontstaan in de absolute grootte van de waterstandsvariatiën.

Daarbij blijkt dat vooral de eerste negatieve translatiegolf (\hat{h}_{min}) kleiner is dan de met de hand berekende waarde; zoals ook al in R 1225-deel I naar voren was gebracht. Verder moet worden aangetekend dat de negatieve translatiegolf in een aantal gevallen nog iets meer zal afnemen indien het doorslingeren van de kolk wordt tegengegaan; de optredende verschillen zijn echter klein.

Op de gevolgen van het doorslingeren zal in paragraaf 5.3 worden teruggekomen.

Uit de resultaten van de berekening kunnen de volgende konklusies worden getrokken:

1. Het effect van de hellende bodem is niet groot, vergelijk S1 (figuur 14) met S3 (figuur 16). Omdat ter plaatse van het doorlaatwerk een grotere waterdiepte aanwezig is, ontstaat een hogere golfsnelheid (c), met als gevolg enige verkleining van de translatiegolfhoogte. Dit geldt zowel voor \hat{h}_{max} als voor \hat{h}_{min} .
2. Door toepassing van een verticale wand op het smalle kanaalgedeelte ontstaat een verkleining van de breedte aan de waterspiegel, waardoor de waterstandsvariatiën zullen toenemen. Vergelijk S2 (figuur 15) met S3 (figuur 16).

3. Een verdere verbreding van het brede kanaalgedeelte dan volgens het in R 1225-deel I, paragraaf 3.4, gehanteerde criterium geeft nog een reductie van de translatiegolfhoogte. Vergelijking S3 (figuur 16) met S4 (figuur 17).

Aan de hand van de figuren 18 en 19 kan de invloed van de aanpassingen van de vormgeving van het kanaal Slaak op de golfhoogte in het kanaal (dus niet alleen ter plaatse van het doorlaatwerk) worden weergegeven.

In deze figuren staat voor S1 t/m S4 het waterstandsverloop uitgezet op kanaal Slaak voor de volgende drie plaatsen:

1. waterstand bij rioolschuiven (doorlaatwerk).
2. waterstand in het midden van het smalle kanaalgedeelte (100 m verder).
3. waterstand op de overgang van het smalle naar het brede kanaalgedeelte (200 m verder).

Hieruit komt duidelijk naar voren dat door aanpassingen in de vormgeving van het smalle kanaalgedeelte de waterstanden in het brede gedeelte nagenoeg niet wijzigen. Alleen als er aanpassingen plaatsvinden van het brede gedeelte, zoals bij S4 dan treedt hier pas een merkbare verandering van de waterstanden op. Omgekeerd heeft deze verandering wel invloed op de waterstanden in het smalle gedeelte.

5. Onderzoek van de ontwerpsituatie

5.1 Aanpassingen in vormgeving

In april 1977 kwam er een nieuwe situatietekening van de Rijkswaterstaat beschikbaar; C6 76.10332. Hierop was het gemaal zo dicht mogelijk bij het doorlaatwerk gesitueerd, waarbij het smalle kanaalgedeelte was teruggebracht tot een "trompetvormige" uitstroomkonstruktie met een lengte van 50 m.

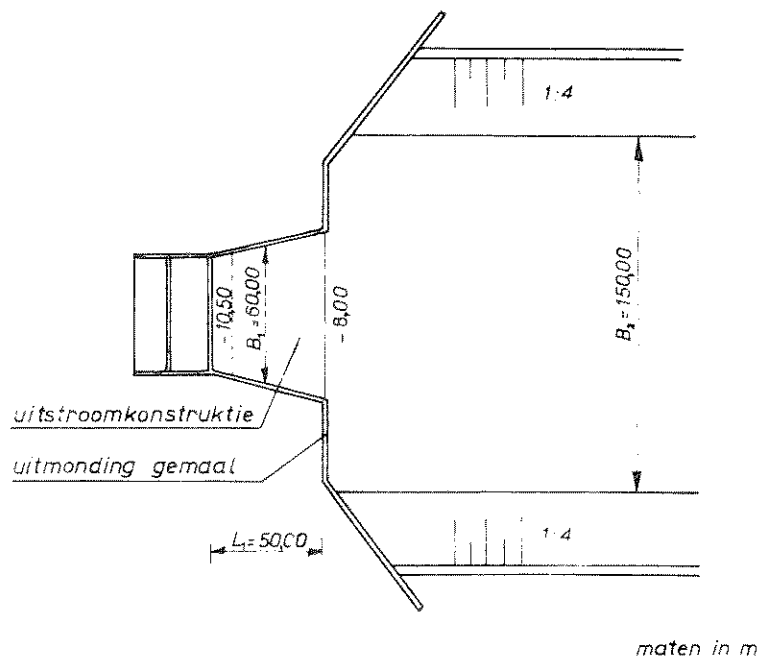


Fig. T9 Situatie begin kanaal Slaak volgens tek. C6 76.10332 (ontwerpsituatie)

Uitgaande van deze situatie, welke in dit rapport verder ontwerpsituatie wordt genoemd, zijn een aantal berekeningen uitgevoerd. In eerste instantie is daarbij geen rekening gehouden met de hellende bodem van de uitstroomkonstruktie, maar is deze bodem op NAP \div 8,00 m gehouden. Het wel opnemen van deze bodemhelling geeft slechts een zeer geringe verbetering, zoals in variant S10 wordt aangetoond.

Achtereenvolgens zijn berekeningen voor de volgende varianten uitgevoerd:

S5 Ontwerpsituatie, met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP \div 8,00 m.

Voor het verlopende gedeelte is de gemiddelde breedte van 60 m ingevoerd.

- S6 Ontwerpsituatie, waarbij als wijziging voor de uitstroomkonstruktie een lengte van 100 m is aangenomen; breedte 60 m, bodemligging NAP \div 8,00 m.
- S7 Ontwerpsituatie, waarbij als wijziging voor de uitstroomkonstruktie een lengte van 200 m is aangenomen; breedte 60 m, bodemligging NAP \div 8,00 m.
- S8 Ontwerpsituatie met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP \div 8,00 m. De bodembreedte van kanaal Slaak is op 100 m gesteld.
- S9 Ontwerpsituatie met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP \div 8,00 m. De bodembreedte van kanaal Slaak is op 200 m gesteld.
- S10 Ongewijzigde ontwerpsituatie.

Alvorens nu de gevolgen van de ingrepen op kanaal Slaak worden beschreven, zal eerst aan de hand van de berekeningsresultaten van variant S5 wat dieper op een aantal verschijnselen worden ingegaan.

Omdat deze verschijnselen door de aanpassingen in de vormgeving van kanaal Slaak nagenoeg niet wijzigen zal voor de overige varianten alleen het waterstandsverloop in kanaal Slaak worden weergegeven.

In de figuren 20 t/m 23 zijn voor variant S5 de waterstanden voor verschillende plaatsen uitgezet. Deze plaatsen zijn in figuur 1 aangegeven.

Verder worden nog het riooldebiet en het debiet en de stroomsnelheid in de mond van de voorhaven weergegeven. In de figuren zijn de resultaten van een periode van 50 minuten uitgezet.

Voorhaven

Uit figuur 20 blijkt dat pas na ca. 11 minuten de gevolgen van het nivelleren merkbaar worden in de voorhaven. Daarbij treden in de voorhaven bij de sluisen waterstandsvariatiën van maximaal 0,6 cm op.

In figuur 22 is verder de stroomsnelheid en het debiet in de mond van de voorhaven uitgezet. De voorkomende snelheden lopen op tot maximaal 0,9 cm/sec. Aangezien deze waarden voor de overige varianten van dezelfde orde van grootte zijn kan het volgende worden gekonkludeerd:

1. Uit de optredende waterstandsvariatiën volgt dat voor het gelijkwater criterium, wat betreft de momentane waterstandsverschillen tussen voorhaven en kanaal Slaak, de translatiegolfverschijnselen op kanaal Slaak

maatgevend zullen zijn.

2. De maximaal voorkomende snelheden zijn zo klein dat de scheepvaart hiervan geen hinder zal ondervinden.

Zijpe/Slaak

De waterstandsvariaties op het Zijpe blijven zoals te verwachten, gezien het grote wateroppervlak, tot een minimum beperkt.

De waterstandsvariaties op het Slaak bij Philipsdam (figuur 20) zijn relatief groot ten opzichte van de overige waterstanden. Dit laatste gegeven dient met de nodige voorzichtigheid te worden gehanteerd. In een later stadium zal nog worden nagegaan in hoeverre dit wordt veroorzaakt door de wijze van schematisatie van dat gedeelte van het Slaak (het translatiegolfverschijnsel wordt hier verder niet door beïnvloed).

Waarschijnlijk wordt deze waterstandsvariatie veroorzaakt doordat in het achterste gedeelte van het Slaak bij een waterstand van NAP \div 2,00 m nog slechts 0,50 m water aanwezig is met een relatief kleine bergende breedte. Door deze factoren ontstaat ten opzichte van de voorgaande tak een lage bc-waarde, met als gevolg dat de hoogte van de binnenlopende golf toeneemt.

Sluiskolk

In figuur 21 is het verloop van de waterstand in de kolk alsmede het debiet van één riool uitgezet. Uit de berekeningen blijkt dat de waterstandsvariaties bij de rioolschuiven (doorlaatwerk) na de eerste startperiode nagenoeg in fase loopt met de waterstand in de kolk.

Uit figuur 21 komt verder naar voren dat het doorslingeren van de kolkwaterstand niet gelijkmatig in de tijd afneemt. Er vindt een duidelijke verstoring plaats als gevolg van het na enige tijd wederom oplopen van de waterstandsvariaties ter plaatse van het doorlaatwerk.

Dit wordt veroorzaakt door gereflekteerde golven vanaf het Slaak. Deze golven zijn zowel afkomstig uit gebied I als uit gebied III (figuur 1); voor beide gebieden gelden nagenoeg gelijke looptijden.

Om de invloed van waterstandsvariaties bij het doorlaatwerk op de kolkwaterstand wat beter tot uitdrukking te laten komen, is in figuur T10 de amplitude van de uitwijking, ten opzichte van de nulstand (NAP \div 2,00 m), uitgezet tegen de periode. Uit deze grafiek kan de uitdempingstijd van het systeem (kolk-riool-buitenwater) worden afgeschat, terwijl hierin tevens de mate van verstoring zichtbaar wordt.

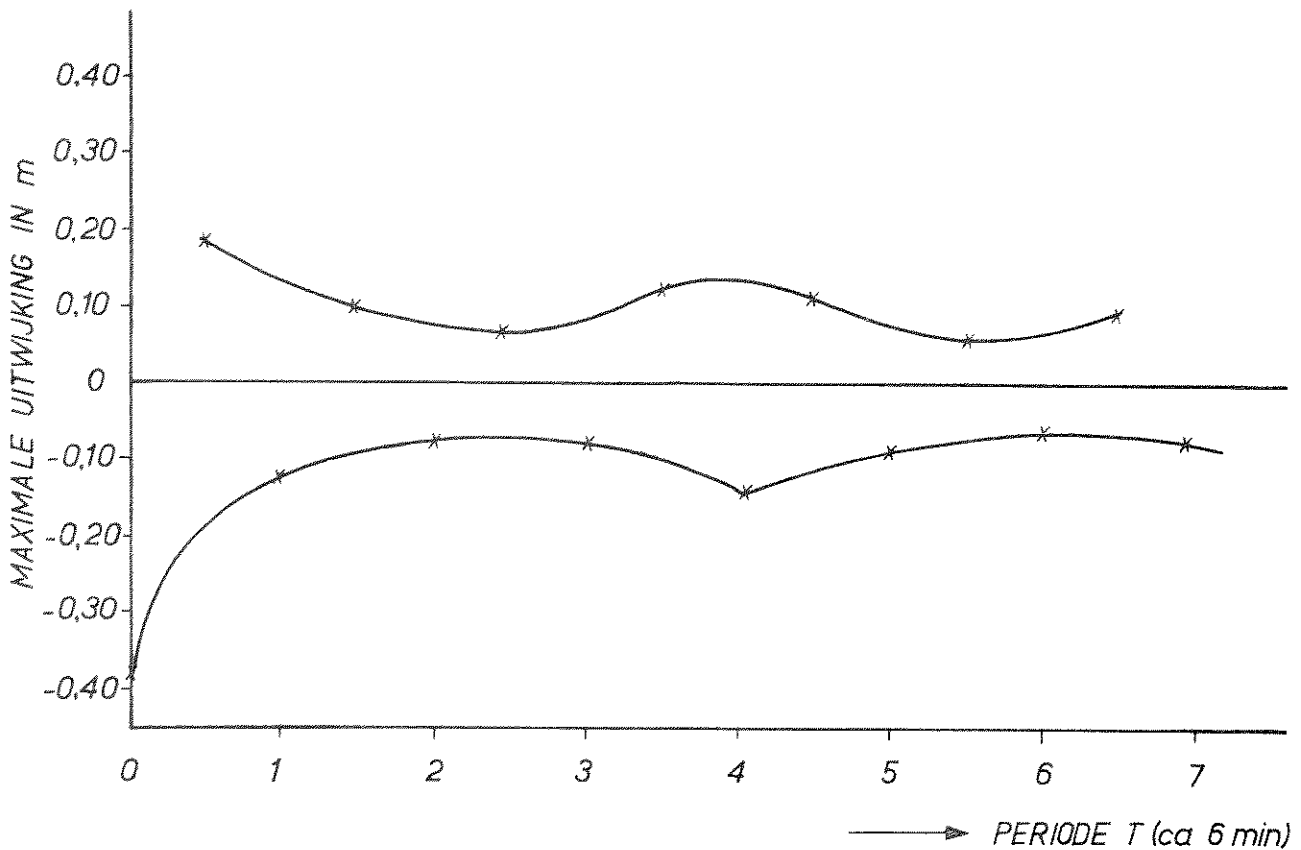


Fig. T10 Uitdempingstijd doorslingereffekt

Kanaal Slaak

Uit figuur 20 blijkt dat in de eerste periode van het op gang komen van het debiet (ca. 100 sec.) als gevolg van heen en weer lopende gereflekteerde golven een aantal sprongen in de helling (dn/dt) van de translatiegolfhoogte ter plaatse van het doorlaatwerk ontstaan.

Het verloop van dit proces kan in grote lijnen als volgt worden weergegeven: Tegelijkertijd met het op gang komen van het debiet vormt zich ter plaatse van het doorlaatwerk een positieve translatiegolf, welke zich voortplant door kanaal Slaak.

Direkt na het op gang komen van deze golf vindt er aan afzwakking in de toename van de translatiegolfhoogte bij het doorlaatwerk plaats, doordat op de overgang (diskontinuuïteit) van de uitstroomkonstruktie naar kanaal Slaak een negatieve gereflekteerde golf is ontstaan. De negatieve gereflekteerde golf wordt bij het doorlaatwerk volledig teruggekaatst, waarna de translatiegolfhoogte weer met dezelfde helling (dn/dt) begint toe te nemen. De teruggekaatste negatieve golf veroorzaakt bij hernieuwde aankomst op de diskontinuuïteit een positieve gereflekteerde golf, die dan weer extra ver-

sterkend werkt op de toename van de translatiegolfhoogte ter plaatse van het doorlaatwerk.

Dit proces herhaalt zich een aantal malen tot dat na ca. 100 sec het riooldebiet, en dus ook de translatiegolf ($\eta_t = f(Q_t)$), zijn maximale waarde heeft bereikt.

De looptijd van de golf in de uitstroomkonstruktie bedraagt $50/\sqrt{60} = 6,45$ sec, zodat in 12,90 sec een gereflekteerde golf al terug zal zijn bij het doorlaatwerk.

Omdat door deze omstandigheid de looptijd in de uitstroomkonstruktie kleiner is dan de in het rekenproces toegepaste tijdstap ($\Delta t = 10$ sec), is voor dezelfde situatie een tweede berekening (S5a) uitgevoerd met een kleinere tijdstap ($\Delta t = 2$ sec).

Uit deze berekening (figuur 23) blijkt dat de sprongen in de helling van de translatiegolfhoogte een iets minder scherp verloop krijgen. De hoogte (\hat{h}_{\max}) van de translatiegolf blijft echter hetzelfde, zodat hieruit kan worden gekonkludeerd dat de berekeningen met de toegepaste tijdstap ($\Delta t = 10$ sec) het verschijnsel van de heen en weer lopende gereflekteerde golven voldoende nauwkeurig weergeven.

Nadat de translatiegolf in hoogte afneemt als gevolg van de vermindering van het riooldebiet beginnen ook de gereflekteerde golven op kanaal Slaak zelf een rol te spelen.

De looptijd van een golf in kanaal Slaak (inklusief de uitstroomkonstruktie) bedraagt ca. 90 sec, zodat in ca. 180 sec een gereflekteerde golf, afkomstig van de overgang kanaal Slaak/Slaak bij het doorlaatwerk arriveert. Er ontstaan echter al eerder negatieve reflekties (na ca. 160 sec) omdat voor in de mond van kanaal Slaak een verwijding optreedt. De reflekties die als gevolg van deze verwijding optreden zijn van dezelfde orde van grootte als de reflekties afkomstig van de overgang naar het Slaak.

De negatieve gereflekteerde golven die na ca. 160 sec arriveren, veroorzaken een versterkte afname van de positieve translatiegolf, waardoor deze tenslotte overgaat in een negatieve translatiegolf.

Op het moment dat de negatieve translatiegolf nagenoeg zijn maximum waarde (\hat{h}_{\min}) heeft bereikt verandert het riooldebiet van teken, waardoor een versterking van de negatieve golf ontstaat. Daarnaast zal de negatieve golf ook langer in de tijd aanhouden. In het verdere verloop van de translatiegolf lopen nu twee verschijnselen door elkaar heen, namelijk de gereflekteerde golven op kanaal Slaak maar daarnaast ook het doorslingeren van de kolkwaterstand. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.3.

Voorgaande beschrijving toont aan dat een kleine lengte van de uitstroomkonstruktie (korte looptijden) en een grote verhouding tussen het dwarsprofiel van de uitstroomkonstruktie en kanaal Slaak (sterke reflekties) gunstig zijn voor afname van de translatiegolfhoogte. Ditzelfde komt nogmaals duidelijk naar voren in de berekeningsresultaten van de varianten S5 t/m S10, welke als volgt in schema kunnen worden weergegeven:

Variant	Fig.	h_{bodem} (m)	α	L_1 (m)	B_1 (m)	B_2 (m)	\hat{h}_{max} (cm)	\hat{h}_{min} (cm)	\hat{h}_{max} \hat{h}_{min}
S 5	20 t/m 23	$\div 8,00$	\perp	50	60	198	7,0	5,2	1,35
S 6	24	$\div 8,00$	\perp	100	60	198	7,9	5,8	1,36
S 7	24	$\div 8,00$	\perp	200	60	198	11,2	8,1	1,38
S 8	25	$\div 8,00$	\perp	50	60	148	9,0	7,9	1,14
S 9	25	$\div 8,00$	\perp	50	60	248	5,9	3,9	1,51
S10	26	variabel		50	60	198	6,7	5,0	1,34

Hierin is: h_{bodem} = bodemligging van de uitstroomkonstruktie
 α = helling talud uitstroomkonstruktie
 L_1 = lengte van het smalle gedeelte (uitstroomkonstruktie)
 B_1 = breedte aan de waterspiegel op het smalle kanaalgedeelte (bergende breedte) bij waterstand NAP $\div 2,00$ m
 B_2 = breedte aan de waterspiegel op het brede kanaalgedeelte (bergende breedte) bij waterstand NAP $\div 2,00$ m
 \hat{h}_{max} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste positieve golf
 \hat{h}_{min} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluitlaat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste negatieve golf

Konklusies

1. De plaats van de overgang van het smalle kanaalgedeelte (uitstroomkonstruktie) naar het kanaal Slaak is belangrijk omdat hiermee voor een groot deel het tijdstip bepaald wordt waarop de eerste gereflekteerde golf bij het doorlaatwerk arriveert (figuur 24). Hoe korter de lengte van het smalle gedeelte wordt gehouden, des te eerder zal er een "afvlakking"

van de positieve translatiegolf ontstaan, met als gevolg een kleinere golfhoogte.

De lengte van het smalle gedeelte is nauwelijks van invloed op de verhouding $\hat{h}_{\max} / \hat{h}_{\min}$; bij een toename van \hat{h}_{\max} neemt \hat{h}_{\min} evenredig toe.

Bij variant S7 met de grootste lengte (200 m) van het smalle gedeelte neemt na de eerste reflectie het riooldebiet alweer af. De gereflekteerde golven die daarna in het smalle gedeelte heen en weer lopen vallen gedeeltelijk samen met de gereflekteerde golven afkomstig van de mond van kanaal Slaak. Door deze kumulatie van reflecties neemt de positieve translatiegolf sneller af waardoor ook de negatieve golf eerder ontstaat. Dit leidt er toe, dat het moment waarop de negatieve golf zijn maximale waarde bereikt en het moment waarop het debiet van stromingsrichting verandert uit fase gaan lopen, met als gevolg de sprong in de negatieve translatiegolf.

2. De grootte van het dwarsprofiel van kanaal Slaak ten opzichte van het dwarsprofiel van de uitstroomkonstructie is bepalend voor de grootte van de gereflekteerde golf (figuur 25). Bij een breedte groter dan in de ontwerpsituatie zal de positieve translatiegolfhoogte (\hat{h}_{\max}) nog verder afnemen, als gevolg van de grotere reflectiecoëfficiënt.

De negatieve translatiegolf neemt daarbij relatief meer in waarde af, zoals uit de verhouding $\hat{h}_{\max} / \hat{h}_{\min}$ blijkt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat bij een grotere breedte van kanaal Slaak de reflectiecoëfficiënt aan de mond van het kanaal afneemt.

3. Het aanbrengen van de helling in de uitstroomkonstructie geeft nog een kleine verlaging van de translatiegolf doordat de golfsnelheid iets toeneemt (figuur 26).

Dit geldt zowel voor de positieve als voor de negatieve translatiegolf zoals uit de verhouding $\hat{h}_{\max} / \hat{h}_{\min}$ naar voren komt.

5.2 Verschillende begin- en randvoorwaarden

Uitgaande van de ontwerpsituatie zijn er een drietal berekeningen uitgevoerd, waarbij de randvoorwaarden, danwel de beginvoorwaarden zijn gewijzigd.

Als uitgangspunt dient daarbij de volgende berekeningsvariant:

S5 Ontwerpsituatie, met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstructie op NAP \div 8,00 m. Voor het verlopende gedeelte is de gemiddelde breedte van 60 m ingevoerd.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

- S11 Het nivelleren van kolk II vindt plaats, waarbij het riool een lengte heeft van 295 m, terwijl ook de weerstand is aangepast.
- S12 Hierbij wordt naast het nivelleren de getijbeweging in rekening gebracht.
- S13 Nivelleren vindt plaats in de vloedfase bij een gelijk verval; waterstand zoute pand NAP +2,00 m, waterstand kolk NAP.

Voor de berekening S11 is bij de schematisatie van het riool uitgegaan van de volgende gegevens:

1. het riool bestaat uit twee delen met verschillende doorsneden:
 - lengte (L_1) is 272,60 m met een doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$
 - lengte (L_2) is 35,00 m met een doorsnede van $4,75 \times 8,60 \text{ m}^2$
2. De totale weerstand van het riool is $\xi = 3,25$ (betrokken op een doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$)

Voor de omrekeningsmethode, om van een riool met deze afmetingen over te gaan naar een riool met één enkele doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$ en een lengte van 295 m, wordt verwezen naar bijlage I.

In berekening S12 is de invloed van het getij op de translatiegolfverschijnselen weergegeven. Om aan de juiste beginvoorwaarden te komen is echter eerst een aparte berekening S12A met alleen de getijbeweging (zonder translatiegolven) uitgevoerd. Daartoe is de randvoorwaarde op de afbreekrand gewijzigd in een vaste opgelegde waterstandsvariatie ($h = \hat{h} \sin \omega t$) met een periode van 12 uur; dat wil zeggen eventuele golven kunnen niet meer ongestoord uit het model wegllopen.

Om aan inspeelverschijnselen te ontkomen zijn daarna een vijftal periodes doorgerekend; zie figuur 29 waarin voor de laatste periode een drietal waterstanden zijn weergegeven.

De gegevens uit de laatste periode van berekening S12A zijn nu gebruikt als beginvoorwaarde voor de uiteindelijke berekening S12.

Aangezien in het rekenprogramma NEBAS de dQ/dt niet als beginvoorwaarde kan worden ingevoerd, zijn in plaats daarvan de debieten in alle takken en de waterstanden in alle knooppunten (tabel 4) van het rekenmodel opgegeven. Uitgangspunt vormen de gegevens van een half uur voor laagwater, waarbij met de gekozen rekentijd van 50 minuten wordt doorgerekend tot 20 minuten na laagwater. Op de afbreekrand van het rekenmodel is de in die periode aanwezige waterstands- en debietvariatie aangebracht, waarbij de translatiegolf die op deze plaats arriveert weer ongestoord uit het model kan wegllopen.

De resultaten van de berekeningen kunnen als volgt in schema worden weer-
gegeven:

Variant	Fig.	\hat{h}_{\max} (cm)	\hat{h}_{\min} (cm)	$\hat{h}_{\max}/\hat{h}_{\min}$	\hat{Q}_{\max}	\hat{Q}_{\min}
S 5	20 t/m 23	7	5,2	1,35	47,9	20,3
S11	27/28	6,7	4,1	1,63	46,8	21,5
S12	30	7 á 8	5,2	1,35 á 1,54	47,0	20,0
S13	31 t/m 33	4,6	3,5	1,31	48,6	20,5

Hierin is: \hat{h}_{\max} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluit-
laat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste positieve golf
 \hat{h}_{\min} = maximale waterstandsvariatie ter plaatse van de riooluit-
laat (doorlaatwerk) ten tijde van de eerste negatieve golf
 \hat{Q}_{\max} = maximale debiet tijdens nivelleren
 \hat{Q}_{\min} = maximale debiet tengevolge van het doorslingeren van de
kolkwaterstand

Konklusies

- Invloed rioollengte (S11)

1. Tengevolge van het langere riool ontstaat er een grotere traagheid met als gevolg een verder doorschieten van de kolkwaterstand. Ten opzichte van berekeningsvariant S5 ontstaat er een duidelijk faseverschil (figuur 28).
2. De positieve translatiegolf op kanaal Slaak komt wat trager op gang en houdt ook iets langer aan; de verschillen zijn echter klein. Ondanks de kleine verschillen ontstaat een relatief lagere negatieve translatiegolf (figuur 27), zoals ook uit de verhouding $\hat{h}_{\max}/\hat{h}_{\min}$ blijkt. Dit wordt veroorzaakt door de grotere traagheid in relatie met de loop-snelheid van de gereflekteerde golven (die niet verandert). Bij een verder in de tijd "uitsmeren" van het debiet (bijvoorbeeld door het toepassen van een lagere hefsnelheid van de schuif) zal dus hetzelfde verschijnsel optreden.

- Beïnvloeding van translatiegolven door getij (S12).

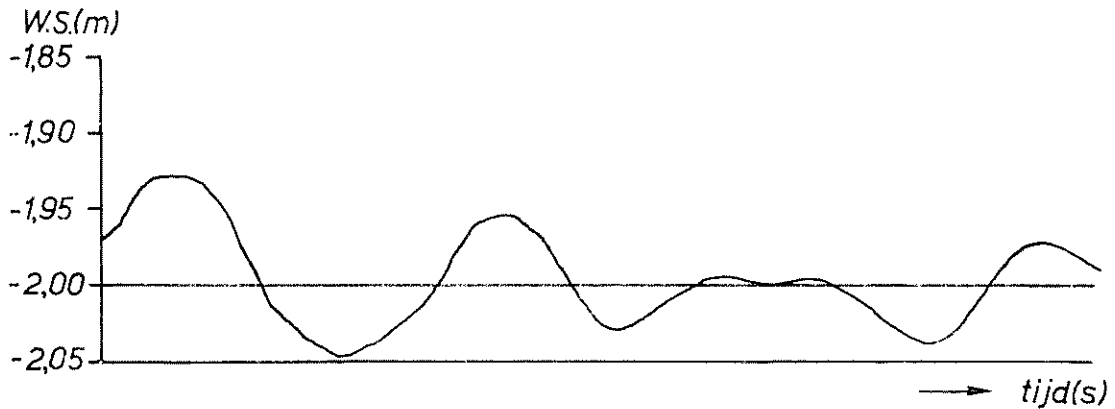
3. Een exakte hoogte van de eerste positieve translatiegolf kan moeilijk worden gegeven, omdat naast de heen en weerlopende reflekties ook inspeelverschijnselen aanwezig zijn. Uit figuur 30 komt echter duidelijk naar voren dat de eerste positieve golf in orde van grootte gelijk is aan die uit berekeningsvariant S5. Indien de waterstandsvariatie tengevolge van het getij van het golfverloop wordt afgetrokken, dan blijft er hetzelfde golfbeeld over als bij berekeningsvariant S5. Er kan dan ook gesteld worden dat de translatiegolven niet noemenswaardig worden beïnvloed door het getij. Het totale golfbeeld kan voor een willekeurige situatie worden verkregen door het golfbeeld veroorzaakt door de translatiegolven en het golfbeeld veroorzaakt door het getij te superponeren, zoals in figuur T11 is weergegeven.

4. Naast de normale getijbeweging blijkt er nog een extra golfbeweging in de voorhaven (ca. half uur; amplitude ca. 3 à 4 cm) en in het Slaak (ca. 1 uur; amplitude ca. 3 à 5 cm) aanwezig te zijn; zie figuur 29. Beide golfbewegingen zullen echter in werkelijkheid niet voorkomen; zij worden veroorzaakt door de wijze van inlezen van de randvoorwaarden. Hierbij speelt zowel de gekozen tijdstap (900 sec) voor het inlezen van de randvoorwaarden een rol, als het feit dat de afbreekrand bij berekening S12A als een vaste rand fungeert. Door aanpassing van deze tijdstap (120 sec) blijkt de golf in de voorhaven al te zijn verdwenen, in het Slaak blijft hij echter aanwezig. Nadere analyse heeft echter aangetoond dat er zich op het Slaak een staande golf bevindt, waarbij de afbreekrand als vast punt werkt.

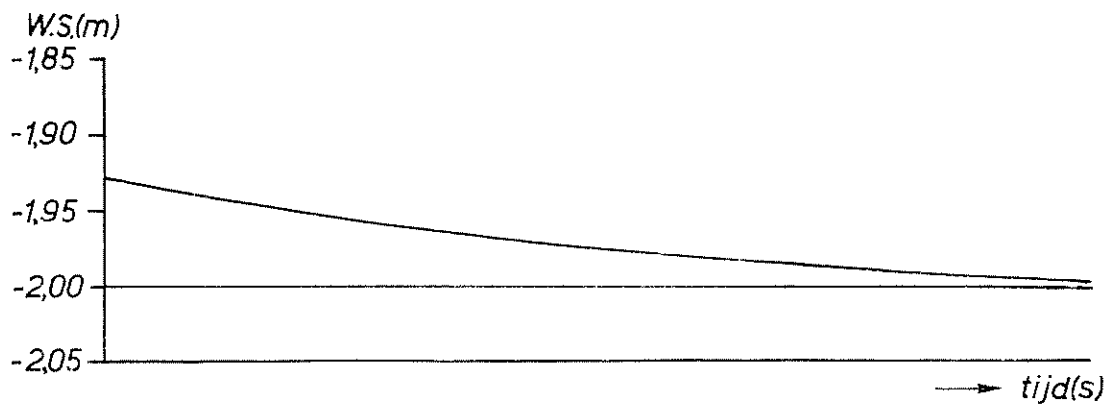
Pogingen om deze verschijnselen ongedaan te maken leverden dermate veel extra werk op dat hiervan verder is afgezien. In het kader van deze studie is slechts gekeken naar de invloed van het getij (dQ/dt) op de translatiegolven, ten gevolge van het nivelleren van één sluiscolk.

- Translatiegolf bij hoge waterstand (S13)

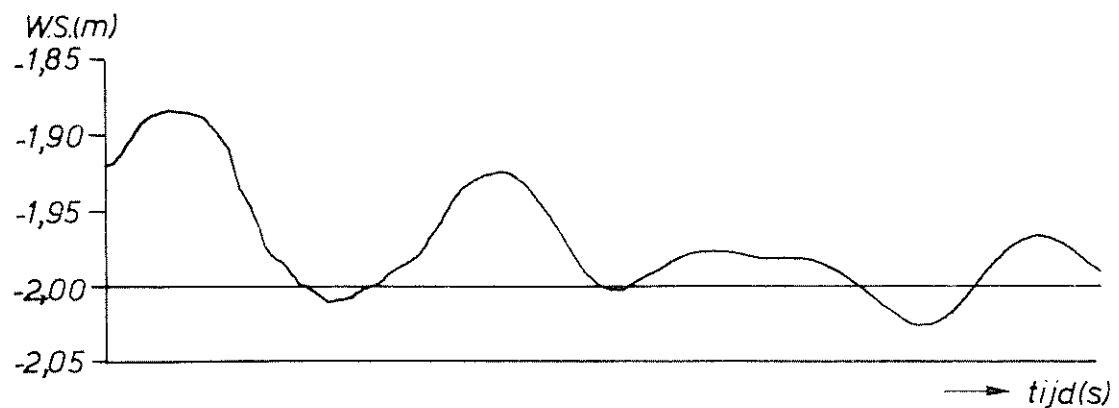
5. In de vloedfase ontstaat een in absolute zin even groot maximum nivelleerdebiet \hat{Q}_{\max} (figuur 32), terwijl ook het maximum doorslingerdebiet \hat{Q}_{\min} zich niet wijzigt.



A. Golfbeeld veroorzaakt door translatiegolf



B. Golfbeeld veroorzaakt door getij



C. Gesuperponeerd golfbeeld translatiegolf + getij

Fig. T11 Superpositie: golfbeeld veroorzaakt door translatiegolf en door getij

6. Als gevolg van de hogere translatiegolfsnelheden en de grotere bergende breedte van het dwarsprofiel (grotere waterdiepte) nemen zowel de positieve als de negatieve translatiegolf in grootte af; de verhouding $\hat{h}_{\max} / \hat{h}_{\min}$ wijzigt zich nauwelijks (figuur 31).

7. De waterstandsvariatiën in de voorhaven veranderen in de vloedfase in het geheel niet. De maximaal voorkomende stroomsnelheden in de mond van de voorhaven zijn door de grotere waterdiepte echter afgenomen tot 0,5 cm/sec (figuur 33).

5.3 Doorslingeren kolkwaterstand

In paragraaf 5.1 is al gewezen op het feit dat er bij het translatiegolfverschijnsel op kanaal Slaak twee verschillende effecten door elkaar heen lopen.

1. Door het nivelleren ontstaat een translatiegolf die, als gevolg van heen en weer lopende reflekties, een bepaalde waterstandsvariatie bij het doorlaatwerk veroorzaakt.
2. Het doorslingeren van de kolkwaterstand doet steeds nieuwe debieten bij het doorlaatwerk ontstaan die ieder op zich weer een translatiegolf veroorzaken.

Om nu te kunnen vaststellen welke van deze twee effecten bepalend is voor het optredende translatiegolfverschijnsel, is de volgende berekening gemaakt, die kan worden vergeleken met S5:

S14 Ontwerpsituatie, met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP \div 8,00 m. Voor het verlopende gedeelte is de gemiddelde breedte van 60 m ingevoerd.

Het nivelleren wordt gesimuleerd door een als randvoorwaarde opgegeven debiet, waarbij er van uitgegaan wordt dat aan het eind van het nivelleren de rioolschuiven weer gesloten zijn, zodat het doorslingeren niet kan optreden.

Voor deze berekening is de schematisatie van het netwerk gewijzigd. De kolk en de riolen zijn verwijderd, waardoor het netwerk begint bij het doorlaatwerk (knooppunt 2). In knooppunt 2 is nu het externe debiet aangebracht, dat gelijk is aan het dubbele riooldebiet (figuur 34; verticale schaal faktor twee verkleind).

Gekozen is voor deze debietkromme omdat dan een goede vergelijking mogelijk is met S5. In werkelijkheid zal bij het weer dichtsturen van de rioolschuiven een kleiner maximaal debiet ontstaan, terwijl ook de dQ/dt over het laatste gedeelte van de kromme een veel lagere waarde zal gaan aannemen. Het extern opgeven van het debiet houdt wel in dat er geen terugkoppeling aanwezig is tussen de waterstand bij het doorlaatwerk en het debiet.

In de figuren 35 en 36 zijn de translatiegolfverschijnselen weergegeven die ontstaan bij een enkel nivelleerdebiet. Alleen op kanaal Slaak ondergaat het waterstandsverloop een zichtbare verandering (vergelijk met S5; figuren 20 en 22). Om dit wat duidelijker te demonstreren zijn in figuur 37 de waterstandsvariatiën bij de rioolschuiven (doorlaatwerk), in de mond van kanaal Slaak en in de voorhaven bij de sluisen uitgezet, met (S5) en zonder (S14) het doorslingeren van de kolkwaterstand.

Uit deze berekeningsresultaten kan het volgende worden gekonkludeerd:

1. De optredende waterstandsvariatiën in de voorhaven Slaak en Zijpe wijken weinig af van de waarden die volgen uit de berekeningen met het doorslingeren van de kolkwaterstand. Ook het stroomsnelheidsverloop in de mond van de voorhaven ondergaat in absolute grootte geen wijziging.
2. De waterstandsvariatiën op kanaal Slaak ondergaan weliswaar een wijziging qua vorm maar de optredende translatiegolfhoogten blijven in orde van grootte gelijk; er vindt geen snellere uitdemping plaats. Alhoewel er bij S14 tijdelijk een kleinere golfhoogte aanwezig is (van 400 sec t/m 1200 sec) heeft dit, indien er van uitgegaan wordt dat de beide duwvaartsluizen volkomen onafhankelijk van elkaar werken, weinig effect omdat de daarna opnieuw optredende translatiegolven de nivelleerfase van de andere sluis kunnen verstoren.
3. In paragraaf 5.1 was reeds vermeld dat de waterstandsvariatie bij de rioolschuiven (doorlaatwerk) na de eerste startperiode nagenoeg in fase loopt met de waterstand in de kolk (berekeningsvariant S5).

Dit leidt tot twee verschillende veronderstellingen:

- Door een toevallige samenloop van omstandigheden heeft het doorslingeren van de waterstand in de kolk eenzelfde periode als de translatiegolf in kanaal Slaak. De translatiegolfperiode in kanaal Slaak is daarbij een functie van de afmetingen van het kanaal; of:
- Het doorslingeren van de kolkwaterstand is dermate dominant dat het translatiegolfverschijnsel hierdoor volledig wordt bepaald.

Uit punt 2 volgt nu dat het doorslingeren van de kolkwaterstand geen belangrijke invloed heeft op het verloop van de translatiegolven in kanaal Slaak.

Het doorslingeren van de waterstand in de kolk blijkt nagenoeg dezelfde periode te hebben als de waterstandsvariatiën (in S14) ter plaatse van het doorlaatwerk. Maatregelen ter voorkoming van het doorslingeren van de kolkwaterstand zullen dus niet automatisch leiden tot een afname van de translatiegolf; hierbij kan gedacht worden aan het gedeeltelijk

dichtsturen van de rioolschuiven aan het einde van de nivelleerfase.

Opmerkingen

- De bij S14 optredende piek in de negatieve translatiegolf (na 290 sec) wordt veroorzaakt door de diskontinuuïteit in de dQ/dt die plotseling de waarde nul aanneemt.
- Duidelijk is nu ook de invloed op de negatieve translatiegolf waarneembaar van de heen en weer lopende reflekties in de uitstroomkonstruktie, die een versnelde afname van deze golf veroorzaken.
- Na 1200 sec nemen de waterstandsvariatiës in kanaal Slaak weer toe. Dit wordt veroorzaakt door reflekties afkomstig van het Slaak (zowel uit gebied I als gebied III - figuur 1 - voor beide gebieden gelden nagenoeg gelijk looptijden).

