

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

Inundatie buitenpolders Zwartemeer



Verslag van berekeningen

R2224

Oktober 1985

13 DEC 1985

Inundatie buitenpolders Zwartemeer

Verslag van berekeningen

R2224

Oktober 1985

INHOUD

Lijst van Tabellen

Lijst van Figuren

Lijst van Bijlagen

blz.

<u>1. Inleiding en samenvatting</u>	1
1.1 Opdracht.....	1
1.2 Probleemstelling.....	1
1.3 Opzet van het rekenmodel en uitvoering van de studie.....	2
1.4 Uitgangspunten, konklusies en aanbevelingen.....	3
<u>2. Het rekenmodel</u>	6
2.1 Opzet.....	6
2.2 Schematisatie.....	7
2.3 De waterbalans.....	9
2.4 Instroming Ramspol.....	10
2.5 Opwaaiing Zwartemeer.....	11
2.6 Uitwisselingsdebiet Zwartemeer-berging.....	13
2.7 Inundatie.....	14
2.8 Opwaaiing in de buitenpolders.....	16
2.9 Golfgroei.....	17
2.10 Golfoploop.....	21
<u>3. De ijkings- en gevoeligheidsberekeningen</u>	24
3.1 Opzet.....	24
3.2 Berekeningen met een hoogwatergolf.....	24
3.3 Ijkingsberekeningen met een storm.....	25
3.4 Verifikatieberekening met een storm.....	26
3.5 Gevoeligheidsberekeningen.....	26

INHOUD (vervolg)

<u>4. De inundatieberekeningen.....</u>	29
4.1 Algemeen.....	29
4.2 Invloed storm-type.....	29
4.3 Invloed windrichting.....	30
4.4 Invloed frequentie van voorkomen; tevens kadeverbeteringsplan...	31
4.5 Inundatieberekeningen.....	32
4.6 Gezamenlijke kans van voorkomen.....	32
4.7 Inundatiediepte in de polder en reductie Zwartemeerwaterstand...	34
4.8 Hoogte van de bestaande hoofdwaterkering.....	39
4.9 Nauwkeurigheid.....	40

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

BIJLAGEN

Lijst van Figuren

1. Overzicht situatie
2. Schematisatie rekengebied
3. Principeschets kombergingsbeschouwing
4. Principeschets opwaaiing
5. Principeschets uitwisselingsdebiet Zwartemeer ↔ berging
6. Principeschets inundatie
7. Lokatie ijkstations
8. Verloop windschuifspanningscoëfficiënt
9. Resultaat ijkingsberekening ijkpunt A (storm type b, richting WNW, freq 10^{-3})
10. Resultaat ijkingsberekening ijkpunt B (storm type b, richting WNW, freq 10^{-3})
11. Resultaat ijkingsberekening ijkpunt C (storm type b, richting WNW, freq 10^{-3})
12. Resultaat verifikatieberekening ijkpunt A (storm type b, richting WNW, freq 10^{-4})
13. Resultaat verifikatieberekening ijkpunt B (storm type b, richting WNW, freq 10^{-4})
14. Resultaat verifikatieberekening ijkpunt C (storm type b, richting WNW, freq 10^{-4})
15. Waterstanden Zwartemeer; vergelijking storm type a ↔ type b
16. Waterstanden Zwartemeer; invloed windrichting
17. Waterstanden Zwartemeer; invloed frequentie van voorkomen;
Tevens kadehoogte-verbeteringsplan
18. Voorbeeld samengestelde overschrijdingslijn
19. Gemiddelde waterstand achter op het Zwartemeer voor verschillende gevallen van kadeverbetering
20. Inundatiediepte buitenpolders voor verschillende gevallen van kadeverbetering
21. Waterstand achter op het Zwartemeer als functie van de inundatie frequentie van de buitenpolders
22. Inundatiediepte in de buitenpolders als functie van de inundatie frequentie van de buitenpolders
23. Golfoploop tegen de hoofdwaterkering; bestaande situatie
24. Golfoploop tegen de hoofdwaterkering; geval 2

Lijst van Tabellen

1. Overzicht dijkvakgegevens
2. Overzicht strijklengten
3. Overzicht uitgevoerde ijkings- en verificatieberekeningen
4. Kadeverbeteringsplan; Gemiddelde hoogte van langs het Zwartemeer gelegen dijkvakken
5. Maxima van de gemiddelde inundatiediepten in de buitenpolders
6. Maxima van de waterstanden achter op het Zwartemeer
7. Voorbeeld van een berekeningsresultaat

Lijst van Bijlagen

1. Typering stormverloop uit 50 jaar windmeting te Den Helder

INUNDATIE BUITENPOLDERS ZWARTEMEER

1. Inleiding en samenvatting

1.1 Opdracht

Middels brief BFX/21.940 gedateerd 3-1-1985, gaf de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging van de Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht tot het uitvoeren van een studie naar het effect van inundatie van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders op de waterstanden in dat meer. De opdracht tot de studie is vastgelegd in de overeenkomst nr. WW 428 DNO.

De studie is uitgevoerd in het eerste kwartaal van 1985 en stond onder leiding van ir. A.C.M. Vermeer die ook dit rapport samenstelde. Van de kant van de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging is het onderzoek begeleid door ir. P. Hartog, hoofd van het distrikt Noord. Voorts heeft het onderzoek plaatsgevonden in nauw overleg met de "coördinatiegroep maatgevende hoogwaterstanden Beneden IJssel" van de Provinciale Waterstaat van de Provincie Overijssel.

1.2 Probleemstelling

In verband met het in de loop van de jaren toegenomen economisch belang van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders (zie Figuur 1) is in het recente verleden overwogen om het tracé van de formele huidige hoofdwaterkering langs het Zwartemeer te verlaten en het Kampereiland c.a. hoogwatervrij te maken. Een bijkomende reden is dat versterking van de bestaande hoofdwaterkering (Kamperzeedijk) op grote problemen zou stuiten.

In de rapporten R1077 en R1524 van het Waterloopkundig Laboratorium [1] en [2] is daarom uitgegaan van een hoogwatervrij Kampereiland. De vereiste kadehoogten ter bescherming van het Kampereiland c.a. tegen hoge waterstanden bij nog te kiezen overschrijdingsfrequentie zijn te ontlezen aan genoemde rapporten.

Voorliggend onderzoek is een voorstudie en gaat uit van handhaving van de bestaande hoofdwaterkering. Doel van de voorstudie is om middels een aantal afschattende berekeningen na te gaan of en in welke mate, bij een eventuele inundatie van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders, de extreme waterstand op het Zwartemeer wordt beperkt als gevolg van de mogelijk beperkte toevoerkapaciteit van de opening bij Ramspol. Tevens zal worden aangegeven wat, in het geval van inundatie, de inundatiediepte is en wat de benodigde kruinhoogte van de bestaande hoofdwaterkering zou moeten zijn.

Bij de voorstudie wordt er van uitgegaan dat de resultaten van de voorstudie slechts zullen worden gebruikt voor het opzetten van een globale kosten-baten analyse voor het al dan niet inunderen van de buitenpolders. Omdat het daarbij voornamelijk om onderlinge vergelijking van een aantal alternatieven gaat kan met een geringere nauwkeurigheid dan voor een ontwerpberekening worden volstaan.

Samen met de overwegingen met betrekking tot de maatschappelijke acceptatie van een dergelijke inundatie kan deze voorstudie mogelijk bijdragen aan een vroegtijdige en verantwoorde beleidsbeslissing inzake het al dan niet inunderen van de buitenpolders met een bepaalde frekwentie.

1.3 Opzet van het rekenmodel en uitvoering van de studie

Ten behoeve van de studie is een gekoppeld waterbalans-model ontwikkeld voor enerzijds het Zwartemeer met de achterliggende berging en anderzijds de buitenpolders van het Kampereiland. Daarbij zijn de volgende balansposten in de beschouwing betrokken:

- in- of uitstroming bij Ramspol als gevolg van een waterstandsverschil over de opening (kombergingsbeschouwing)
- bovenafvoer van de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water
- uitwisselingsdebiet van het Zwartemeer met de achterliggende berging
- inundatie van de buitenpolders via verschillende dijkvakken (ook eventuele terugstroming is gemodeleerd).

Het inundatie-rekenmodel is zodanig opgezet dat gegeven ontwerpstormen kunnen worden doorgekend. Daarbij is er vanuit gegaan dat de ontwerpstorm en het bijbehorende waterstandsverloop aan de open rand (= Ketelmeerwaterstand nabij Ramspol) bekend zijn uit metingen of andere berekeningen.

Met de kombergingsbeschouwing wordt de in- of uit-stroming bij Ramspol tengevolge van het waterstandsverschil over de opening berekend. Daaruit wordt de stijging van de gemiddelde Zwartemeerwaterstand en van de waterstand in de achterliggende berging bepaald.

Vervolgens wordt de opwaaiing op het Zwartemeer berekend waaruit de waterstanden voor een aantal maatgevend geachte dijkvakken volgt. Bij gegeven kruinhoogten van de kaden kunnen daarna ook de inundatiedebieten worden berekend. Sommatie van deze debieten levert het inundatievolume waaruit weer de gemiddelde inundatiediepte in de buitenpolders kan worden berekend.

De opwaailingsberekening voor het (geinundeerde) poldergebied levert vervolgens de waterstand tegen de bestaande hoofdwaterkering (de Kamperzeedijk) en samen met een golfgroei en golfoploopberekening resulteert dit tot slot in de benodigde kruinhoogte voor de bestaande hoofdwaterkering op een aantal representatief geachte plaatsen.

Met het ontwikkelde rekenmodel is allereerst geijkt en geverifieerd aan eerder uitgevoerde berekeningen, die destijds getoetst zijn aan opgetreden zware stormen waarbij nog net geen inundatie optrad. Met het rekenmodel zijn vervolgens voor verschillende ontwerpfrequenties een aantal inundatieberekeningen uitgevoerd voor zowel de bestaande situatie alsook voor verschillende gevallen van kadeverbetering.

1.4 Ugangspunten, konklusies en aanbevelingen

1. Bij de voorliggende studie naar inundatie van het Kampereiland c.a. is er vanuit gegaan dat Goot, Veneriete en Ganzendiep van een kering worden voorzien die op eenzelfde hoogte ligt als de aansluitende kaden. Ook de dijk langs het Ketelmeer wordt zodanig hoog verondersteld dat geen inundatie optreedt vanuit dit meer. Deze situatie wordt in het verdere onderzoek aangeduid als "de bestaande situatie". Bij de berekeningen wordt verondersteld dat inundatie uitsluitend het gevolg is van overlopen van de kaden; dijkdoorbraak als gevolg van overslag of overstromen wordt niet geacht plaats te vinden.

2. Uit het onderzoek is gebleken dat de inundatie-frekwentie van de buitenpolders in de bestaande situatie ongeveer 1 x per 30 jaar is.
3. Eveneens is gebleken dat, in de bestaande situatie, inundatie van de buiten-polders een aanmerkelijke waterstandsreductie (ca. 0,50 m bij een frekwentie 1 x per 1000 jaar) achter op het Zwartemeer geeft, vergeleken bij een aangenomen situatie, waarbij geen inundatie van de buitenpolders optreedt, zoals is verondersteld in het oorspronkelijk W.L.-onderzoek.
4. Uit de berekeningen volgt dat als de bestaande situatie wordt gehandhaafd de bestaande hoofdwaterkering (Kamperzeedijk) over grote lengten maar net, of net niet hoog genoeg is om voldoende veiligheid te bieden voor situaties die ongeveer 1 x per 1000 jaar kunnen voorkomen. Er is daarbij alleen getoetst aan het hoogtekriterium voor de kruin. De stabiliteit van de kaden wordt geacht buiten het kader van deze studie te vallen.
5. Tevens is aangetoond dat met een relatief geringe verbetering van enkele kaden langs het Zwartemeer (geval 2) een situatie kan worden bereikt waarin de verwachte inundatie frekwentie van de buitenpolders wordt teruggebracht tot bijna 1 x per 100 jaar. Deze situatie geeft een waterstandsreduktie achter op het Zwartemeer van ca. 0,30 m bij een frekwentie van 1 x per 1000 jaar. De bestaande hoofdwaterkering (Kamperzeedijk) is in dit geval nagenoeg overal voldoende hoog voor situaties die 1 x per 1000 jaar kunnen voorkomen. Geval 2 is uitsluitend bedoeld als rekenvoorbeeld en houdt geen frequentiekeuze in.
6. Bij een kosten-baten analyse van de inundatie van de buitenpolders dienen eveneens de gevolgen van de waterstandsreduktie op het Zwartemeer, op de eventuele benodigde verhogingen van de Zwartewaterdijken te worden meegenomen. Dit aspect heeft geen onderdeel gevormd van de huidige studie.
7. Het lijkt vooralsnog juist om het alternatief van een stormvloedkering bij Ramspol bij een kosten-baten analyse te betrekken.
8. Zodra, op grond van de kosten-baten analyse en overwegingen met betrekking tot de maatschappelijke acceptatie van een mogelijke inundatie, een

beleidsbeslissing is genomen en een keuze is gemaakt uit de verschillende varianten dient mogelijk aanvullend onderzoek met betrekking tot de waterstanden te worden uitgevoerd ten behoeve van het definitief vaststellen van verschillende hoogten van hoofdwaterkeringen en/of inundatiekaden voor nog nader te specificeren ontwerpomstandigheden. Tevens moet in dat stadium mogelijk aandacht besteed worden aan het overloopbestendig zijn van bepaalde kaden.

2. Het rekenmodel

2.1 Opzet

Het inundatie rekenmodel is zodanig opgezet dat een gegeven storm kan worden doorgerekend. Daarbij wordt verondersteld dat de begintoestand bekend is (en in rust). Ook het bij de betreffende storm behorende waterstandsverloop achter op het Ketelmeer wordt geacht bekend te zijn (als functie van de tijd) en niet afhankelijk van de hoeveelheid water die het Zwartemeer in- of uitstroomt.

Met de kombergingsbeschouwing wordt de in- of uitstroming bij Ramspol tengevolge van het waterstandsverschil over de opening berekend alsmede de stijging of daling van de gemiddelde Zwartemeerwaterstand.

Vervolgens wordt de opwaaiing op het Zwartemeer berekend waaruit de waterstanden ter plaatse van een aantal voor inundatie maatgevend geachte kaden volgt. Bij gegeven kruinhoogten van de kaden kunnen daarna ook de inundatiedebieten worden berekend. Sommatie van deze debieten levert het inundatievolume waaruit weer de gemiddelde inundatiediepte in de buitenpolders kan worden berekend.

De opwaaiingsberekening voor het poldergebied levert vervolgens de waterstanden langs de kaden met het Zwartemeer (nodig voor de berekening van eventueel terugstromend water na de storm en voor de bepaling van het debiet bij een onvolkomen overlaat) alsmede de waterstand tegen de bestaande hoofdwaterkering (de Kamperzeedijk).

Een golfgroei en golfoploopberekening geeft tot slot de benodigde kruinhoogte voor de bestaande hoofdwaterkering op een aantal representatief geachte plaatsen.

Het model is opgezet als "waterbalans-model" voor Zwartemeer en buitenpolders. De beschouwde processen (toestroming, opwaaiing, inundatie en golfgroei) worden beschouwd als "quasi-stationair" d.w.z. er wordt ervan uitgegaan dat bijvoorbeeld de opwaaiing en de golfgroei zich momentaan aan de heersende

windsnelheid en windrichting hebben aangepast. Voor het onderhavige probleem met zijn relatief ondiepe meren, kleine strijklengten en relatief hoge windsnelheden lijkt deze aanname verantwoord.

Het rekenmodel is een expliciet model d.w.z. de toestand op het nieuwe tijdstip wordt berekend uit de toestand op het vorige tijdstip of uit bekende opgelegde randvoorwaarden op het tijdstip zelf. Het rekenmodel werkt met voorwaartse integratie. Uitgaande van een gegeven begintoestand kan aldus de stormduur worden doorgerekend als de verdere randvoorwaarden (windsnelheidsverloop, windrichtingsverloop en verloop van de waterstand aan de open rand) bekend zijn.

Het rekenmodel wordt aan eerder uitgevoerde berekeningen afgeijkt waarna een aantal inundatieberekeningen wordt uitgevoerd.

2.2 Schematisatie

Op grond van Topografische en Waterstaats-kaarten alsmede op basis van door het Waterschap IJsseldelta beschikbaar gestelde liggerkaarten van het betreffende gebied zijn het Zwartemeer en de buitenpolders geschematiseerd tot een aantal dijkvakken die representatief geacht worden voor het inundatieproces. Daarbij is zowel rekening gehouden met de oriëntatie van de dijkvakken alsook met de hoogteligging van de kruin van de kaden. De schematisatie met de dijkvaknummering is weergegeven in Figuur 2. Verschillende relevante dijkvakgegevens (voor de bestaande situatie) zijn opgenomen in Tabel 1.

De plannen van de gemeente Genemuiden voor een uitbreiding van stedelijke bebouwing in de Zuiderzeepolder zijn niet in de schematisatie opgenomen. Genoemde uitbreiding zal naar verwachting een verwaarloosbare invloed hebben op de bij deze studie te berekenen waterstanden.

Bij de schematisatie moet worden opgemerkt dat de contouren die zijn aangehouden overeenkomen met de kaden van de direkt aan het Zwartemeer gelegen kleinere polders. Ook bij eerder bij het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerde berekeningen R1524 [2] zijn deze contouren als nieuwe hoofdwaterkering aangehouden. Echter de kruinhoogte en dijkvaklengte die aan

deze dijktracé's zijn toegekend komen overeen met respectievelijk kruinhoogte en dijkvaklengte van de (soms) iets verder naar binnen gelegen kaden die de grotere buitenpolders scheiden van de direkt aan het Zwartemeer gelegen kleinere polders. De kruin van deze kaden ligt doorgaans wat hoger dan die van de direkt aan het Zwartemeer gelegen kaden en vormt uiteindelijk de hoofdkering van het meerendeel van het beschouwende gebied tegen inundatie.

Bij de schematisatie moet er, volgens Rijkswaterstaat, vanuit worden gegaan dat de vanuit het Kampereiland c.a in het Zwartemeer uitmondende rivierarmen (Goot, Veneriete en Ganzendiep) van een kering worden voorzien die op eenzelfde hoogte ligt als de aansluitende kade.

Bij de probleemstelling is door Rijkswaterstaat gesteld dat er vanuit moest worden gegaan dat geen inundatie zou optreden vanuit het Ketelmeer (dijkvak 25). Ook eventuele inundatie van de buitenpolders vanuit de beneden IJssel (via de dijkvakken 23 en 24) is buiten beschouwing gelaten;

Bij de schematisatie is geen rekening gehouden met de kompartimentering van de buitenpolders en is voor het poldergebied een konstante diepte aangehouden.

Middels uitgevoerde gevoeligheids-berekeningen is gebleken dat het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht gezien hun enorm bergend vermogen een niet verwaarloosbare invloed hebben op de inundatie van de buitenpolders langs het Zwartemeer en op de als gevolg daarvan optredende waterstandsreduktie op het Zwartemeer. Bij de uiteindelijke schematisatie is daarom ook het bergend oppervlak van Zwarte Water en Overijssels Vecht tot aan de eerste stuw, stroomopwaarts van Genemuiden gemodelleerd.

Uit waterstandsmetingen in het betreffende gebied is gebleken dat bij storm de maximale waterstand in deze berging nagenoeg overal even hoog is en nagenoeg gelijk aan het maximum van de waterstand achter op het Zwartemeer. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat voor verschillende lokaties in de berging een geringe tijdsverschuiving van het maximum kon worden geconstateerd.

In het rekenmodel is van deze wetenschap gebruik gemaakt door te veronderstellen dat de waterstand op het Zwarte Water en de Overijsselde Vecht horizontaal is en zicht momentaan aanpast aan de waterstand achter op het Zwartemeer (dijkvak 8)

2.3 De waterbalans

Het model is opgezet als gekoppeld waterbalans-model voor enerzijds het Zwartemeer met de achterliggende berging en anderzijds de buitenpolders van het Kampereiland. Daarbij zijn de volgende balansposten in de beschouwing betrokken:

- in- of uitstroming bij Ramspol als gevolg van een waterstandsverschil over de opening (kombergingsbeschouwing)
- bovenafvoer van de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water
- uitwisselingsdebiet van het Zwartemeer met de achterliggende berging
- inundatie van de buitenpolders via de verschillende dijkvakken (ook eventuele terugstroming is gemodeleerd).

Deze in- en uitstromende waterhoeveelheden kunnen worden omgewerkt naar waterstandsveranderingen. In formulevorm luidt de balansvergelijking voor het Zwartemeer:

$$ws_{ZM}(t + dt) = ws_{ZM}(t) + \frac{Q_0 + Q_{riv}}{Opp_{ZM} + Opp_B} - \frac{\sum Q_i}{Opp_{ZM} + Opp_B} + \frac{Q_{ex}}{Opp_{ZM}}$$

en voor de buitenpolders:

$$ws_P(t + dt) = ws_P(t) + \frac{\sum Q_i}{Opp_P}$$

waarin:	ws_{ZM}	= waterstand in Zwartemeer (getallen tussen haakjes is tijdsaanduiding)	[m]
	ws_P	= waterstand in buitenpolders (getallen tussen haakjes is tijdsaanduiding)	[m]
	t	= tijd	[s]
	dt	= rekentijdstap	[s]
	Q_0	= instroomvolume bij Ramspol	[m ³]
	Q_{riv}	= bovenafvoer Overijsselse Vecht en Zwarte Water	[m ³]
	Q_i	= inundatievolume over dijkvak i	[m ³]

Q_{ex}	= uitwisselingsdebiet tussen Zwartemeer en achterliggende berging	$[m^3]$
Opp_{ZM}	= Oppervlakte Zwartemeer	$[m^2]$
Opp_B	= Oppervlakte berging	$[m^2]$
Opp_P	= Oppervlakte buitenpolders	$[m^2]$

In de hiernavolgende hoofdstukken wordt op een aantal balansposten nader ingegaan.

2.4 Instroming Ramspol

Voor de toestroming van water naar het Zwartemeer bij de doorstroomopening te Ramspol wordt de kombergingsbeschouwing toegepast. Daartoe zijn de scheepvaargeul (Ramspol) en de stroomgeul (Ramsdiep) in het rekenmodel gecombineerd tot één doorstroomopening. Het instroomdebiet wordt daarbij bepaald door het waterstandsverschil over de relatief nauwe doorstroomopening bij Ramspol volgens de formule (zie ook de principeschets in Figuur 3):

$$q_o = \text{sign}(\Delta h) \mu A_s \sqrt{2g|\Delta h|}$$

met $\Delta h = h_b - h_o$

en $A_s = B_s \left\{ d_s + \left(\frac{h_b + h_o}{2} \right) \right\}$

waarin	q_o = doorstroomdebiet	$[m^3/s]$
	A_s = doorstroomprofiel	$[m^2]$
	g = versnelling van de zwaartekracht	$[m/s^2]$
	Δh = waterstandsverschil over de doorstroomopening	$[m]$
	h_b = waterstand buiten	$[m]$
	h_o = waterstand in punt o (binnen)	$[m]$
	B_s = breedte doorstroomopening	$[m]$
	d_s = bodemdiepte ter plaatse van doorstroom- opening	$[m]$
	μ = afvoercoefficient ($\mu = 1$)	$[-]$

De buitenwaterstand op het eind van het Ketelmeer (h_b) is daarbij als randvoorwaarde opgelegd. De binnenwaterstand (h_o) wordt daarbij bepaald door de gemiddelde waterstand in het Zwartemeer en de afwaaiing (bij westelijke winden) ter plaatse van de Zwartemeerzijde van de opening (punt o in Figuur 2).

Het gedurende de rekenstap toegestroomde debiet wordt vervolgens gelijkmatig verdeeld gedacht over zowel het Zwartemeer (oppervlak = 19 km^2) alsmede over het bergend oppervlak van Zwartewater en Overijssels Vecht (oppervlak = 19 km^2) waaruit de waterstandstijging in het Zwartemeer en de berging ($\Delta h_{1 \text{ ZM} + \text{B}}$) kan worden bepaald (als gevolg van de instroming bij Ramspol).