5.4 Invloed verondieping Slaak en kanaal Slaak

Voor de ontwerpsituatie zijn tenslotte nog een vijftal berekeningen uitgevoerd, waarbij de invloed van verondieping van het Slaak en/of kanaal Slaak is bekeken.

Als uitgangspunt dient daarbij de volgende berekeningsvariant:

S5 Ontwerpsituatie, met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP \div 6,00 m. Voor het verlopende gedeelte is de gemiddelde breedte van 60 m ingevoerd.

Teneinde één en ander zo overzichtelijk mogelijk weer te geven zijn in figuur 1 een drietal gebieden, waar de verondiepingen zijn aangebracht, genummerd van I t/m III:

Gebied I het gedeelte van het Slaak tussen Philipsdam en mond van kanaal Slaak; gemiddelde bodemligging NAP \div 7,50 m.

Gebied II kanaal Slaak; bodemligging NAP \div 8,00 m

Gebied III het gedeelte van het Slaak tussen mond van kanaal Slaak en het Zijpe; gemiddelde bodemligging NAP \div 7,50 m.

Achtereenvolgens zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

S15 Uitgangssituatie, met de bodem van gebied I op NAP \div 5,00 m

S16 Uitgangssituatie, waarbij gebied I geheel is afgedamd

S17 Uitgangssituatie, met de bodem van gebied I en III op NAP \div 5,00 m

S18 Uitgangssituatie, met de bodem van gebied I, II en III op NAP ÷ 5,00 m

S19 Uitgangssituatie, met de bodem van gebied I, II en III op NAP ÷ 3,00 m

In de schematisatie zijn de verondiepingen aangebracht, door op de betreffende diepte een nieuwe bodem aan te nemen ter grootte van de aanwezige breedte van het dwarsprofiel.

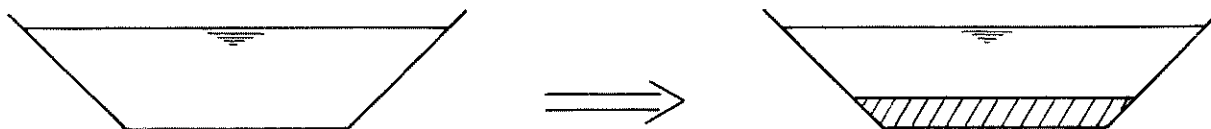


Fig. T12 Wijze van schematisatie verondieping

De resultaten van de berekeningen kunnen als volgt in schema worden weergegeven:

Var.	Fig.	Gem. diepte van het gebied (m t.o.v. NAP)			Translatiegolfhoogte (cm)		$\hat{h}_{\max}/\hat{h}_{\min}$
		I	II	III	\hat{h}_{\max}	\hat{h}_{\min}	
S 5	38	- 7,50	- 8,00	- 7,50	7,0	5,2	1,35
S15	39	- 5,00	- 8,00	- 7,50	7,0	4,7	1,49
S16	40	-	- 8,00	- 7,50	7,0	2,9	2,41
S17	41	- 5,00	- 8,00	- 5,00	7,0	4,1	1,71
S18	42	- 5,00	- 5,00	- 5,00	10,7	12,3	0,87
S19	43	- 3,00	- 3,00	- 3,00	21,0	10,0	2,10

Konklusies

1. Uit vergelijking van S5 en S15 blijkt dat verondieping van gebied I een gunstige invloed heeft.

In het extreme geval dat dit gedeelte zelfs geheel wordt afgedamd (S16) levert dit een aanzienlijke reductie op.

Omdat er op kanaal Slaak geen wijzigingen plaatsvinden wordt de eerste

positieve golf niet beïnvloed door de aanzandingen.

2. Uit vergelijking van S5, S15 en S17 komt naar voren dat het verondiepen van gebied I en III nog gunstiger werkt. Ook hier wordt de eerste positieve golf niet beïnvloed door de verondiepingen.
3. Uit vergelijking S5, S17 en S18 blijkt dat zodra er ook verondieping plaatsvindt in kanaal Slaak (gebied II), dat dan de situatie ongunstiger wordt. S19 geeft dan nog eens het extreme beeld weer, waarbij er slechts nog 1 m water aanwezig is in kanaal Slaak en het Slaak. Door de verondieping van kanaal Slaak wordt de hoogte van de eerste positieve golf wel beïnvloed.

Tenslotte is de invloed van windopzet nagegaan in geval van verondieping van kanaal Slaak. Daarbij is gebruik gemaakt van de formule [5]:

$$\Delta h = \frac{\alpha' \cdot w^2 \cdot L_s}{g h_{gem}} \quad (19)$$

- Waarin: Δh = waterstandsverschil door wind
 α' = schuifspanningscoëfficiënt; experimenteel bepaald op
 $\alpha \approx 0,25 \times 10^{-5}$
 w = windsnelheid; 20 m/s (= Beaufort 8 á 9, stormachtig tot storm)
 L_s = maatgevende strijklengte, waarbij bedacht moet worden dat het hier om waterstandsverschillen (Δh) tussen de voorhaven (bij de sluisdeuren) en het kanaal Slaak (bij het doorlaatwerk) gaat; lengte ca. 1 km
 h_{gem} = gemiddelde waterdiepte over het beschouwde traject

In onderstaande tabel zijn de waterstandsverschillen tussen voorhaven en doorlaatwerk weergegeven voor verschillende waterdiepten in kanaal Slaak.

h_{gem} (m)	Δh (m)
6,00	0,017
5,00	0,020
3,00	0,034
1,00	0,102

Hieruit volgt dat bij verondieping van kanaal Slaak eveneens de waterstandsverschillen tussen voorhaven en doorlaatwerk zullen toenemen.

LITERATUUR

- [1] Kollegediktaat "Lange golven in leidingen" - deel 1
Technische Hogeschool Delft
- [2] Proceeding and informations no. 18
Hydraulic Research for Water Management
"Computational methods for channel flow" C.B. Vreugdenhil
- [3] Proceedings Institution Mechanical Engineers Volume 189 40/75
"Fundamental equations governing pressure surge phenomena in pipes
of rectangular cross-section" A.R.D. Thorley, C. Guymmer
- [4] Rijkswaterstaat, Deltadienst, Afdeling Waterbouwkundige Werken Oost
"Duwvaartsluizen Philipsdam"
- [5] Waterloopkundig Laboratorium
"Philipsdamsluizen "Translatiegolfberekeningen kanaal Slaak"
Verslag onderzoek R 1225-I
- [6] Waterloopkundig laboratorium
Duwvaartsluizen in de Philipsdam - hoogteligging in-, uit- en
doorlaatwerk
Verslag onderzoek R 1209
- [7] Waterloopkundig Laboratorium
"Zoutbestrijding Kreekraksluizen - Onderzoek rioolschuiven en woelbak
bij zoutbestrijding volgens systeem Duinkerken"
Verslag modelonderzoek M 865-VI

Tabel 1 Gegevens geschematiseerde kanaalvakken

Vak	Omschrijving	lengte (m)	bodem breedte (m)	bodem hoogte (m tov NAP)	natte * doorsnede (m ²)	bergende * breedte	Opmerkingen
1	riool	200	-	-	-	-	zie bijlage I
2	kanaal Slaak	50	60	- 8,00	360,00	60,00	
3	kanaal Slaak	100	150	- 8,00	1044,00	198,00	
4	kanaal Slaak	100	150	- 8,00	1044,00	198,00	
5	kanaal Slaak	100	150	- 8,00	1044,00	198,00	
6	kanaal Slaak	100	170	- 8,00	1164,00	218,00	
7	kanaal Slaak	100	210	- 8,00	1404,00	258,00	
8	kanaal Slaak	100	400	- 8,00	2544,00	448,00	
9	Slaak	400	70	- 7,50	1342,80	418,30	
10	Slaak	400	100	- 7,50	1362,80	411,00	
11	Slaak	400	220	- 7,50	1977,30	339,00	
12	Slaak	400	40	-10,00	1171,50	256,00	
13	Slaak	400	60	- 7,50	723,00	484,00	
14	voorhaven	400	220	- 7,00	1100,00	220,00	
15	voorhaven	300	200	- 7,00	1475,00	400,00	
16	voorhaven	300	240	- 7,00	1300,00	280,00	
17	voorhaven	300	400	- 7,00	2100,00	440,00	
18	voorhaven	300	390	- 7,00	2050,00	410,00	
19	voorhaven	300	360	- 7,00	1900,00	400,00	
20	voorhaven	150	350	- 7,00	1850,00	390,00	
21	voorhaven	150	180	- 7,00	1000,00	220,00	
22	Zijpe	400	150	-25,00	9416,25	835,00	
23	Zijpe	500	180	-15,00	8520,00	1080,00	
24	Zijpe	500	250	-12,50	7529,20	983,30	
25	Zijpe	500	200	-12,50	6495,20	867,33	
26	Zijpe	500	5	-17,50	9065,80	1046,67	
27	Zijpe	500	130	-12,50	7440,80	1046,67	
28	Slaak	500	90	- 7,50	1242,50	380,00	
29	Slaak	500	20	- 7,50	1092,55	340,20	
30	Slaak	500	110	- 7,50	992,00	338,00	
31	Slaak	500	80	- 7,50	901,88	277,50	
32	Slaak	500	530	- 2,50	266,00	534,00	
33	Slaak	500	50	- 2,50	35,00	90,00	
34	riool	200	-	-	-	-	
35	Zijpe	400	150	-25,00	9416,25	835,00	
36	Zijpe	400	150	-25,00	9416,25	835,00	

* waarden bepaald bij waterstand NAP ÷ 2,00 m

Tabel 2 Schuifverliescoëfficiënt als functie van d/D

d/D	ξ_{schuif}	$\xi_{\text{schuif}} + \xi_{\text{riool}}$	$\xi_{\text{ingevoerd}}$	Opmerkingen
-0,05	2600	2602,327	0,19432	} heffen schuif
-0,02	1700	1702,327	0,12711	
0	800	802,327	0,05991	} uit sponning
0,02	380	382,327	0,02855	
0,05	150	152,327	0,01137	
0,10	62	64,327	0,00480	
0,15	31	33,327	0,00249	
0,20	18,5	20,827	0,00156	
0,25	12,5	14,827	0,00111	
0,30	8,2	10,527	0,00079	
0,35	5,9	8,127	0,00061	
0,40	4,4	6,727	0,00050	
0,45	3,4	5,727	0,00043	
0,50	2,6	4,927	0,00037	
0,55	2,05	4,377	0,00033	
0,60	1,65	3,977	0,00030	
0,65	1,30	3,627	0,00027	
0,70	1,00	3,327	0,00025	
0,75	0,70	3,027	0,00023	
0,80	0,50	2,827	0,00021	
0,85	0,30	2,627	0,00020	
0,90	0,20	2,527	0,00019	
0,95	0,08	2,447	0,00018	
1,00	0	2,327	0,00017	

$$v_{\text{schuif}} = 0,02 \quad \text{m/s}$$

$$\text{sponningdiepte} = 0,25 \quad \text{m}$$

$$\xi_{\text{riool}} \text{ (voor bepaling zie bijlage I)} = 2,327$$

$$\text{omrekeningsfaktor } (2 g A^2)^{-1} = 7,467 \times 10^{-5} \text{ s}^2/\text{m}^5$$

ξ_{schuif} is betrokken op de doorsnede ter plaatse van de schuif

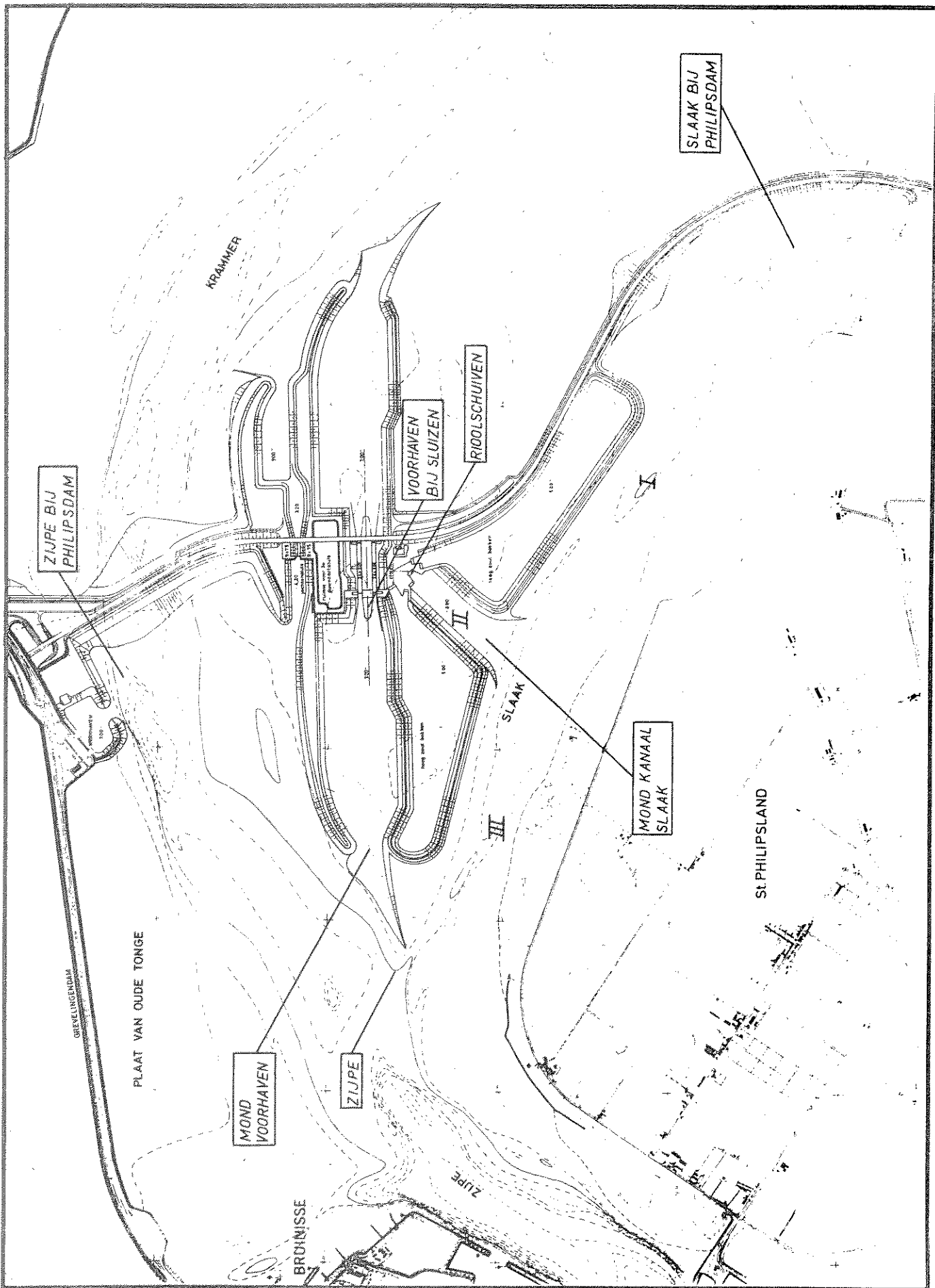
Tabel 3 Uitgevoerde berekeningen

Variant	Omschrijving
PROEFBEREKENINGEN	
P1	Situatie volgens RWS tekening C7.76.10308, met als wijziging verticale wanden op het smalle gedeelte en een langzaam oplopende bodem over de gehele lengte van het smalle deel
P2	Variant P1 met een hogere weerstand in de takken
P3	Variant P1 met een aantal kortsluitingen op het Zijpe
P4	Variant P1 met de bergende breedte van het riool op 0,25 m
P5	Variant P1 met de bergende breedte van het riool op 0,125 m
P6	Aparte schematisatie voor vullen kolk met rekenprogramma VLKOLK
P7	Aparte schematisatie voor vullen kolk met rekenprogramma NEBAS, met de bergende breedte van het riool op 0,50 m
P8	Variant P7 met de bergende breedte op 0,01 m
P9	Variant P8, waarbij in de continuïteitsvergelijking de berging van het riool nul is gesteld
BEREKENINGEN VOOR DE VERSCHILLENDE SITUATIES	
S1	Situatie volgens figuur T8, paragraaf 4.1, met als wijziging een verticale wand op het smalle kanaalgedeelte en een over de gehele lengte van het smalle gedeelte hellende bodem
S2	Situatie volgens figuur T8
S3	Variant S2 met als wijziging een verticale wand op het smalle kanaalgedeelte
S4	Variant S3 met als wijziging de bodembreedte van het brede kanaalgedeelte teruggebracht van 150 m tot 120 m
S5	Ontwerpsituatie (figuur T9) met als wijziging de bodem van de uitstroomkonstruktie op NAP ÷ 8,00 m
S5A	Variant S5 met een rekentijdstap $\Delta t = 2$ sec
S6	Variant S5 met als wijziging de lengte van de uitstroomkonstruktie L = 100 m
S7	Variant S5 met als wijziging de lengte van de uitstroomkonstruktie L = 200 m
S8	Variant S5 met als wijziging de bodembreedte van het brede kanaalgedeelte teruggebracht tot 100 m
S9	Variant S5 met als wijziging de bodembreedte van het brede kanaalgedeelte verbreedt tot 200 m
S10	Ontwerpsituatie (figuur T9)
S11	Variant S5 waarbij het nivelleren plaatsvindt van kolk II met een rioollengte van 295 m
S12A	Variant S5 met alleen het getij, zonder translatiegolven
S12	Variant S5 met als wijziging de getijbeweging op de afbreekrand van het rekenmodel
S13	Variant S5, waarbij het nivelleren in de vloedfase plaatsvindt bij een gelijk verval; waterstand zoute pand NAP +2,00 m, waterstand kolk NAP
S14	Variant S5, nivelleren waarbij het doorslingeren van de kolk is tegengegaan
S15	Variant S5, met bodem van gebied I (figuur 1) op NAP ÷ 5,00 m
S16	Variant S5, waarbij gebied I geheel is afgedamd
S17	Variant S5, waarbij de bodem van gebied I en III op NAP ÷ 5,00 m
S18	Variant S5, waarbij de bodem van gebied I, II en III op NAP ÷ 5,00 m
S19	Variant S5, waarbij de bodem van gebied I, II en III op NAP ÷ 3,00 m

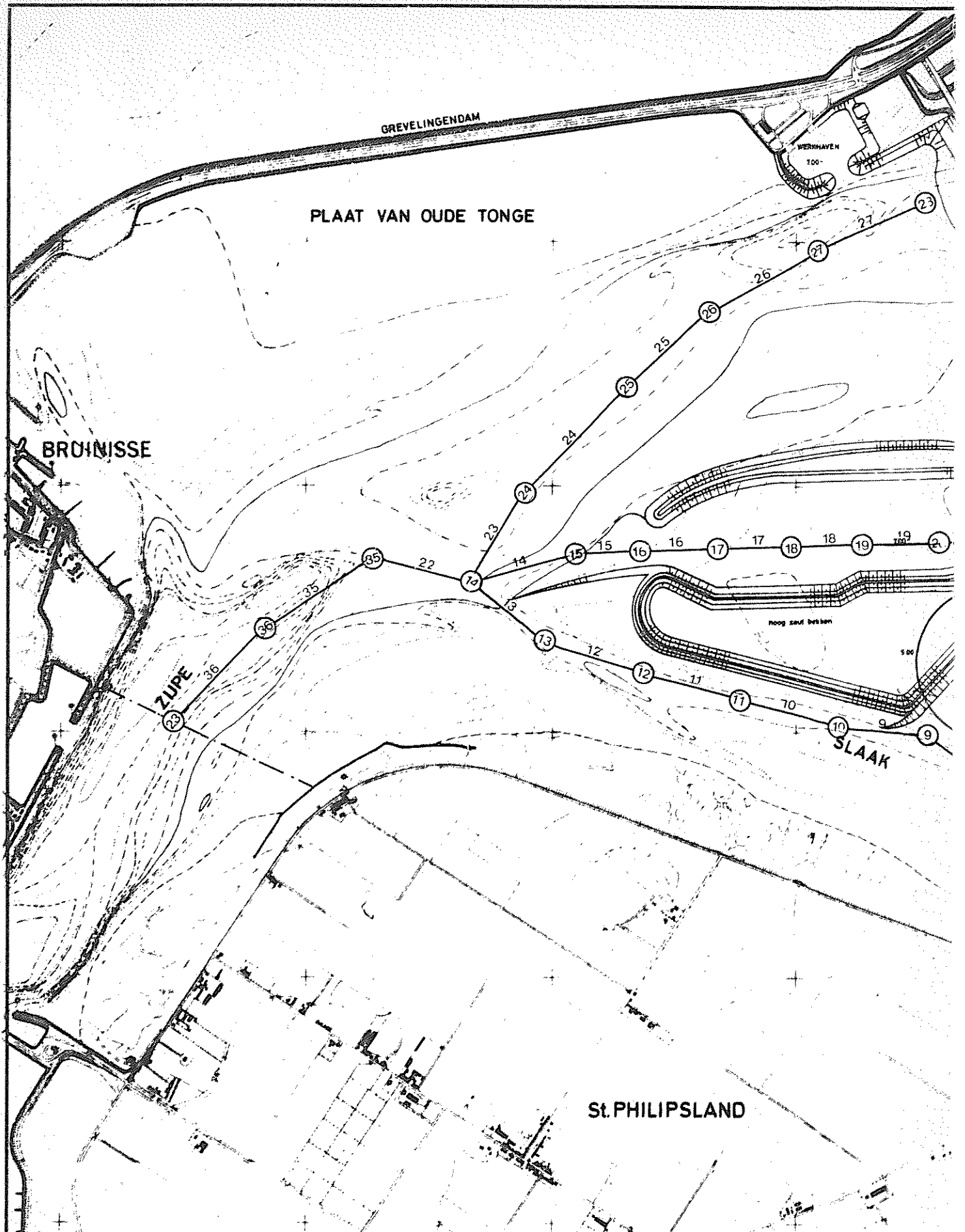
Tabel 4 Beginvoorwaarden voor berekeningsvariant S12

Knooppunts no:	Waterstanden (m tov NAP)	Tak no:	Debiten (m ³ /s)
1	0,000	1	3
2	- 1,943	2	0
3	- 1,943	3	1
4	- 1,943	4	2
5	- 1,943	5	3
6	- 1,943	6	5
7	- 1,943	7	6
8	- 1,943	8	8
9	- 1,943	9	98
10	- 1,942	10	109
11	- 1,940	11	118
12	- 1,938	12	126
13	- 1,935	13	134
14	- 1,932	14	8
15	- 1,935	15	9
16	- 1,937	16	10
17	- 1,938	17	8
18	- 1,938	18	6
19	- 1,939	19	3
20	- 1,939	20	1
21	- 1,939	21	0
22	- 1,939	22	214
23	- 1,930	23	- 58
24	- 1,932	24	- 39
25	- 1,932	25	- 28
26	- 1,931	26	- 18
27	- 1,931	27	- 6
28	- 1,931	28	- 77
29	- 1,945	29	- 64
30	- 1,947	30	- 52
31	- 1,947	31	- 39
32	- 1,948	32	- 20
33	- 1,945	33	- 3
34	- 1,938	34	0
35	- 1,932	35	235
36	- 1,931	36	-- 262

- het debiet is positief gedefinieerd stromend van een laag naar een hoog knooppuntnummer.



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND
 SITUATIE VOLGENS R.W.S. TEK. NO 76.10332



SCHEMATISATIE VAN HET REKENMODEL VOLGENS
 TEKENING 'EINDSITUATIE PHILIPSDAM' — C6.7610332
 (RIJKSWATERSTAAT—DELTADIENST)

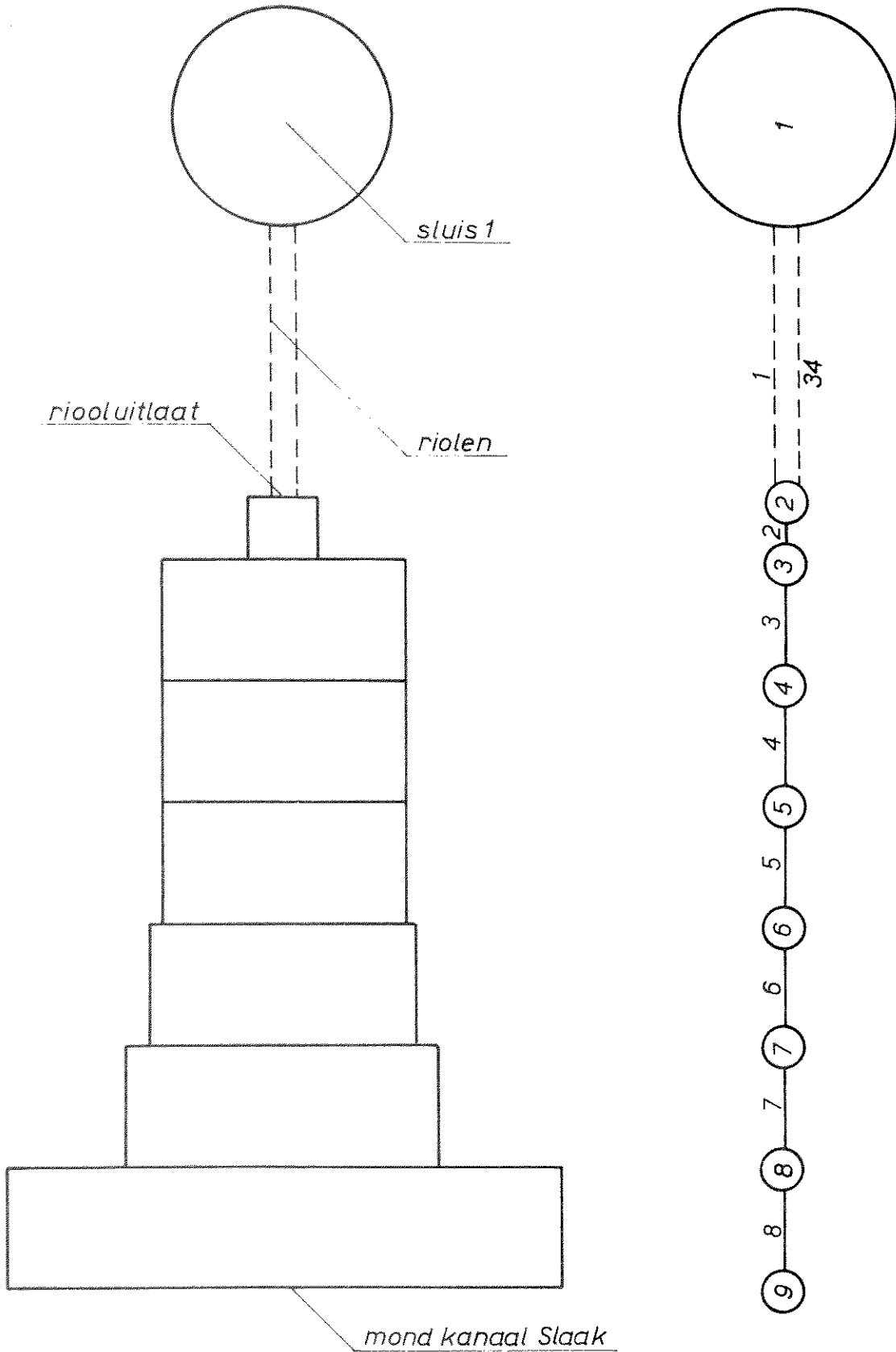
SCHAAL 1:20.000

A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225^{II}—1003

FIG 2



SCHEMATISATIE KANAAL SLAAK

schaal 1:5000

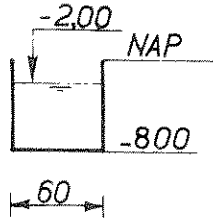
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

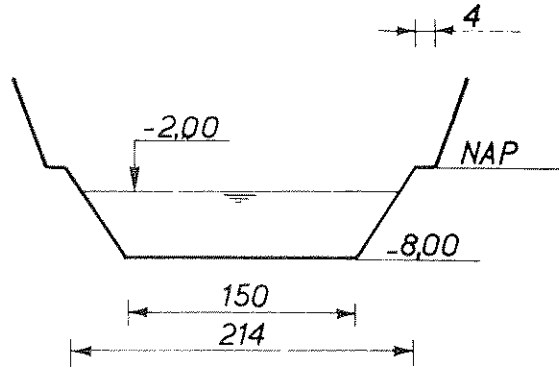
R1225^{II}_1004

FIG 3

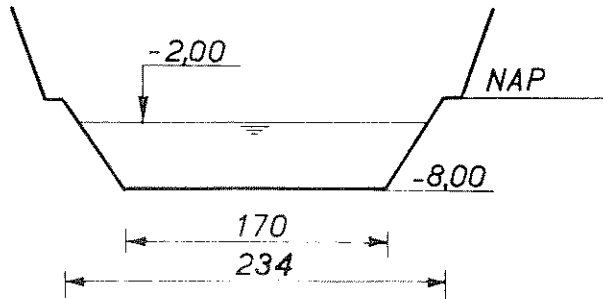
tak 2



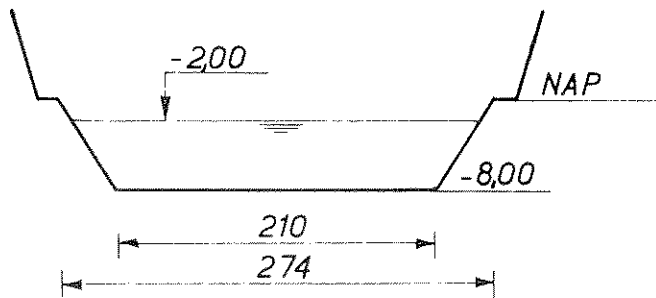
tak 3/4/5



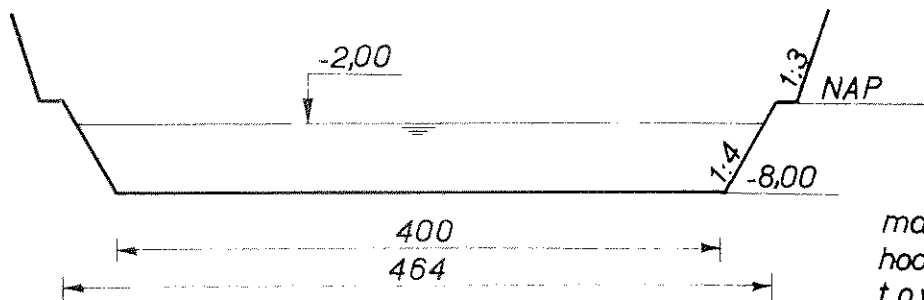
tak 6



tak 7



tak 8



maten in m
hoogten in m
t.o.v NAP

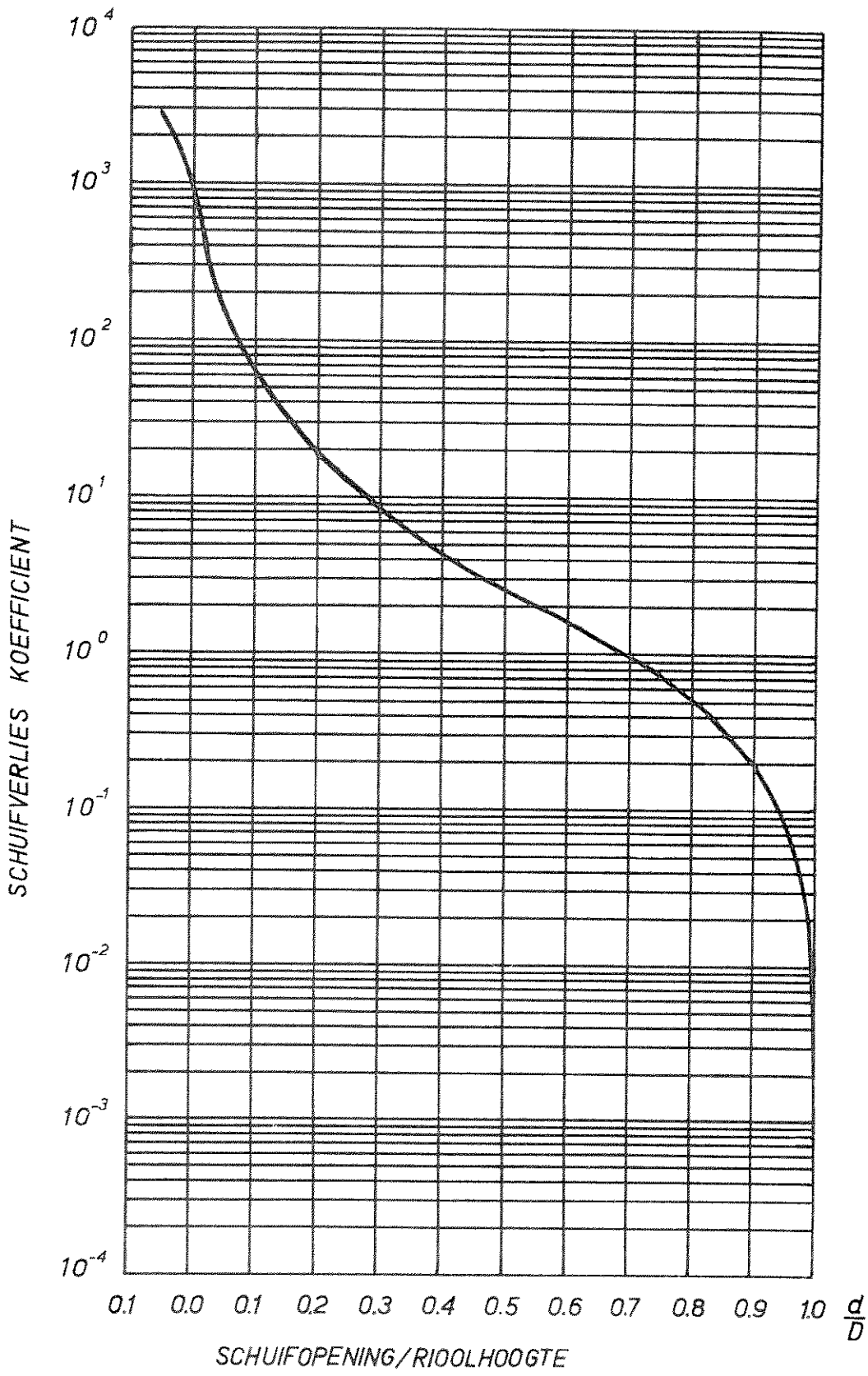
GESCHEMATISEERDE DWARSPROFIELEN KANAAL
SLAAK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1225 II 1005

FIG 4



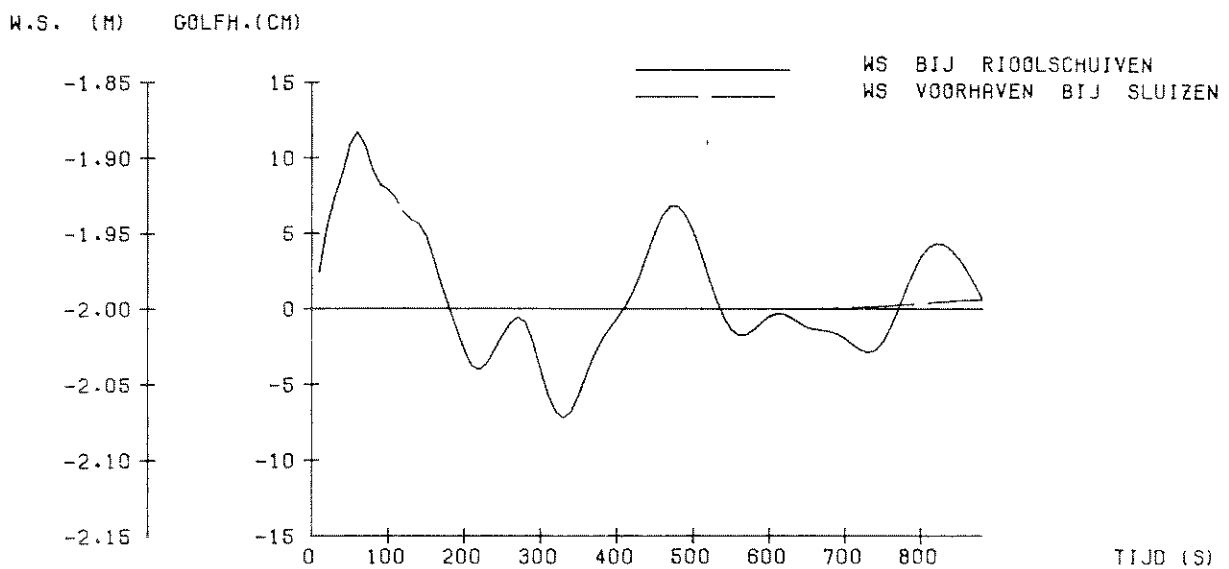
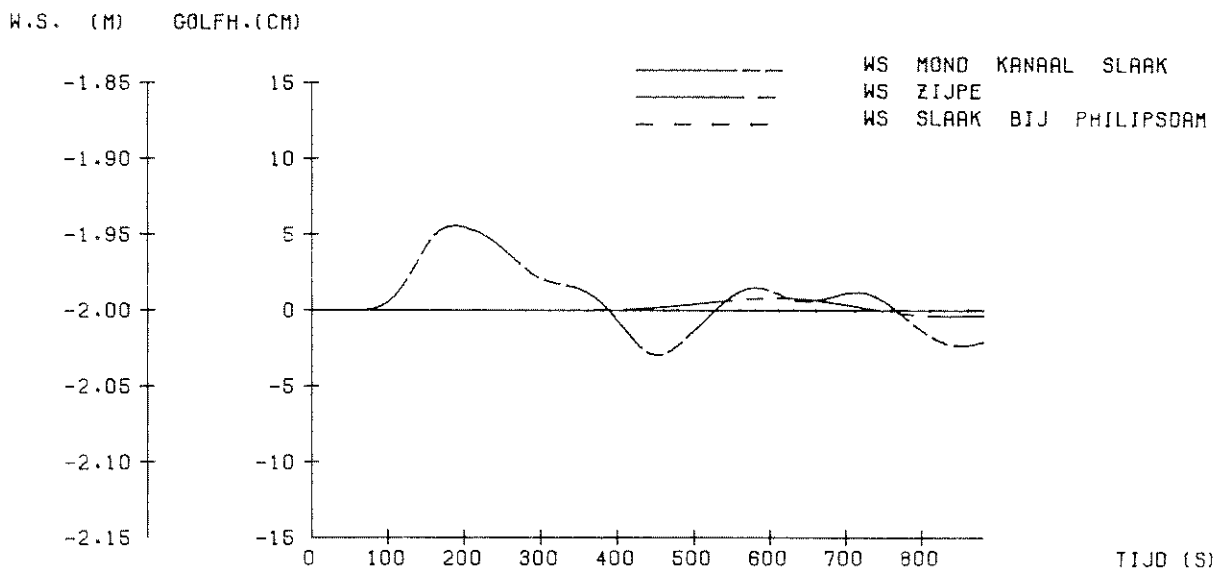
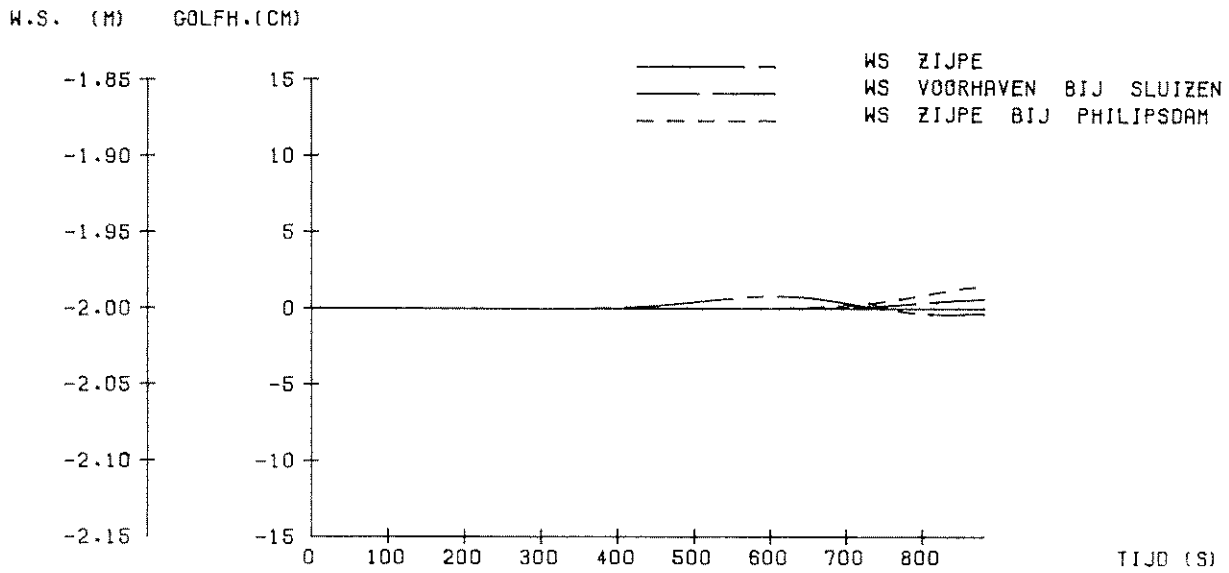
SCHUIFVERLIESKOEFFICIENT ALS FUNKTIE VAN
SCHUIFOPENING/RIOOLHOOGTE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1225 II 1006