In formulevorm:

$$Q_o = q_o \, dt$$

$$\text{en} \quad \Delta h_{1 \text{ ZM} + \text{B}} = \frac{Q_o}{\text{Opp}_{\text{ZM}} + \text{Opp}_{\text{B}}}$$

waarin	Q_o	= instroomvolume	$[\text{m}^3]$
	dt	= rekentijdstap	$[\text{s}]$
	$\Delta h_{1 \text{ ZM} + \text{B}}$	= waterstandstijging Zwartemeer + berging ten gevolge van instroming Ramspol	$[\text{m}]$
	Opp_{ZM}	= oppervlakte Zwartemeer	$[\text{m}^2]$
	Opp_{B}	= oppervlakte berging	$[\text{m}^2]$

Met een afvoerdebiet van het Zwarte Water (Q_{riv}) is (met uitzondering van de gevoeligheidsberekeningen in hoofdstuk 3.5) geen rekening gehouden.

2.5 Opwaaiing Zwartemeer

De opwaaiing in het Zwartemeer is berekend volgens de stationaire beschouwingswijze. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat de opwaaiing zich momentaan aan de optredende windsnelheid en windrichting aanpast en dat steeds het bijbehorende evenwichtsverhang is opgetreden. Voor de onderhavige studie

lijkt dit een verantwoorde aanname.

Voor de opwaalingsberekeningen wordt verondersteld dat het Zwartemeer een constante diepte heeft. De opwaaiing ten opzichte van het opwaalingscentrum (d.i. het punt in het meer waar de waterstand als gevolg van opwaaiing niet verandert) kan dan als eerste benadering worden beschreven met de formule (zie ook de principeschets in Figuur 4):

$$s = \frac{C_D}{g} \frac{\rho_l}{\rho_w} \frac{W^2 L_v \cos Q}{d_{ZM}}$$

waarin

s	= opwaaiing	[m]
C _D	= windschuifspanningscoëfficiënt	[-]
ρ _l	= dichtheid van lucht	[kg/m ³]
ρ _w	= dichtheid van water	[kg/m ³]
g	= versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
W	= windsnelheid	[m/s]
d _{ZM}	= gemiddelde waterdiepte in het meer	[m]
Q	= hoek tussen de windrichting en de richting waarin de opwaaiing wordt berekend	[-]
L _v	= afstand van het beschouwde vakmidden tot het opwaalingscentrum	[m]

In analogie met voor het betreffende gebied eerder uitgevoerde opwaalingsberekeningen [1] wordt ook hier een windsnelheidsafhankelijke windschuifspanningscoëfficiënt ingevoerd. Bij de ijkingsberekeningen in hoofdstuk 3 wordt op de absolute grootte hiervan nader ingegaan.

Met bovenstaande formule wordt de Zwartemeerwaterstand aan de binnenzijde van de doorstroomopening bij Ramspol bepaald alsook de waterstanden in het Zwartemeer ter plaatse van het midden van de verschillende kaden.

De plaats van het opwaalingscentrum van het Zwartemeer is in Figuur 2 aangegeven als punt Z₁. Voor de voor opwaaiing relevante dijkvakgegevens wordt verwezen naar Tabel 1.

2.6 Uitwisselingsdebiet Zwartemeer-berging

Bij de kombergingsbeschouwing is de via Ramspol in- of uitgestroomde hoeveelheid water gelijkmatig verdeeld gedacht over zowel het Zwartemeer als over het bergend oppervlak van Zwarte Water en Overijsselse Vecht. Ten gevolge van een verandering van de opwaaiing (bijvoorbeeld omdat de wind harder is gaan waaien of uit een andere richting komt) zijn de waterstand achter op het meer en de waterstand in de berging mogelijk niet meer aan elkaar gelijk (verschil =

Δh_{ex}). Om aan het uitgangspunt dat de waterstand in de berging gelijk is aan de waterstand achter op het Zwartemeer te voldoen wordt een denkbeeldig "uitwisselingsdebiet" (Q_{ex}) geïntroduceerd dat ervoor zorgt dat de waterstand in de berging gelijk wordt aan de waterstand achter op het Zwartemeer (dijkvak 8) (zie ook de principeschets in Figuur 5). In formulevorm kan dit worden geschreven als:

$$Q_{ex} = \Delta h_{exB} \text{ Opp}_B = \Delta h_{exZM} \text{ Opp}_{ZM}$$

en

$$\Delta h_{ex} = \Delta h_{exB} + \Delta h_{exZM}$$

waarin:

Δh_{ex}	=	waterstandsverschil	[m]
Q_{ex}	=	uitwisselingsdebiet Zwartemeer-berging	[m ³]
Δh_{exZM}	=	aanpassing waterstand Zwartemeer	[m]
Δh_{exB}	=	aanpassing waterstand berging	[m]
Opp_{ZM}	=	oppervlakte Zwartemeer	[m ²]
Opp_B	=	oppervlakte berging	[m ²]

Deze formules kunnen worden omgewerkt tot:

$$\Delta h_{exB} = \Delta h_{ex} \left[\frac{\text{Opp}_{ZM}}{\text{Opp}_{ZM} + \text{Opp}_B} \right]$$

en

$$\Delta h_{exZM} = \Delta h_{ex} \left[\frac{\text{Opp}_B}{\text{Opp}_{ZM} + \text{Opp}_B} \right]$$

Bij gelijke oppervlakken van Zwartemeer en berging (beide 19 km²) komt dit erop neer dat zowel in berging als Zwartemeer de waterstand met $\frac{1}{2}\Delta h_{ex}$ moet worden aangepast (de ene stijgt en de ander daalt of omgekeerd) om aan het uitgangspunt dat de waterstand in de berging steeds gelijk moet zijn aan de waterstand achter op het Zwartemeer, te voldoen.

2.7 Inundatie

Zodra de waterstand in het Zwartemeer bij een van de dijkvakken hoger komt dan de kruinhoogte van de betreffende kade vindt inundatie plaats. Bij het aflopen van de storm is het in bepaalde gevallen mogelijk dat ook terugstroming uit de polders in het meer plaatsvindt. In het ontwikkelde rekenmodel wordt dit hele proces gesimuleerd. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat de dijken overloopbestendig zijn en niet doorbreken zodra overslag of overstroming plaatsvindt.

De overstroming van de kaden wordt beschreven door de bekende overlaatformule (zie ook de principeschets in Figuur 6). Als de benedenwaterstand lager is dan $2/3$ x de energiehogte bovenstrooms, beide gemeten ten opzichte van de kruin, is de afvoer maximaal en is de formule voor de volkomen overlaat van toepassing.

$$q = 2/3 m \sqrt{2/3 g} H^{3/2}$$

Hierin is:

q = afvoerdebiet (per eenheid van breedte)	[m ² /s]
g = versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
H = energiehogte bovenstrooms	[m]
m = afvoercoëfficiënt	[-]

Bij de volkomen overlaat is de afvoer slechts afhankelijk van de bovenstroomse toestand. Voor de gevallen waarin de benedenwaterstand hoger is dan $2/3$ x de energiehogte bovenstrooms, beide gemeten ten opzichte van de kruinhoogte, is

de afvoer afhankelijk van zowel boven als benedenwaterstand en wordt beschreven door de formule voor de onvolkomen overlaat:

$$q = \mu h_2 \sqrt{2g(H - h_2)}$$

Hierin is:

q = afvoerdebiet (per eenheid van breedte)	$[m^2/s]$
g = versnelling van de zwaartekracht	$[m/s^2]$
H = energiehogte bovenstrooms	$[m]$
h_2 = benedenwaterstand	$[m]$
μ = afvoercoëfficiënt	$[-]$

Voor de energiehogte bovenstrooms (H) kan worden geschreven $H = h_1 + v^2/2g$ (h_1 = waterstand bovenstrooms en v = gemiddelde snelheid bovenstrooms). Als eerste benadering kan doorgaans worden gesteld $H = h_1$, welke benadering ook voor de onderhavige studie is toegepast.

Bij de oorspronkelijke studie is ook gesteld $m = 1$ en $\mu = 1$. Beide afvoerformules gaan daardoor voor $h_2 = 2/3 h_1$ in elkaar over.

Per dijkvak kan nu de gedurende de rekentijdstap in- of uitgestroomde hoeveelheid water worden berekend uit:

$$Q_i = q_i L_i dt$$

waarin:

Q_i = waterhoeveelheid stromend over dijkvak i	$[m^3]$
q_i = afvoerdebiet van vak i (per eenheid van breedte)	$[m^2/s]$
L_i = dijkvaklengte van vak i	$[m]$
dt = rekentijdstap	$[s]$

Sommatie van deze volumina over de vakken 1 t/m 8 geeft de uitwisselingsterm in de waterbalansvergelijking voor Zwartemeer en berging enerzijds en de buitenpolders anderzijds. Deze uitgewisselde waterhoeveelheden worden vervolgens gelijkmatig verdeeld gedacht over het Zwartemeer en de berging

(oppervlak = 38 km²) en de gehele buitenpolder (oppervlak = 44 km²). Zoals reeds eerder opgemerkt wordt hierbij geen rekening gehouden met de kompartimentering van het poldergebied. De waterstandsveranderingen in Zwartemeer en berging ($\Delta h_{ZM + B}$) en polders (Δh_p) als gevolg van deze uitwisseling van water worden dan gegeven door:

$$\Delta h_{ZM + B} = \frac{-\sum_{i=1}^a Q_i}{Opp_{ZM} + Opp_B}$$

en

$$\Delta h_p = \frac{\sum_{i=1}^a Q_i}{Opp_p}$$

waarin

$\Delta h_{ZM + B}$	= waterstandstijging Zwartemeer en berging ten gevolge van inundatie	[m]
Δh_p	= waterstandstijging polder	[m]
Q_i	= waterhoeveelheid stromend over dijkvak i	[m ³]
Opp_{ZM}	= oppervlakte Zwartemeer	[m ²]
Opp_p	= oppervlakte polder	[m ²]
Opp_B	= oppervlakte berging	[m ²]

Als reeds eerder opgemerkt is aangenomen dat de dijk tussen Ketelmeer en de betreffende buitenpolders (dijkvak 25) voldoende hoog is om inundatie te voorkomen en is ook eventuele inundatie van de buitenpolders vanuit de beneden IJssel (via de dijkvakken 23 en 24) buiten beschouwing gelaten.

Volledigheidshalve dient tot slot nog te worden opgemerkt dat geen rekening is gehouden met instroming als gevolg van golfoverslag maar dat instroming begint en volledig bepaald is door boven- en benedenwaterstand en kruinhoogte.

2.8 Opwaaiing in de buitenpolders

De opwaaiing in het poldergebied wordt op soortgelijke wijze berekend als in het Zwartemeer (zie hoofdstuk 2.4). De gemiddelde bodemligging in het poldergebied wordt veronderstelt te liggen op NAP + 0,3m. Als eerder opgemerkt wordt in het rekenmodel geen rekening gehouden met de kompartimentering van

het poldergebied. De ligging van het opwaaiingscentrum van een dergelijke open polder is in Figuur 2 weergegeven als punt Z_2 .

Met de in hoofdstuk 2.4 beschreven formule wordt de polderwaterstand bepaald ter plaatse van het midden van de verschillende langs het Zwartemeer gelegen kaden (nodig voor de berekening van eventuele terugstroming van de polder naar het Zwartemeer of voor de bepaling van de afvoer bij een onvolkomen overlaat) alsmede de waterstand ter plaatse van het midden van de dijkvakken van de bestaande hoofdwaterkering (dijkvakken 17 t/m 22), (nodig voor de bepaling van de benodigde kruinhoogte van die hoofdwaterkering).

De waterstanden ter plaatse van het midden van de dijkvakken 23 t/m 25 worden voor de voorliggende studie niet van belang geacht en buiten beschouwing gelaten omdat eventuele overslag over deze dijken in de IJssel of in het Ketelmeer terecht zou komen. De voor de opwaaiingsberekeningen relevante dijkvakgegevens zijn opgenomen in Tabel 1.

Omdat de helling van het opwaaiingsvlak omgekeerd evenredig is met de waterdiepte worden voor zeer geringe inundatiediepten onrealistisch hoge opwaaiingen berekend, dit mede omdat onvoldoende water aanwezig is en gebieden gaan droogvallen. Voor geringe inundatiediepten zal bovendien de kompartimentering nog een belangrijke rol spelen zodat de met het model berekende waterstanden ook geen goede benadering van de werkelijke waterstanden geven. Om deze redenen is besloten de opwaaiing in de polder pas mee te nemen als de gemiddelde inundatiediepte in de polder groter is dan 1.0 m (bij een windsnelheid van 25 m/s en een polderlengte van ca. 12 km valt de bovenwindse kant van de polder dan net droog (NAP + 0,3 m) en komt het water achter in de polder op ca. NAP +2.3 m hetgeen net iets hoger is dan de huidige kruinhoogte van vak 8 (= NAP + 2.08 m).

Voor gemiddelde inundatiediepten kleiner dan 1.0 m wordt aangenomen dat de waterstand ter plaatse van de verschillende dijkvakken gelijk is aan de gemiddelde inundatiediepte in de polder.

2.9 Golfgroei

Voor het bepalen van de benodigde kruinhoogte van de bestaande hoofdwaterkering is naast de waterstand ook de golfoploop van belang.

Randvoorwaarde voor deze golfoploop wordt gevormd door de ter plaatse van de kade optredende golfcondities.

In het geval van golfgroei op ondiep water is de tijdsduur van de wind vrijwel nooit beperkend voor de golfhoogte. Voor de bepaling van de golfcondities wordt in het rekenmodel dan ook uitgegaan van de momentane windsnelheid en windrichting en wordt verondersteld dat de golfomstandigheden zich hieraan hebben aangepast. Aldus kunnen de golfcondities gedurende het hele stormverloop worden bepaald.

In "Methoden voor golfvoorspelling", gepubliceerd door de Technische Advieskommissie voor de Waterkeringen [3], wordt een overzicht gegeven van vigerende golfvoorspellingsmethoden. Op basis hiervan is uitgegaan van de golfgroeigrafieken van Bretschneider voor ondiep water, die te vinden zijn in lit.[4]. Daar zijn empirische relaties gegeven, waarbij gebruik wordt gemaakt van dimensieloze parameters:

$$H^* = \frac{gH_s}{W^2}$$

$$d^* = \frac{gd}{W^2}$$

$$F^* = \frac{gF}{W^2}$$

$$T^* = \frac{gT_s}{2\pi W}$$

met:

H_s	=	signifikante golfhoogte aan het benedenwindse einde van de windbaan	[m]
W	=	windsnelheid op 10 m hoogte	[m/s]
d	=	waterdiepte	[m]
F	=	lengte windbaan (fetch)	[m]
T_s	=	signifikante golfperiode	[s]
g	=	zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]

De relaties luiden dan:

$$H^* = 0,283 \tanh [0,53 (d^*)^{0,75}] \tanh \frac{0,0125 (F^*)^{0,42}}{\tanh [0,53 (d^*)^{0,75}]}$$

$$T^* = 1,20 \tanh [0,833 (d^*)^{0,375}] \tanh \frac{0,077 (F^*)^{0,25}}{\tanh [0,833 (d^*)^{0,375}]}$$

Omdat in deze studie sprake is van waterdiepten van 2-4 m en hoge windsnelheden van 25-35 m/s geldt dat $d^* < 0,10$, zodat de vergelijkingen dan vereenvoudigd kunnen worden tot:

$$H^* = 0,15 (d^*)^{0,75} \tanh \left[0,024 \frac{(F^*)^{0,42}}{(d^*)^{0,75}} \right]$$

$$T^* = (d^*)^{0,375} \tanh \left[0,092 \frac{(F^*)^{0,25}}{(d^*)^{0,375}} \right]$$

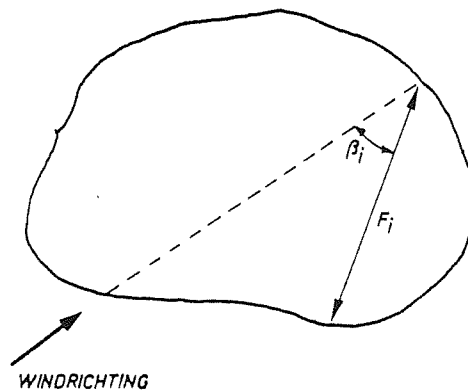
Met behulp van de waarden van d , U en F kunnen derhalve H_s en T_s worden berekend.

Bedacht moet wel worden dat de twee laatstgenoemde formules geldig zijn voor water met een konstante diepte en bij een standaard windveld waarbij per definitie de bovenwindse begrenzing loodrecht staat op de gemiddelde windrichting en de breedte van de windbaan enkele malen groter is dan de lengte. Windsnelheid en windrichting zijn konstant. In het geval de oever van het betreffende gebied een onregelmatige vorm heeft, kan worden uitgegaan van bovengenoemde parameterrelaties maar met een waarde voor de strijklengte die afhangt van de geometrie, de zogenaamde effectieve strijklengte.

De effectieve strijklengte voor een bepaald punt en behorend bij een gemiddelde windrichting kan in een willekeurige situatie dan gelijk gesteld worden aan een gewogen gemiddelde van de projecties van de afstanden naar de kust in alle richtingen. Omdat in het geval van ondiep water de golfhoogte bij grotere stijklengtes beperkt wordt door de waterdiepte, is een betere benadering de uit een bepaalde richting toegevoerde energie niet evenredig te stellen met F , maar met het kwadraat van de golfhoogte [5]. De gevraagde significante golfhoogte kan nu bepaald worden uit:

$$H_s^2 = \frac{\sum H_{si}^2 \cos \beta_i}{\sum \cos \beta_i}$$

met H_{s1} als significante golfhoogte bij een strijklengte F_i die behoort bij de radiaal die een hoek β_i met de windrichting maakt.



Gezien de windrichtingsfluctuaties is er van uitgegaan dat er energie wordt toegevoerd vanuit richtingen die maximaal een hoek van 30° maken [3] met de windrichting. De golfhoogte in een bepaald punt is derhalve bepaald met het gewogen gemiddelde van de golfhoogten uit drie richtingen: de windrichting en twee richtingen die een hoek van 30° met de windrichting maken. Omdat de vorm van de polders zelf niet erg grillig is, zijn geen tussenliggende richtingen meegenomen.

De voor de golfoploop ook van belang zijnde golfperiode (T_s) wordt bepaald uit middeling van de voor de 3 richtingen berekende golfperioden volgens:

$$T_s = 1/3 (T_{s1} + T_{s2} + T_{s3})$$

Wat betreft de stijklengten moet nog het volgende worden opgemerkt. Waar voor de inundatiediepte en opwaaiing geen rekening werd gehouden met de compartimentering van de buitenpolders werd dit voor de golfgroei wel gedaan. De in het ene gebied opgewekte golven zullen namelijk voor een belangrijk deel over de compartimenteringskaden (steeds 2 kades vlak na elkaar) breken, zeker als de waterstand boven deze kades niet hoger is dan 1.0 meter [6]. In Figuur 2 zijn ook de diverse compartimenteringskaden weergegeven die zijn gebruikt voor de stijklengtebepaling. Tabel 2 geeft een overzicht van de aangehouden stijklengten voor diverse dijkvakken als functie van de richting.

De aldus in de voorliggende studie gevolgde berekeningswijze komt dan exact overeen met golfgroeiberekening in de eerder voor het betreffende gebied door het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerde studie R1524 [2]

Bij de golfhoogtebepaling volgens Bretschneider wordt uitgegaan van een constante waterdiepte over het beschouwde golfgroeigebied. Bij de golfgroeiberekening in het model is daarvoor de op dat moment gemiddelde inundatiediepte in de polder genomen. Voor situaties dat er in het poldergebied naast de inundatie ook nog een aanzienlijke opwaaiing is kan dit (in ongunstige gevallen) voor de dijkvakken 17, 18 en 19 leiden tot een onderschatting van de golfhoogte en golfoploop van ca. 50%. Voor de dijkvakken 20, 21 en 22 is de aanname aanzienlijk beter en zal de onderschatting beduidend minder bedragen.

Zoals gesteld in het vorige hoofdstuk over opwaaiing in de polder worden er voor geringe gemiddelde inundatiediepten in de polder geen problemen verwacht voor de bestaande hoofdwaterkering. Om deze reden wordt ook de golfgroei pas meegenomen als de gemiddelde inundatiediepte in de polder groter is dan 1.0 m.

2.10 Golfoploop

Onder de oploophoogte z wordt verstaan de maximale hoogte boven de waterstand ter plaatse van het talud, die wordt bereikt door een tegen het talud oplopende golftong. Omdat de golfoploop tegen een talud een stochastische variabele is, kan er geen eenduidige waarde worden aangegeven, die nooit zal worden overschreden. Voor dijken in Nederland wordt gewoonlijk als maatstaf aangehouden de golfoploop die door 2% van het aantal golven wordt overschreden, een waarde die ook in het rapport van de Deltakommissie wordt gehanteerd [7].

In het TAW rapport "Golfoploop en golfoverslag" [8] is de kennis met betrekking tot golfoploop en golfoverslag geïventariseerd. Voor onregelmatige golven, brekend op een glad en vlak talud, wordt de volgende golfoploopformule gegeven (loodrechte inval).

$$z_{(2)} = C_{(2)} (\epsilon) \hat{T} \sqrt{gH_s} \tan \alpha$$

met:	$z_{(2)}$	=	golfoploophoogte met 2% overschrijdingspercentage.	[m]
	$C_{(2)}$	=	parameter die de vorm van de waarschijnlijkheidsverdeling van de golfoploop aangeeft.	[-]
	ϵ	=	maat voor de relatieve breedte van het energiedichtheidsspectrum.	[-]
	$\hat{T}$	=	periode behorend bij de spectrale komponent met maximale energiedichtheid.	[s]
	H_s	=	signifikante golfhoogte van het invallend golfbeeld.	[m]
	α	=	hellingshoek van het talud.	[-]

Het verloop van $C_{(2)}$ als fuktie van ϵ is voor een aantal gevallen gemeten: $C_{(2)}$ varieert van ca. 0,55 bij een voor windgolven smal spectrum tot ca. 0,70 bij een breed spectrum.

In de onderhavige situatie (beperkte strijklengte en ondiep water) zal er sprake zijn van een relatief smal spectrum. Aangenomen is derhalve $C_{(2)} = 0,6$. De golfgroeigrafieken van Bretschneider geven waarden voor de significante golfperiode T_s , terwijl in de golfoploopformule een waarde voor $\hat{T}$, de periode behorend bij de spectrale komponent met maximale energiedichtheid, moet worden ingevoerd. In lit [9] wordt een overzicht gegeven van prototypemetingen aan de hand waarvan o.a. de verhouding tussen $\hat{T}$ en T_s is bepaald.

Metingen in situaties overeenkomstig de onderhavige (waterdiepte ca. 4 m, $\bar{T} = 2$ à 3 s, relatief korte fetch) leveren op dat $\hat{T} = 1,12 T_s$

$$C_{(2)} = 0,60 \text{ en } \hat{T} = 1,12 T_s \text{ levert op:}$$

$$z_{(2)} = 0,67 T_s \sqrt{gH_s} \tan \alpha$$

Bovenstaande formule geldt voor situaties dat er sprake is van loodrechte golfinval op een glad, vlak talud.