FIG 5

A4



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

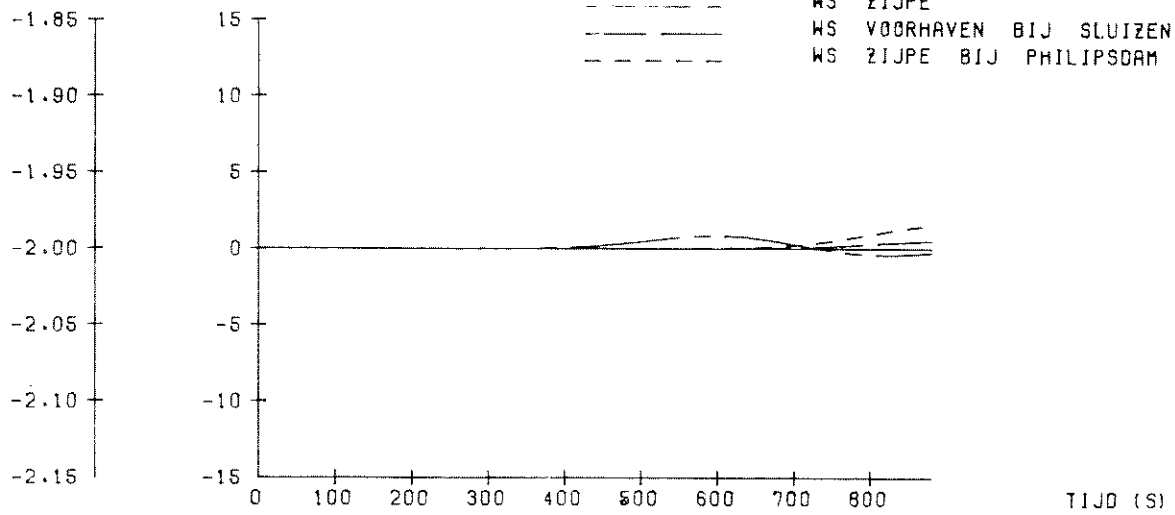
VARIANT_P1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

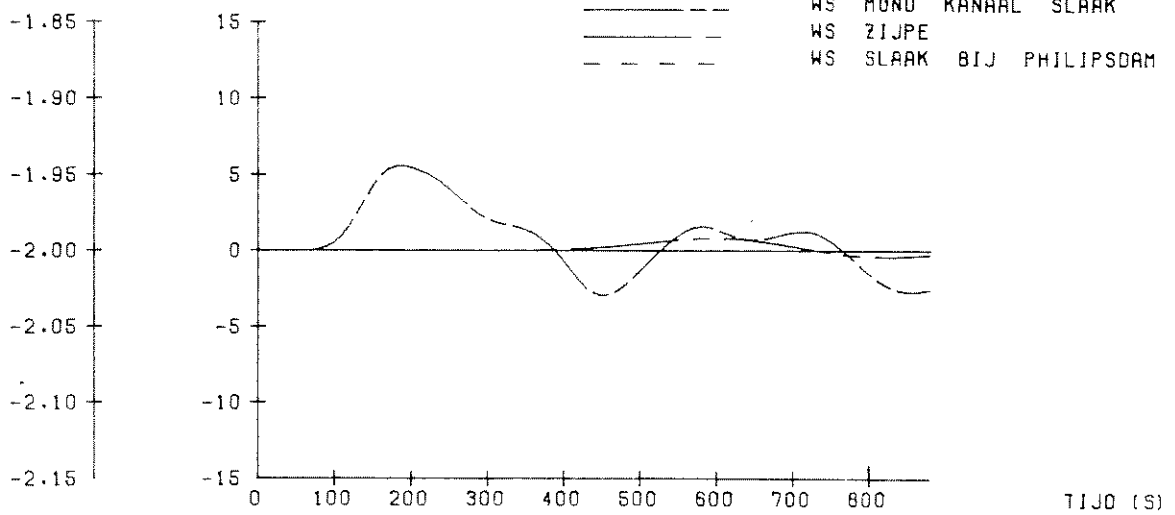
R 1225II-1007

FIG. 6

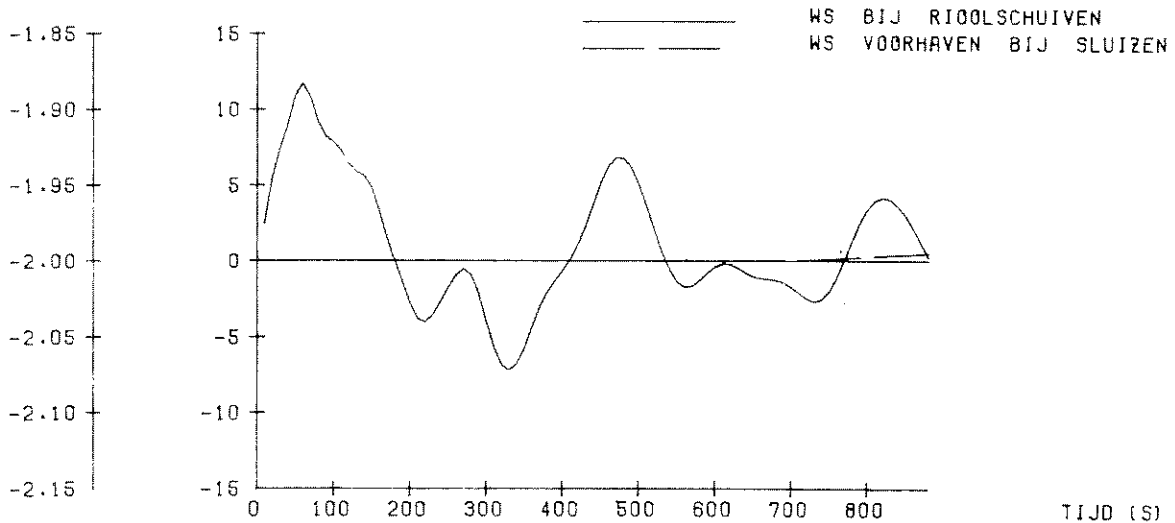
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

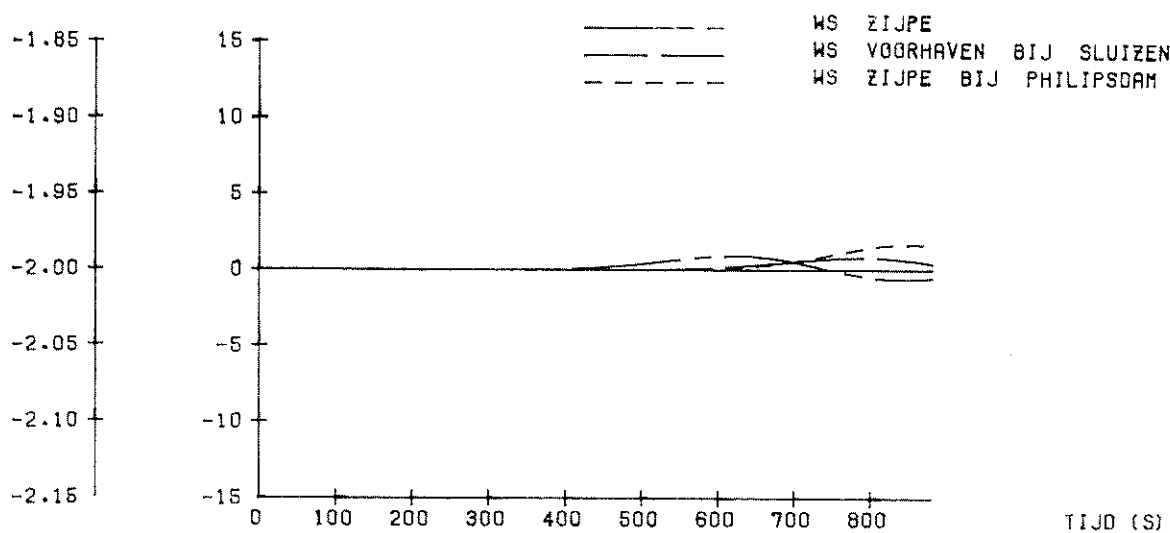
VARIANT_P2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

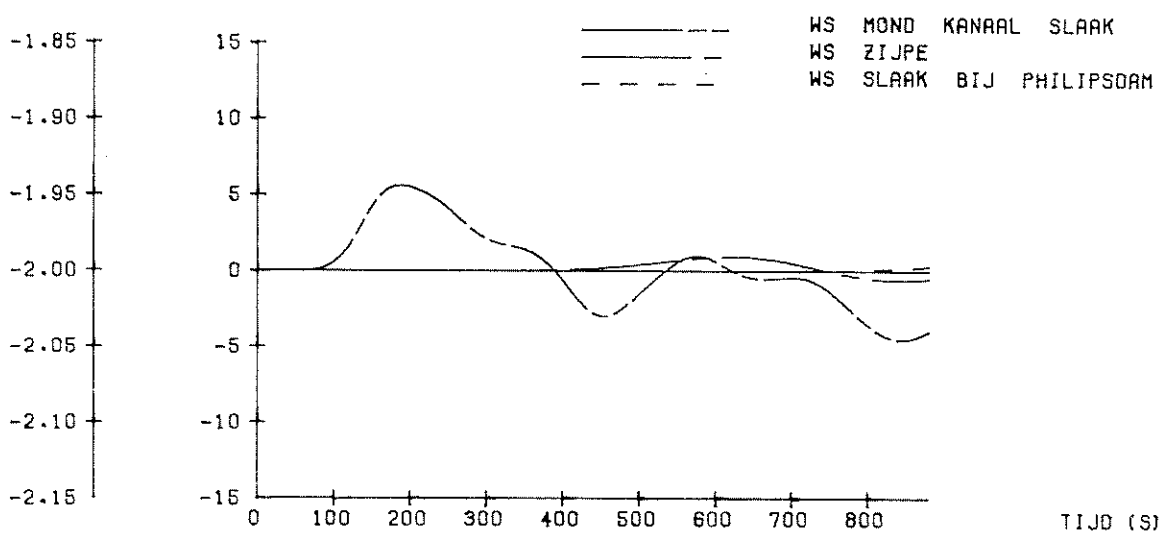
R 1225^{II}-1008

FIG. 7

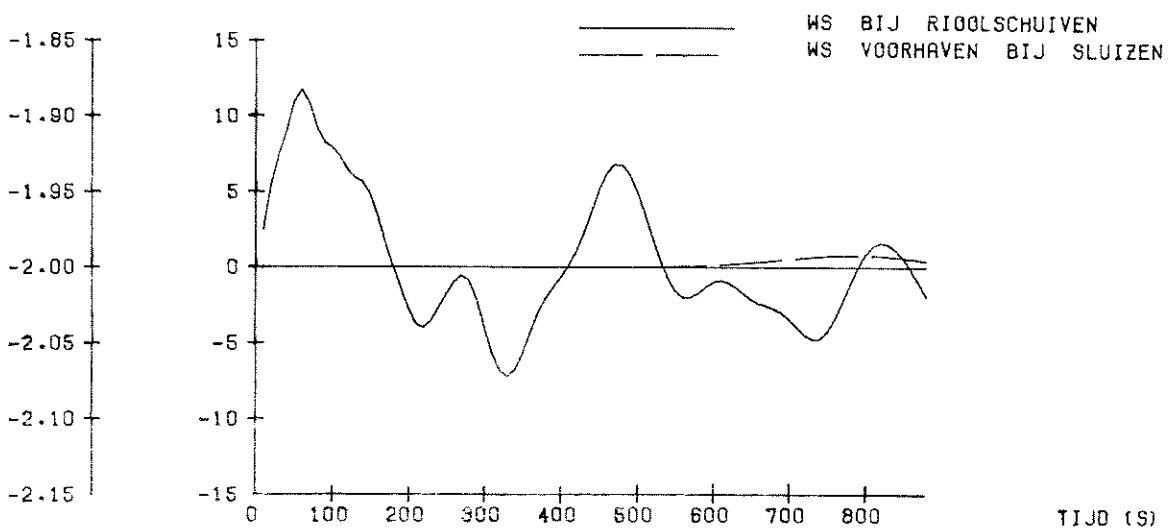
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

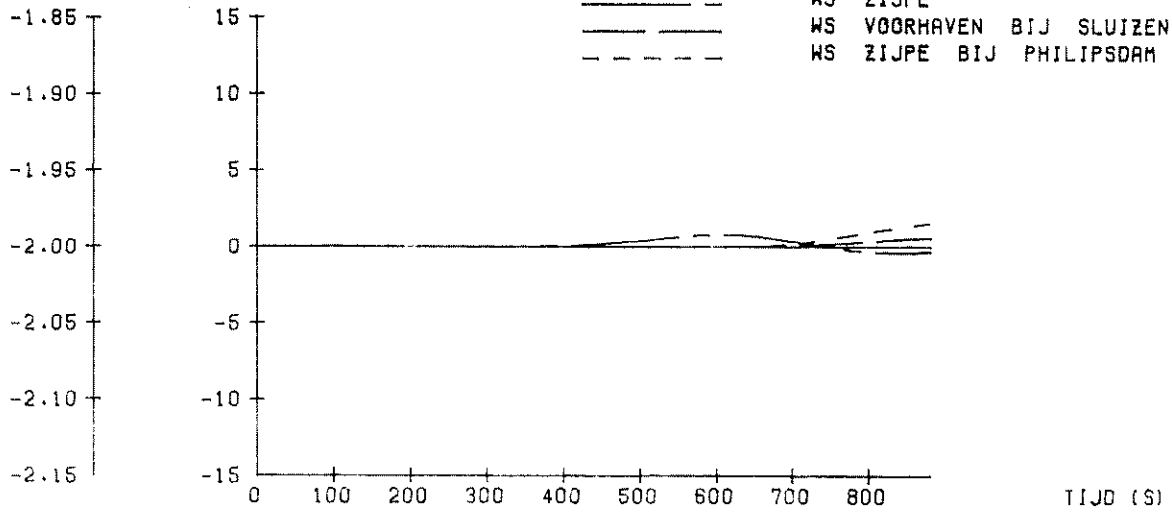
VARIANT_P3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

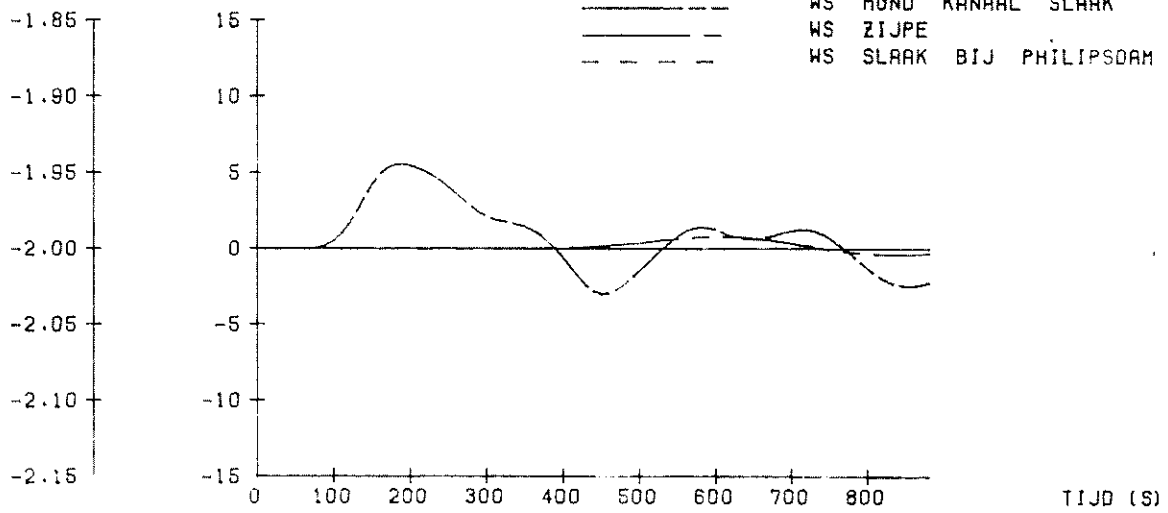
R 1225 II_1009

FIG. 8

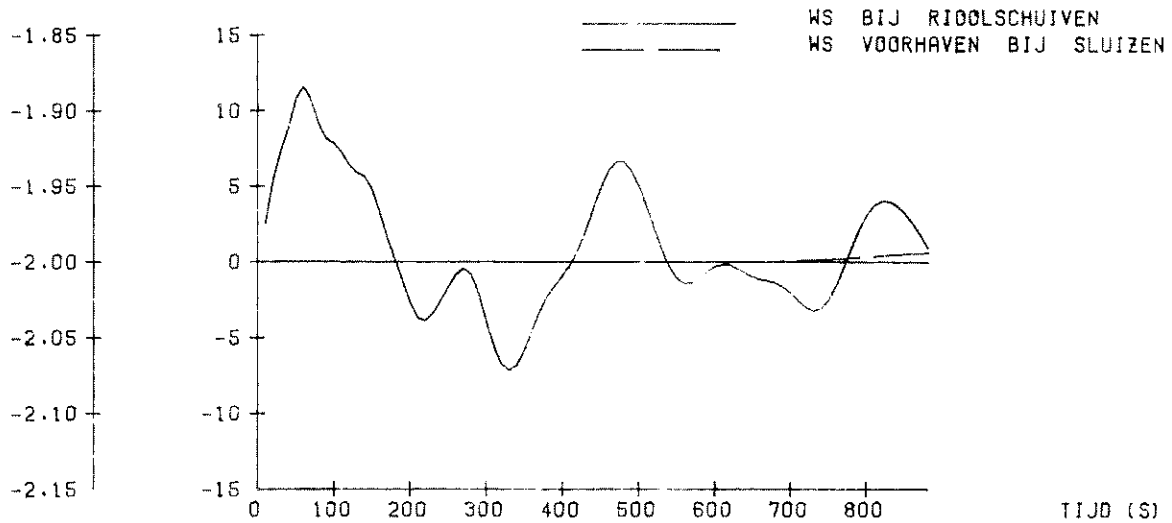
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

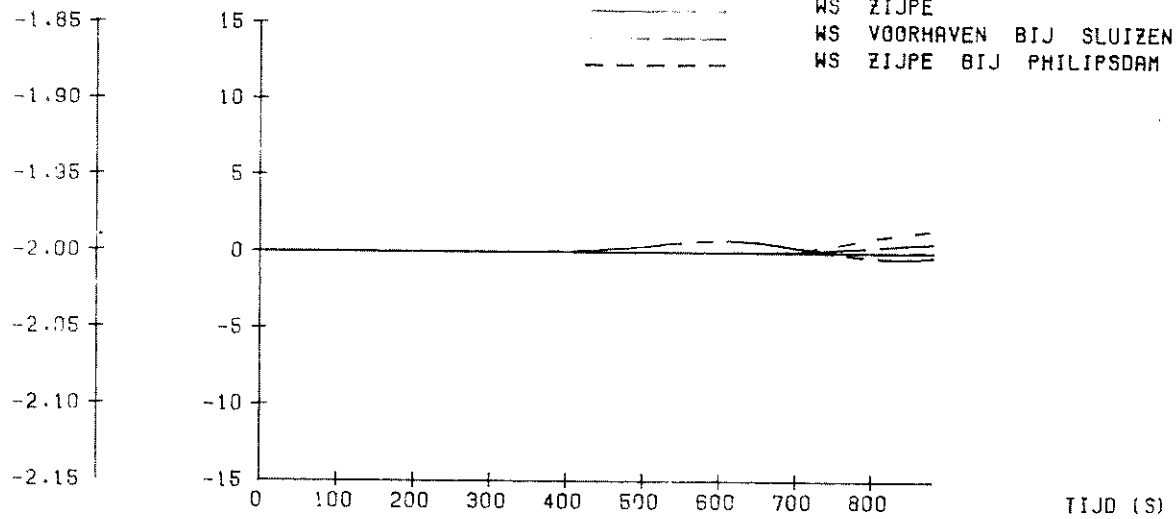
VARIANT_ P4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

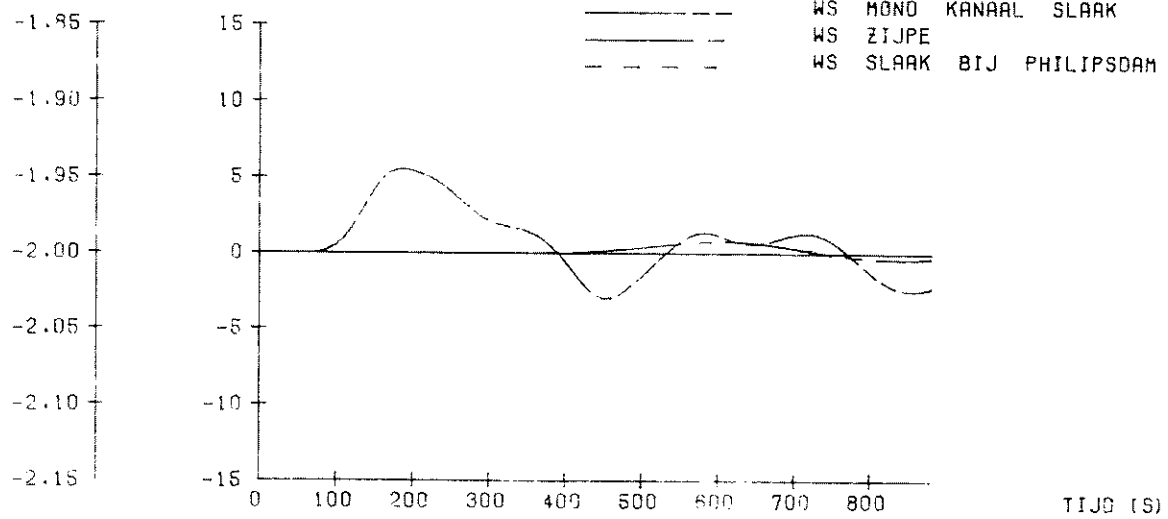
R 1225^L-1010

FIG. 9

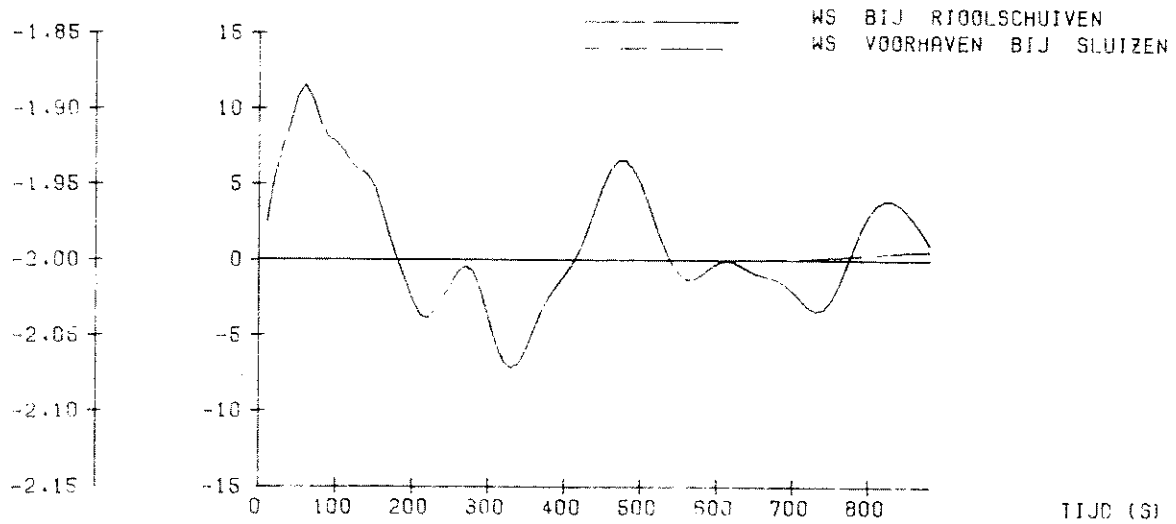
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

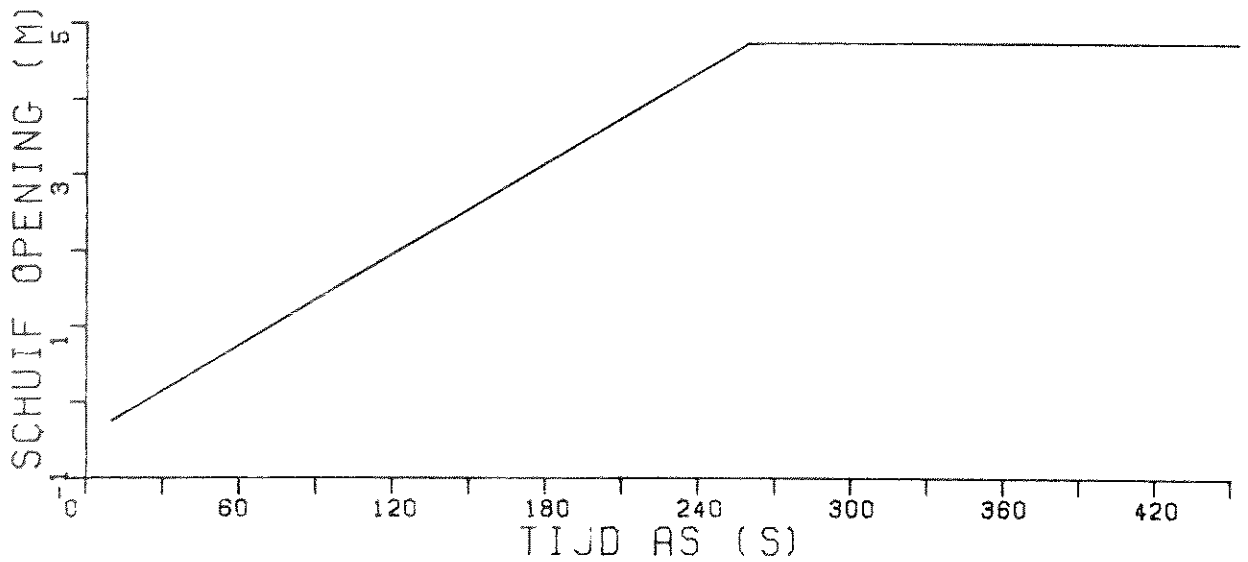
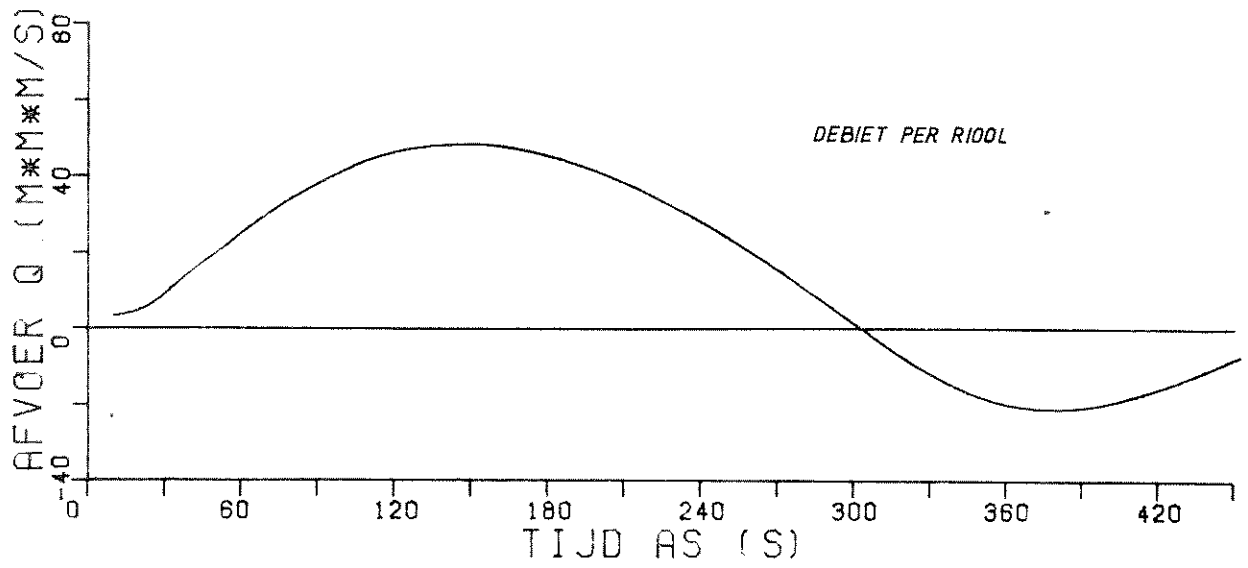
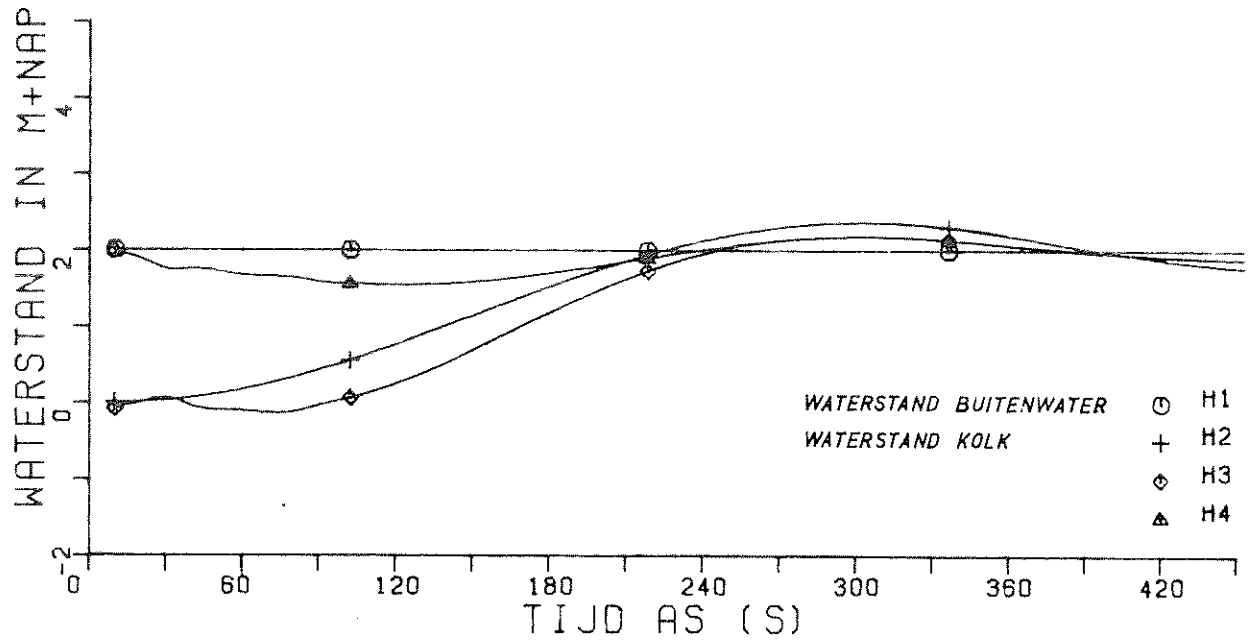
WATERSTANDEN

VARIANT_P5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225-1011

FIG.10



KOLK 1 NIET AANGEGROEID

Q(T) EN H(T) LIJNEN

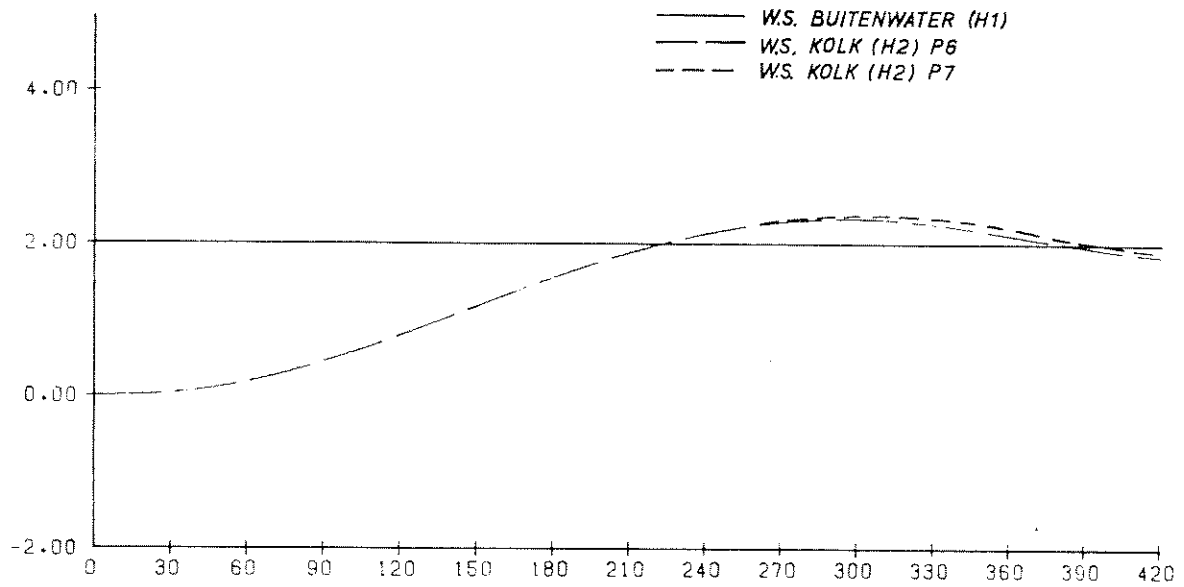
VARIANT_P6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

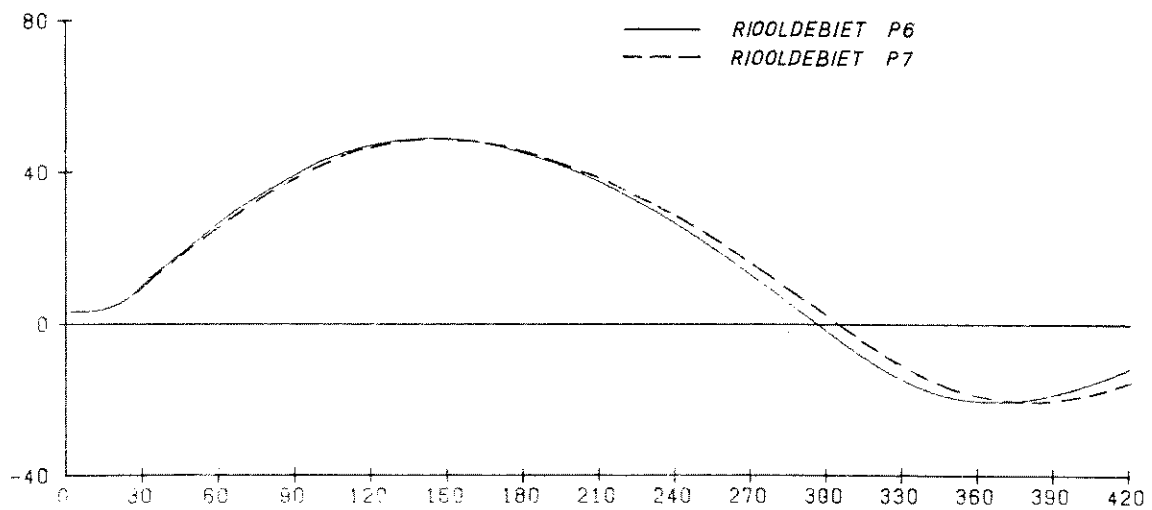
R1225^{II}-1012

FIG. 11

W.S. (M)



Q (M³/S)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOETE PAND

WATERSTANDEN EN RIOOLDEBIET

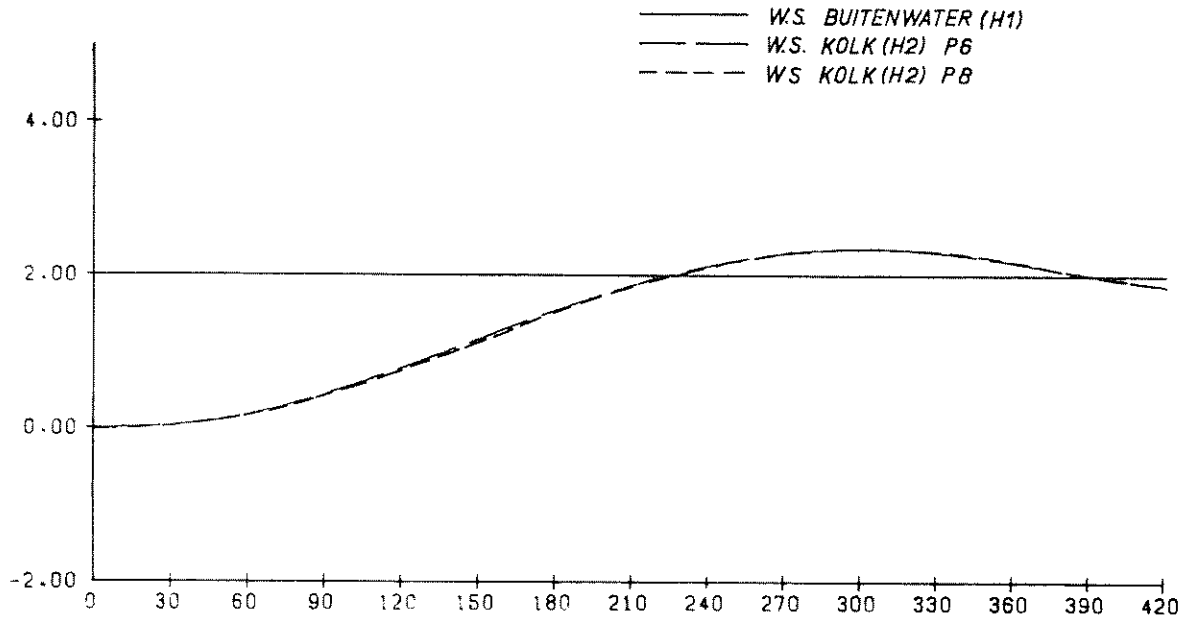
VARIANT - P6/P7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