Reduktie van golfoploop kan optreden ten gevolge van scheve golfinval. Er zijn aanwijzingen dat de oploop van brekende golven op vlakke taluds bij scheve golfinval gereduceerd kan worden met een faktor $\cos \beta$. De hoek β is hierbij de scherpe hoek tussen de golfvoortplantingsrichting en de horizontale kom-

ponent van de normaal op het talud. Het bovenstaande geldt tot $\beta = 45^\circ$ à 60° . Voor strijkgolven, min of meer evenwijdig lopend aan de lengterichting van de dijk, wordt aangenomen dat de golfoploop gelijk is aan de significante golfhoogte ter plaatse. In lit [10] zijn aldus bepaalde oploophoogten vergeleken met golfoploophoogten bepaald uit veebrandwaarnemingen. Omdat de overeenstemming tussen beide benaderingen redelijk goed was, is uitgegaan van $z_{(2)} = H_s$ voor waarden van β in de buurt van 90° . Omdat er voor $\beta = 45^\circ - 90^\circ$ weinig bekend is van de reductiefactor wordt uitgegaan van $z_{(2)} = H_s$ tenzij de formule met reductiefactor $\cos \beta$ een hogere waarde geeft voor de golfoploop. In dit geval wordt laatstgenoemde waarde van $z_{(2)}$ aangehouden.

Ook de ruwheid of doorlatendheid van het talud kan enige reductie van de golfoploop tot gevolg hebben. Afhankelijk van de soort bekleding zal de golfoploop worden gereduceerd. Lit [8] geeft b.v. voor de reductiefactor f_r de volgende waarden:

grasmat	$f_r = 0,85 \text{ à } 0,90$
stortsteen	$f_r = 0,50 \text{ à } 0,90$
basaltglooing	$f_r = 0,85 \text{ à } 0,90$

In de onderhavige studie is voor de reductiefactor f_r de waarde 0,9 aangehouden.

Ook de eventuele aanwezigheid van bermen zou oploopreducerend kunnen werken. Omdat op de door het Waterschap IJsseldelta beschikbaar gestelde dwarsprofielen van de hoofdwaterkering dergelijke bermen niet aanwezig blijken hoeft dit aspect niet in de beschouwing te worden betrokken.

Resultierend kan worden gesteld dat $z_{(2)}$ gelijk is aan de grootste van:

$$z_{(2)} = 0,6 T_s \sqrt{gH_s} \tan \alpha \cos \beta$$

$$z_{(2)} = H_s$$

3. De IJkings- en gevoeligheidsberekeningen

3.1 Opzet

Het ontwikkelde rekenmodel diende te worden afgeijkt aan de resultaten van eerder uitgevoerde berekeningen. Daartoe is gebruik gemaakt van resultaten tijdens ontwerpomstandigheden als gevonden bij het onderzoek R1524 [2] van het Waterloopkundig Laboratorium. Het bij dat onderzoek toegepaste rekenmodel was afgeijkt en geverifieerd aan enkele voorgekomen zware stormen (R1077 [1]).

Bij de ijkingsberekening zijn de kaden langs het Zwartemeer zodanig hoog verondersteld (NAP +10 m) dat geen inundatie zou optreden. De ijking heeft dan ook alleen betrekking op de toestroming naar, en op de opwaaiing op het Zwartemeer.

Voor de ijking is gebruik gemaakt van een drietal ijkstations. De lokatie van de ijkstations is weergegeven in Figuur 7. De ligging van de ijkstations is daarbij zodanig gekozen dat zowel aan het begin van het Zwartemeer alsook in het midden en achter op het Zwartemeer een representatief punt wordt verkregen.

De parameters die, binnen de grenzen van het fysisch redelijke, konden worden gevarieerd, waren:

- breedte van de doorstroomopening bij Ramspol
- diepte van de doorstroomopening bij Ramspol
- verloop van de windschuifspanningscoëfficiënt
- gemiddelde bodemdiepte van het Zwartemeer
- ligging van het punt o (afwaaiing in punt o bepaalt mede de toestroming naar het Zwartemeer)

3.2 Berekeningen met een hoogwatergolf

Om gevoel te krijgen voor de invloed van de doorstroomopening bij Ramspol is allereerst gerekend met het geval er alleen een hoogwatergolf bij Kamperhoek

(en dus ook Ramspol) wordt opgelegd. De invloed van de wind en de opwaaiing (windschuifspanningscoëfficiënt) blijft daarbij dus buiten beschouwing.

Er werd gebruik gemaakt van een hoogwatergolf bij Kamperhoek van 1.7 m en 2.5 m wat globaal overeenkomt met overschrijdingsfrequenties van respectievelijk 10^{-3} en 10^{-4} jaar. De respons van het Zwartemeer op de hoogwatergolf werd bepaald met het bij de studie R2152 [11] toegepaste rekenmodel.

3.3 IJkingsberekeningen met een storm

De ijking van het thans ontwikkelde inundatiemodel heeft plaatsgevonden aan een WNW storm (type b, geval W) met een overschrijdingsfrequentie van 1 x per 1000 jaar (voor een beschrijving van deze storm wordt verwezen naar bijlage 1 van dit rapport). Bij de ijking is mede gebruik gemaakt van de met de hoogwatergolfberekeningen verkregen inzichten betreffende de invloed van de doorstroomopening (breedte en diepte).

In analogie met de studie voor Ketelmeer, Zwartemeer en Vossemeer is een windsnelheidsafhankelijke windschuifspanningscoëfficiënt aangehouden. Daarbij is een rechtlijnig verloop tussen windschuifspanningscoëfficiënt (C_D) en windsnelheid (W) verondersteld (zie Figuur 8). Het verloop kan worden beschreven met de formule

$$C_D = (C_0 + C_1 W) 10^{-3}$$

waarin

C_D = windschuifspanningscoëfficiënt

$C_0 \times 10^{-3}$ = C_D waarde bij 0 m/s

C_1 = factor die de helling van het verloop aangeeft

W = windsnelheid in m/s

De helling van het windschuifspanningsverloop is ook bij deze studie als destijds in overleg met het KNMI vastgesteld (zie Ref [2] bijlage 1 : $C_1 = 0,06$ s/m) De absolute ligging van de lijn (C_0 -waarde) vormt dus de ijkknop voor de opwaaiing.

Voor een overzicht van de uitgevoerde ijkingsberekeningen en de daarbij gevarieerde parameters wordt verwezen naar Tabel 3. De beste resultaten werden daarbij verkregen voor de volgende parametercombinatie

- breedte doorstroomopening $B_S = 200$ m
- diepte doorstroomopening $d_S = 4.0$ m
- windschuifspanningscoëfficiënt $C_D = (0,5 + 0,06 W) 10^{-3}$
- bodemdiepte Zwartemeer $d_{ZM} = 1.0$ m
- ligging punt 0; vaklengte $L_{vo} = 7,3$ km

Deze parameters kunnen, elk voor zich, alleszins als fysisch reeel worden beschouwd.

De resultaten voor de drie ijkpunten zijn gepresenteerd in de Figuren 9,10 en 11. De verschillen voor het maximum van het waterstandsverloop bedroegen maximaal 5 cm, terwijl ook de vorm van het waterstandsverloop goed wordt gereproduceerd.

3.4 Verifikatieberekening met storm

De ijking van het model is vervolgens nog geverifieerd voor een tweetal andere stormen. Daartoe zijn gekozen de NW storm (type b, geval W) behorend bij een overschrijdingsfrequentie van 1 x per 1000 jaar en de WNW storm (type b, geval W) behorend bij een overschrijdingsfrequentie van 1 x per 10.000 jaar. De resultaten van deze verificatieberekeningen zijn ook alleszins redelijk te noemen. De verschillen voor het maximum van het waterstandsverloop bedroegen maximaal 6 cm hetgeen alleszins acceptabel genoemd kan worden en ook de vorm van het waterstand verloop werd redelijk geproduceerd. In de Figuren 12,13 en 14 zijn voor de drie ijkpunten de resultaten van de verifikatieberekening met de WNW storm behorend bij de overschrijdingsfrequentie van 1 x per 10.000 jaar gepresenteerd.

3.5 Gevoeligheidsberekeningen

Naast de ijkingsberekeningen zijn enkele berekeningen uitgevoerd om de

gevoeligheid van het resultaat voor bepaalde aannamen af te schatten.

Rekentijdstap

Allereerst is nagegaan wat de invloed is van de grootte van de rekentijdstap. Daartoe is tijdens de ijkingsberekeningen een bepaalde storm tweemaal doorgerekend: eenmaal met een rekentijdstap van 2 minuten en eenmaal met een rekentijdstap van 10 minuten. Het waterstandsverloop in het Zwartemeer bleek nauwelijks door deze variatie in rekenstapgrootte te worden beïnvloed (verschil maximaal 1 cm; afrondingsverschillen). Voor de verdere berekeningen is daarom steeds een rekenstapgrootte van 10 minuten aangehouden.

Debiet Zwarte Water

Het afvoerdebiet van de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water is niet standaard in de berekeningen opgenomen. Middels enkele gevoeligheidsberekeningen is nagegaan wat de invloed van een dergelijke afvoer is op de maximale Zwartemeerwaterstand en op het maximum van de gemiddelde inundatiediepte in de polders. Een gemiddelde afvoer van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ blijkt geen noemenswaardige verhoging te geven (maximaal 1 cm), noch voor de maximale Zwartemeerwaterstand, noch voor het maximum van de gemiddelde inundatiediepte van de polders.

In het geval een extreme afvoer van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (d.i. exclusief gemalen, waarvan wordt aangenomen dat deze bij een dergelijke extreme toestand al lang niet meer functioneren) zou samenvallen met een extreme storm zou de Zwartemeerwaterstand op de voorflank van de storm ca. een decimeter hoger liggen dan in het geval zonder Zwarte Water afvoer. De maximale Zwartemeerwaterstand zal echter maar ca. 4 cm hoger liggen. Het maximum van de gemiddelde inundatiediepte in de polder zal in dit geval ca. 20 cm hoger liggen. Het samenvallen van een extreme storm en een extreme afvoer wordt echter niet waarschijnlijk geacht en bij de inundatieberekeningen hoeft daarmee ook geen rekening te worden gehouden.

Berging Zwarte Water en Overijsselse Vecht

In eerste instantie is bij het opzetten van het model het Zwarte Water en de berging daarvan niet gemodeleerd. Gaande het onderzoek is gebleken dat het bergend vermogen van het gebied stroomopwaarts van Genemuiden van gelijke orde van grootte was als het oppervlak van het Zwartemeer zelf. Middels enkele uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen is gebleken dat het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht, gezien hun enorm bergend vermogen een niet verwaarloosbare invloed hebben op de inundatie van de buitenpolders langs het Zwartemeer en op de als gevolg daarvan optredende waterstandsreduktie op het Zwartemeer. Bij de uiteindelijke schematisatie is daarom ook het bergend oppervlak van Zwarte Water en Overijsselse Vecht (tot aan de eerste stuw) gemodeleerd.

4. Inundatieberekeningen

4.1 Algemeen

Met het geijkte rekenmodel is allereerst nagegaan welk type storm het meest ongunstig is voor de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders en welke windrichtingen mogelijk van belang zijn voor inundatie van genoemde buitenpolders. Tevens zijn met het model voor de situatie met bestaande kadehoogten berekeningen uitgevoerd voor een tweetal overschrijdings frequenties (1 x per 1000 jaar en 1 x per 10.000 jaar) en stormen uit verschillende windrichtingen.

Vervolgens is ook voor een aantal zo optimaal mogelijk gekozen kadeverhogingen nagegaan wat in die gevallen de inundatiediepte in de buitenpolders zou zijn en wat de waterstand en golfoploop tegen de hoofdwaterkering zou zijn.

In het hiernavolgende worden deze aspecten en de berekeningen nader toegelicht en worden de resultaten ervan geanalyseerd. Voor een overzicht van de uitgevoerde inundatieberekeningen wordt verwezen naar de Tabellen 5 en 6 van dit verslag.

4.2 Invloed storm-type

Voorliggende studie sluit met name waar het de randvoorwaarden betreft zeer nauw aan op de door het Waterloopkundig Laboratorium voor het betreffende gebied eerder uitgevoerde studie R1524 [2]. Bij die studie is het principe van de gevallen M en W als ontwerprekenregel [12] gehanteerd. De vorm van het windsnelheids- en windrichtingsverloop alsmede de bijbehorende maximale windsnelheid werden daarbij gebaseerd op analyse en statistische verwerking van 50 jaar windmeting te Den Helder. Bij deze stormanalyse bleken 3 verschillende typen stormen te kunnen worden onderscheiden waarvan er voor het thans in beschouwing genomen gebied 2 typen relevant waren:

type a: een vrij plotseling vrij sterk ruimende storm met een kortdurende, relatief iets hogere maximale windsnelheid.

type b: een geleidelijk en vrij langzaam ruimende storm met een relatief iets lagere maximale windsnelheid, maar met een iets persistenter karakter dan type a.

Opm: In bijlage 1 wordt een schematische weergave gegeven van de verschillende typen en worden de karakteristieken van deze stormtypen voor ontwerpomstandigheden (10^{-3} en 10^{-4} /jaar) samengevat. Voor een volledige omschrijving van de stormtypen wordt verwezen naar de WL-studie R1524 [2]

Met het geijkte inundatiemodel is middels onderlinge vergelijking nagegaan welk van de twee typen het meest ongunstig is voor de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders. Daarbij is verondersteld dat de kaden langs het Zwartemeer hoog genoeg zijn om inundatie te voorkomen. De onderlinge vergelijking is uitgevoerd voor het geval W (wind maatgevend) met een storm uit het NW behorend bij een overschrijdingsfrequentie van 1 x per 10.000 jaar. Het resultaat van de onderlinge vergelijking is weergegeven in Figuur 15. In deze figuur is voor de twee stormtypen de maximale waterstand ter plaatse van de middens van de dijkvakken 1 t/m 8 uitgezet alsmede het geschematiseerde lengte profiel van de langs het Zwartemeer gelegen kaden. Uit de figuur kan worden afgeleid dat de storm van het type b duidelijk ernstiger zal zijn voor de buitenpolders. De storm is niet alleen persistenter van karakter dan type a maar als gevolg van dit langer aanhouden van de wind is ondanks de geringere maximale windsnelheid ook de maximale waterstand op het Zwartemeer al hoger dan bij een storm van het type a. Voor de verdere inundatieberekeningen worden de stormen van het type a dan ook niet meer meegenomen en worden alleen de bijdragen van stormtype b in de beschouwing betrokken.

4.3 Invloed windrichting

Bij genoemde stormtypering zijn, in verband met het belang van de windrichting, de stormen ingedeeld in sektoren van $22,5^\circ$. De ontwerpstorm wordt dus bepaald door de overschrijdingsfrequentie, het stormtype en de windrichting. Daarbij moet windrichting worden gezien als de windrichting, als

veelvoud van $22,5^\circ$ (West, WNW, NW, NNW), die optreedt op het moment dat de windsnelheid (voor het eerst) maximaal is.

Voor het stormtype b (zie bijlage 1) is vervolgens nagegaan welke windrichting of windrichtingen de meest ongunstige situaties opleveren voor de langs het Zwartemeer gelegen kaden (in het geval er geen inundatie optreedt). In Figuur 16 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven zowel voor de overschrijdingsfrequentie 10^{-3} als voor de overschrijdingsfrequentie 10^{-4} . Uit deze figuur zal duidelijk zijn dat de bijdragen van stormen uit het NNW verder buiten beschouwing kunnen worden gelaten en dat afhankelijk van de plaats op het meer de stormen uit West en WNW of uit WNW en Noordwest de belangrijkste bijdragen aan de inundatie van de buitenpolders zullen leveren. Bij de verdere inundatieberekeningen zullen dan ook tenminste deze 3 richtingen steeds worden doorgerekend.

4.4 Invloed frequentie van voorkomen; tevens kadeverbeteringsplan

Figuur 16 toont dat er een aanzienlijk verschil is tussen de waterstanden voor de kaden van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders behorend bij overschrijdingsfrequentie van 10^{-3} en die behorend bij 10^{-4} . Dit verschil bedraagt orde 0.80 m. In Figuur 17 is ook voor enkele tussenliggende waarden van de overschrijdingsfrequentie (1 x per 2.000 en 1 x per 5.000 jaar) het waterstandsverloop langs de kaden van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders weergegeven. Deze onderlinge vergelijking voor verschillende overschrijdingsfrequenties is uitgevoerd voor stormen (van het type b) uit de richting WNW, die (zoals uit Figuur 16 blijkt) nagenoeg overal bij de beschouwde kaden de hoogste waterstanden zullen geven.

Ook in Figuur 17 is het geschematiseerde lengteprofiel van de bestaande kaden ingetekend. Uit de figuur zal duidelijk zijn dat inundatie het eerste en vooral zal plaatsvinden via de kaden 4, 5 en 8. In de figuur is tevens ingetekend een voorstel voor kadeverbetering zodanig dat alle kaden (behalve de kaden 6 en 7 die in de thans bestaande situatie al hoger liggen) nagenoeg gelijktijdig gaan overstromen. Als nog verdergaande bescherming tegen inundatie noodzakelijk zou zijn, geven de voor verschillende overschrijdingsfrequenties

voor de windrichting WNW berekende waterstanden voor de kaden van de langs het Zwartemeer gelegen buitenpolders een goede indicatie voor optimale (= alle kaden overstroomd nagenoeg gelijktijdig) kadeverhogingen. De gepresenteerde Figuur 17 kan dan ook worden opgevat als een kade-verbeteringsplan. In Tabel 4 is dit kadeverbeteringsplan in tabelvorm weergegeven.

4.5 Inundatieberekeningen

Met het gekozen rekenmodel is vervolgens een aantal inundatieberekeningen uitgevoerd. De doorgerekende stormen waren van het type b. Bij het vaststellen van de uit te voeren berekeningen is tevens rekening gehouden met de resultaten van in hoofdstuk 4.3 beschreven berekeningen wat betreft de meest ongunstige windrichtingen en is het kade-verbeteringsplan als weergegeven in Figuur 17 aangehouden.

Voor een overzicht van de uitgevoerde berekeningen wordt verwezen naar de Tabellen 5 en 6 waarin tevens de resultaten van respectievelijk het maximum van de gemiddelde inundatiediepte in de polder en het maximum van de waterstand achter op het Zwartemeer zijn opgenomen.

In Tabel 7 is als voorbeeld een berekeningsresultaat opgenomen. Het berekeningsvoorbeeld geeft gedurende de storm om het uur de berekende waterstand (h) en de berekende waterstand plus golfoploop (hz) voor de dijkvakken van de hoofdwaterkering (vakken 17 t/m 22). Tevens zijn de tijd, de uurwaarde van de gemiddelde waterstand op het Zwartemeer, de uurwaarde van de gemiddelde polderwaterstand en de uurwaarde van de waterstand achter op het Zwartemeer uitgevoerd.

4.6 Gezamenlijke kans van voorkomen

Bij de inundatieberekeningen zijn verschillende gevallen doorgerekend, die elk een (belangrijke) bijdrage zullen geven aan de totale kans van voorkomen dat een bepaalde waterstand of golfoploop wordt overschreden. Deze afzonderlijke gevallen moeten nog worden samengesteld tot de gezamenlijke kans van voorkomen.

Daartoe zijn voor de drie meest extreme gevallen (geval W, stormtype b windrichtingen West, WNW en NW) de voor 10^{-3} en 10^{-4} berekende waterstanden of golfoploopwaarden op log-lin papier uitgezet waarna de drie overschrijdingslijnen zijn samengesteld tot een gezamenlijke overschrijdingslijn voor waterstand of golfoploop. Dergelijke samengestelde overschrijdingslijnen zijn vastgesteld voor de golfoploop tegen de zes langs de hoofdwaterkering gelegen dijkvakken alsmede voor het maximum van de inundatiediepte in de polder en het maximum van de waterstand achter op het Zwartemeer. In Figuur 18 is een voorbeeld opgenomen van een dergelijke samengestelde overschrijdingslijn (waterstand plus golfoploop voor vak 22 voor geval 2).

Bij het samenstellen van de gezamenlijke kans van voorkomen moet nog de volgende opmerking worden gemaakt. Voor bepaalde gevallen is het mogelijk dat in de berekende waterstanden plus golfoploop behorend bij de frequentie 10^{-3} nog geen opwaaiing en golfoploop zitten opgesloten. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat de gemiddelde inundatiediepte in de polder voor frequentie 10^{-3} minder was dan 1.0 m (zie bijvoorbeeld Tabel 6) en omdat dan, om redenen als genoemd in hoofdstuk 2.6, de opwaaiing in de polder en de golfgroei en golfoploop niet worden berekend. Bij de frequentie 10^{-4} is de opwaaiing in de polder en de golfoploop tegen de hoofdwaterkering doorgaans wel berekend.

Bovengenoemd verschijnsel kan worden geïllustreerd als in het voorbeeld van het samenstellen van de gezamenlijke overschrijdingslijn ook de waarden voor tussenliggende frequenties worden ingeplot (zie Figuur 18). Voor het in Figuur 18 gepresenteerde voorbeeld liggen voor de richting WNW de punten voor de overschrijdingsfrequenties 1 x per 10.000 jaar, 1 x per 5.000 jaar en 1 x per 2.000 jaar nagenoeg op een lijn, terwijl het punt voor de overschrijdingsfrequentie 1 x per 1000 jaar (waarvoor vanwege de te geringe inundatiediepte in de polder geen opwaaiing en oploop zijn berekend) hiervan duidelijk afwijkt.

Om nu toch de opwaaiing en de golfoploop zo correct mogelijk in rekening te brengen is bij het samenstellen van de gezamenlijke overschrijdingsfrequentie-lijn de volgende procedure gevolgd: Slechts door de punten voor de richting WNW waarvoor wel opwaaiing en golfoploop zijn meegenomen is een lijn getrokken

en deze lijn is geëxtrapoleerd naar hogere waarden van de overschrijdingsfrequentie. Als ook voor andere windrichtingen (waarvoor geen tussenliggende overschrijdingsfrequenties zijn doorgerekend) het probleem speelt dat voor de overschrijdingsfrequentie 10^{-4} wel opwaaiing en golfoploop zijn meegenomen en voor de overschrijdingsfrequentie 10^{-3} niet, wordt voor die betreffende windrichting een lijn getrokken evenwijdig aan de lijn voor de windrichting WNW en door het punt behorend bij de overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} van die betreffende richting (zie ook het gepresenteerde voorbeeld in Figuur 18). Met behulp van de aldus aangepaste lijnen wordt de gezamenlijke overschrijdingsfrequentie-lijn samengesteld.

Een tweede opmerking die bij het samenstellen van de gezamenlijke overschrijdingsfrequentie-lijn moet worden gemaakt is dat, denkkelijk vanwege de vele discontinuïteiten in het inundatieproces, de relatie tussen overschrijdingsfrequentie en waterstand, uitgezet op log-lineair papier, niet altijd een lineair verband te zien gaf. Zowel enigszins op- als neer-buigende verbanden werden geconstateerd zodat op voorhand niet verwacht mag worden dat een andere extreme-waarden verdeling (b.v. een Gumbel of Weibull verdeling) tot betere resultaten zal leiden. Genoemde a-lineairiteiten kwamen met name tot uiting bij het maximum van de gemiddelde inundatiediepte van de buitenpolders en bij het maximum van de waterstand achter op het Zwartemeer. Bij de nadere uitwerking van de resultaten is hiermee zo goed mogelijk rekening gehouden.

4.7 Inundatiediepte in de polder en reductie Zwartemeerwaterstand

Uit onderlinge vergelijking van de gezamenlijke overschrijdingslijnen voor de waterstand achter op het Zwartemeer met dezelfde lijn voor het geval er geen inundatie optreedt (geval 0) kan de waterstands-reductie voor een punt achter op het Zwartemeer als gevolg van inundatie van de buitenpolders bij verschillende gevallen van kadeverbetering worden bepaald. De onderlinge vergelijking is uitgevoerd voor de volgende vier gevallen:

geval 0: geen inundatie

geval 1: bestaande situatie

geval 2: kaden 4, 5 en 8 enigszins verhoogd (zie Figuur 17)

geval 3: alle kaden, behalve kade 7 iets verhoogd (zie Figuur 17)

Een soortgelijke analyse kan worden uitgevoerd voor de gemiddelde inundatiediepte van de buitenpolders zelf.