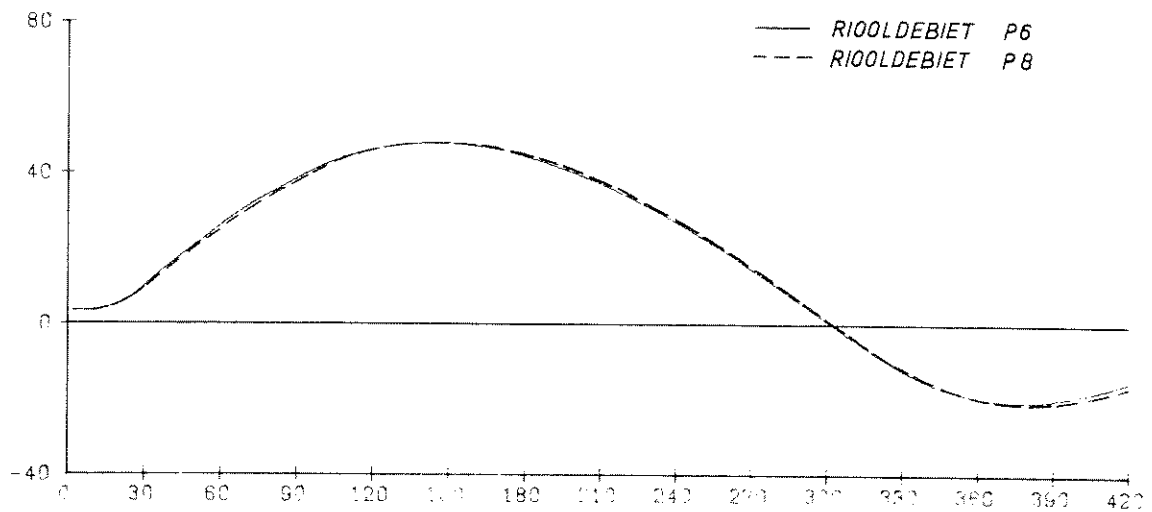
R 1226^{II}-1013

FIG.12

W.S. (M)



Q (M³/S)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

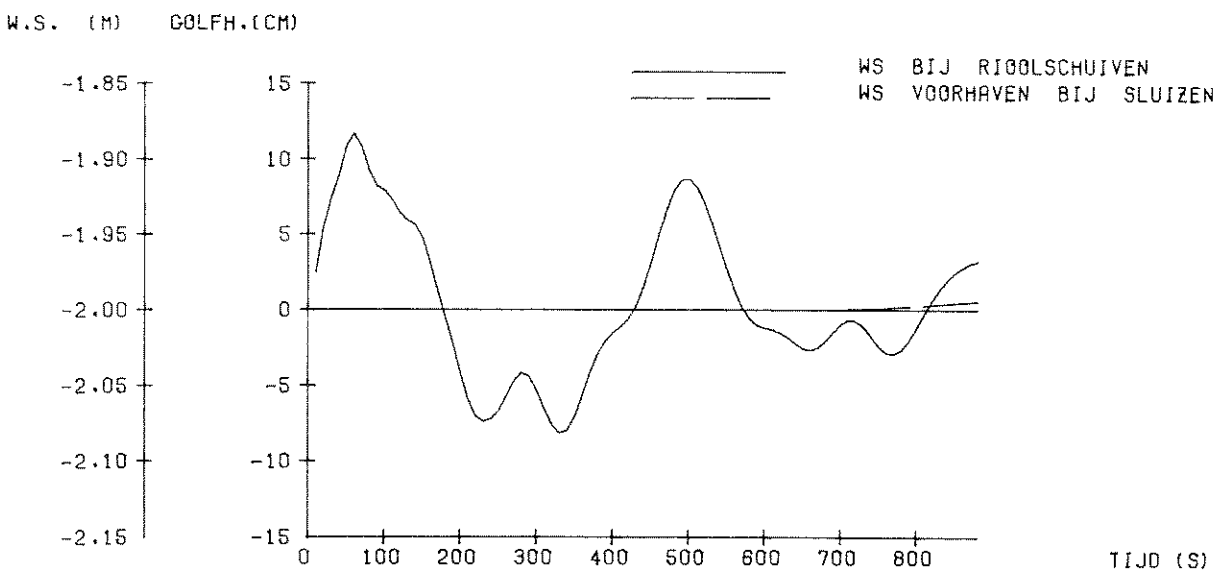
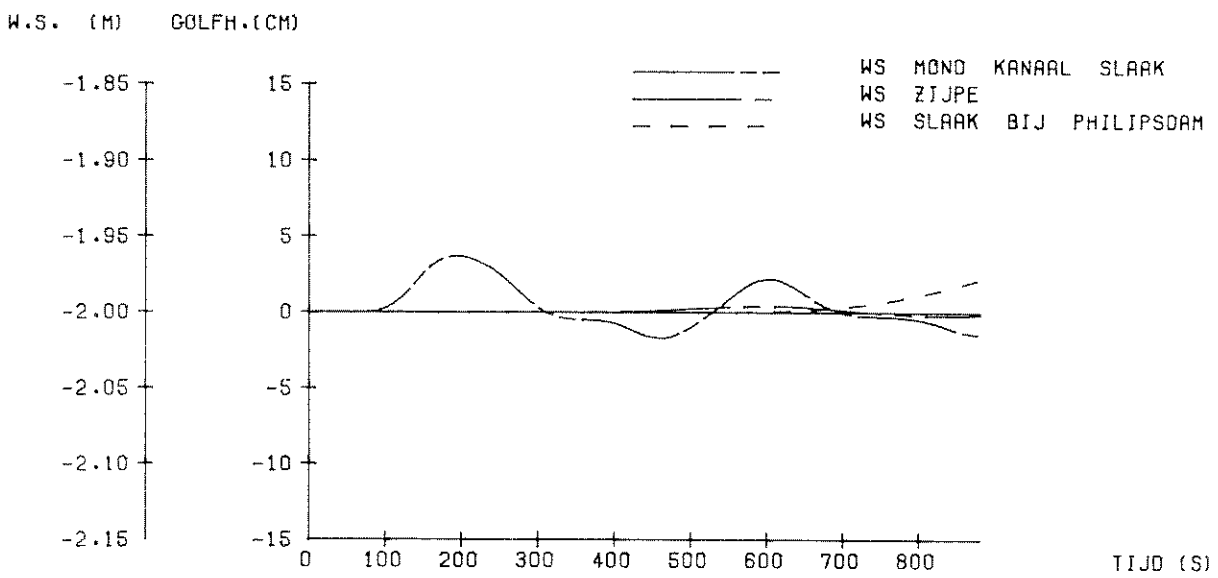
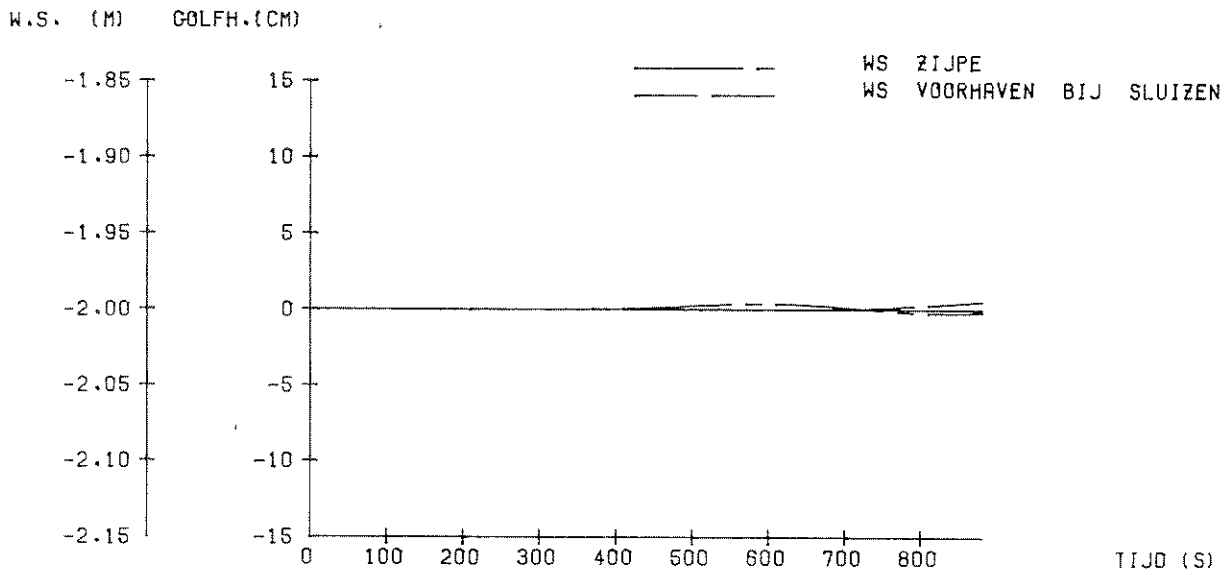
WATERSTANDEN EN RIOOLDEBIET

VARIANT—P6/P8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1014

FIG. 13



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

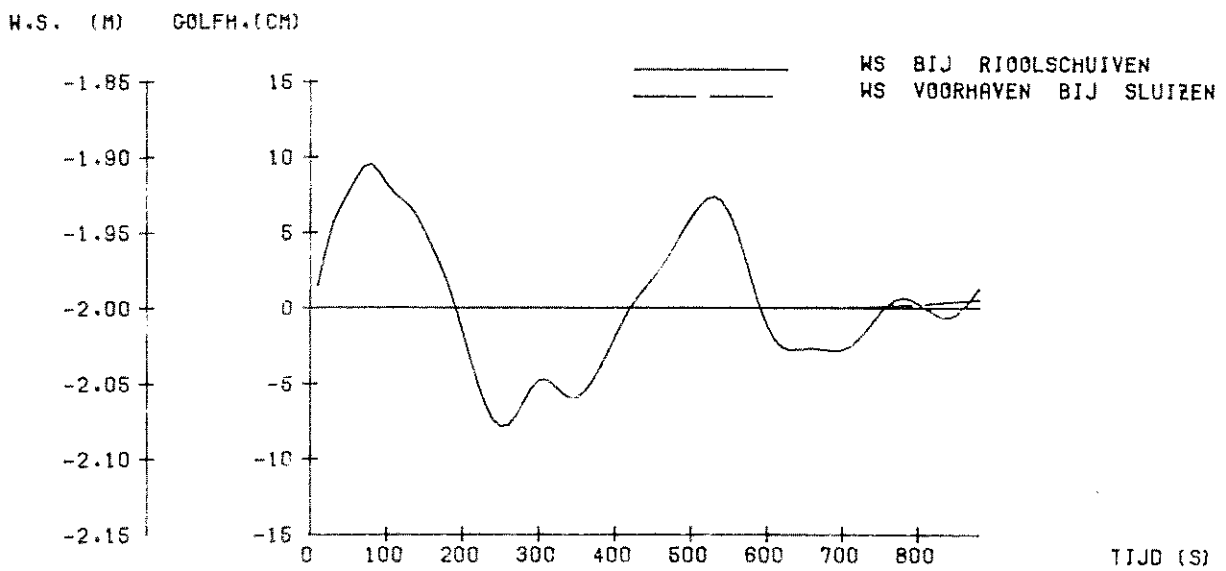
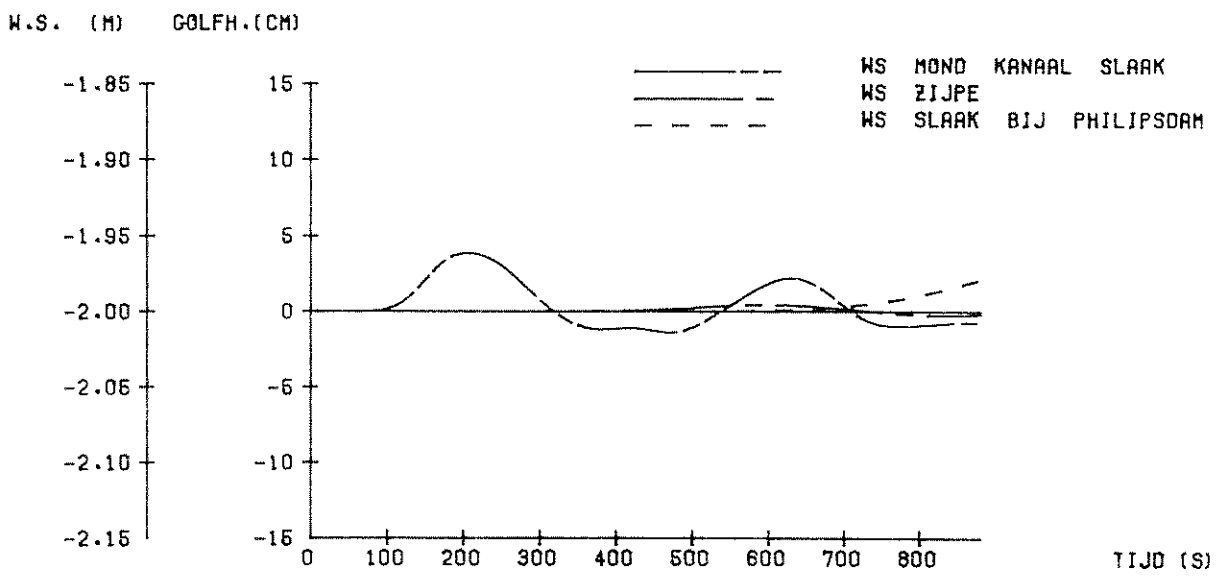
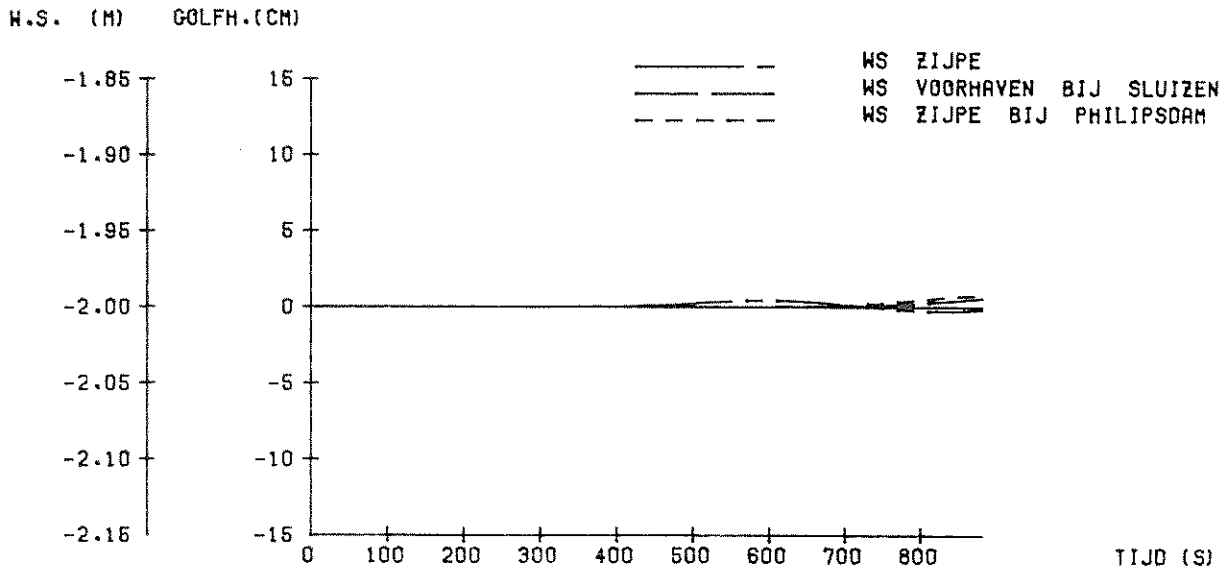
WATERSTANDEN

VARIANT_ S1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225^{II}-1015

FIG. 14



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

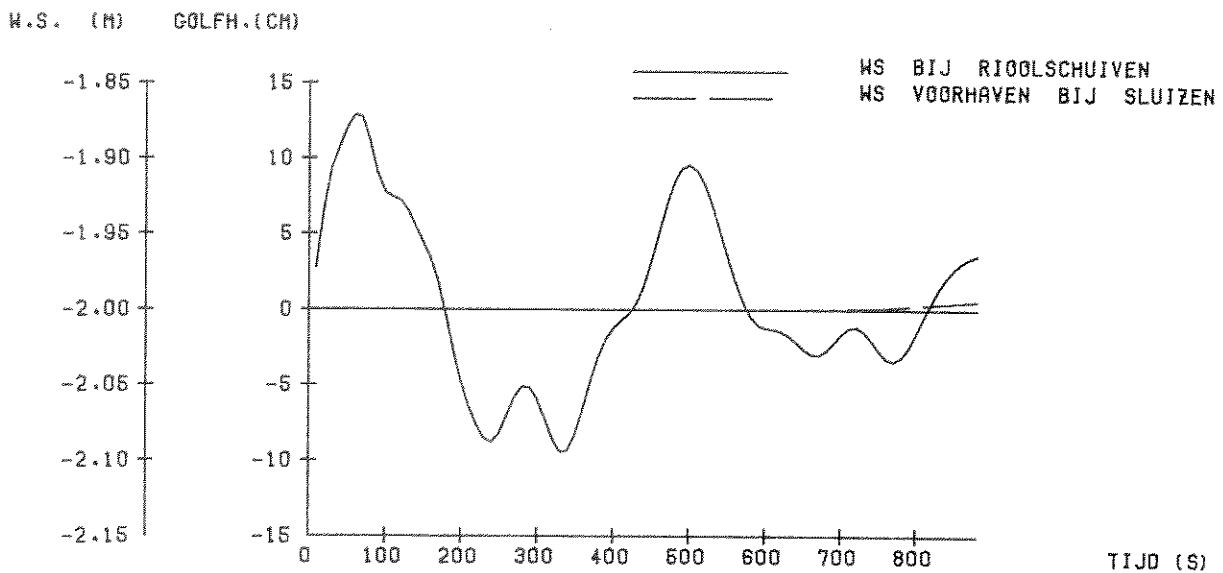
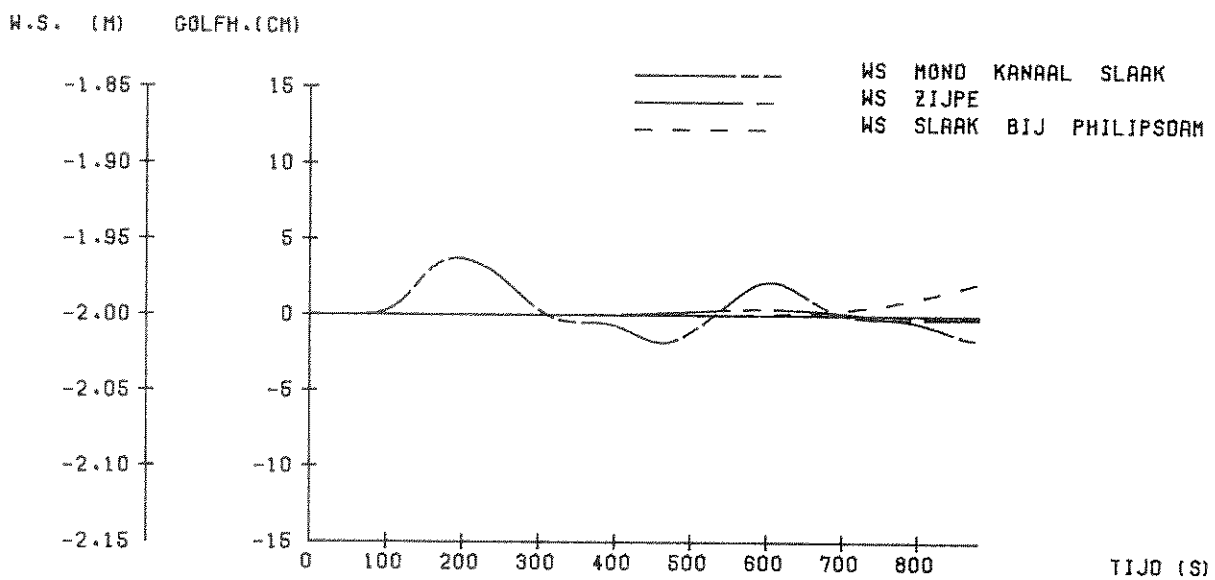
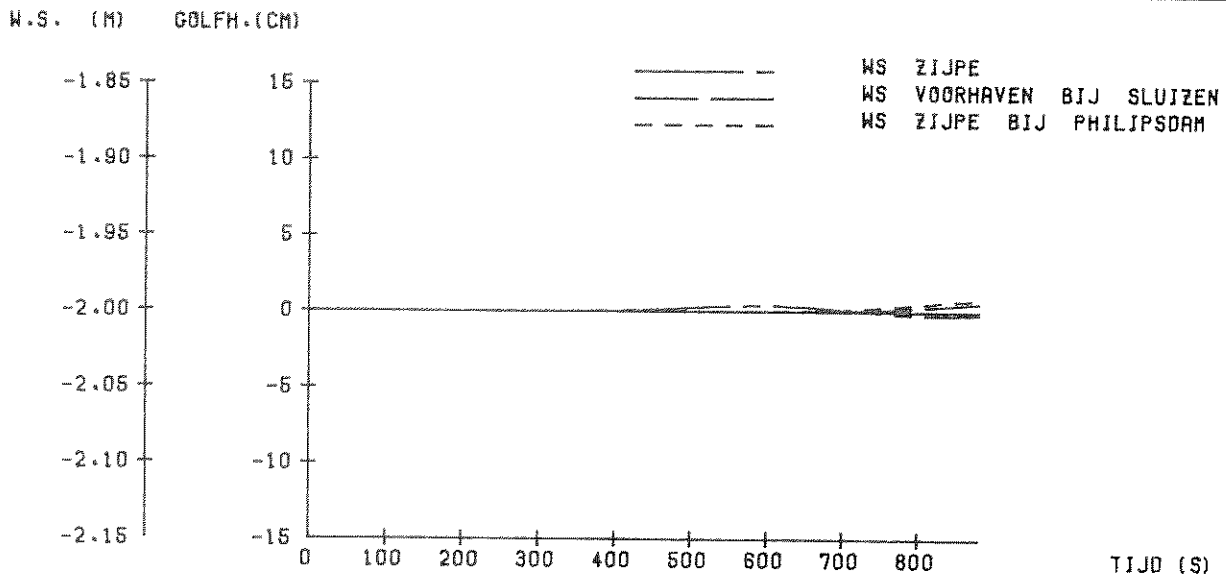
WATERSTANDEN

VARIANT_ S2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1226^{II}-1016

FIG .15



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

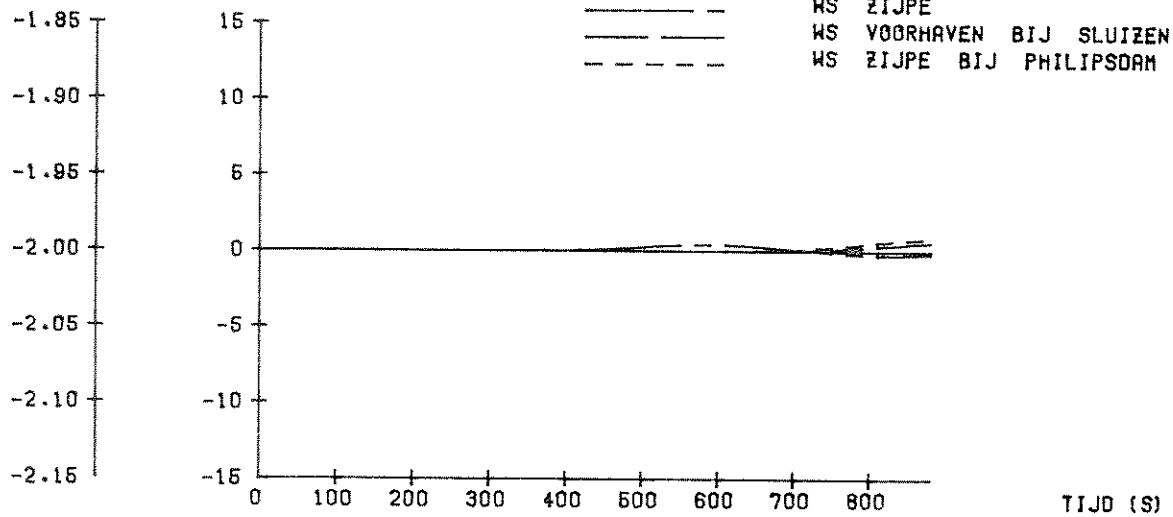
VARIANT_ S3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

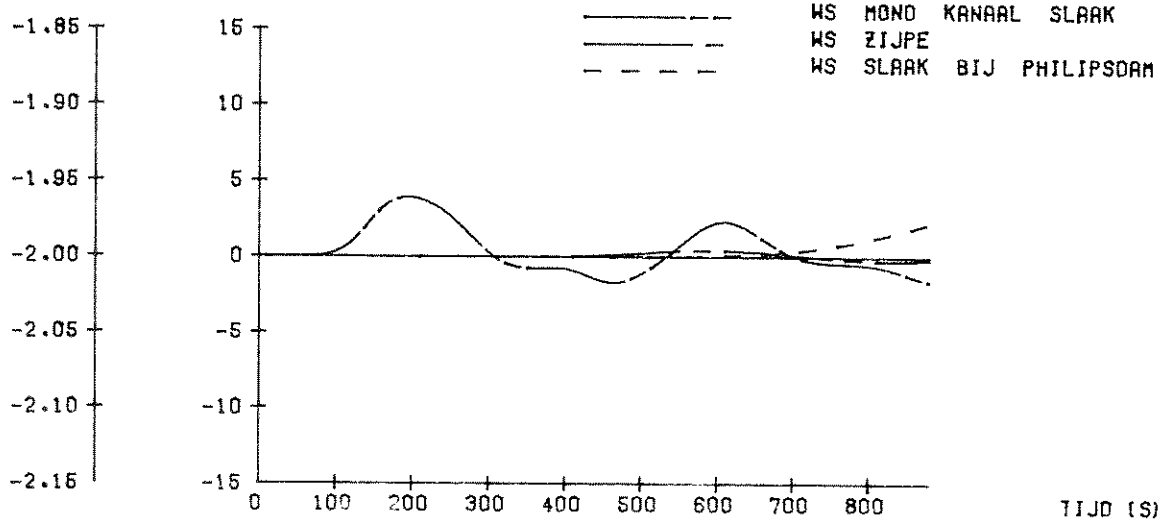
R 1225^{II}-1017

FIG. 16

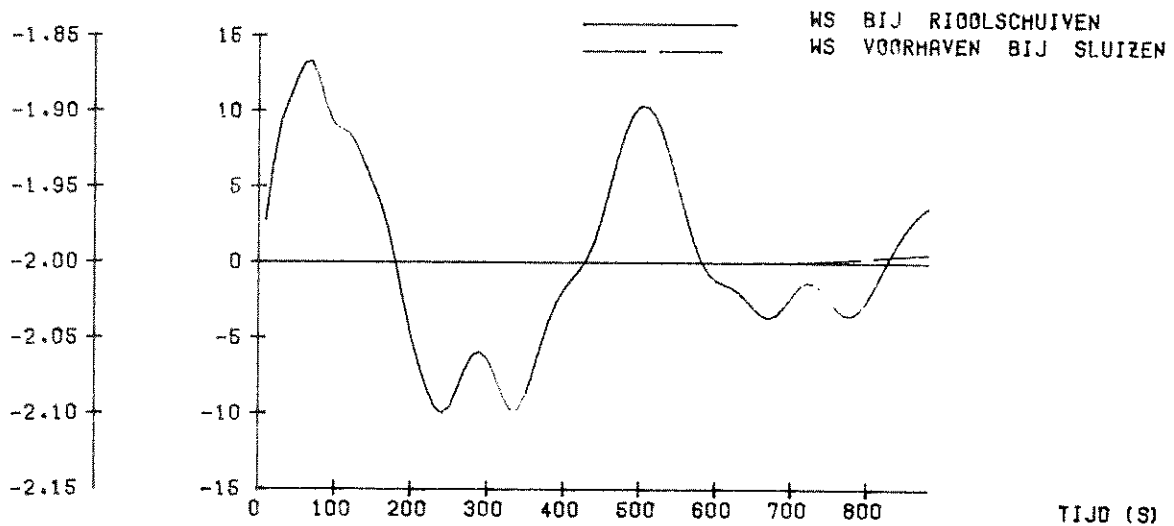
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

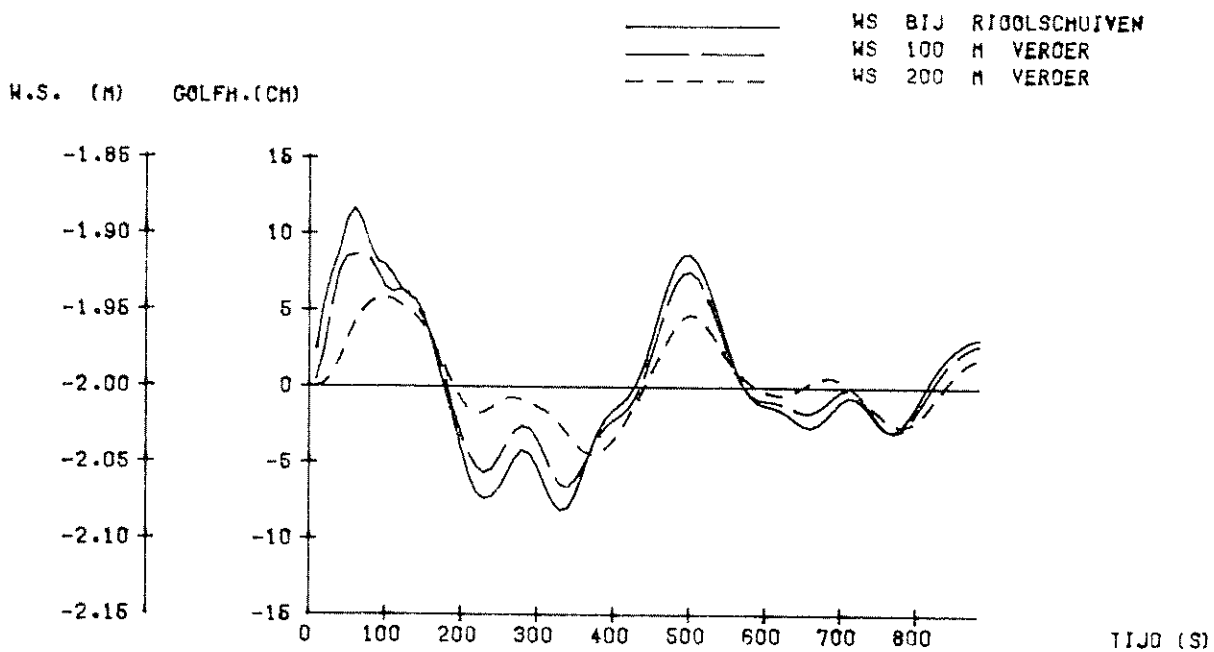
WATERSTANDEN

VARIANT_54

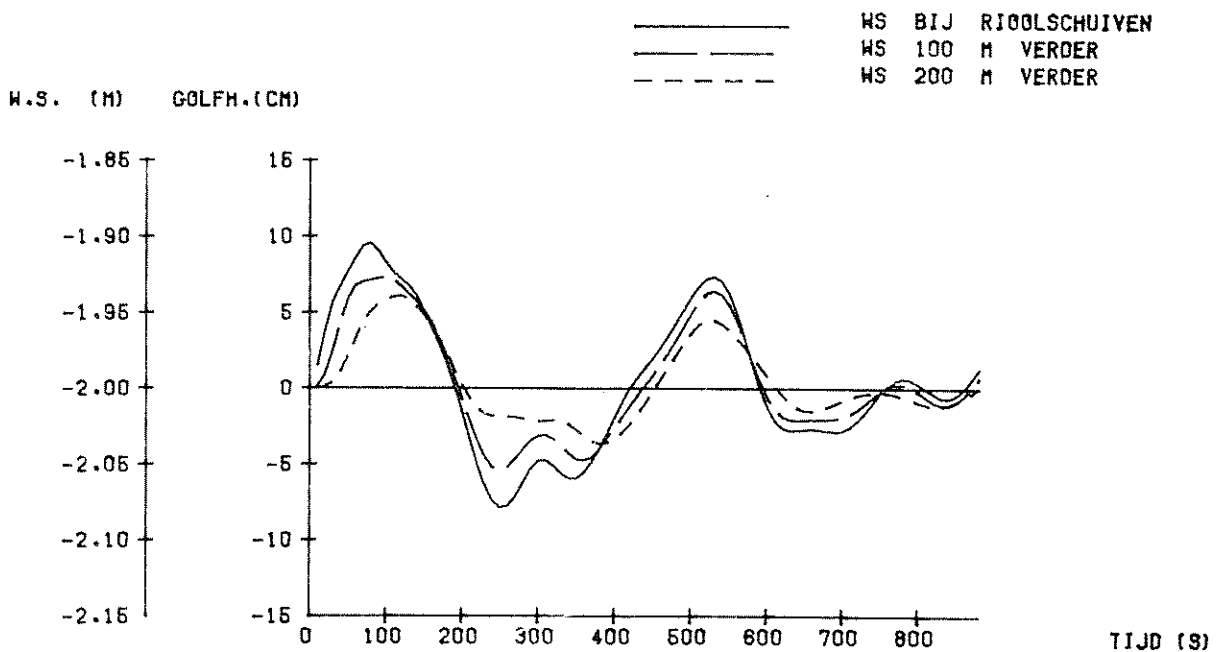
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1018

FIG. 17



VARIANT S1



VARIANT S2

PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

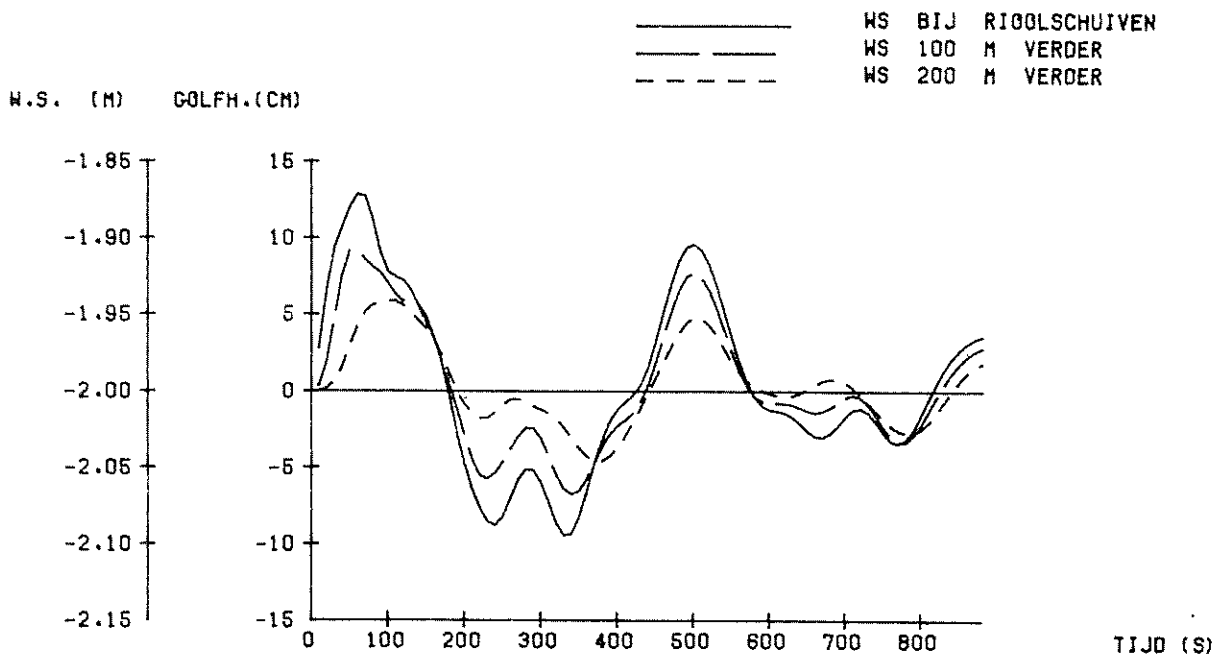
WATERSTANDEN KANAAL SLAAK

VARIANT_ S1/S2

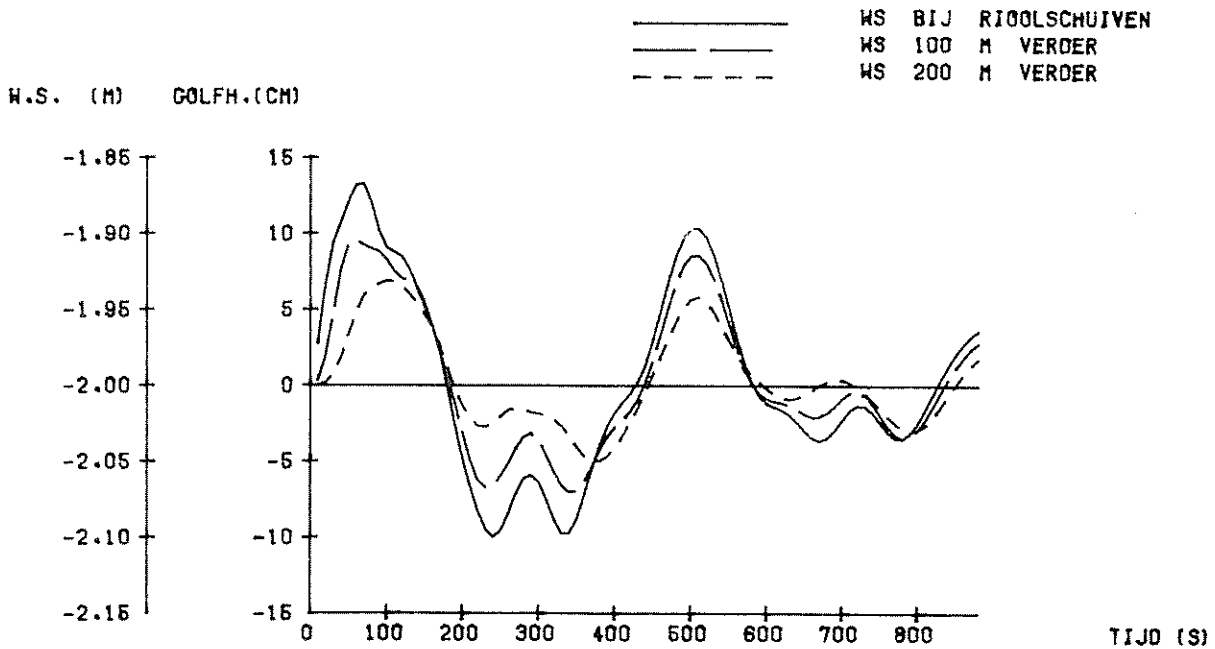
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1226^{II}-1019