De resultaten zijn schematisch weergegeven in de Figuren 19 en 20 en samengevat in onderstaande tabel.

gemiddelde inundatiediepte buitenpolders in m				
	geval 0	geval 1	geval 2	geval 3
freq = 10^{-3}	0.00	1.76	1.50	0.48
freq = 10^{-4}	0.00	2.96	2.92	2.60

waterstand dijkvak 8 in m boven NAP				
	geval 0	geval 1	geval 2	geval 3
freq = 10^{-3}	3.07	2.58	2.71	2.96
freq = 10^{-4}	3.92	3.18	3.18	3.26

Uit bovenstaande tabellen kan worden afgeleid dat bij handhaving van de bestaande situatie als gevolg van inundatie van de buitenpolders voor de waterstanden echter op het Zwartemeer de reductie kan worden verwacht van ca.

0,50 m bij een frequentie van 1 x per 1000 jaar, vergeleken bij een aangenomen situatie waarbij geen inundatie van de buitenpolders optreedt. Voor een frequentie van 1 x per 10.000 jaar bedraagt de reductie zelfs ca. 0,70 m. Hierbij wordt in herinnering gebracht dat er voor alle doorgerekende gevallen (dus ook voor de "bestaande situatie") vanuit wordt gegaan dat Goot, Veneriete en Ganzendiep zijn afgesloten, dat de dijk langs het Ketelmeer zodanig hoog is dat via deze dijk geen inundatie van het Kampereiland plaatsvindt en dat de kaden langs het Zwartemeer overloop- en overslag- bestendig zijn.

Enige verhoging van de kaden 4, 5 en 8 (zie Figuur 17; geval 2) waardoor de inundatiefrequentie van de buitenpolders aanzienlijk zal afnemen blijkt toch nog een reductie van de waterstand achter op het Zwartemeer te geven van ca. 0,30 m bij een frequentie van 1 x per 1000 jaar.

Bovenstaande beschouwing is slechts gebaseerd op bijdragen van de drie zwaarste stormen. Naar verwachting zullen de reducties (waterstandverschillen) ook gelden wanneer alle stormen worden meegenomen. De absolute waarden van de waterstanden zelf zullen dan mogelijk een fractie hoger komen te liggen.

Ter vergelijking zijn onderstaand opgenomen de resultaten van twee punten achter op het Zwartemeer uit het eerdere WL-onderzoek R1524 waarbij "alle" stormen werden opgenomen.

		waterstand in m t.o.v. NAP		verschil in m
		R1524	R2224	
R1524 punt 8	10^{-3}	3.01	3.07	+0.06
	10^{-4}	3.83	3.92	+0.09
R1524 punt 9	10^{-3}	3.08	3.07	-0.01
	10^{-4}	3.92	3.92	0.00

De verschillen kunnen alleszins redelijk worden genoemd.

Als de samengestelde overschrijdingslijn voor de inundatiediepte in de polder wordt geëxtrapoleerd naar inundatiediepte nul geeft dit bij benadering de

inundatie-frequentie voor de buitenpolders. In Figuur 20 is dit weergegeven voor geval 1 (bestaande situatie), voor geval 2 (enige verhoging van de kaden 4, 5 en 8) en voor geval 3 (het merendeel der kaden met een aantal decimeters verhoogd; zie ook Figuur 17). Uit de figuur blijkt dat de inundatiefrequentie van de polders bij handhaving van de bestaande situatie naar verwachting ca 1 x per 30 jaar zal bedragen. Bij enige verhoging van de kaden 4, 5 en 8 (geval 2 Figuur 17) kan deze inundatie frequentie naar verwachting worden gereduceerd tot bijna 1 x per 100 jaar en voor geval 3 zal de inundatie frequentie bij benadering 1 x per 500 jaar bedragen.

Op verzoek van de "technische coördinatiegroep maatgevende hoogwaterstanden Beneden IJssel" zijn ten behoeve van de kosten-baten analyse, voor de ontwerp frequenties 1 x per 1250 jaar en 1 x per 2500 jaar, de resultaten voor de waterstanden achter op het Zwartemeer en de inundatiediepte in de polder uitgewerkt voor een aantal inundatie frequenties van de buitenpolders. Uit Figuur 20 is daartoe afgeleid wat voor de doorgerekende gevallen 1, 2 en 3 van het kadeverbeteringsplan de inundatie frequentie van de buitenpolders is (respectievelijk 1 x per 33 jaar; 1 x 87 jaar en 1 x per 580 jaar). De voor deze gevallen bepaalde waterstanden achter op het Zwartemeer (zie Figuur 19) en de inundatiediepte van de buitenpolders (zie Figuur 20) zijn vervolgens uitgezet tegen de inundatie frequentie van de buitenpolder. Deze resultaten zijn gepresenteerd in respectievelijk de Figuren 21 en 22. Ook het limiet geval met geen inundatie (Kampereiland voorzien van een hoofdwaterkering) is in de betreffende figuren ingeplot. Uit genoemde figuren zijn ten behoeve van de kosten-baten analyse de volgende resultaten bepaald.

	maximale waterstand achter op Zwartemeer (dijkvak 8) in m boven NAP	
	1 x per 1250 jaar	1 x per 2500 jaar
1. huidige kadehoogten	2.64	2.82
2. inundatie Kampereiland ca 1/100 j	2.76	2.86
3. inundatie Kampereiland ca 1/500 j	2.96	3.05
4. Kampereiland hoofdwaterkering	3.15	3.41

	maximale gemiddelde inundatiediepte buitenpolders in m.	
	1 x per 1250 jaar	1 x per 2500 jaar
1. huidige kadehoogten	1.88	2.24
2. inundatie Kampereiland ca. 1/100 j	1.58	2.02
3. inundatie Kampereiland ca. 1/500 j	0.76	1.39
4. Kampereiland hoofdwaterkering	-	-

Opm: voor het geval met een afsluiting bij Ramspol zijn geen gegevens voorhanden.

4.8 Hoogte van de bestaande hoofdwaterkering

Voor de bestaande situatie (geval 1) en voor het geval de kruin van de kaden 4,5 en 8 enigermate wordt verhoogd (geval 2) is nagegaan wat de waterstand en de golfoploop tegen de hoofdwaterkering zal bedragen voor frequenties van voorkomen van 1 x per 1000 en 1 x per 10.000 jaar. In Figuur 23, waar naast deze lijnen ook het werkelijke en het geschematiseerde lengteprofiel van de kruinhoogte van de hoofdwaterkering zijn opgenomen, zijn deze resultaten voor de bestaande situatie gepresenteerd. In Figuur 24 zijn de resultaten voor het geval 2 met enige kadeverbetering (van de dijken langs het Zwartemeer) gepresenteerd.

Volledigheidshalve moet worden opgemerkt dat de berekeningen zijn uitgevoerd met voor vak 20 en 21 een taludhelling van 1 : 2½ (zie b.v. Tabel 8). In een later stadium is gebleken dat voor vak 20 een taludhelling van 1 : 4 à 1 : 5 meer representatief was. De in Tabel 1 en de Figuren 23 en 24 gepresenteerde resultaten zijn hiervoor aangepast.

Uit de laatste twee figuren lijkt de konklusie gerechtvaardigd dat voor het geval 2, met enige verbetering van de langs het Zwartemeer gelegen kaden 4,5 en 8 de kruinhoogte van de bestaande hoofdwaterkering nagenoeg overal voldoende hoog is voor situaties die orde 1 x per 1000 jaar voorkomen. Bij handhaving van de bestaande situatie volgt uit de berekeningen dat de bestaande hoofdwaterkering (Kamperzeedijk) over aanzienlijke lengten niet hoog genoeg is om voldoende veiligheid te bieden voor situaties die orde 1 x per 1000 jaar kunnen voorkomen. Niet in de berekening betrokken lokale reductiefactoren (b.v. tweede kade vlak voor de hoofdwaterkering van de dijkvlakken 20 en 21) kunnen dit beeld mogelijk verbeteren. Gezien het globale karakter van de studie en de mogelijke onnauwkeurigheden in de berekeningsresultaten wordt in het geval dat wordt gekozen voor een inundatie funktie van het Kampereiland nader onderzoek aanbevolen ter definitieve vaststelling en controle van de benodigde kruinhoogte van de bestaande hoofdwaterkering. Voor de kosten-baten analyse kan denkkelijk verantwoord van bovenstaande resultaten gebruik worden gemaakt.

4.9 Nauwkeurigheid

Het rekenmodel beschrijft een uiterst complex stromingsproces. Bij het opzetten van het model zijn een aantal vereenvoudigingen doorgevoerd zoals bijvoorbeeld het niet meenemen van de compartimentering van de buitenpolders en het blijven beschouwen van twee afzonderlijke bekkens ook onder zeer extreme omstandigheden. Ook moesten, om numerieke instabiliteiten te voorkomen, beperkingen aan het rekenmodel worden opgelegd (zie hoofdstuk 2.7).

Van een dergelijk vereenvoudigd rekenmodel kan geen hoge mate van nauwkeurigheid worden verwacht. Dit wordt bijvoorbeeld ook geïllustreerd in Tabel 6 waar voor relatief zware stormen (freq. 10^{-4} ; richtingen WNW en NW) en relatief lage kruinhoogten (geval 1) een geringe verlaging (orde 6 cm) van de waterstand achter op het Zwartemeer wordt gevonden als de kaden langs het Zwartemeer enigszins worden verbeterd, (geval 2), terwijl dan juist een geringe verhoging van de Zwartemeerwaterstanden wordt verwacht. Gesteld kan worden dat dergelijke verschillen binnen de nauwkeurigheidsmarges van het rekenproces vallen.

De gepresenteerde resultaten pretenderen een grotere nauwkeurigheid dan ze in werkelijkheid hebben. Naar verwachting bedraagt de absolute nauwkeurigheid van de gepresenteerde waterstanden niet meer dan ± 1 à 2 decimeter. Voor het opzetten van een globale kosten-baten analyse voor het al dan niet inunderen van de buitenpolders, waarbij het voornamelijk gaat om onderlinge vergelijking van een aantal alternatieven, wordt de nauwkeurigheid voldoende geacht.

REFERENTIES

1. Waterloopkundig Laboratorium
Opwaaiing Ketelmeer, Zwartemeer en Vossemeer
Verslag onderzoek R1077
April 1978.
2. Waterloopkundig Laboratorium
Waterstanden en golfoploop in Ketelmeer, Zwartemeer en Vossemeer
Verslag van berekeningen R1524
December 1981.
3. L.H. Holthuijsen
Methoden voor golfvoorspelling
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
1980.
4. Shore Protection Manual, Volume I
U.S. Army Coastal Engineering Research Center
1973.
5. Dienst der Zuiderzeewerken
Nota B 73-3
Golfhoogten en waterstanden op het Vossemeer
Februari 1972.
6. Delt Hydraulics Laboratory
Artificial islands in the Beafort-sea
Structures to reduce wave transmission
Report en literature study
M1271 part II
December 1974
7. Rapport Deltacommissie, deel I.