FIG. 18



VARIANT S3



VARIANT S4

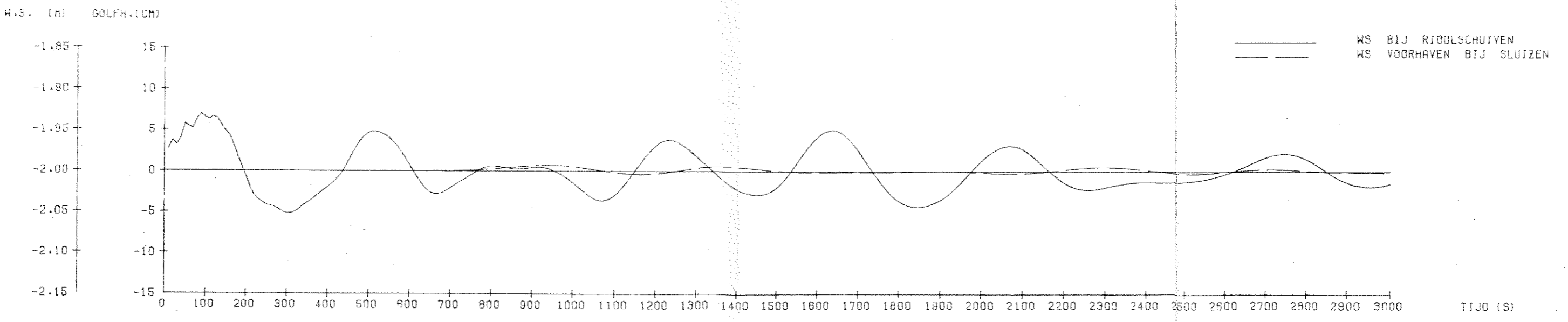
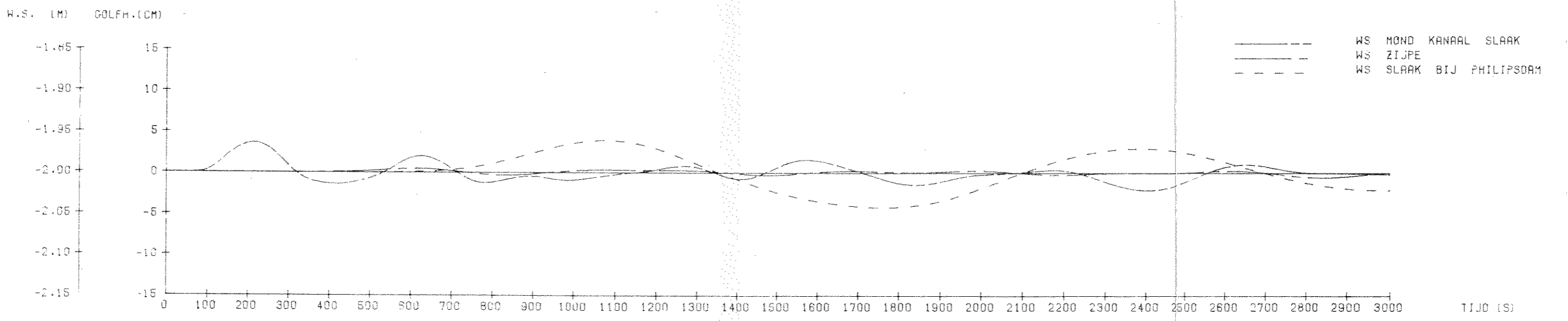
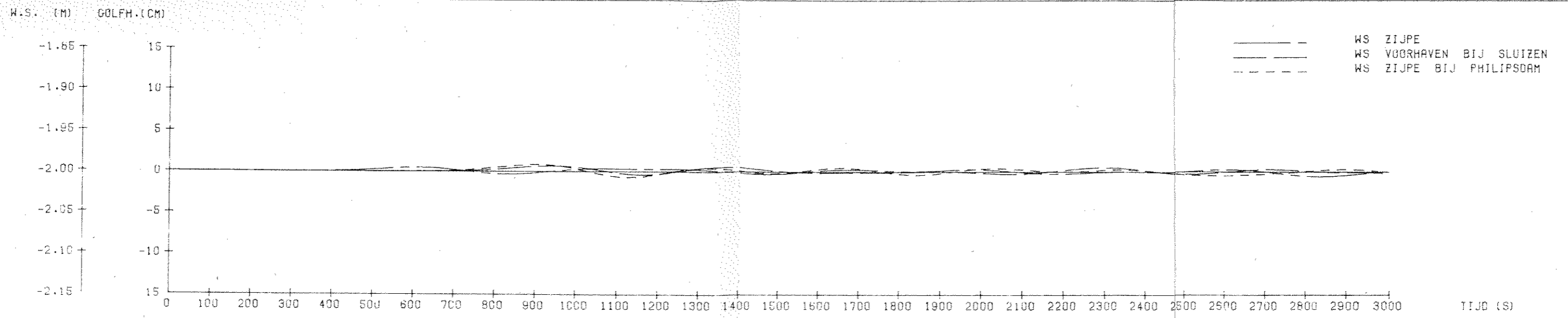
PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND
 WATERSTANDEN KANAAL SLAAK

VARIANT- S3/S4

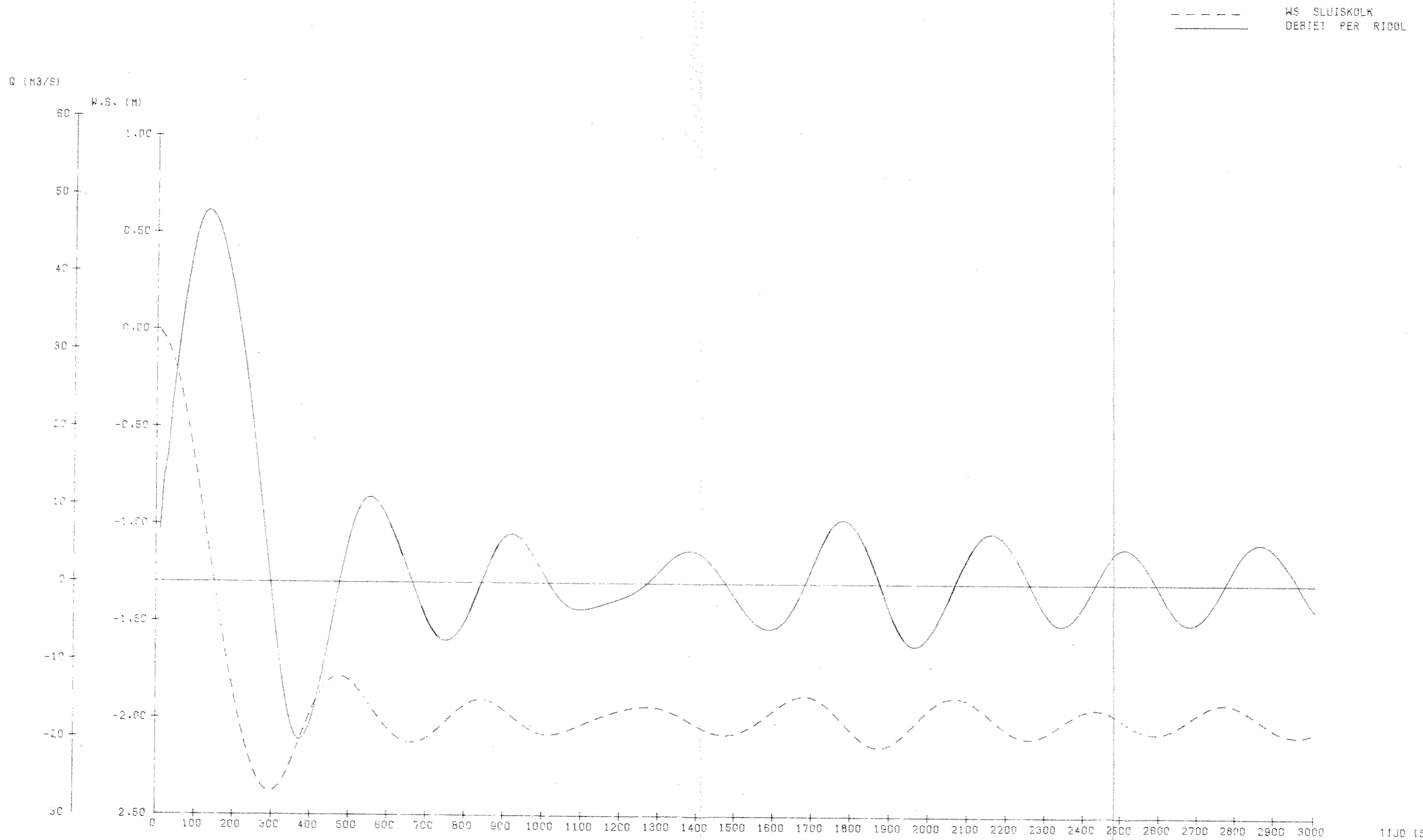
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II-1020

FIG. 19

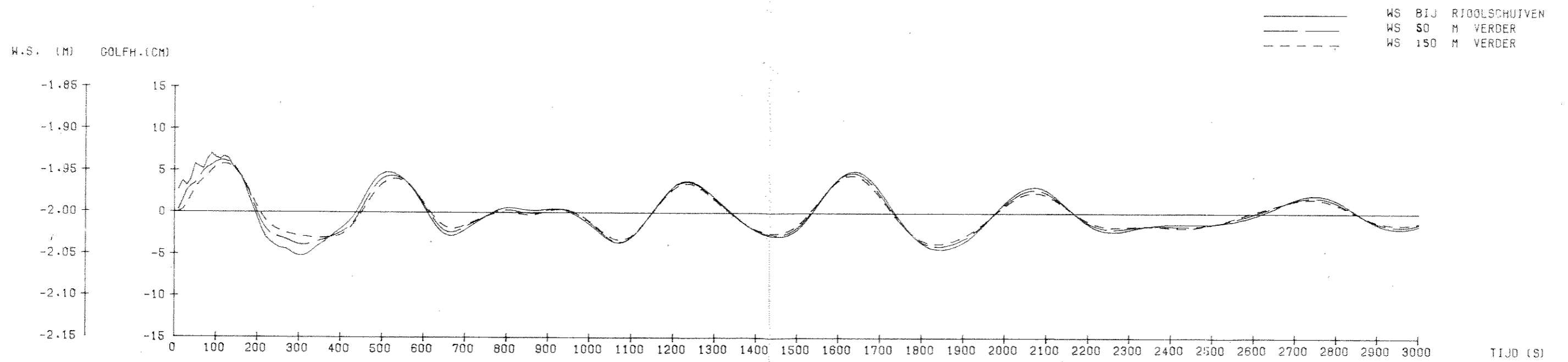
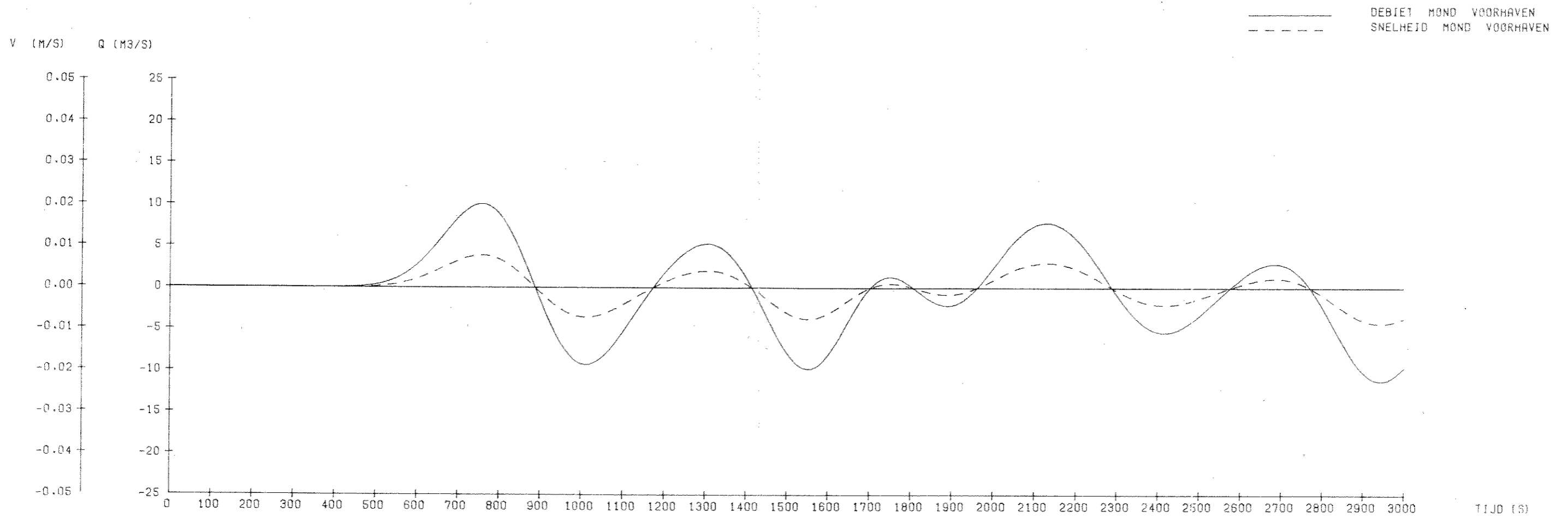


PHILIPSDAMSLUIZEN		
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND		
WATERSTANDEN		VARIANT— S5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		R 1225 II-1021 FIG. 20



PHILIPSDAMSLUIZEN TRANSLATIEGOLF CP ZOUTE PAND		
WATERSTAND KOLK EN DEBIET PER RIJOL	VARIANT - S5	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1225 II-1022	FIG. 21

TIJD (S)



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN KANAAL SLAAK EN DEBIET MOND VOORHAVEN

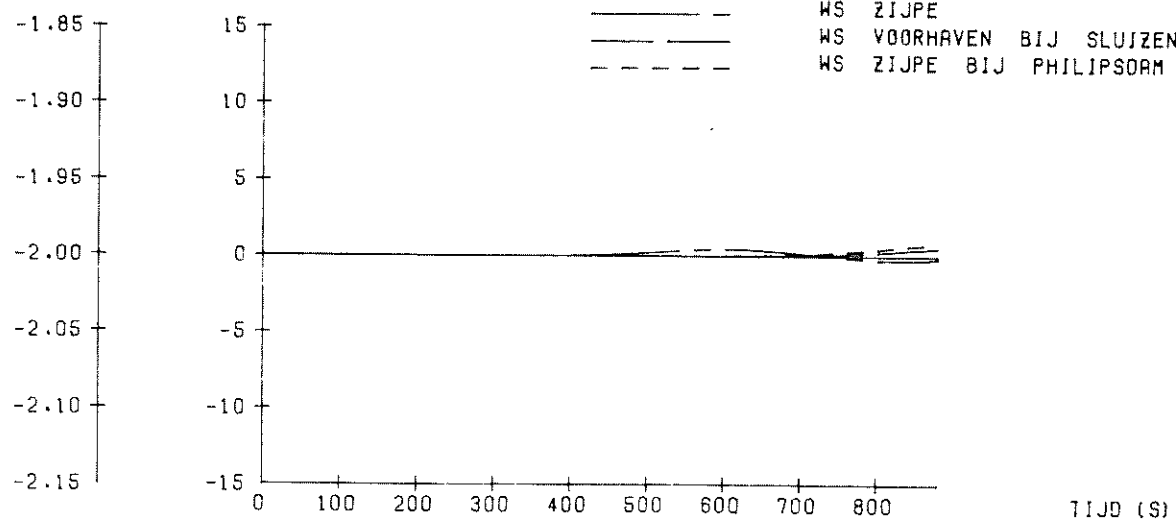
VARIANT-S5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

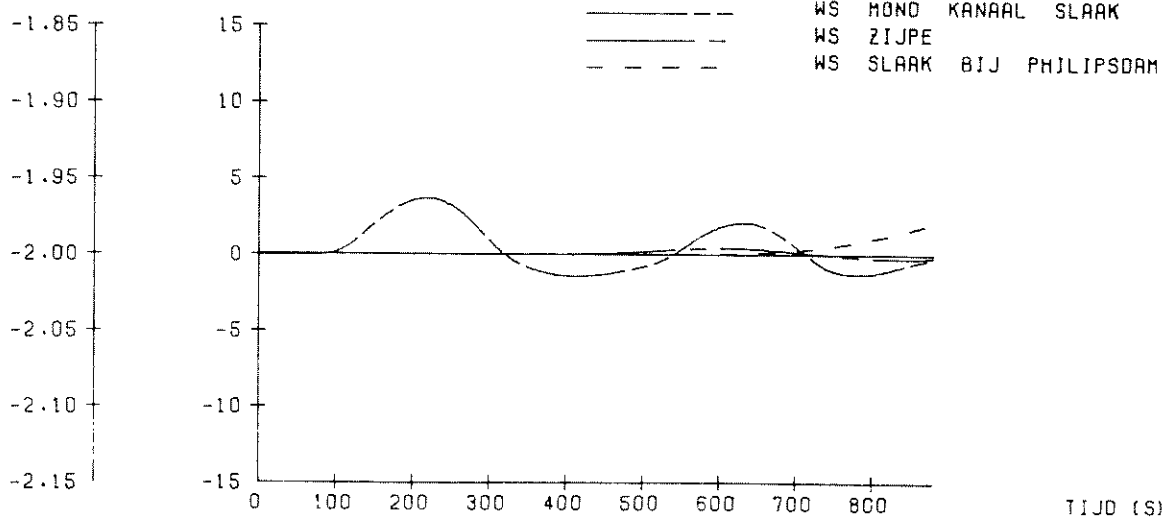
R 1225-II-1023

FIG. 22

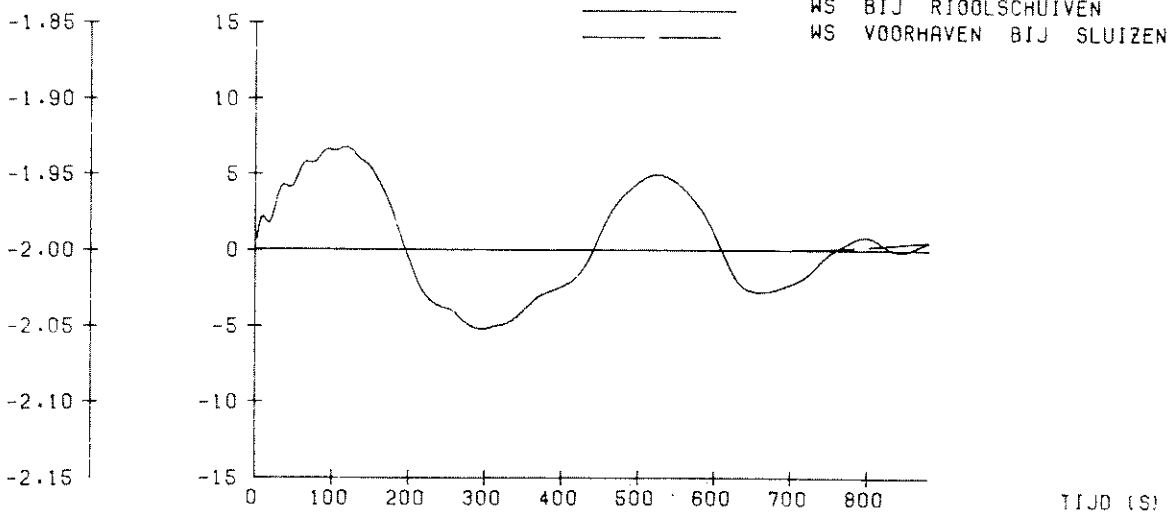
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

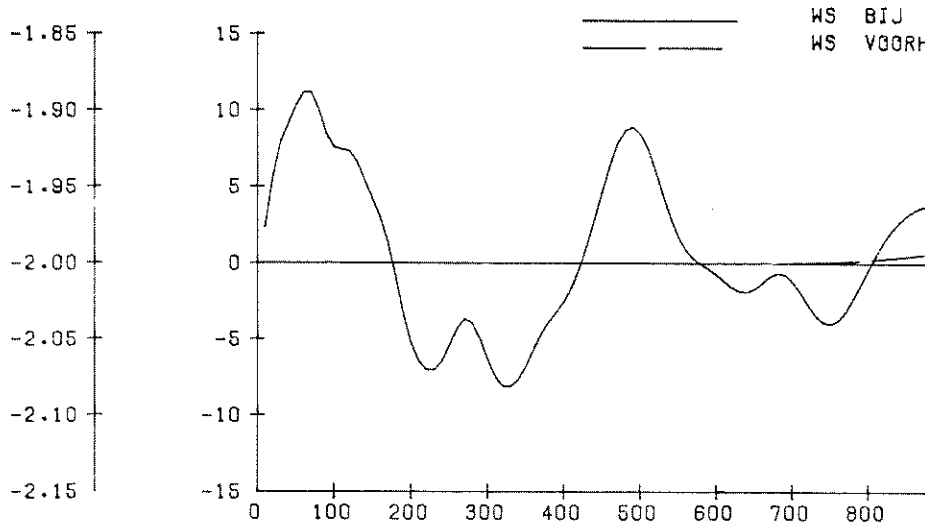
VARIANT— S5A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1024

FIG. 23

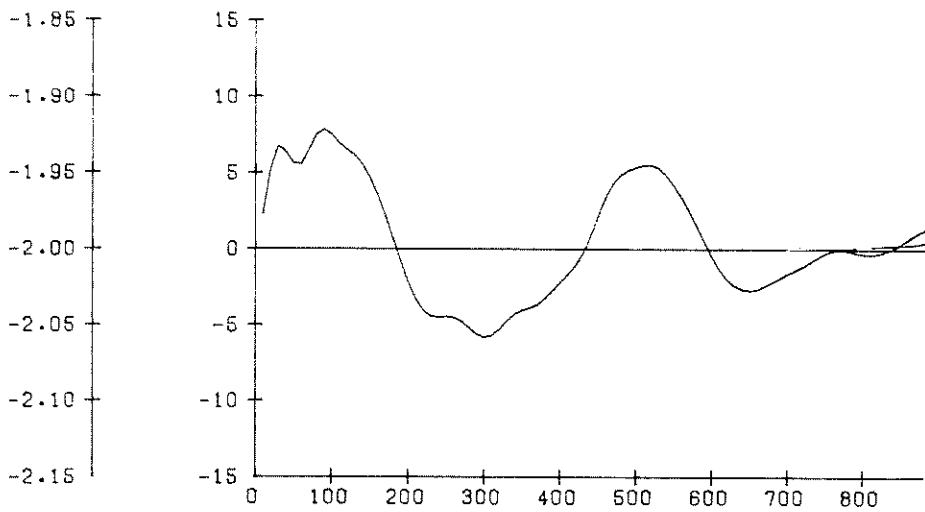
W.S. (M) GOLFH.(CM)



VARIANT S7

TIJD (S)

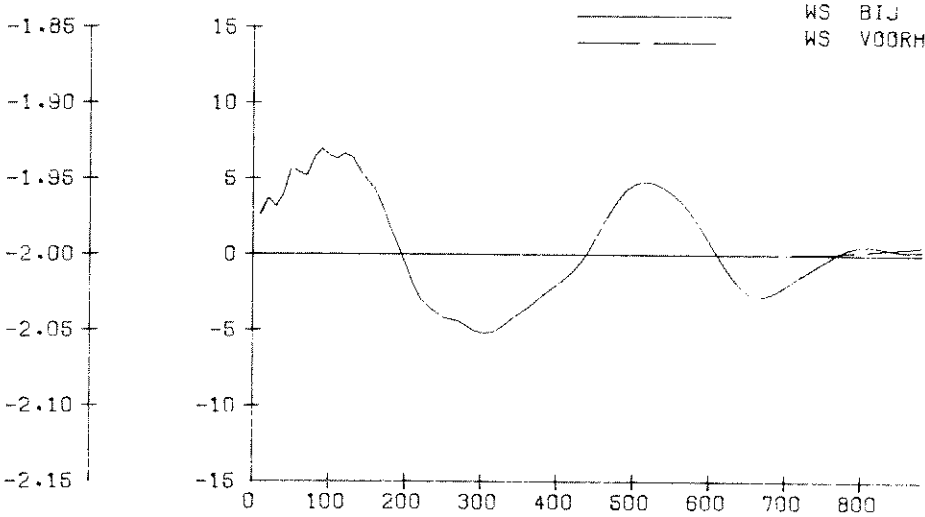
W.S. (M) GOLFH.(CM)



VARIANT S6

TIJD (S)

W.S. (M) GOLFH.(CM)



VARIANT S5

TIJD (S)

PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN-EFFEKTIJENITE-OMRANDE KANAAL-GEDELTJE

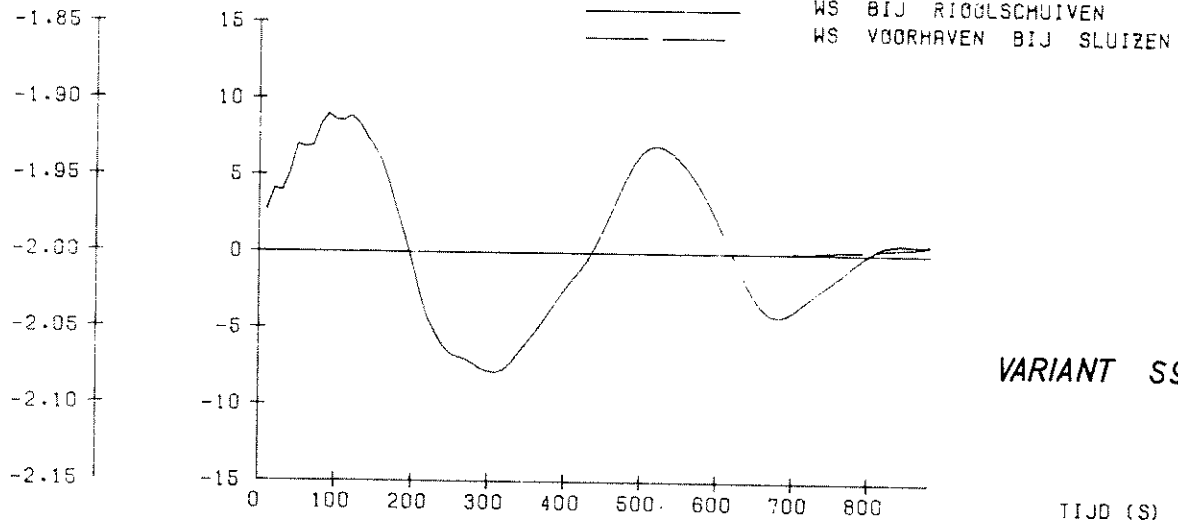
VARIANT-S5/S6/S7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

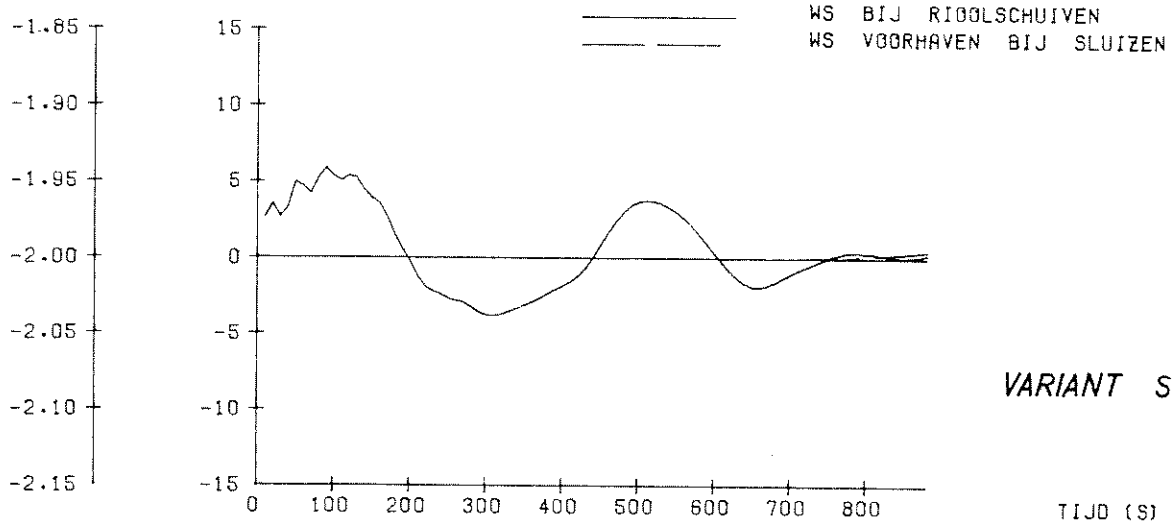
R 1225 II 1025

FIG. 24

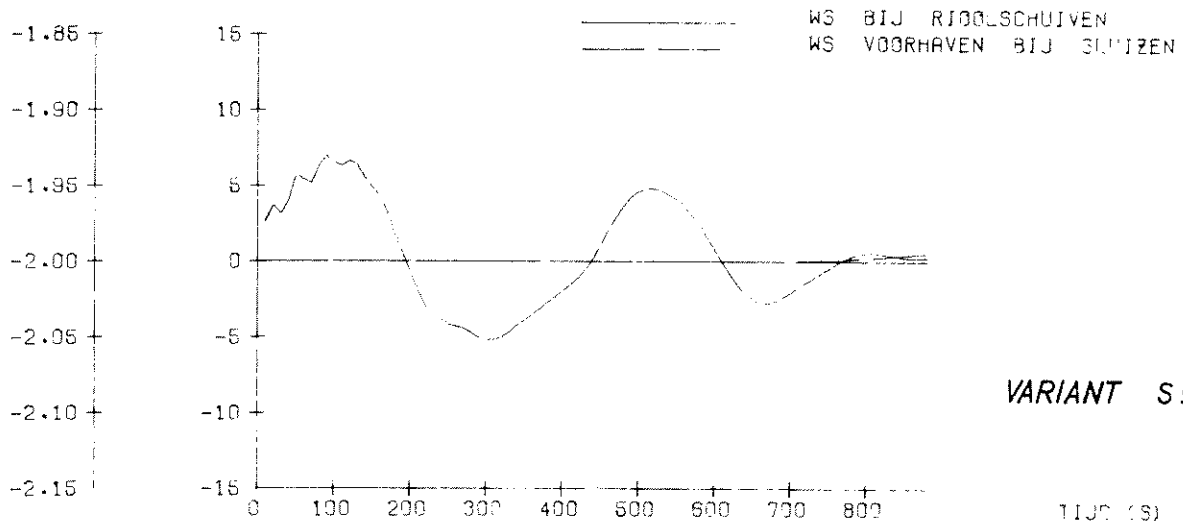
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

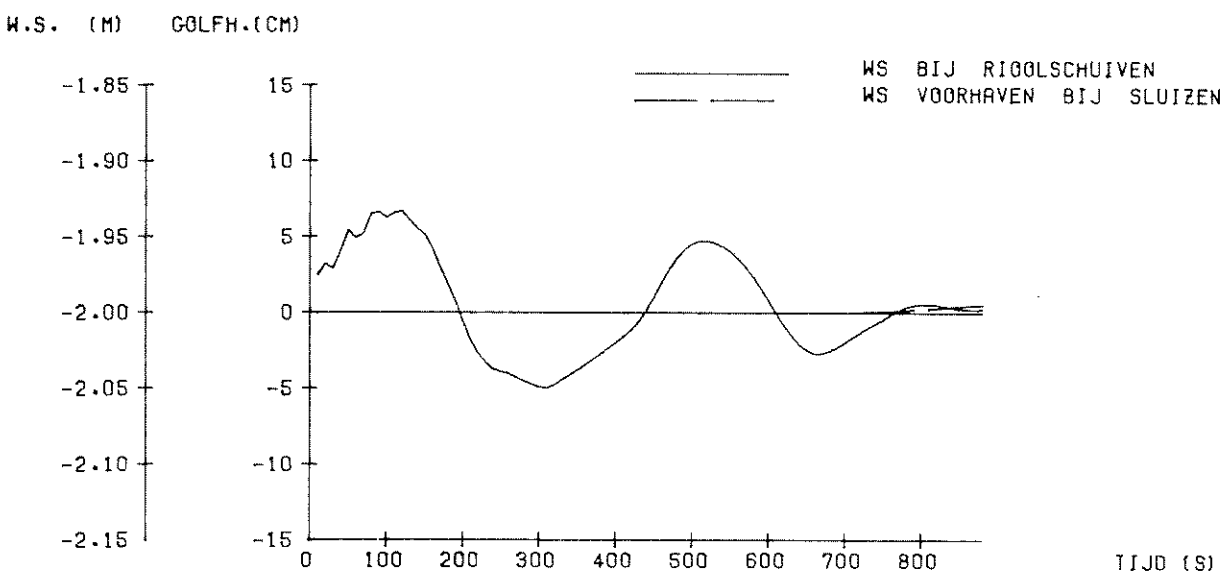
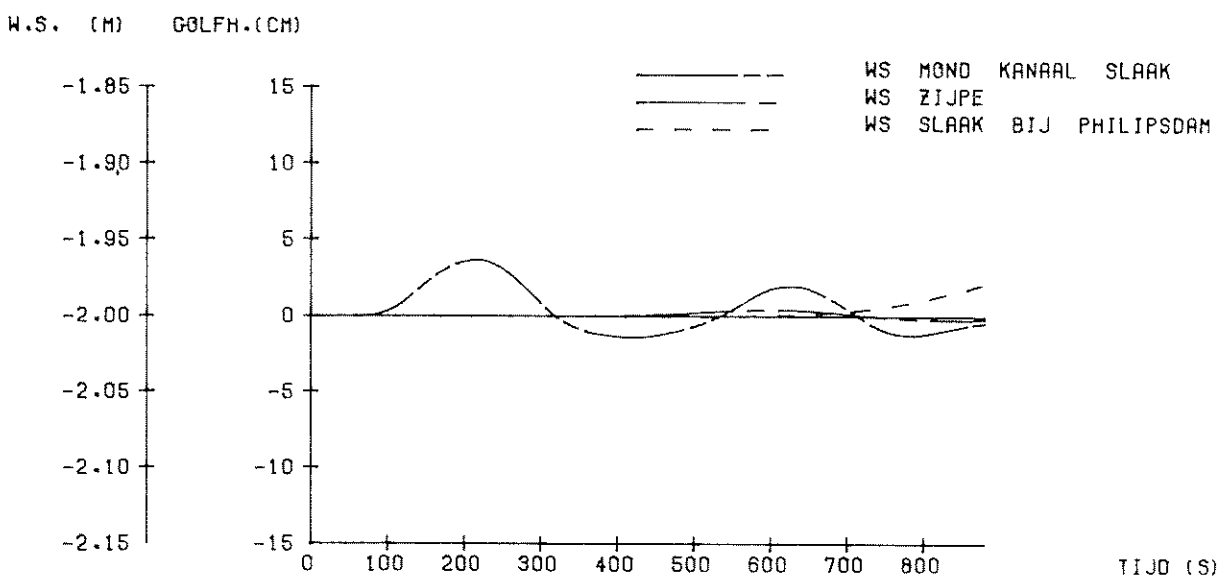
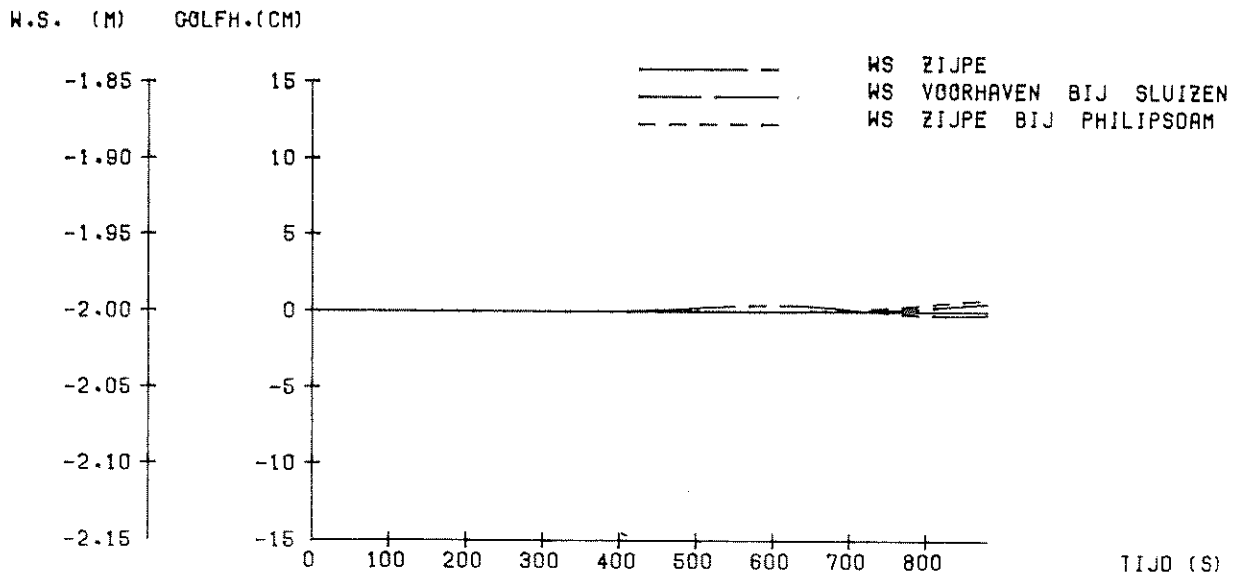
WATERSTANDEN-EFFEKT BREEDTE KANAAL SLAAK

VARIANT - S5/S8/S9

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1026

FIG. 25



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

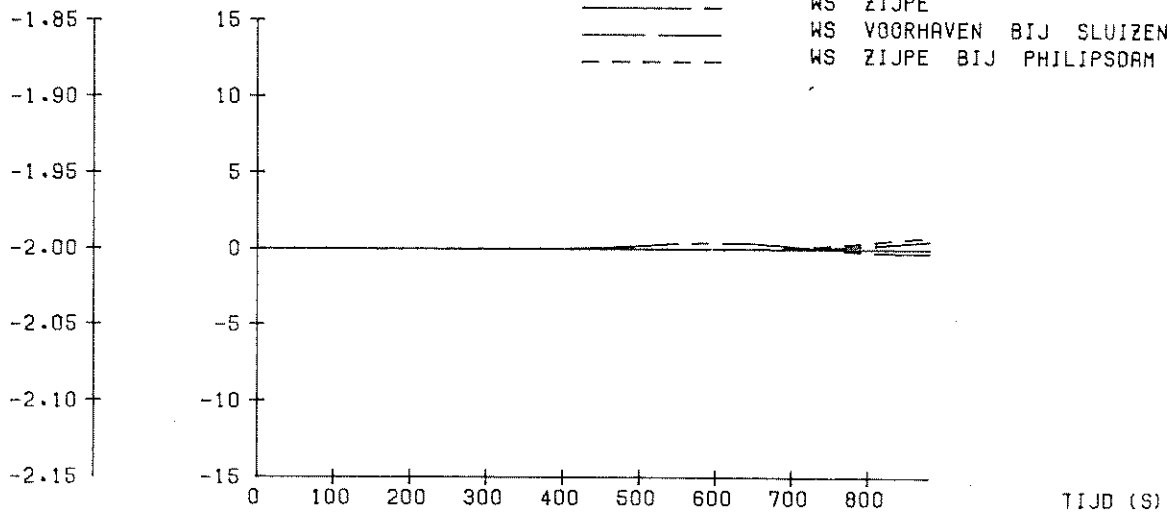
VARIANT — S10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

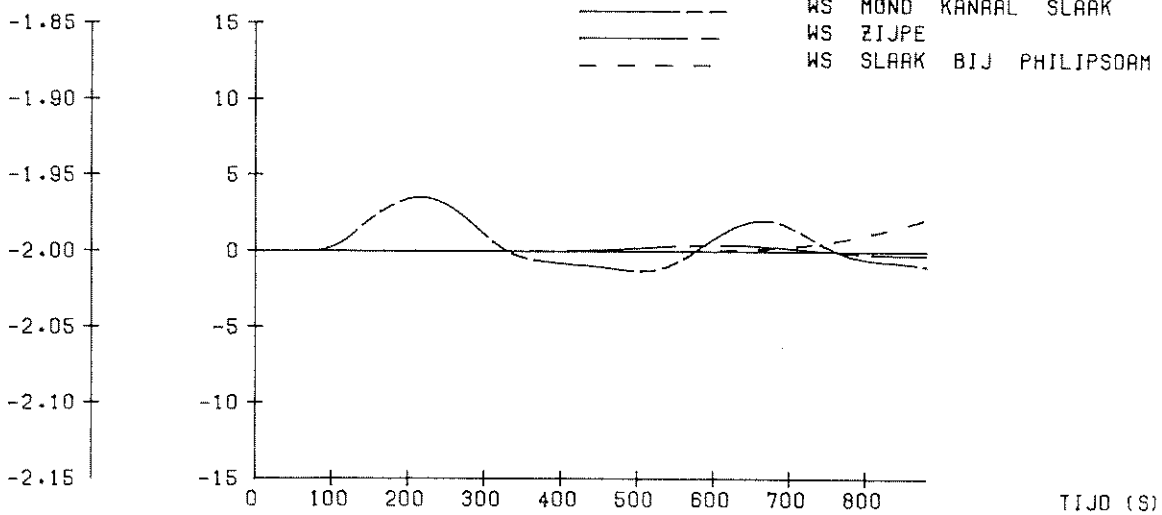
R 1225^{II}-1027

FIG. 26

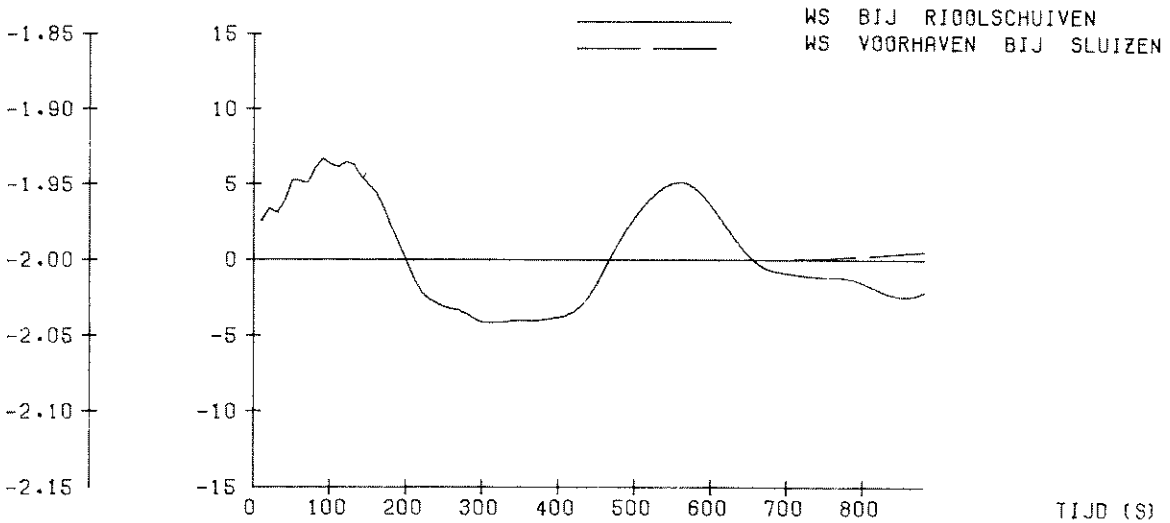
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

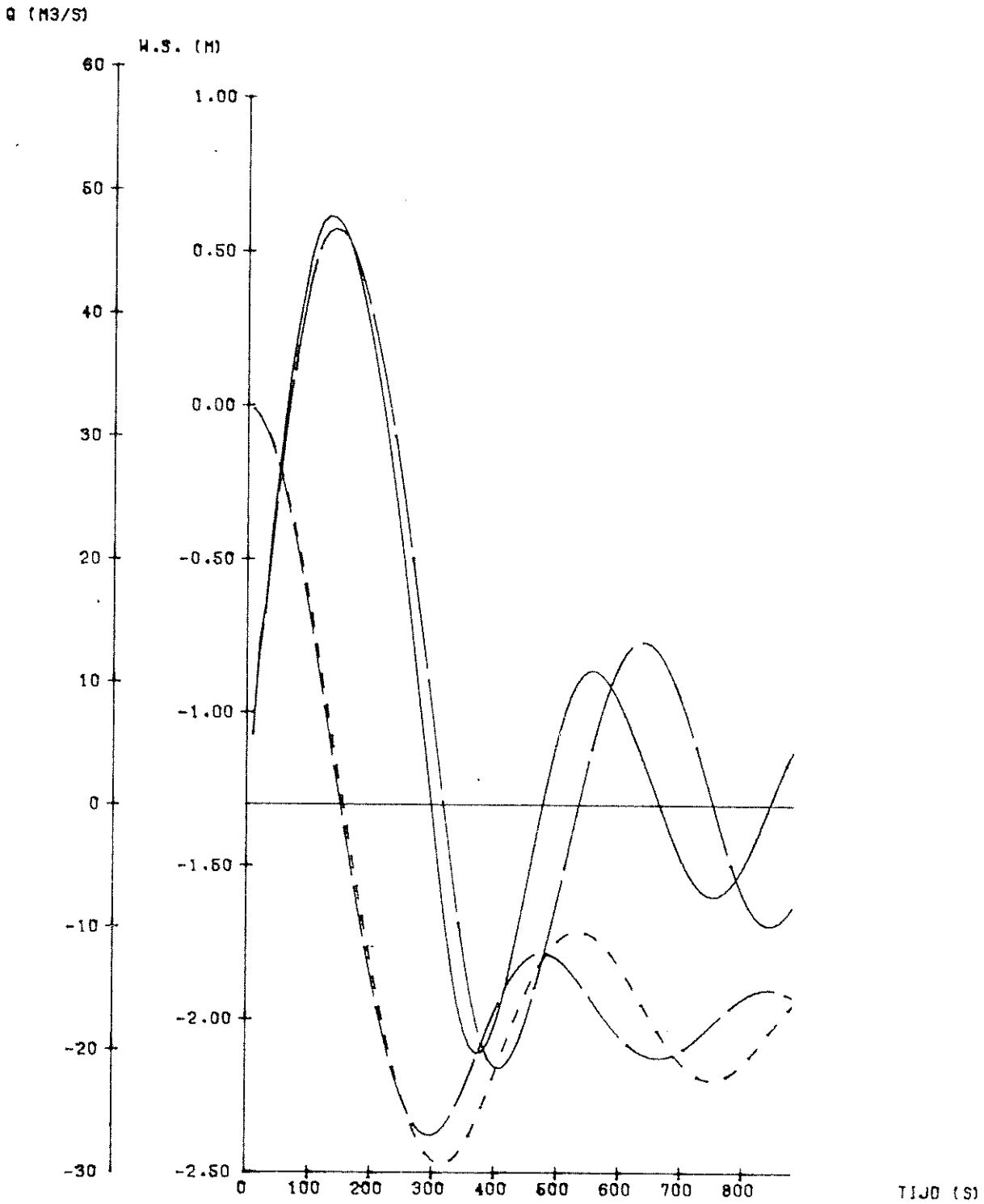
VARIANT— S11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1030

FIG. 27

- - - - - WS SLUISKOLK S5
 - - - - - WS SLUISKOLK S11
 ———— DEBIET PER RIJOL S5
 ———— DEBIET PER RIJOL S11



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTAND KOLK EN DEBIET PER RIJOL

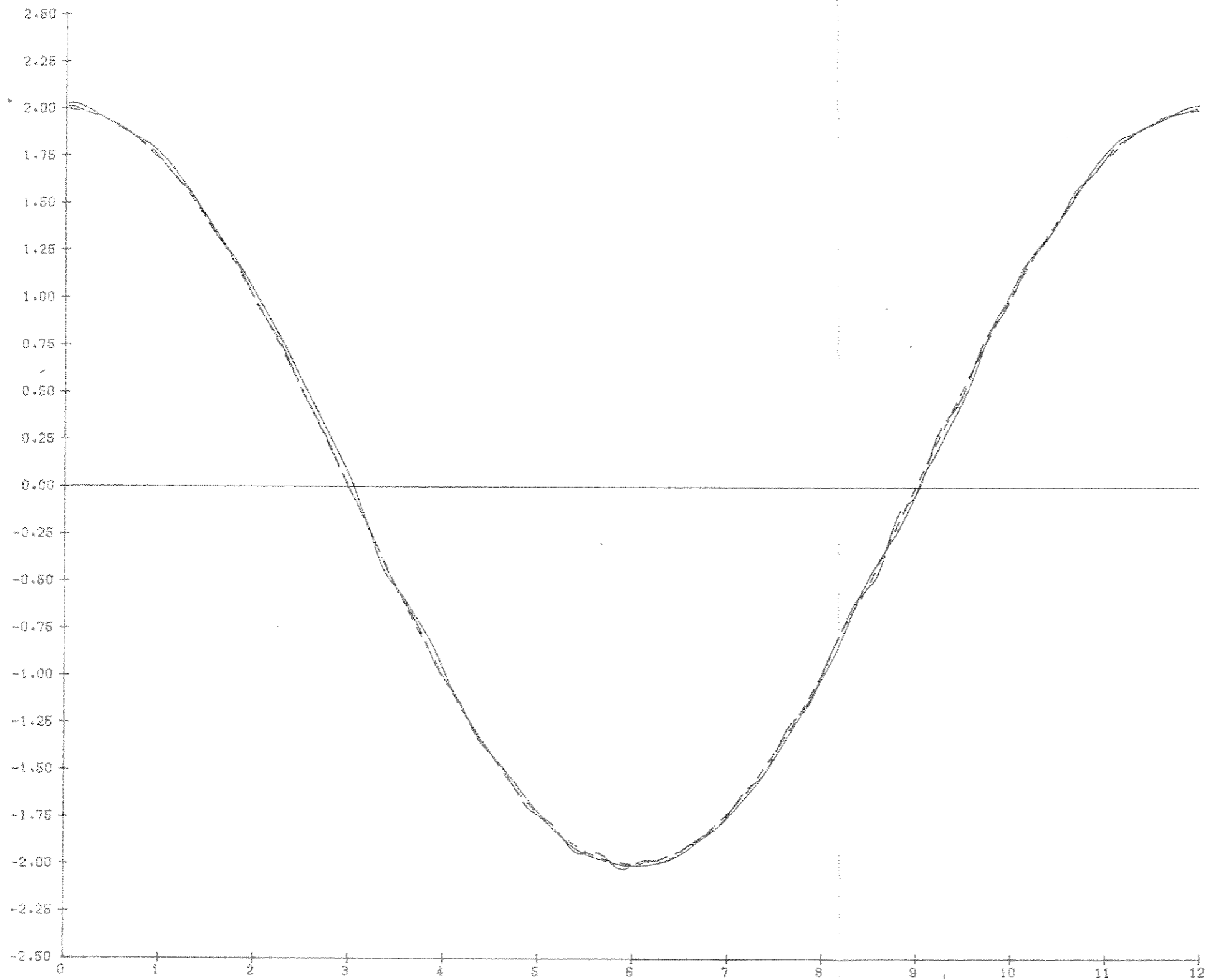
VARIANT— S5/S11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225^{II}-1031

FIG. 28

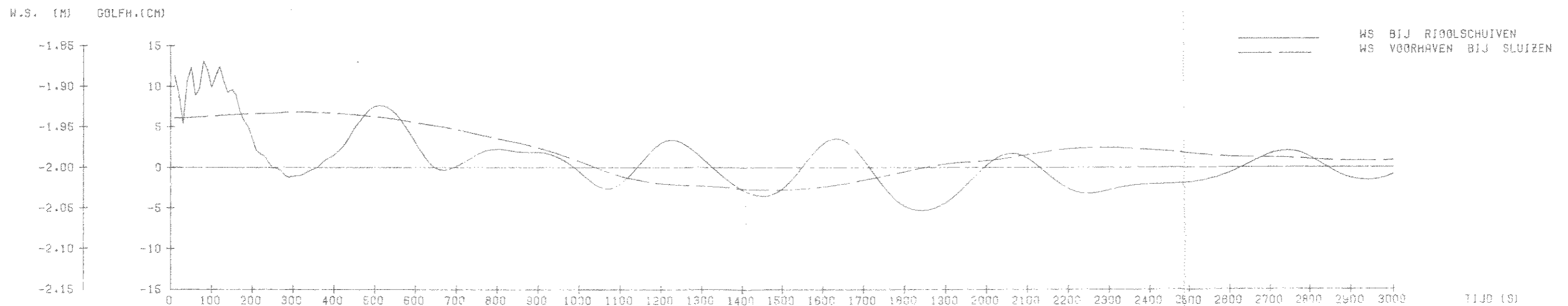
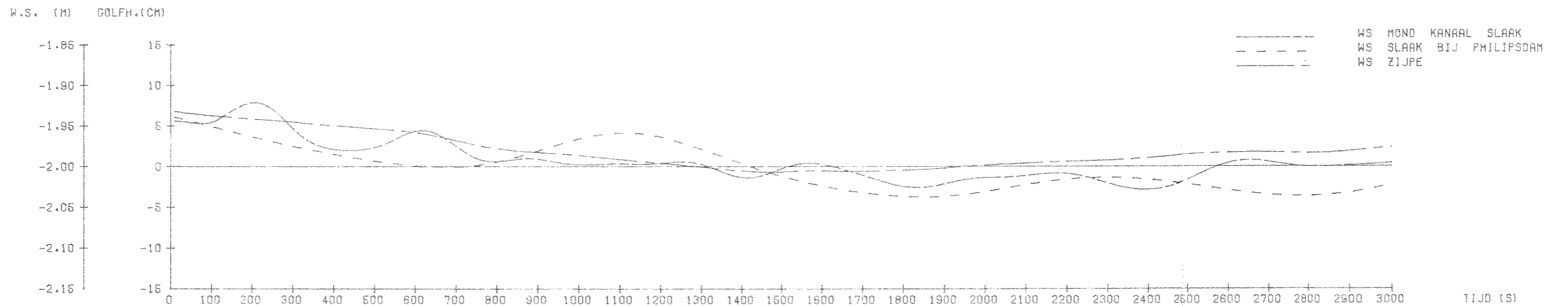
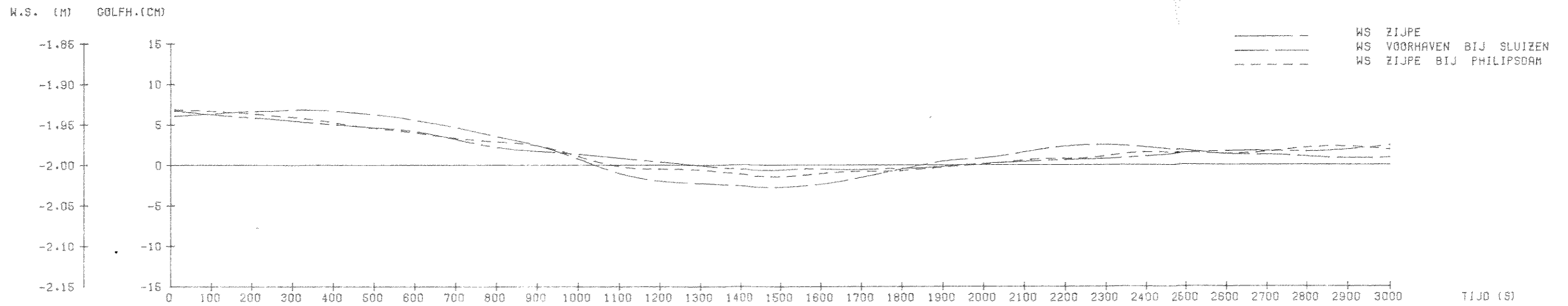
W.S.



W.S. DOORLAATWERK
W.S. VOORHAVEN BIJ SLUIZEN
W.S. ZIJPE RAND

TIJD (UUR)

PHILIPSDAMSLUIZEN GETIJBEWEGING OP ZOUTE PAND WATERSTANDEN		
	VARIANT-S12A	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1225 II 1028	FIG. 29



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

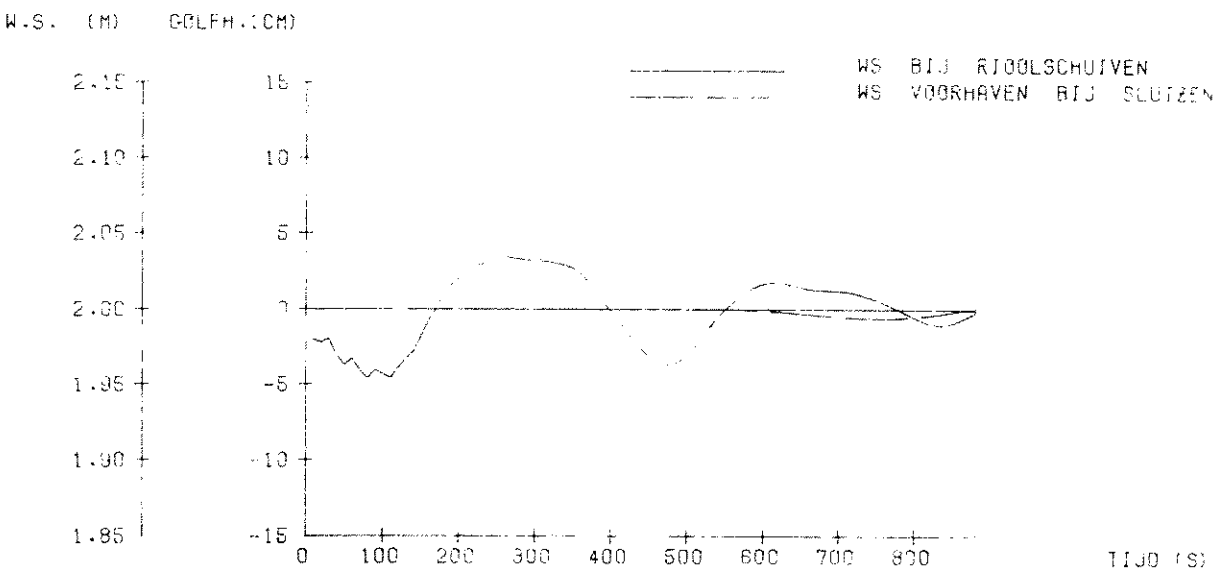
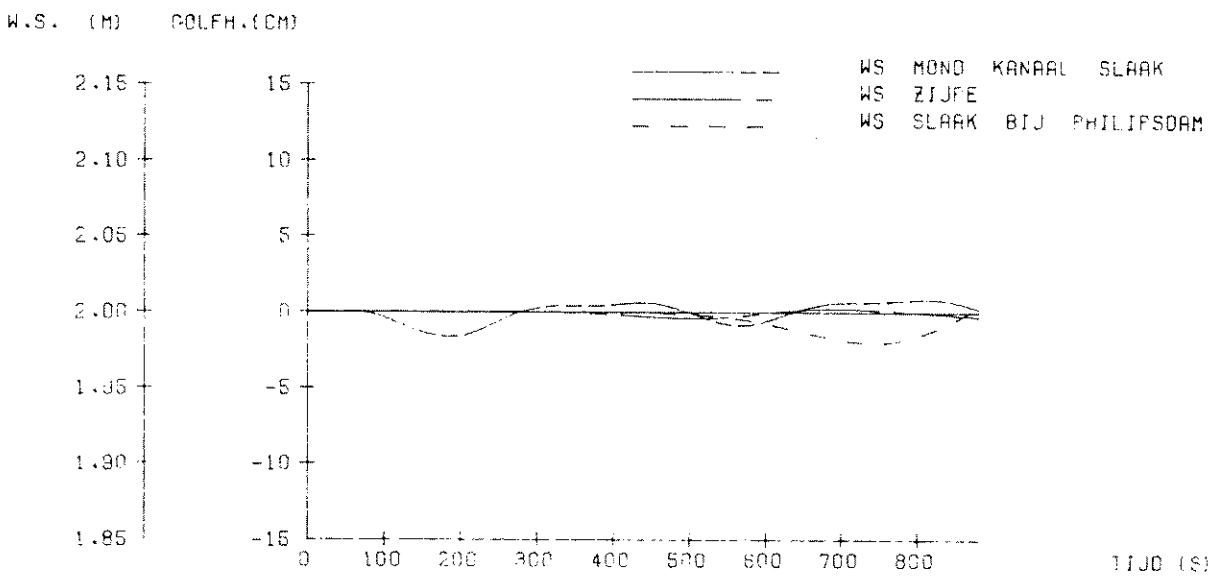
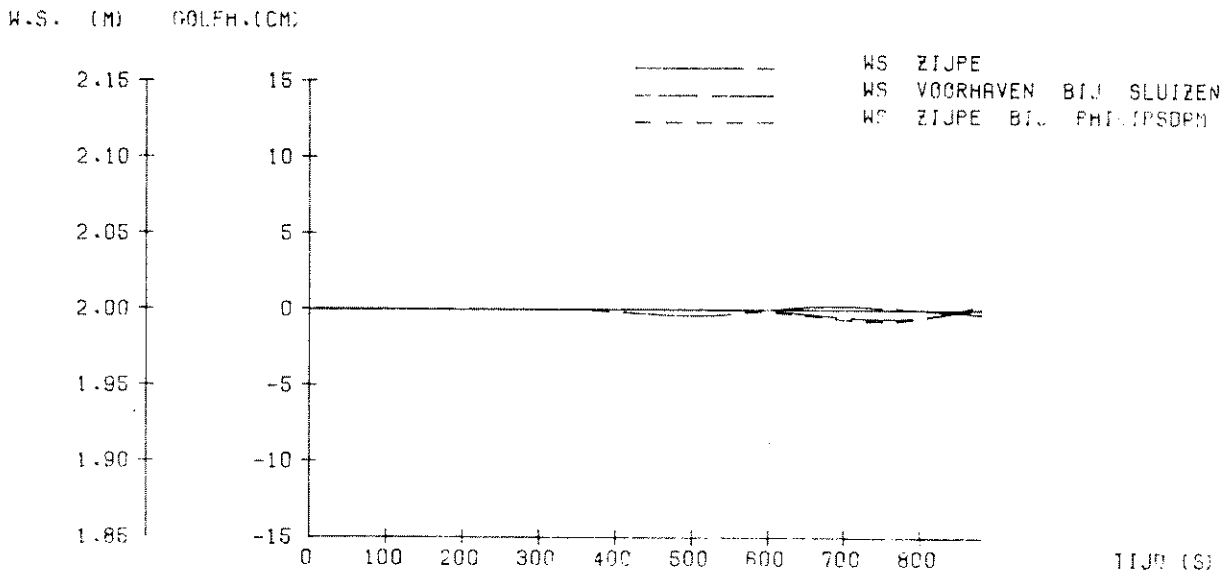
WATERSTANDEN

VARIANT-S12

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1029

FIG. 30



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

VARIANT-S13

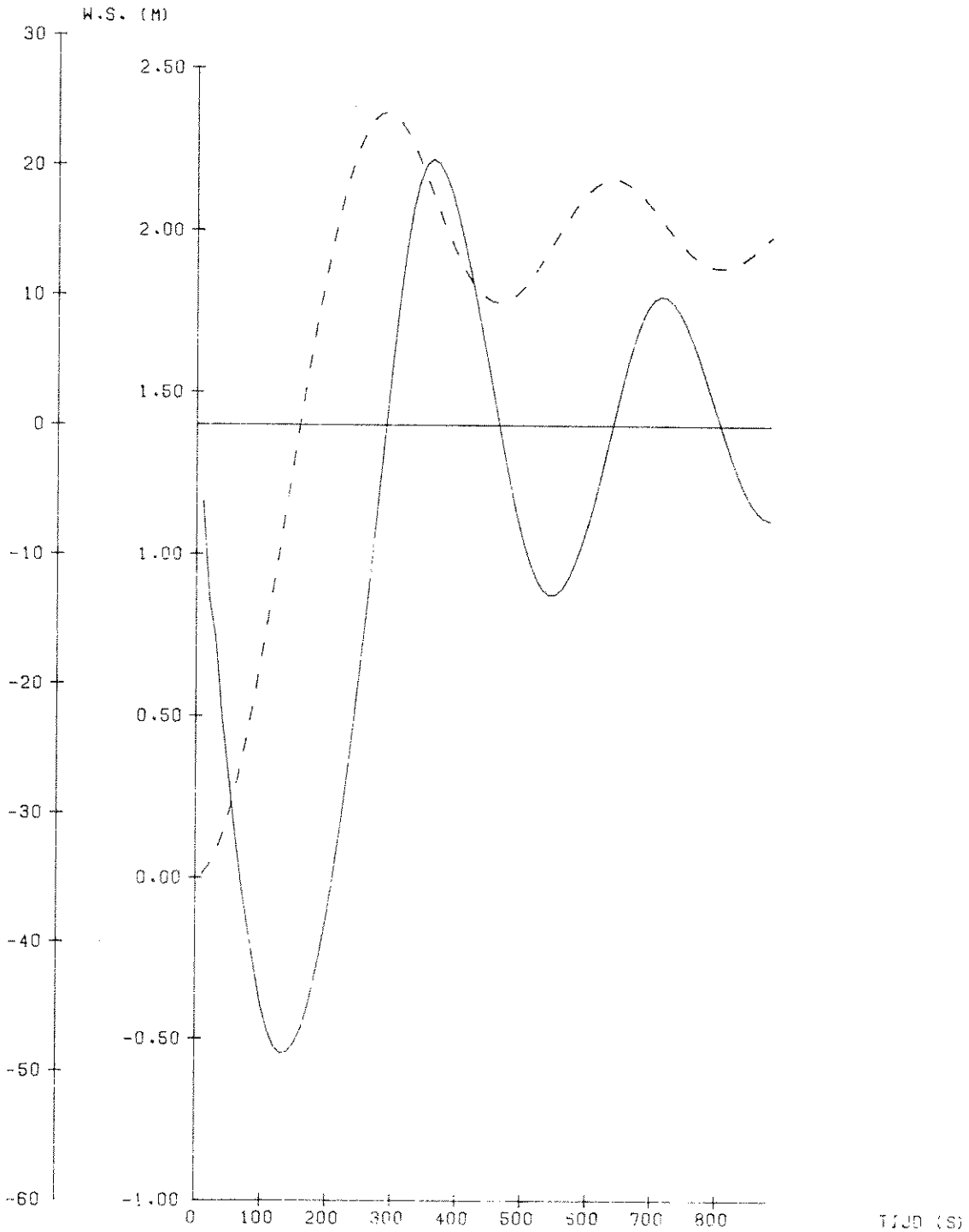
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1032

FIG. 31

--- WS SLUISKOLK
 _____ DEBIET PER RIJOL

Q (M³/S)



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

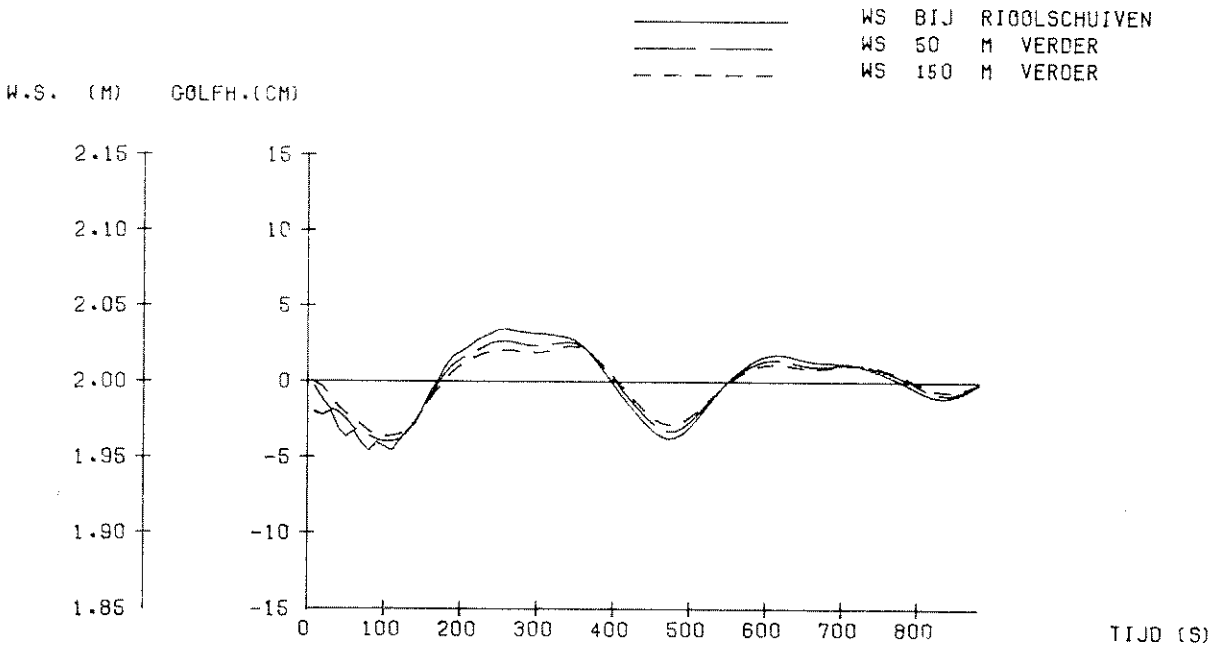
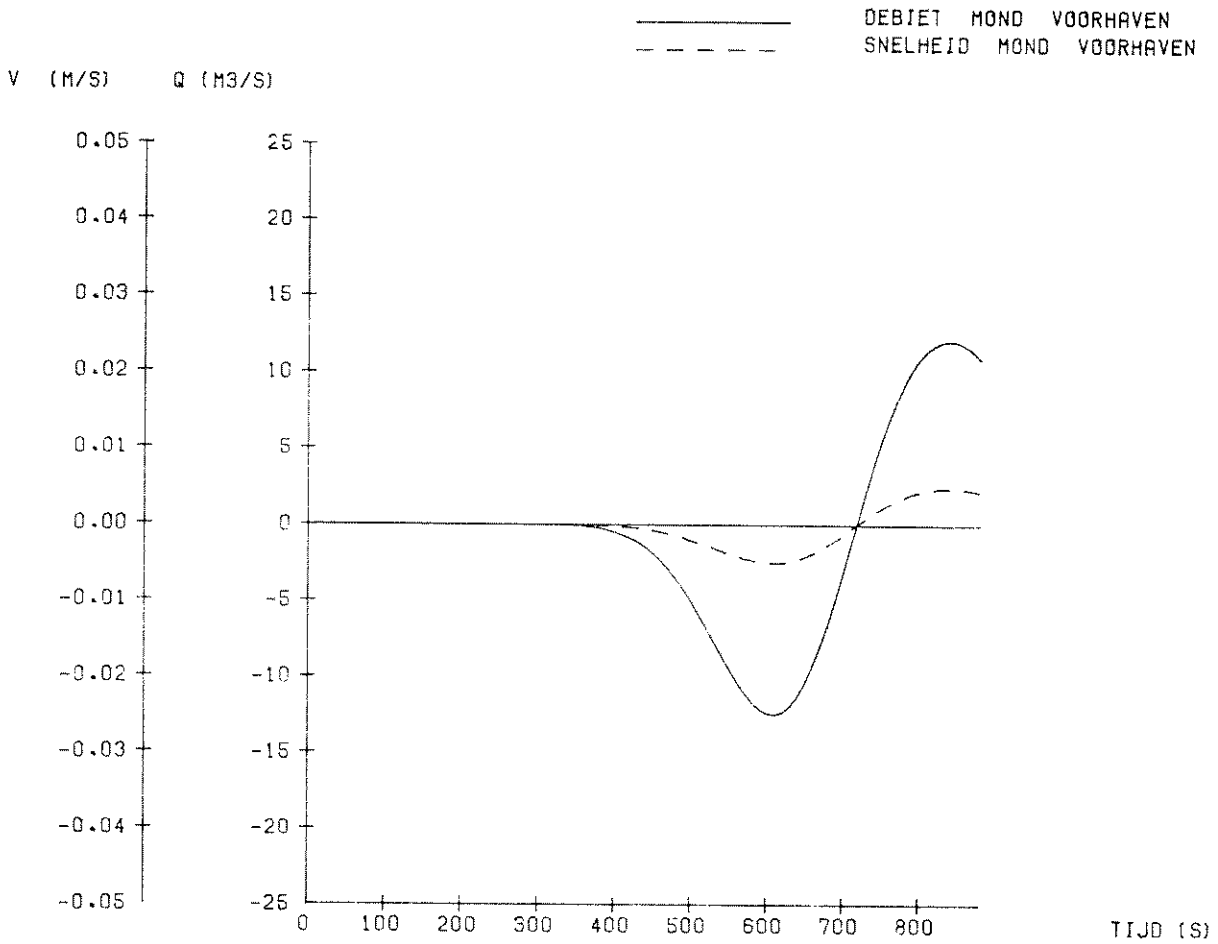
WATERSTAND KOLK EN DEBIET PER RIJOL

VARIANT-513

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 1033

FIG. 32



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN KANAAL SLAAK EN DEBIET MOND VOORHAVEN

VARIANT—S13

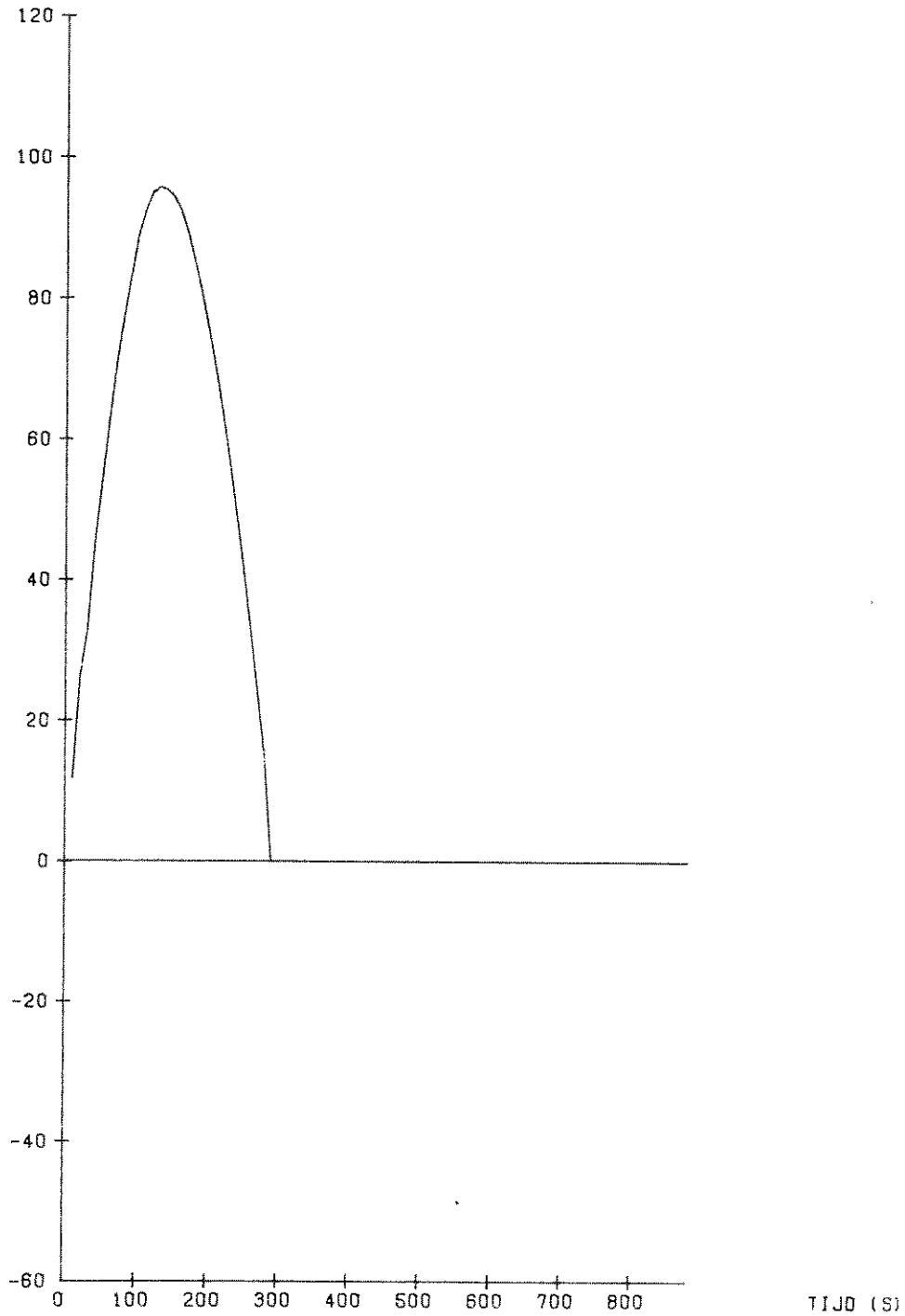
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II.1034

FIG.33

DEBIET PER RIJOL

Q (M³/S)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

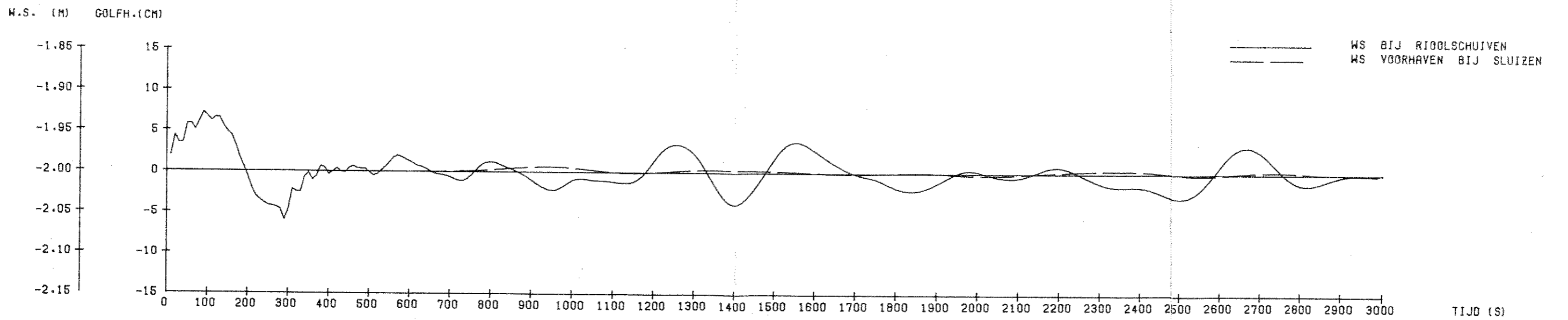
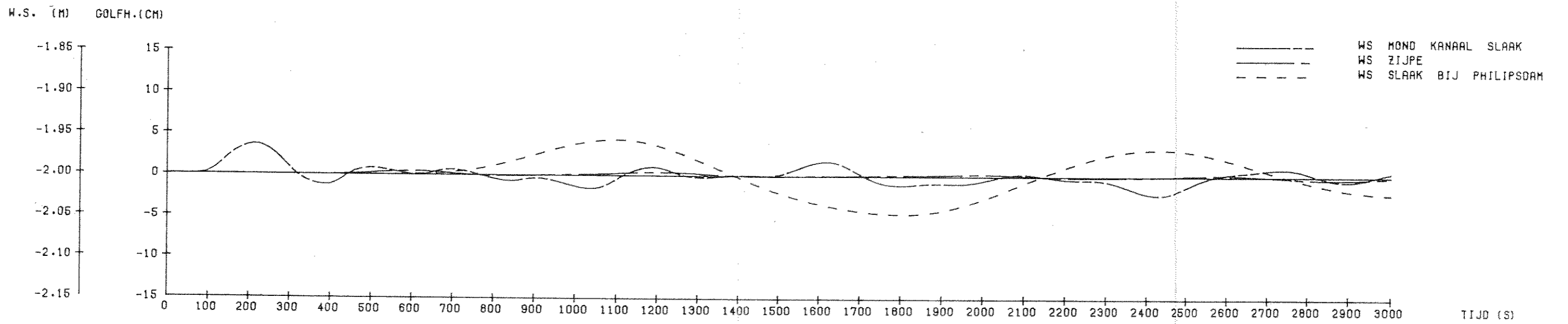
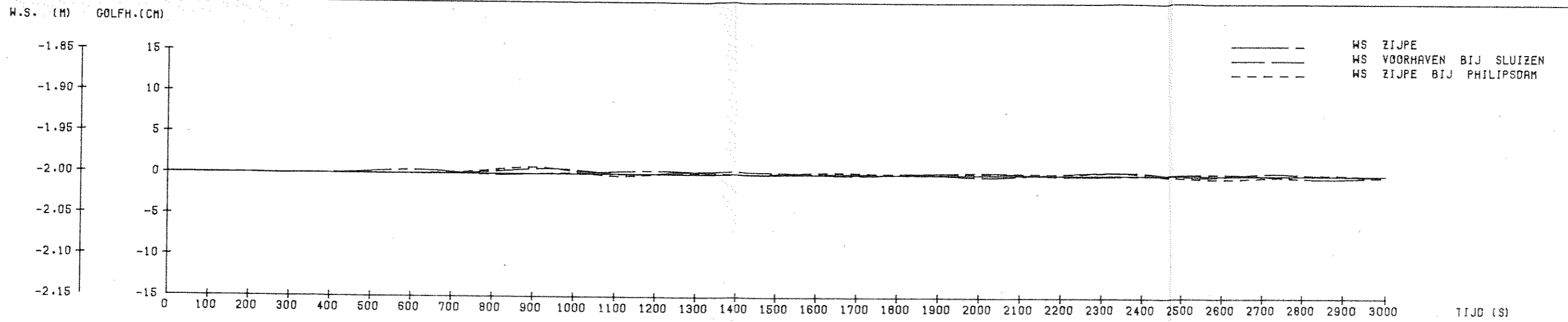
OPGELEGD DEBIET BIJ BEGIN KANAAL SLAAK

VARIANT-S14

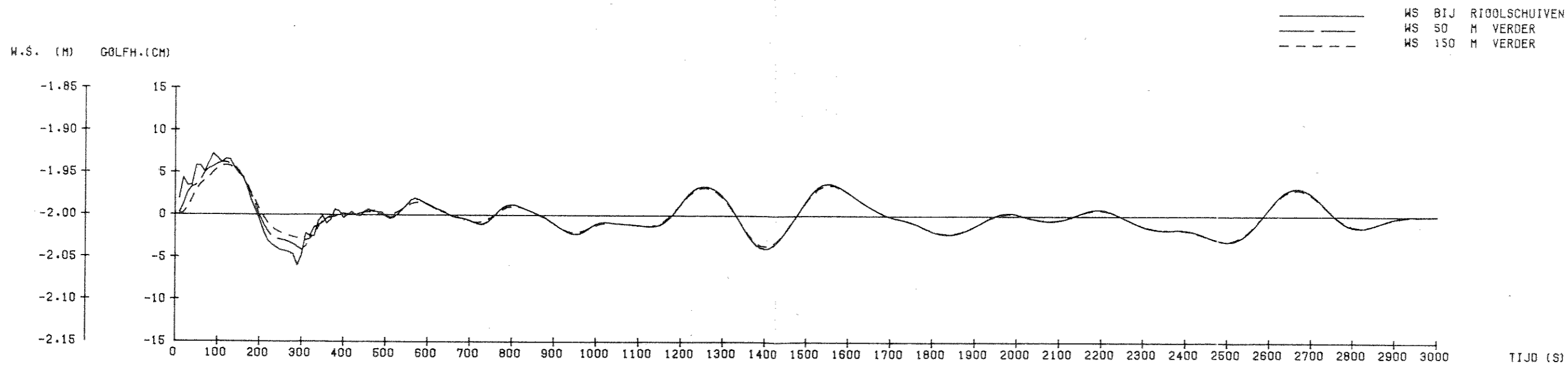
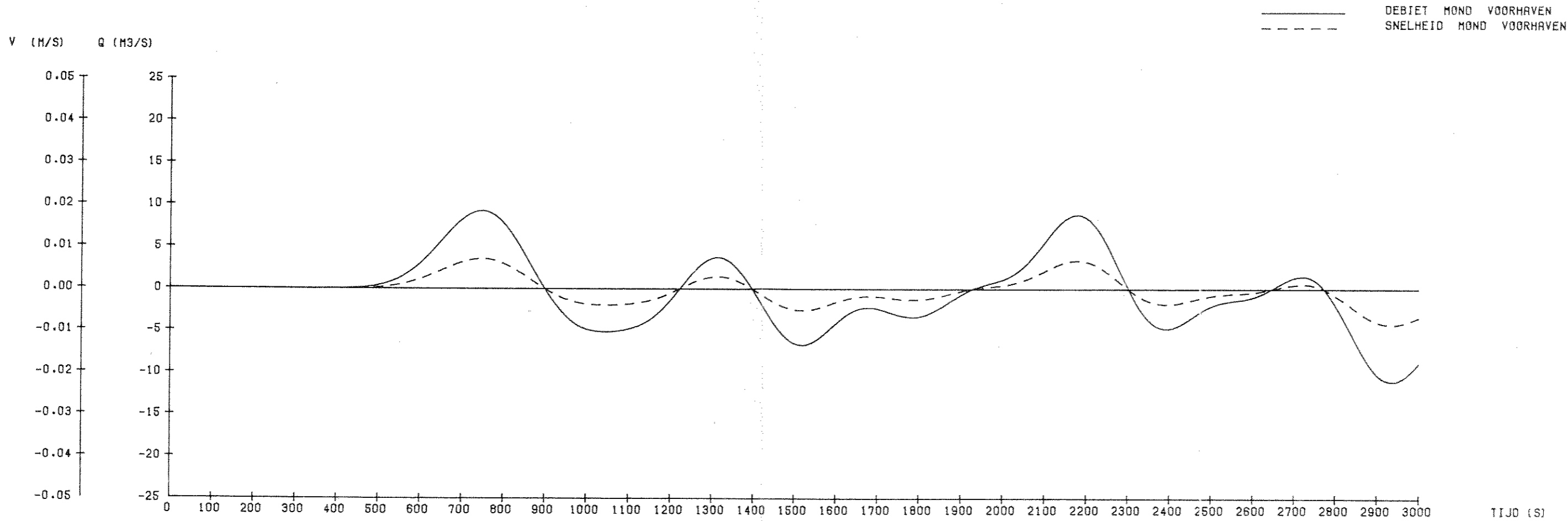
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225^{II}-1035

FIG.34



PHILIPSDAMSLUIZEN		
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND		
WATERSTANDEN	VARIANT - S 14	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R 1225 II-1036	FIG. 35



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

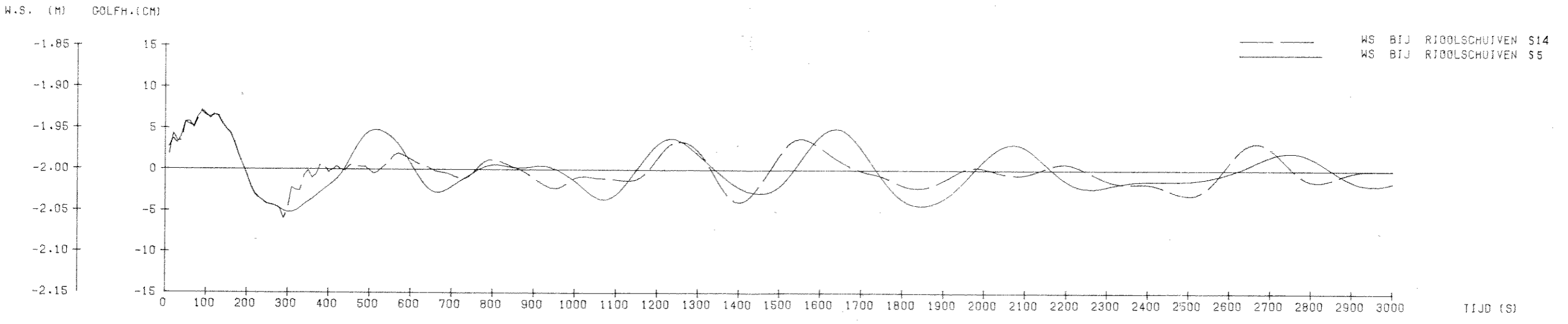
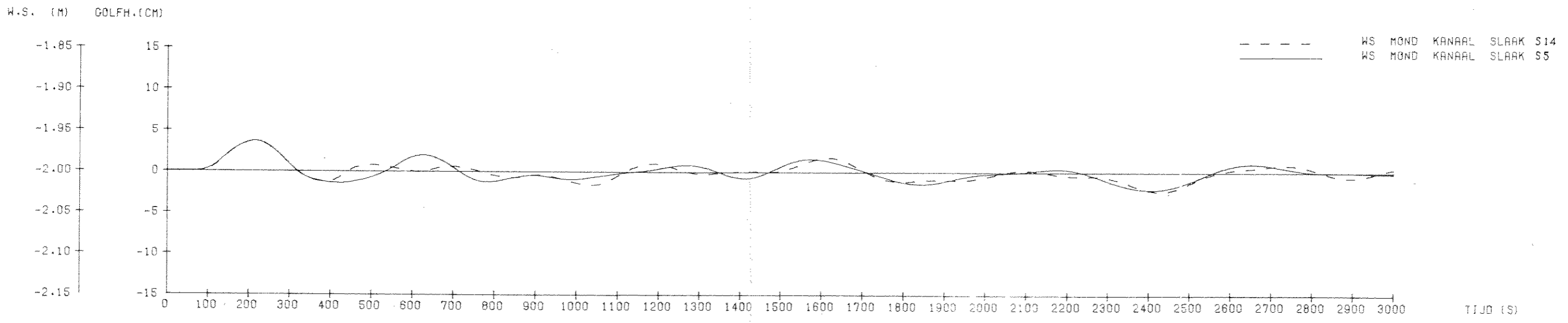
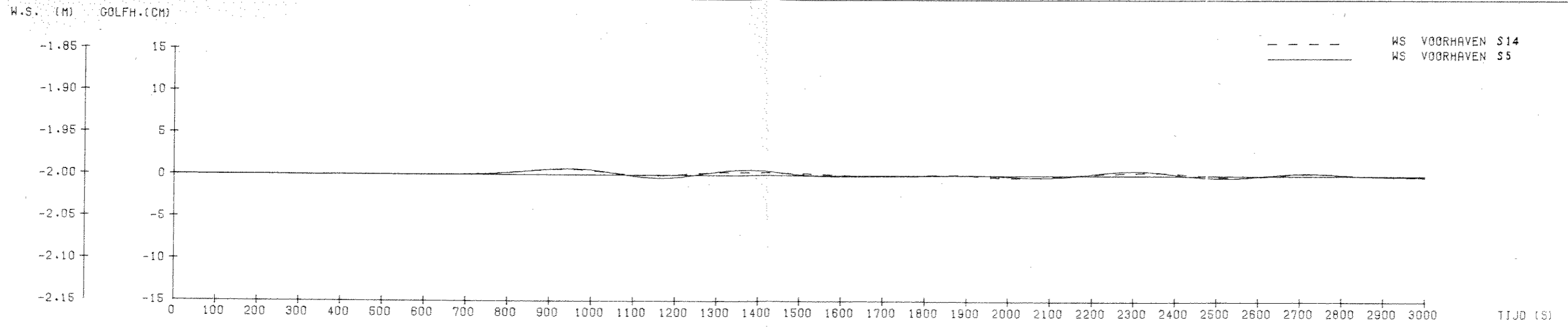
WATERSTANDEN KANAAL SLAAK EN DEBIET MOND VOORHAVEN

VARIANT - S14

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

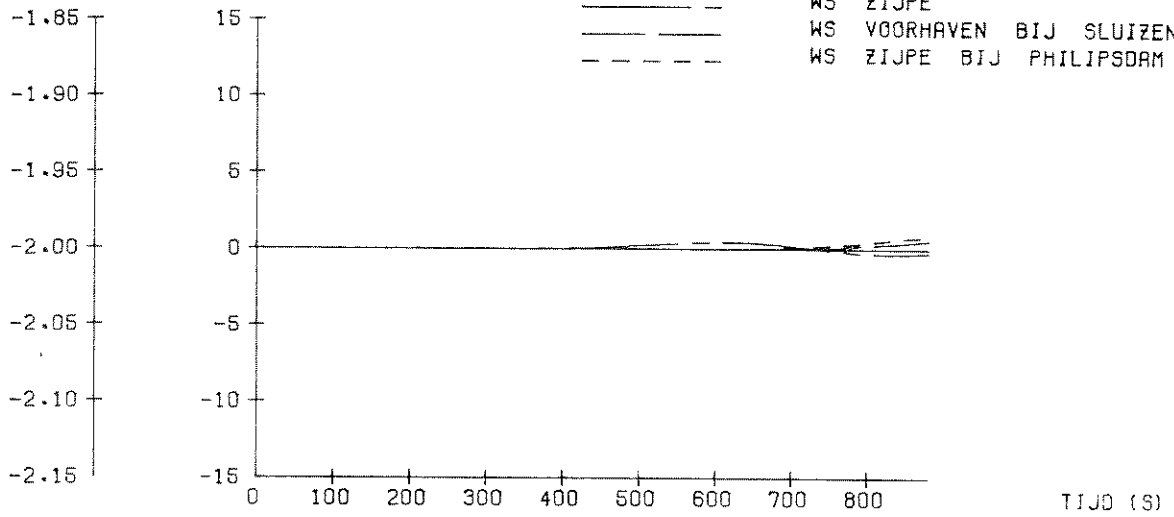
R 1225 II 1037

FIG. 36

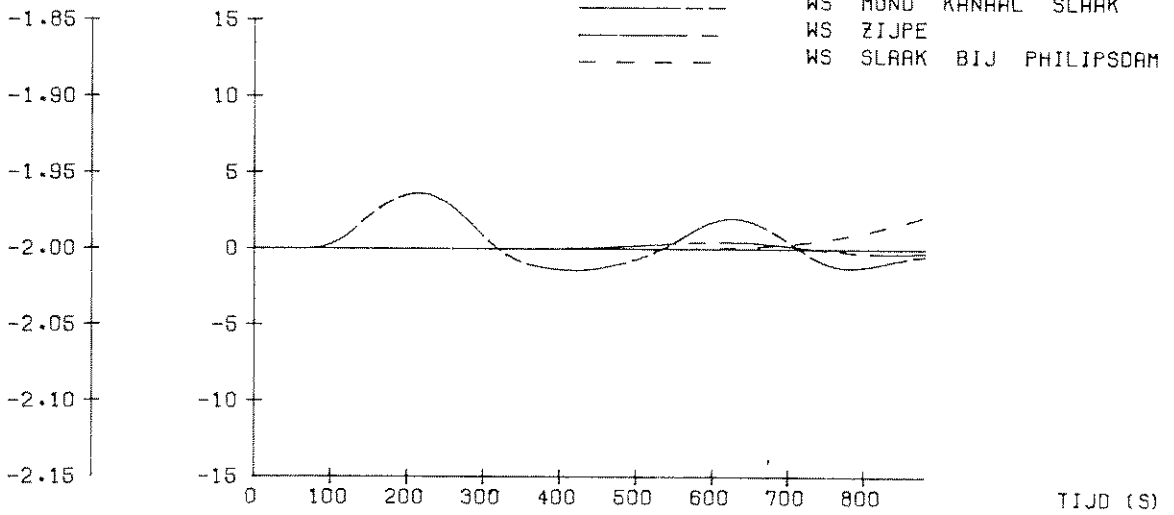


PHILIPSDAMSLUIZEN TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND		
WATERSTANDEN - MET EN ZONDER DOORSLINGEREN		VARIANT - S5/S14
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		R 1225 II-1038 FIG. 37

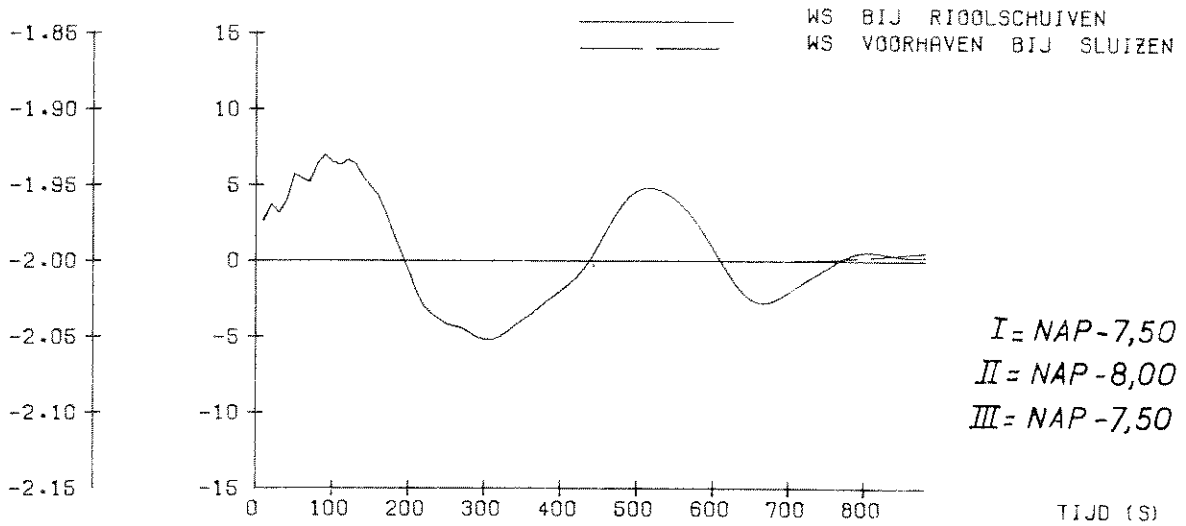
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

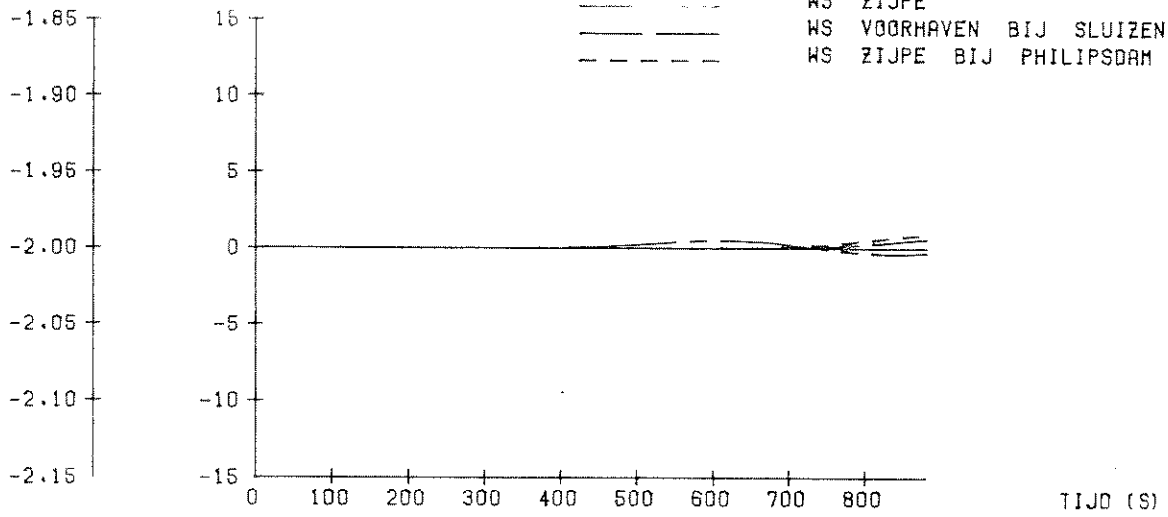
VARIANT - S5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

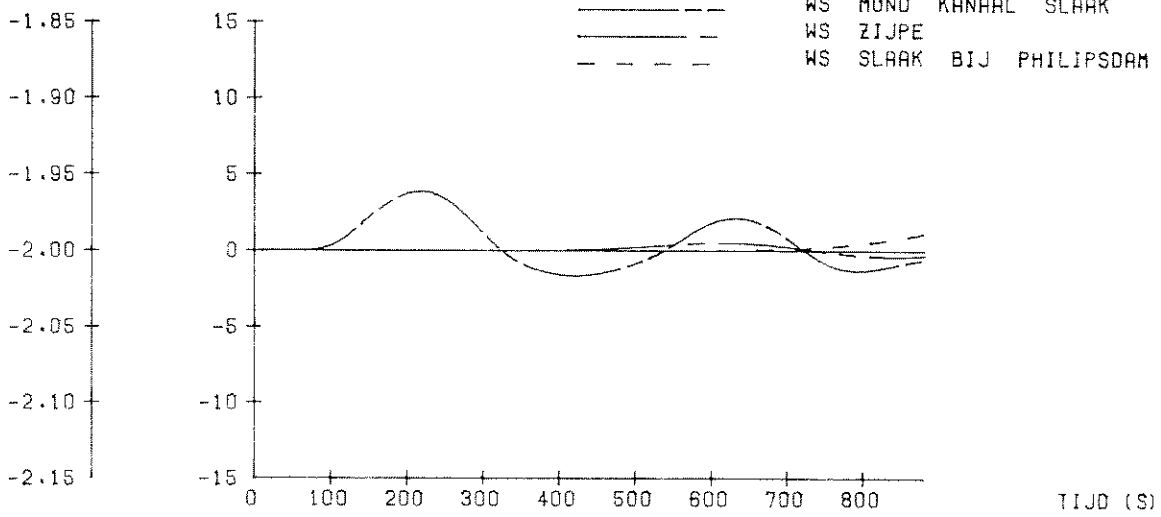
R 1225 $\frac{1}{2}$ 1039

FIG. 38

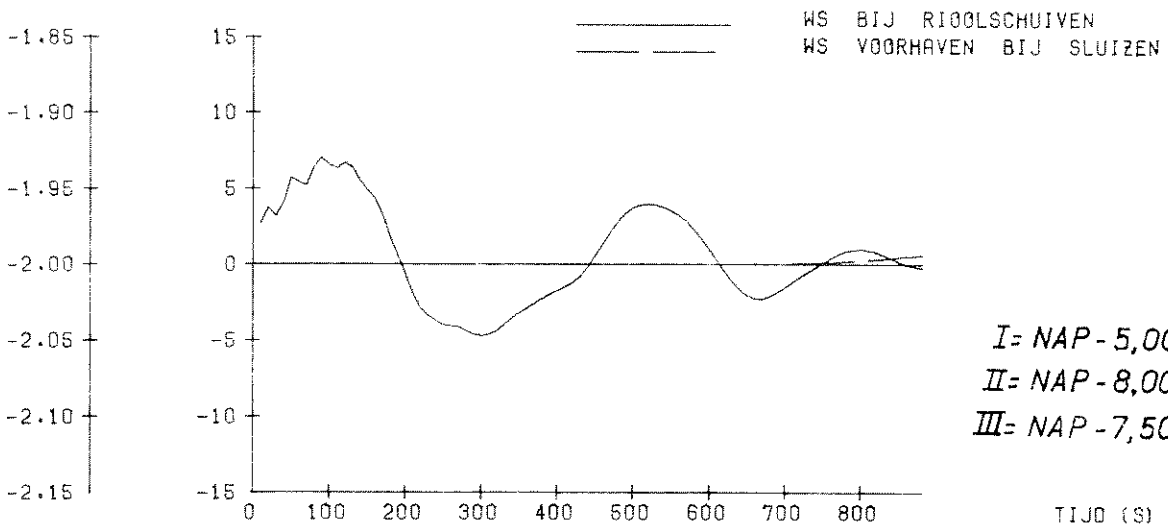
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

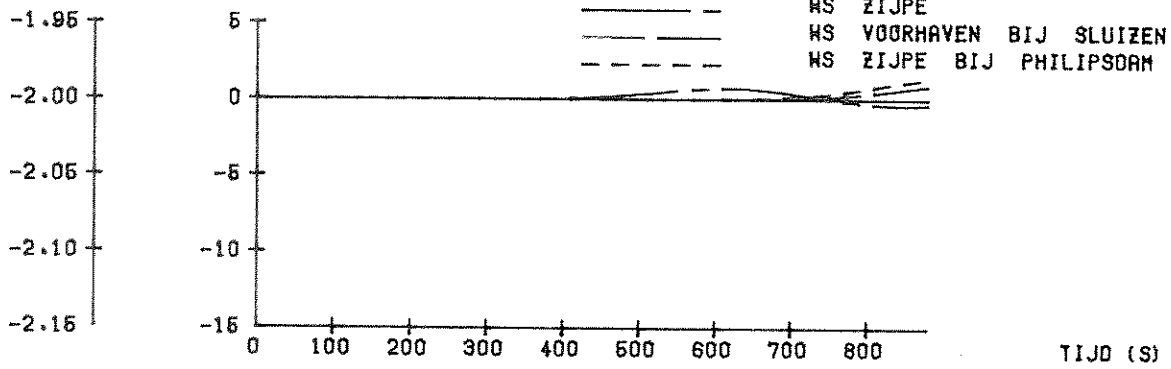
VARIANT - S 15

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

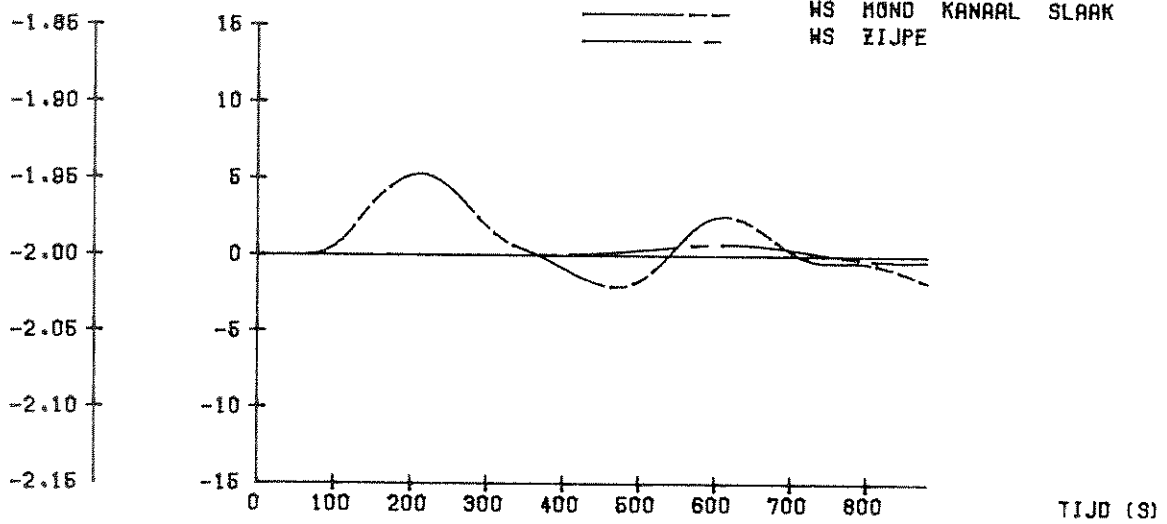
R 1225 II 1040

FIG. 39

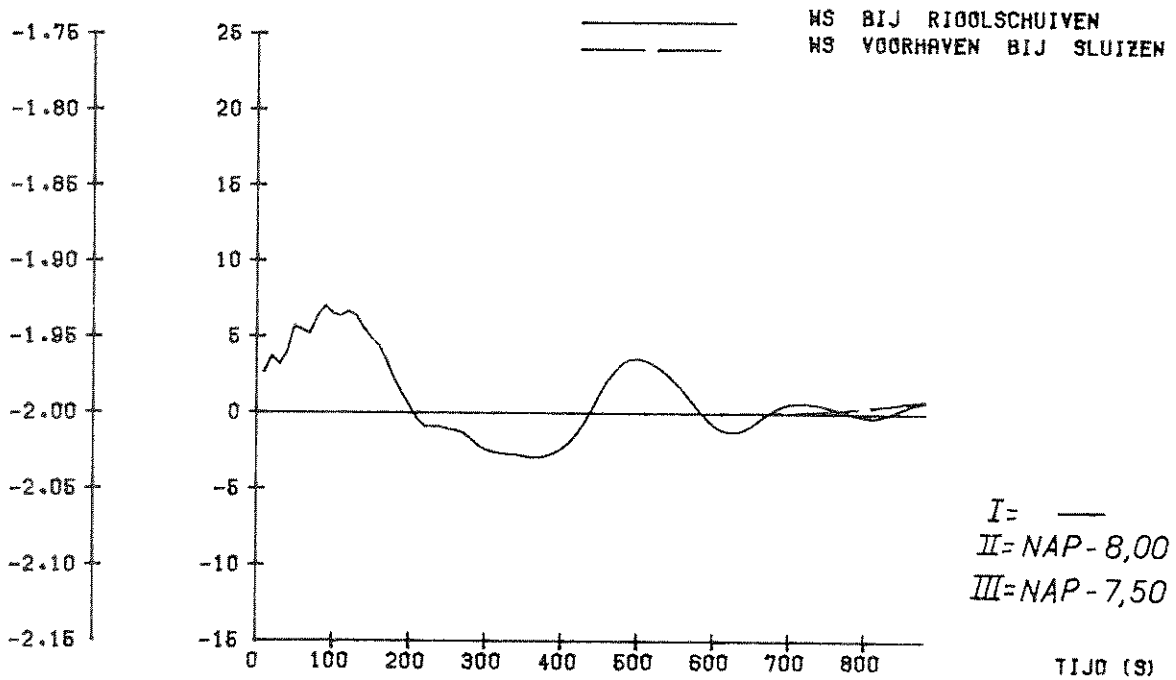
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

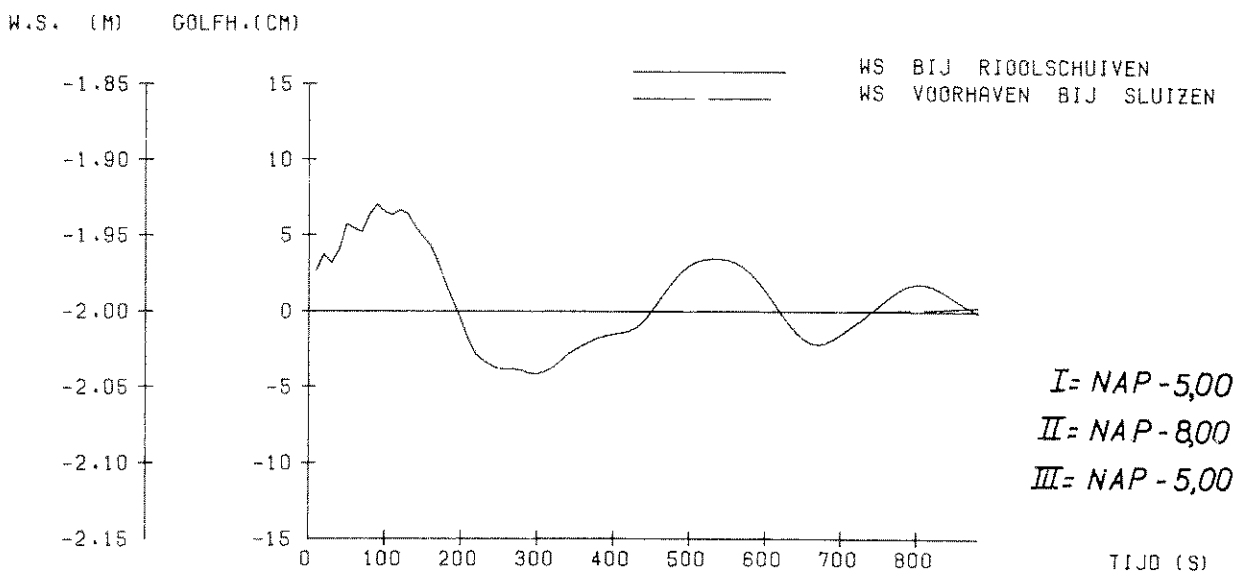
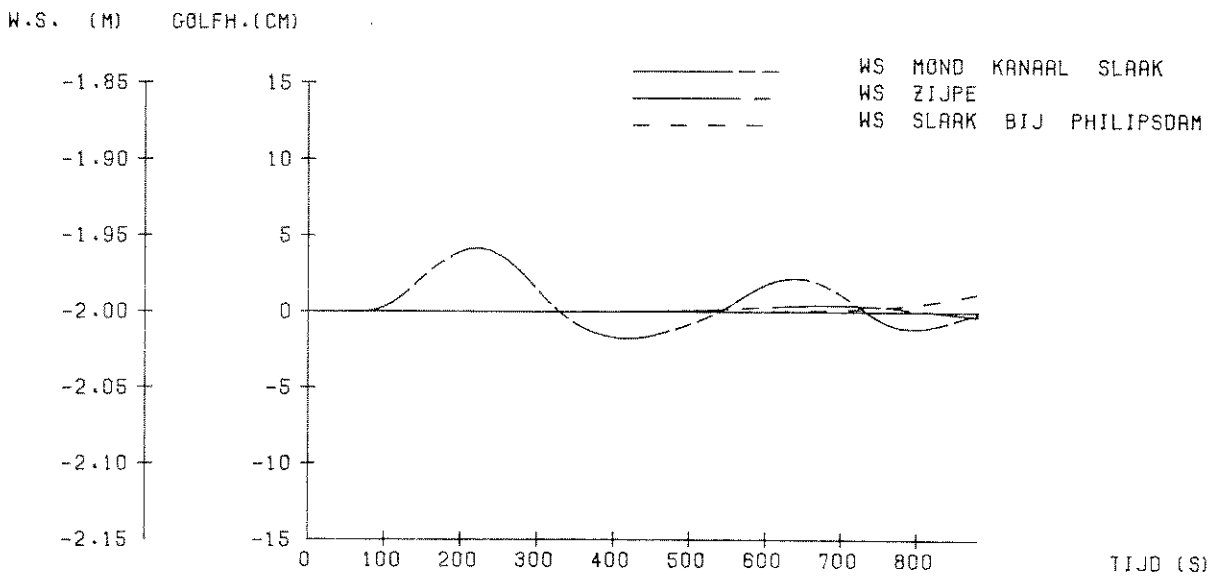
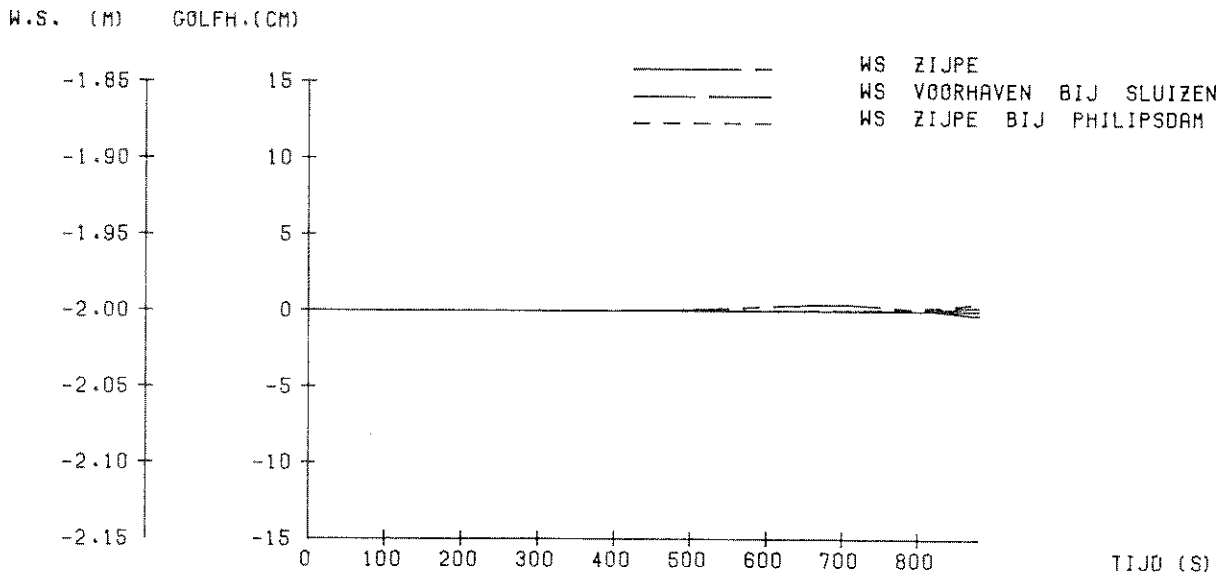
WATERSTANDEN

VARIANT - S16

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II-1041

FIG. 40



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

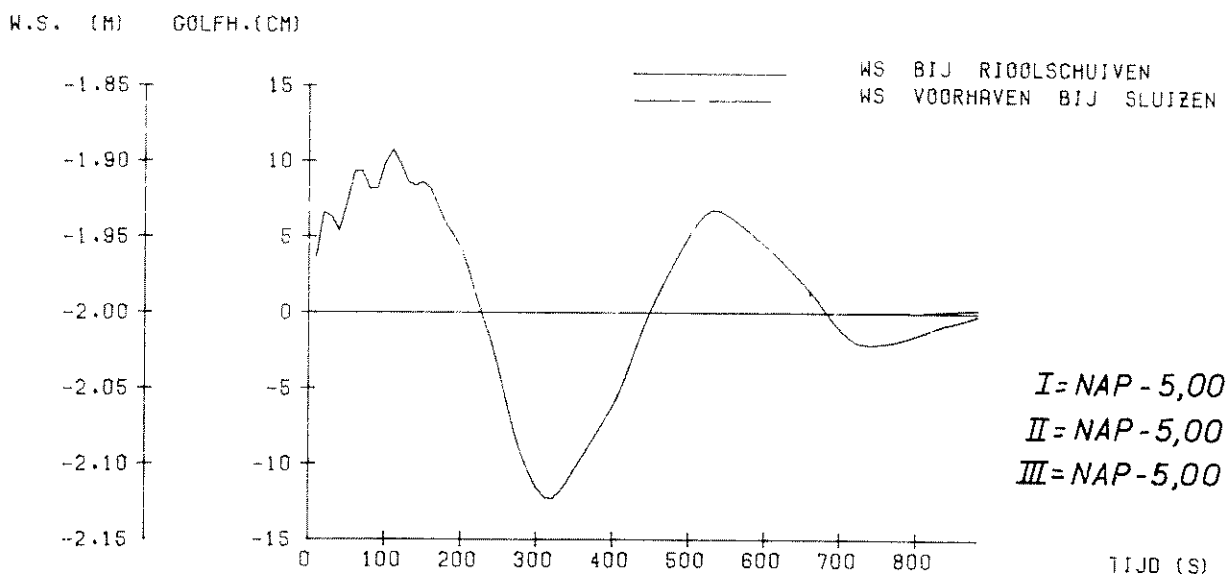
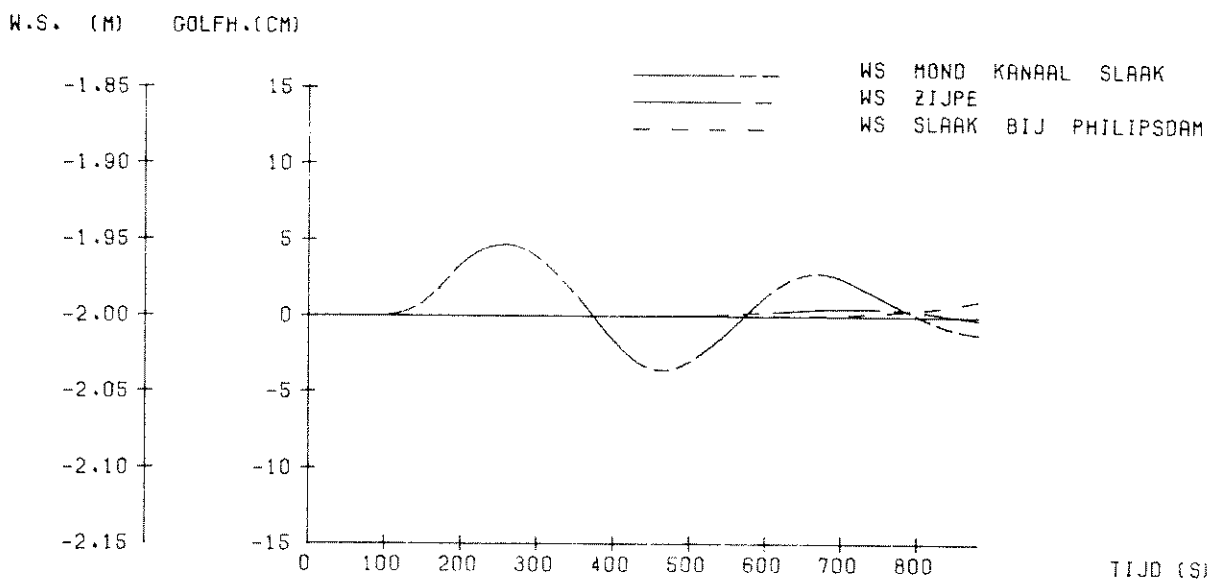
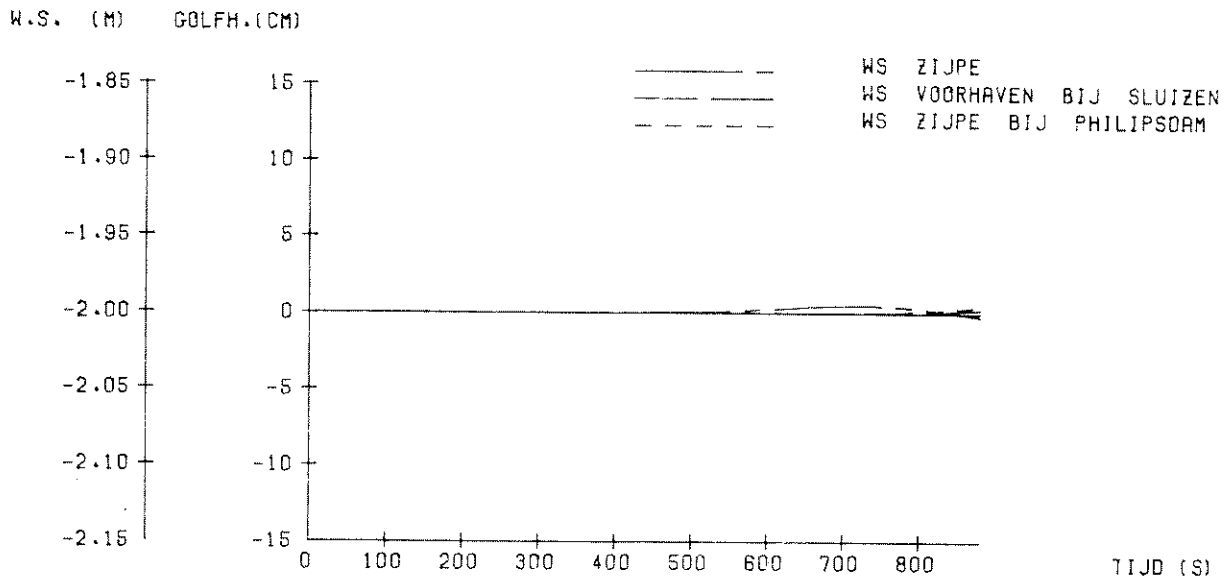
WATERSTANDEN

VARIANT—S17

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1042

FIG. 41



PHILIPSDAMSLUIZEN
 TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

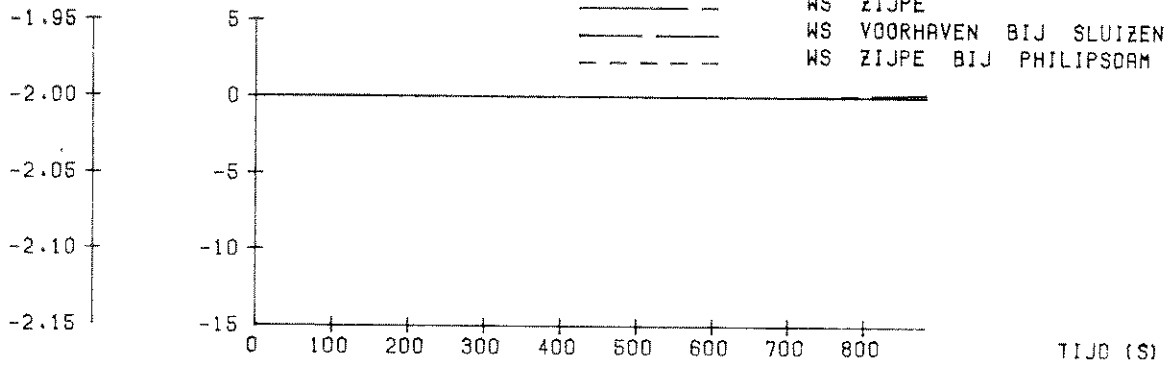
VARIANT - S18

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

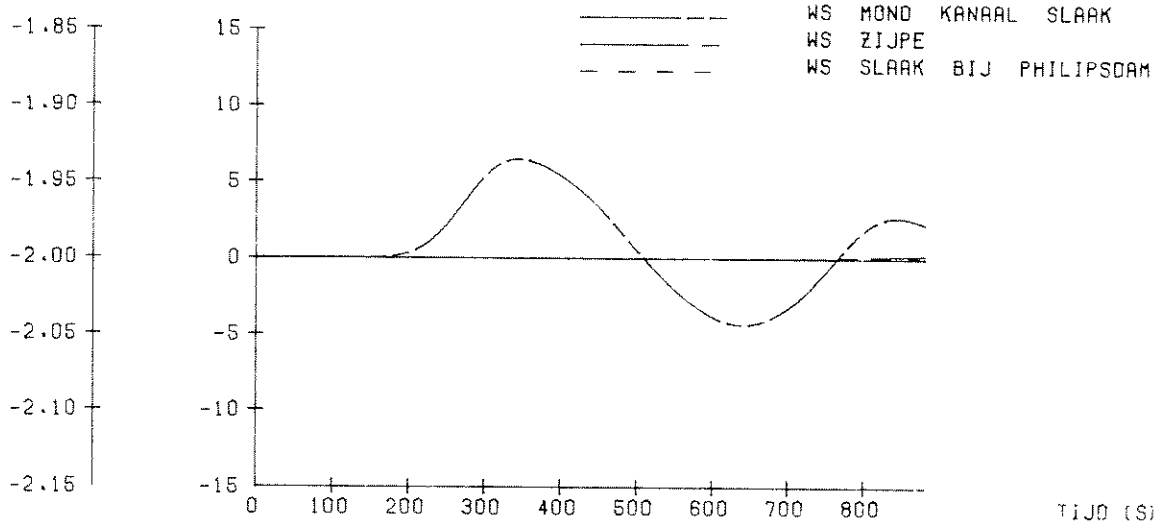
R 1225 II 1043

FIG. 42

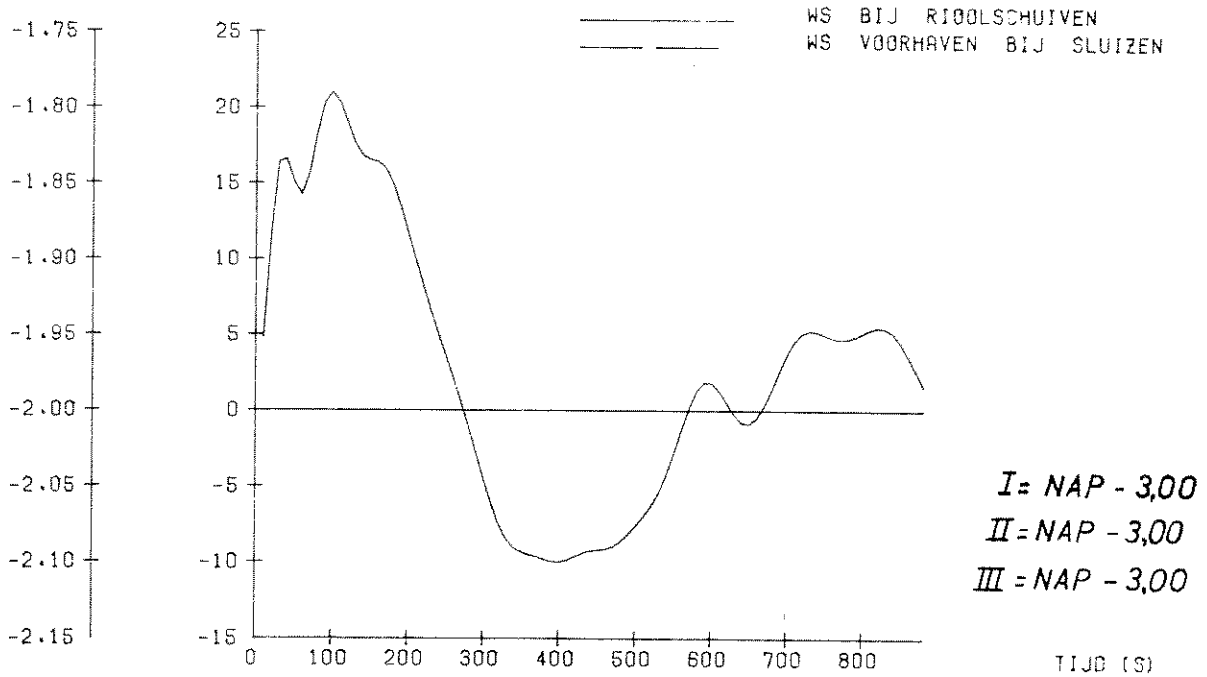
W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



W.S. (M) GOLFH.(CM)



PHILIPSDAMSLUIZEN
TRANSLATIEGOLF OP ZOUTE PAND

WATERSTANDEN

VARIANT - S19

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1225 II 1044

FIG. 43

Bijlage I Schematisatie riool

Bij de schematisatie van het riool is uitgegaan van de volgende gegevens:

1. Het riool bestaat uit twee delen met verschillende doorsnede:
 - lengte (L_1) is 168,60 m met een doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$
 - lengte (L_2) is 55,00 m met een doorsnede van $4,75 \times 8,60 \text{ m}^2$
2. De totale weerstand van het riool is $\xi = 2,85$; betrokken op de doorsnede van $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$.

In deze waarde is de invloed van de geperforeerde vloer verwerkt. Voor het bepalen van de weerstand is uitgegaan van een niet aangegroeid riool.

In de berekeningen is voor het gehele riool één doorsnede aangehouden. Aangezien de riooldoorsnede varieert over de lengte, betekent dit dat er een omrekening dient plaats te vinden, waarbij gebruik is gemaakt van de volgende afleidingen:

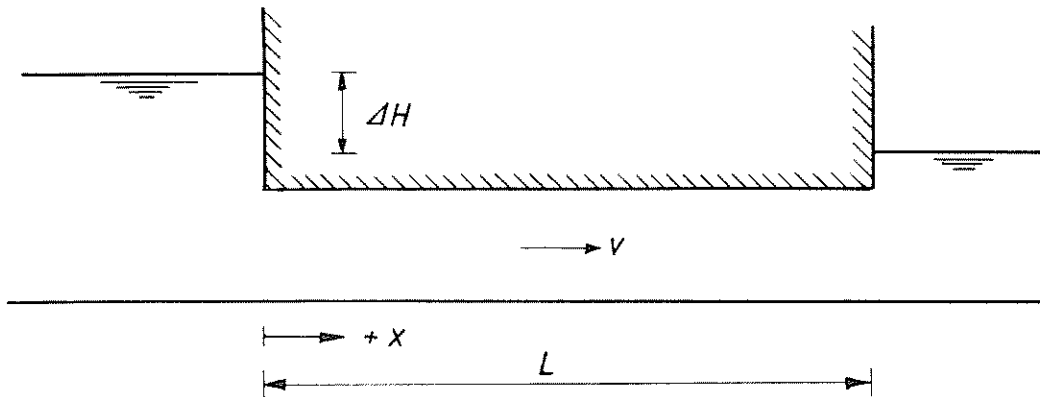


Fig. T13 Schematische voorstelling riool

Voor bovenstaande situatie kan de volgende bewegingsvergelijking worden opgesteld:

$$\rho A L \frac{dv}{dt} = \rho g \Delta H A - A L \rho g \frac{v^2}{C^2 R} \quad (1)$$

Waarin: ρ	= soortelijke massa van water	(kg/m^3)
A	= natte doorsnede (leiding doorsnede)	(m^2)
L	= lengte riool	(m)
dv/dt	= versnelling van het water	(m/s^2)
g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s^2)
ΔH	= drukverlies	(m)
v	= snelheid van het water in de leiding	(m/s)
C	= Chézy-koëfficiënt	($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
R	= hydraulische straal	(m)

Met $\xi_r = 2 g L/C^2 R$ en na deling door $\rho A L$ kan vergelijking (1) worden omge-
 werkt tot de algemene bewegingsvergelijking:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta H}{L} g - \xi_r \frac{v^2}{2L} \quad (2)$$

Uit vergelijking (2) kan worden afgeleid:

$$\Delta H = \xi_r \frac{v^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = \xi_r \frac{Q^2}{2gA^2} + \frac{L}{Ag} \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

Waarin: Q	= debiet	(m^3/s)
dQ/dt	= versnelling van het debiet	(m^3/s^2)

Als nu de riooldoorsnede over de lengte varieert wordt vergelijking (3) getrans-
 formeerd in:

$$\Delta H = \xi_r \frac{Q^2}{2gA^2} + \frac{1}{g} \frac{dQ}{dt} \sum_{i=1}^n \frac{L_n}{A_n}$$

De faktor $\sum_{i=1}^n \frac{L_n}{A_n}$ is met de volgende gegevens opgelost:

1. lengte (L_1) is 168,60 m met een doorsnede 26,125 m^2
2. lengte (L_2) is 55,00 m met een doorsnede 40,85 m^2

Uit 1 en 2 volgt $\sum \frac{L_n}{A_n} = \frac{168,60}{26,125} + \frac{55,00}{40,85} = 6,45 + 1,35 = 7,80$

Indien nu wordt aangenomen dat de riooldoorsnede over de gehele lengte kon-
 stant 4,75 \times 5,50 m^2 bedraagt, dan volgt hieruit voor de lengte:

$$L = 7,80 \times 26,125 = 203,8 \text{ m}$$

Neem voor de lengte van het riool $L = 200 \text{ m}$.

Voor de schematisatie zijn de maten aangehouden zoals is weergegeven in nevenstaande figuur.

De weerstand kan in het rekenprogramma worden opgenomen met de Nikuradse ruwheidsmaat k ($= \varnothing$ zandkorrel). Daarna berekent het programma de bijbehorende Chézy-waarde met behulp van de formule $C = 18 \log 12 R/k$.

In geval van de schematisatie van het riool heeft deze werkwijze het nadeel dat de weerstand afhankelijk is van de waterstand in de denkbeeldige standpijp. Deze waterstand is echter variabel waardoor de rioolweerstand niet meer een konstante waarde is. Het probleem is als volgt ondervangen: Voor de k -waarde is een minimale waarde ingevoerd, terwijl de resterende waarde als konstante bij de schuifweerstand (ξ_{schuif}) is opgesteld.

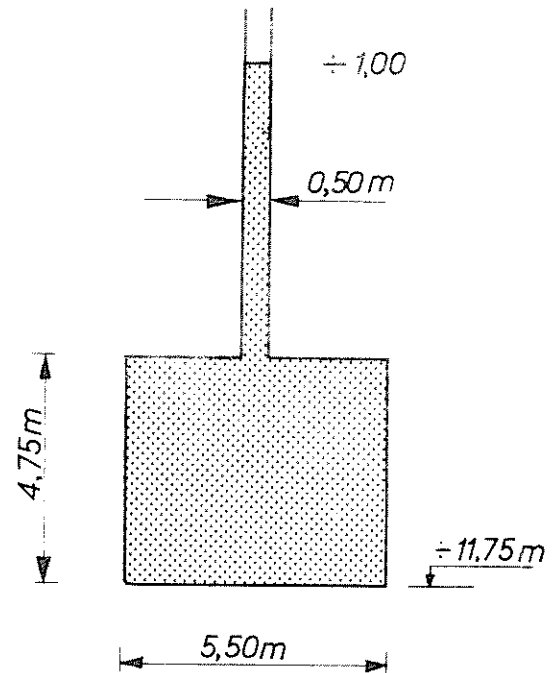


Fig. T14 Afmetingen riool

Rekenvoorbeeld:

Neem aan: - $k = 0,0001 \text{ m}$

- gemiddelde waterstand in standpijp NAP $\div 1,00 \text{ m}$

$$R = \frac{A}{O} = \frac{4,75 \times 5,50 + 0,50 \times 5,00}{32,5} = 0,896 \text{ m}$$

$$C = 18 \log \frac{12 R}{K} = 18 \log \frac{12 \times 0,896}{0,0001} = 90,57 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$$

$$\xi_r = \frac{2 g L}{C^2 R} = \frac{2 \times 9,81 \times 200}{90,57^2 \times 0,896} = 0,523$$

Met de $k = 0,0001 \text{ m}$ wordt dus een rioolweerstand $\xi_r = 0,523$ (betrokken op de doorsnede $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$) ingevoerd. De resterende weerstand $2,85 - 0,523 = 2,327$ is als konstante bij de schuifweerstand opgeteld; zie tabel II (zie voor bepaling rioolweerstand $\xi_r = 2,85$; eveneens betrokken op doorsnede $4,75 \times 5,50 \text{ m}^2$ paragraaf 2.3)

Opmerkingen:

- De aangenomen gemiddelde waterstand in de standpijp van NAP ÷ 1,00 m is niet helemaal juist. De waterstand zal eerder een gemiddelde waarde van NAP ÷ 2,00 m aannemen.

De afwijking die hierdoor ontstaat is echter marginaal.

- In de ontwerpsituatie is als diepteligging van het riool NAP ÷ 10,50 m aangenomen, zonder dat dit is verrekend in de ξ -waarden.

Dit betekent in feite dat deze berekeningen zijn uitgevoerd met $\xi = 2,81$ in plaats van met $\xi = 2,85$.

- Als beginvoorwaarde is in het riool een soort van lekdebiet opgegeven, dat op de volgende manier is bepaald:

Zonder rekening te houden met de traagheid kan men stellen:

$$\Delta H = \xi_{\text{ingevoerd}} * Q^2$$

Waarin: $\xi_{\text{ingevoerd}} = (\xi_{\text{schuif}} + \xi_{\text{riool}}) * (2 g A^2)^{-1} = 0,19432$

Bij een verval van 2,00 m volgt hieruit voor het debiet:

$$Q = 3,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Deze beginvoorwaarde is ingevoerd om de start van het rekenproces te vereenvoudigen.

Bijlage II - Vergelijking van de formules voor een open en een gesloten leiding

1. Inleiding

Voor de beschrijving van het lange golfverschijnsel kunnen de volgende twee algemene vergelijkingen worden afgeleid:

kontinuiteitsvergelijking
$$\frac{\partial (\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v A)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

bewegingsvergelijking
$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin I + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (2)$$

(zie voor afleiding kollegediktaat "Lange golven in leidingen" TH Delft [1]).

Hierin is: A = oppervlak van het stroomvoerend profiel	m ²
ρ = dichtheid (soortelijke massa) van water	kg/m ³
v = snelheid van het water	m/s
t = tijd	s
x = plaatscoördinaat	m
g = versnelling van de zwaartekracht	m/s ²
I = bodemhelling	-
C = Chézy-koëfficiënt	m ^{1/2} /s
R = hydraulische straal	m

Dit stelsel vergelijkingen is zowel geldig voor een open als een gesloten leiding. Indien wordt overgegaan tot invoering van de eigenschappen van de leiding, ontstaan twee verschillende stelsels, die alléén gelden voor het specifieke geval waarvoor zij zijn afgeleid.

De beide stelsels die op deze wijze ontstaan zijn, in de gebruikelijke vorm waarin ze zijn opgesteld, moeilijk met elkaar te vergelijken.

Daartoe zijn een aantal bewerkingen nodig (welke zijn weergegeven in figuur T15), waardoor in de termen van de vergelijkingen dezelfde grootheden ontstaan. De bewerkingen zijn:

- In de vergelijkingen voor de gesloten leiding wordt onder bepaalde voorwaarden de voortplanting van de drukgolven verwaarloosd.
- Daarna worden in zowel de vergelijkingen voor de open- als de gesloten leiding de termen met de snelheid (v) vervangen door het debiet (Q), zodat er een relatie ontstaat met het oppervlak van het stroomvoerend profiel (A).

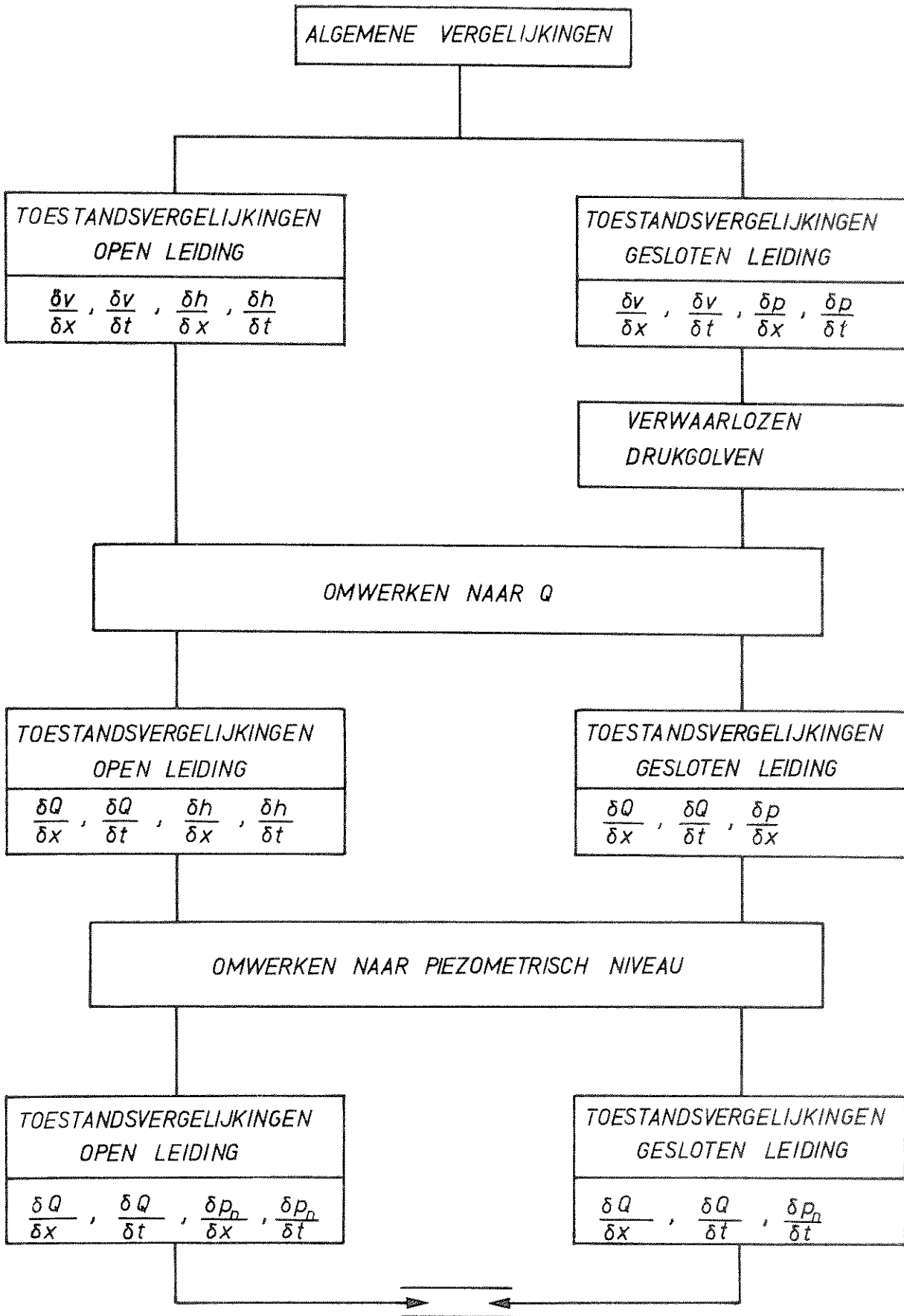


Fig. T15 Omwerking van algemene vergelijkingen

- Verder worden de druktermen (p) in de vergelijkingen voor de gesloten leiding en de termen met de waterstand (h) in de vergelijkingen voor de open leiding beide vervangen door het piëzometrisch niveau (p_n); dat wil zeggen dat de druk wordt gedefinieerd ten opzichte van een horizontaal vergelijkingsvlak.

2. Gesloten leiding

Voor de vergelijkingen van de gesloten leiding kunnen de volgende verbanden worden opgesteld: (zie voor afleiding [1])

- verband tussen druk (p) en dichtheid (ρ) voor vloeistoffen:

Dit verband heeft te maken met de samendrukbaarheid van vloeistoffen, welke relatief klein is.

Uitgaande van de relatie: $\rho(x,t) = \frac{\rho}{K} p(x,t)$

levert de differentiatie naar x en t:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

Waarin: p = druk N/m²
 K = kompressiemodulus N/m²

- verband tussen druk (p) en het stroomvoerend profiel, uitgaande van een prismatische leiding:

Een drukverhoging (dp) in de vloeistof zal aanleiding geven tot vervorming van de leidingdoorsnede. In deze formules zijn dan ook naast de afmetingen van de leiding de eigenschappen van het toegepaste leidingmateriaal verwerkt.

Uitgaande van de relatie: $A(x,t) = \frac{A}{f(A)} \cdot p(x,t)$

levert differentiatie naar x en t:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A}{f(A)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A}{f(A)} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

waarin: f(A) = stijfheidsparameter, welke afhankelijk is van de vorm van de leidingdoorsnede (A) N/m²

Substitutie van de vergelijkingen (3), (4), (5) en (6) in de algemene vergelijkingen (1) en (2) levert:

$$\text{continuïteitsvergelijking: } \rho \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{c} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v}{c} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

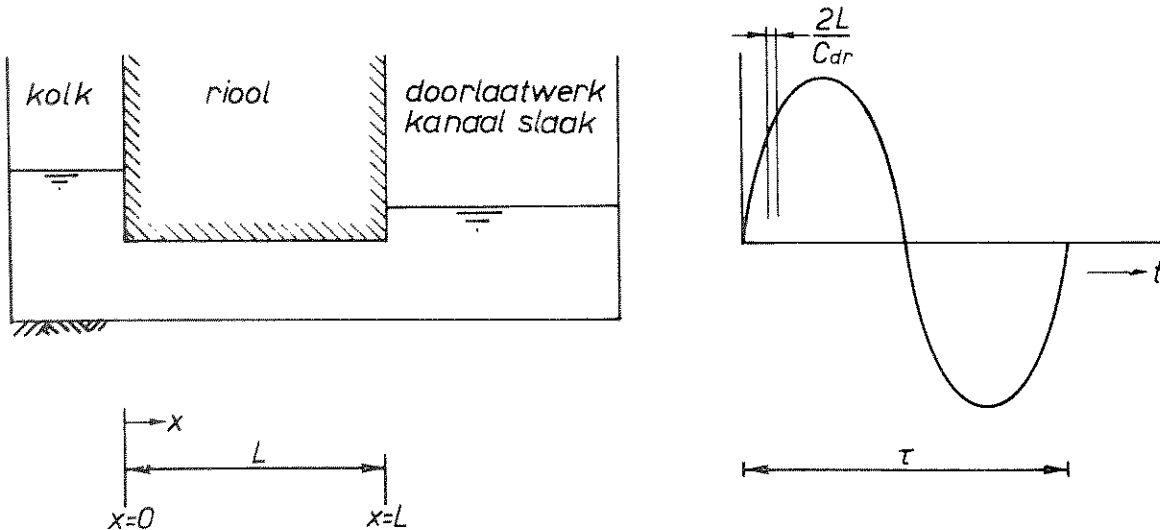
$$\text{bewegingsvergelijking: } \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin I + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (8)$$

Waarin: c_{dr} = voortplantingssnelheid van de drukgolf m/s
in de leiding

$$\text{Hierbij geldt: } c_{dr} = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{E(A)} \right)}} \quad (9)$$

In de vergelijking (7) en (8) is de voortplanting van de drukgolven, welke wordt bepaald door de kompressibiliteit van het water en de elasticiteit van de leiding, geheel meegenomen.

Voor het geval van de translatiegolfberekeningen is deze voortplanting van de drukgolven echter van ondergeschikte betekenis, wat in de volgende beschouwing nader zal worden uiteengezet.



a) Schema kolk-kanaal Slaak

b) Verhouding periode drukgolf/
randvoorwaarden

Fig. T16

Het drukgolfverschijnsel in de leiding (riool) is afhankelijk van de in de tijd veranderende randvoorwaarden (hier de kolk en het doorlaatwerk in kanaal Slaak).

Als nu de periode (τ) van de randvoorwaarden voldoende groot is ten opzichte

van de periode van de drukgolf ($2 L/c_{dr}$) in de leiding, dan kan de voortplanting van deze golven buiten beschouwing blijven.

Als voorwaarden kan worden gesteld:

$$2 L/c_{dr} \ll \tau \quad (10)$$

Aan de hand van het volgende rekenvoorbeeld zal worden aangetoond dat aan deze voorwaarde wordt voldaan.

Gezien de afmetingen van het riool ($4,75 \times 5,50$) mag voor de formule van de voortplantingssnelheid worden uitgegaan van een vierkant doorstromingsprofiel; de fout die hiermee gemaakt wordt is verwaarloosbaar klein.

De voortplantingssnelheid wordt dan [6]:

$$c_{dr} = \frac{1}{\sqrt{\rho (1/K + 1/15E' (D/e)^3)}} \quad (11)$$

Waarin: ρ = dichtheid (soortelijke massa) van water	(kg/m ³)
K = kompressiemodulus van water	(N/m ²)
E = elasticiteitsmodulus van het leidingmateriaal	(N/m ²)
D = afmeting één zijde van het vierkante doorstromingsprofiel	(m)
e = wanddikte van de leiding	(m)

Uitgaande van de volgende waarden

$$\begin{aligned} \rho &= 1020 \text{ kg/m}^3 \\ K &= 2,045 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \\ E &= 3,05 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ (betonnen leiding)} \\ e &= 0,75 \text{ à } 1,00 \text{ m} \\ A &= 4,75 \times 5,50 \text{ m}^2 \\ D &= \sqrt{A} + e = 5,86 \text{ à } 6,11 \text{ m} \end{aligned}$$

volgt hieruit voor de voortplantingssnelheid:

$$c_{dr} = 800 \text{ à } 1000 \text{ m/s}$$

Bij een rioollengte $L = 200$ m leidt dit tot een periode:

$$2 L/c_{dr} = 0,4 \text{ à } 0,5 \text{ sec}$$

Uit de translatiegolfberekeningen (zie bijvoorbeeld variant S5) volgt dat als periode van zowel de randvoorwaarde in de kolk als die ter plaatse van het doorlaatwerk in kanaal Slaak gekozen kan worden voor $\tau = 300$ sec.

Hieruit volgt dat ruimschoots wordt voldaan aan de voorwaarde:

$$2 L/c_{dr} \ll \tau$$

Opmerking:

Zelfs uitgaande van de kortere periode in het smalle gedeelte van kanaal Slaak (zie paragraaf 5.1) met $\tau \approx 12$ sec, wordt nog aan de voorwaarde voldaan.

Het buiten beschouwing laten van de voortplanting van de drukgolven houdt de veronderstelling in dat:

- de vloeistof onsamendrukbaar is.
- de leiding onvervormbaar is.

Als gevolg daarvan wordt dan de voortplantingssnelheid oneindig groot.

Dit heeft tot gevolg dat de continuïteitsvergelijking (7) overgaat in:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Substitutie van (12) in de bewegingsvergelijking (8) levert:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin I + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (13)$$

Substitutie van $v = \frac{Q(x,t)}{A}$ geeft:

$$\text{continuïteitsvergelijking} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$\text{bewegingsvergelijking} \quad \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin I + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (15)$$

De drukterm in de bewegingsvergelijking wordt nu uitgedrukt in het piëzometrisch niveau (pn). Daartoe worden een aantal betrekkingen afgeleid die het verband weergeven tussen de druk (p) en het piëzometrisch niveau.

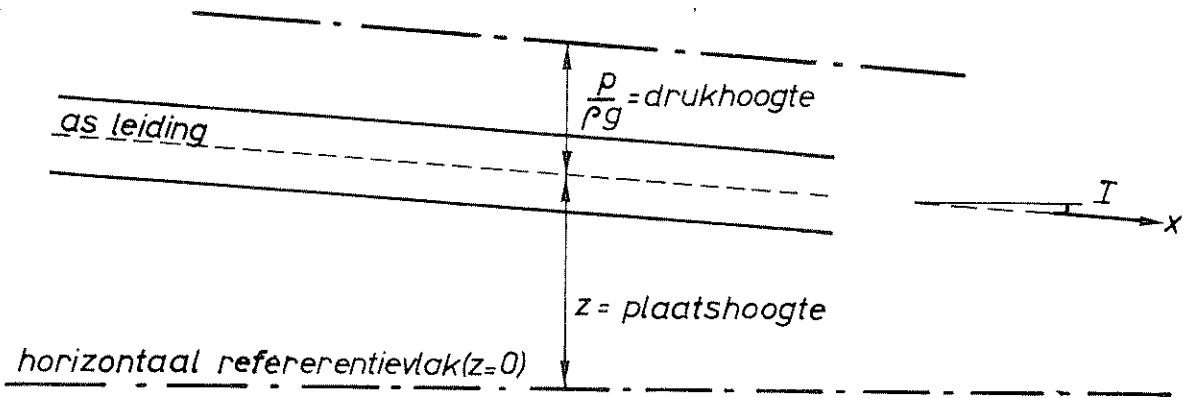


Fig. T17 Gedeelte prismatische gesloten leiding

Voor het piëzometrisch niveau geldt:

$$pn = \frac{p}{\rho g} + z \quad (16)$$

Differentiëren naar x levert:

$$\frac{\partial (pn)}{\partial x} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{p}{\rho^2 g} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x}, \text{ of} \quad (17)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + \frac{p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \rho g \frac{\partial z}{\partial x} \quad (18)$$

Hierin is:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\sin I \quad (19)$$

Substitutie van (19) en (3) in 18 levert:

$$\left(1 - \frac{\rho}{K}\right) \frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + \rho g \sin I \quad (20)$$

Voor water (weinig samendrukbare vloeistof) kan gesteld worden $p/K \ll 1$, zodat

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + \rho g \sin I \quad (21)$$

Substitutie van (21) in vergelijking (15) geeft tenslotte:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (22)$$

3. Open leiding

Voor de vergelijking van de open leiding geldt als uitgangspunt:

- afleiding vindt plaats voor prismatische leidingen ($\partial A / \partial x = 0$)
- de bergende breedte is gelijk aan de stroomvoerende breedte (zie voor afleiding [1])
- verband tussen druk (p) en waterdiepte (h):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \cos I \quad (23)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \cos I \quad (24)$$

- verder mag de dichtheid ρ als een konstante worden beschouwd. De toename van de berging bij de open leiding met de vrije waterspiegel zal zich namelijk volledig uiten in een verhoging van de waterstand, waarbij er in tegenstelling tot bij de gesloten leiding geen "berging" zal ontstaan door het samendrukken van de vloeistof (toename dichtheid).

Hieruit volgt: $\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (25)$

- tenslotte kan voor het dwarsprofiel A worden aangenomen:

$$A = \int_0^h b(z) dz \quad (26)$$

zodat geldt:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = b \frac{\partial h}{\partial x} \quad (27)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = b \frac{\partial h}{\partial t} \quad (28)$$

Substitutie van de vergelijkingen (23 t/m 28) in de algemene vergelijkingen (1) en (2) levert:

kontinuiteitsvergelijking
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (Av)}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

bewegingsvergelijking
$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} \cos I - g \sin I + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (30)$$

Deze beide vergelijkingen kunnen worden uitgedrukt in Q, in plaats van in v.
Daartoe moet worden gesubstitueerd: $v = Q/A$.

Hieruit volgt:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Qb}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{Q^2 b}{A^3} \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} \cos I - g \sin I + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (32)$$

Deze laatste vergelijking kan als volgt worden uitgewerkt:

De tweede term kan met behulp van (31) worden geschreven als:

$$\frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{bQ}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (33)$$

Samen met de derde term volgt hieruit:

$$- \frac{bQ}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{bQ}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{2bQ}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (34)$$

Substitutie levert dan:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2bQ}{A^2} \frac{\partial h}{\partial t} + g \left(\cos I - \frac{Q^2 b}{gA^3} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin I + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (35)$$

In de vergelijkingen (31) en (35) worden de termen met de waterstand h vervan-
gen door het piëzometrisch niveau (pn). Daartoe worden een tweetal betrek-
kingen afgeleid, die het verband weergeven tussen de waterdiepte (h) en het
piëzometrisch niveau (pn)

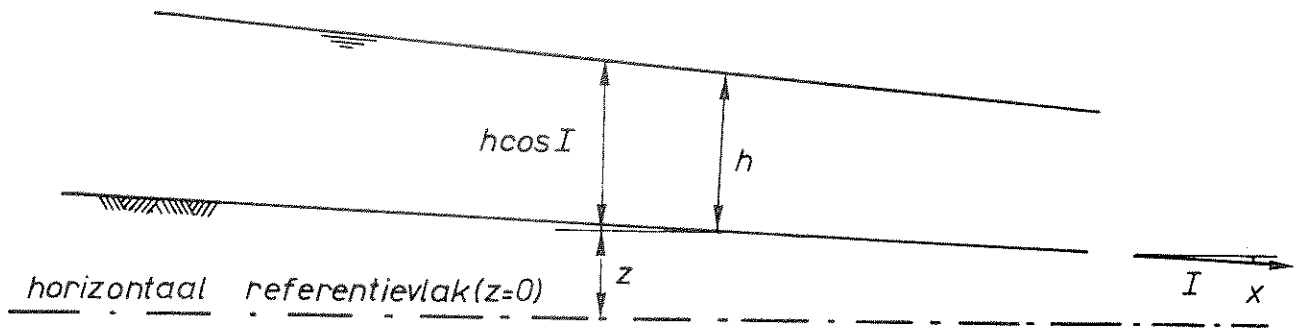


Fig. T18 Gedeelte prismatische open leiding

Voor het piëzometrisch niveau geldt:

$$pn = \frac{P}{\rho g} + z \quad (36)$$

Differentiëren naar x levert:

$$\frac{\partial (pn)}{\partial x} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{p}{\rho^2 g} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \quad (37)$$

Verder geldt:

$$p = \rho g h \cos I \quad (38)$$

Differentie hiervan naar x leidt tot:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \cos I \quad (39)$$

Substitutie van (19), (25) en (39) in (37) levert:

$$\frac{\partial (pn)}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} \cos I - \sin I, \text{ of} \quad (40)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\cos I} \left(\frac{\partial (pn)}{\partial x} + \sin I \right) \quad (41)$$

Op dezelfde wijze kan worden afgeleid:

$$\frac{\partial (pn)}{\partial t} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} \quad (42)$$

Uitgaande van een niet bewegende bodem geldt $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$

Differentiëren naar t van (38) geeft:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \cos I \quad (43)$$

Hieruit volgt:

$$\frac{\partial (pn)}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial t} \cos I, \text{ of} \quad (44)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\cos I} \frac{\partial (pn)}{\partial t} \quad (45)$$

Substitutie van (41) en (45) in de vergelijkingen (31) en (35) levert:

$$\text{continuïteitsvergelijking:} \quad \frac{b}{\cos I} \frac{\partial (pn)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (46)$$

bewegingsvergelijking:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \left(1 - \frac{Q^2 b}{gA^3 \cos I}\right) \frac{\partial (pn)}{\partial x} - \frac{2bQ}{A^2 \cos I} \frac{\partial (pn)}{\partial t} - \frac{Q^2 b \sin I}{A^3 \cos I} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (47)$$

4. Vergelijkingen beide stelsels

In het voorgaande zijn de volgende stelsels afgeleid:

gesloten leiding (drukgolven buiten beschouwing gelaten)

$$\text{continuïteitsvergelijking:} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$\text{bewegingsvergelijking:} \quad \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial (pn)}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0 \quad (22)$$

open leiding

$$\text{continuïteitsvergelijking:} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{b}{\cos I} \frac{\partial (pn)}{\partial t} = 0 \quad (46)$$

- tweede term

In deze term met $\partial(pn)/\partial x$ komt voor de koëfficiënt

$$\frac{Q^2 b}{gA^3} = \frac{v^2}{gA/b} \quad (51)$$

Deze koëfficiënt is echter verwaarloosbaar klein als geldt:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gA/b} \ll 1 \quad (52)$$

- derde term

Voor kleine Froude-getallen ($Fr^2 \ll 1$) kan worden afgeleid [1] dat deze term verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de tweede term met $\partial(pn)/\partial x$.

Beide verschillen in de vergelijking zijn dus verwaarloosbaar klein indien geldt $Fr^2 \ll 1$. Dit Froude-getal is weer direkt gekoppeld aan de bergende breedte (b) van de standpijp, zodat bij een voldoende kleine waarde voor (b) aan de bewegingsvergelijking van de gesloten leiding (22) wordt voldaan.

Opmerking:

Bij eventuele toekomstige berekeningen kan een maat voor de in rekening te brengen standpijpbreedte worden ontleend aan een te stellen eis ten aanzien van het gewenste Froude-getal.

Uit vergelijking (31) en (52) volgt:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gA/b} = \frac{Q^2 b}{gA^3} \quad (53)$$

Dit geeft voor de bergende breedte (b):

$$b = Fr^2 \frac{gA^3}{Q^2} \quad (54)$$

p.o. box 177

delft

the netherlands