REFERENTIES (vervolg)

8. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Golfoploop en golfoverslag
Januari 1972.
9. Goda, A.
A Review on Statistical Interpretation of Waves
Report of the Port and Harbour Research Institute.
Vol. 18, no I
March 1979.
10. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging.
Partiële dijkversterking Oost-Flakkee
Nota WWKZ-77.009
11. Waterloopkundig Laboratorium
Lozingen kerncentrales langs het IJsselmeer en het Hollands Diep
Verspreiding en accumulatie van regulier geloosd radioactief materiaal
in het natte milieu.
Eindrapport wiskundige modelstudies R2112/R2152
April 1985
12. Rijkswaterstaat, Dienst der Zuiderzeewerken
Veiligheid tegen overstroming van gebieden rond het IJsselmeer en de
Randmeren
Nota B73-24
Oktober 1973

dijkvak nr	afstand o.c. - dijkvak midden [km]	richting verb. lijn o.c.- dijkvakm. [°] tov N	kruin hoogte t.o.v. NAP [m]	dijkvak lengte [m]	talud tg α [-]	orientatie dijkvak; richting v/d normaal [°] tov N
0	7.30	255.00	-	-	-	-
1	6.81	253.00	2.00	2500.00	0.25	349.00
2	4.40	243.00	2.00	2600.00	0.25	16.00
3	2.51	218.00	2.04	2600.00	0.25	345.00
4	1.21	187.00	2.10	300.00	0.25	282.00
5	1.36	142.00	2.15	2600.00	0.25	17.00
6	2.18	118.00	2.30	200.00	0.25	290.00
7	2.80	89.00	2.73	1900.00	0.25	317.00
8	4.47	87.00	2.30	2500.00	0.25	25.00
9	4.75	283.00	-	-	-	-
10	2.34	299.00	-	-	-	-
11	1.24	15.00	-	-	-	-
12	2.58	41.00	-	-	-	-
13	3.42	53.00	-	-	-	-
14	4.35	61.00	-	-	-	-
15	5.65	55.00	-	-	-	-
16	7.19	62.00	-	-	-	-
17	7.72	72.00	10.00	-	0.14	267.00
18	7.00	79.00	10.00	-	0.20	309.00
19	4.81	87.00	10.00	-	0.18	344.00
20	2.55	107.00	10.00	-	0.22	314.00
21	2.00	130.00	10.00	-	0.40	4.00
22	2.63	178.00	10.00	-	0.22	299.00

Opm 1: voor de dijkvakken 1 en 9 t/m 16 zijn kruinhoogte, dijkvaklengte, taludhelling en dijkvakorientatie niet van belang.

Opm 2: voor de dijkvakken 17 t/m 22 wordt de kruinhoogte zodanig hoog gesteld dat geen overstroming plaatsvindt (NAP +10.0 m) en is de dijkvaklengte niet van belang.

Opm 3: de dijkvakken 23, 24 en 25 zijn voor de berekeningen niet van belang.

Tabel 1: Overzicht dijkvakgegevens

FETCH (in km) als functie van de windrichting (° t.o.v. Noord)

dijkvak	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°
1							1.8	1.1	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	1.3	2.5	11.6		
2									1.8	1.5	1.4	1.3	1.4	1.6	1.9	2.9	8.6	4.0	2.3	1.2
3				1.4			2.6	3.8	2.8	2.3	2.1	2.0	2.1	2.4	3.0	6.5	1.7			
4	0.4	0.5	0.8	1.7	3.7	5.6	3.2	3.2	2.3	1.9	1.7	1.7	1.8							
5									2.6	2.2	2.0	2.0	2.5	4.0	4.2	4.2	2.4	1.3	1.1	1.0
6		0.4	0.4	0.5	0.7	1.3	4.2	3.0	3.0	2.6	2.6	3.1	3.9	3.8						
7				2.2	3.0	5.0	2.8	2.5	2.5	2.5	2.8	2.9	2.6	2.4	2.1	2.1				
8								3.8	3.8	3.8	2.8	1.4	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1	1.0	1.0
17	0.5	0.8	2.0	2.0	2.2	2.5	3.5	2.8	2.5	1.2	0.8	0.6								
18			0.8	0.8	0.9	1.0	1.4	2.3	3.0	2.9	2.8	2.1	1.8	1.6	1.0					
19						1.7	1.4	1.3	1.3	1.4	1.6	2.0	1.6	1.4	1.3	1.3	1.4	1.7		
20			0.7	1.0	1.0	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	2.4	2.8	2.3	2.2	2.6					
21								0.7	0.7	0.8	0.9	1.4	2.6	3.1	3.0	3.2	1.9	1.0	0.8	
22				1.4	1.2	1.1	1.1	1.3	1.5	1.5	1.3	1.2	1.2	1.4	1.7					

Opn 1: De Fetch voor de dijkvakken 17 t/m 22 is van toepassing als de golven breken op de voorliggende compartimenteringsdijken (zie ook Figuur 2)

Tabel 2: Overzicht strijklengten

	B _s	d _s	d _{zm}	C ₀	C ₁	L _{vo}
hoogwater-	300	4	1,0	0,5	0,06	5,3
golf	300	3	1,0	0,5	0,06	5,3
NAP + 1.7 m	300	5	1,0	0,5	0,06	5,3
freq: 10 ⁻³	30	5	1,0	0,5	0,06	5,3
	100	3	1,0	0,5	0,06	5,3
	100	5	1,0	0,5	0,06	5,3
	200	5	1,0	0,5	0,06	5,3
	100	4	1,0	0,5	0,06	5,3
hoogwater-	100	4	1,0	0,5	0,06	5,3
golf	100	5	1,0	0,5	0,06	5,3
NAP + 2.5 m	300	4	1,0	0,5	0,06	5,3
freq: 10 ⁻⁴	300	3	1,0	0,5	0,06	5,3
	300	5	1,0	0,5	0,06	5,3
storm	100	4	1,0	0,5	0,06	5,3
type b	100	4	0,8	0,5	0,06	5,3
WNW	100	4	1,2	0,5	0,06	5,3
geval W	300	5	1,0	0,5	0,06	5,3
freq: 10 ⁻³	100	4	1,0	0,3	0,06	5,3
	100	4	1,0	0,7	0,06	5,3
	100	4	1,0	0,5	0,06	5,3
	100	4	1,0	0,5	0,06	6,3
	100	4	1,0	0,5	0,06	7,3
	150	4	1,0	0,7	0,06	7,3
	200	4	1,0	0,7	0,06	7,3
	300	4	1,0	0,7	0,06	7,3
	200	4	1,0	0,5	0,06	7,3
idem NW	200	4	1,0	0,5	0,06	7,3
idem 10 ⁻⁴	200	4	1,0	0,5	0,06	7,3

Tabel 3: Overzicht uitgevoerde ijkings- en verificatieberekeningen

Kadehoogte in m boven NAP							
	geval 1 bestaande situatie	geval 2 kaden 4,5,8 verhoogd	geval 3	geval 4	geval 5	geval 6	geval 0 geen inundatie
dijkvak 1	2.00	2.00	2.19	2.43	2.67	2.88	10.00
2	2.00	2.00	2.34	2.58	2.85	3.07	10.00
3	2.04	2.04	2.47	2.71	3.02	3.24	10.00
4	1.75	2.10	2.52	2.78	3.09	3.31	10.00
5	1.55	2.15	2.57	2.84	3.15	3.38	10.00
6	2.30	2.30	2.63	2.90	3.23	3.46	10.00
7	2.73	2.73	2.73	2.92	3.24	3.47	10.00
8	2.08	2.30	2.73	3.02	3.35	3.59	10.00

Tabel 4: Kadeverbeteringsplan; Gemiddelde hoogte van langs hetZwartemeer
gelegen dijkvakken

Kadehoogte in m boven NAP							
	geval 1 bestaande situatie	geval 2 kaden 4,5,8 verhoogd	geval 3	geval 4	geval 5	geval 6	geval 0 geen inundatie
dijkvak 1	2.00	2.00	2.19	2.43	2.67	2.88	10.00
2	2.00	2.00	2.34	2.58	2.85	3.07	10.00
3	2.04	2.04	2.47	2.71	3.02	3.24	10.00
4	1.75	2.10	2.52	2.78	3.09	3.31	10.00
5	1.55	2.15	2.57	2.84	3.15	3.38	10.00
6	2.30	2.30	2.63	2.90	3.23	3.46	10.00
7	2.73	2.73	2.73	2.92	3.24	3.47	10.00
8	2.08	2.30	2.73	3.02	3.35	3.59	10.00

Maximum van de gemiddelde inundatiediepte in de buitenpolders								
Freq.	wind- richting	geval 1 bestaande situatie	geval 2 kaden 4,5,8 verhoogd	geval 3	geval 4	geval 5	geval 6	geval 0 geen inundatie
1 x per 1000 j	W WNW NW	1.15 1.28 0.91	0.39 0.55 0.27	0.00 0.00 0.00				0.00 0.00 0.00
1 x per 10.000 j	W WNW NW	2.20 2.64 2.29	2.14 2.43 2.25	1.53 1.93 1.38	0.90 1.20 0.66	0.16 0.38 0.06	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00
1x per 1000 j	WNW	1.28	0.55	0.00				0.00
1x per 2000 j	WNW	1.77	1.18	0.31	0.00			0.00
1x per 5000 j	WNW	2.14	1.99	1.05	0.43	0.00		0.00
1x per 10.000 j	WNW	2.64	2.43	1.93	1.20	0.38	0.00	0.00

Tabel 5 Maxima van de gemiddelde inundatiediepten in de buitenpolders

Kadehoogte in m boven NAP							
	geval 1 bestaande situatie	geval 2 kaden 4,5,8 verhoogd	geval 3	geval 4	geval 5	geval 6	geval 0 geen inundatie
dijkvak 1	2.00	2.00	2.19	2.43	2.67	2.88	10.00
2	2.00	2.00	2.34	2.58	2.85	3.07	10.00
3	2.04	2.04	2.47	2.71	3.02	3.24	10.00
4	1.75	2.10	2.52	2.78	3.09	3.31	10.00
5	1.55	2.15	2.57	2.84	3.15	3.38	10.00
6	2.30	2.30	2.63	2.90	3.23	3.46	10.00
7	2.73	2.73	2.73	2.92	3.24	3.47	10.00
8	2.08	2.30	2.73	3.02	3.35	3.59	10.00

Maximum van de waterstand achter op het Zwartemeer							
Freq.	wind- richting	geval 1 bestaande situatie	geval 2 kaden 4,5,8 verhoogd	geval 3	geval 4	geval 5	geval 0 geen inundatie
1 x	W	2.37	2.60	2.74			2.74
per	WNW	2.35	2.57	2.73			2.73
1000 j	NW	2.22	2.42	2.51			2.51
1 x	W	3.06	3.09	3.17	3.35	3.54	3.58
per	WNW	2.91	2.85	3.10	3.30	3.51	3.59
10.000 j	NW	2.71	2.64	2.94	3.10	3.28	3.31
1x per	WNW	2.35	2.57	2.73			2.73
1000 j							
1x per	WNW	2.43	2.65	2.93	3.02		3.02
2000 j							
1x per	WNW	2.68	2.74	3.03	3.21	3.35	3.35
5000 j							
1x per	WNW	2.91	2.85	3.10	3.30	3.51	3.59
10.000 j							

Tabel 6: Maxima van de waterstanden achter op het Zwartemeer

tijd in uren	waterstanden en golfoploop in m boven NAP														
	h17	h17	h18	h18	h19	h19	h20	h20	h21	h21	h 22	hz22	ws _{ZM}	ws _p	ws _B
1	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
2	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.31
3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.33	0.30	0.34
4	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.37	0.30	0.40
5	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.43	0.30	0.47
6	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.49	0.30	0.56
7	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.58	0.30	0.66
8	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.68	0.30	0.80
9	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.81	0.30	0.95
10	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.95	0.30	1.12
11	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.12	0.30	1.32
12	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.31	0.30	1.54
13	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.52	0.30	1.77
14	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.75	0.30	2.02
15	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	2.00	0.30	2.29
16	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	2.21	0.36	2.51
17	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	2.29	0.57	2.62
18	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	2.34	0.90	2.64
19	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	2.35	1.29	2.63
20	2.32	2.87	2.47	3.38	2.38	3.12	2.22	4.05	2.20	3.45	2.26	3.11	2.33	1.69	2.60
21	2.48	3.10	2.61	3.62	2.56	3.40	2.47	4.49	2.46	3.89	2.53	3.45	2.31	2.06	2.56
22	2.63	3.22	2.73	3.77	2.72	3.59	2.67	4.74	2.67	4.21	2.74	3.64	2.29	2.40	2.48
23	2.69	3.25	2.77	3.75	2.78	3.63	2.76	4.75	2.76	4.34	2.83	3.67	2.36	2.55	2.50
24	2.55	3.07	2.62	3.51	2.64	3.44	2.63	4.46	2.64	4.16	2.71	3.47	2.29	2.47	2.39
25	2.38	2.84	2.44	3.24	2.47	3.22	2.47	4.13	2.49	3.96	2.55	3.23	2.14	2.34	2.21
26	2.27	2.70	2.33	3.04	2.35	3.05	2.37	3.86	2.39	3.77	2.44	3.04	1.89	2.27	1.94
27	2.20	2.57	2.25	2.87	2.28	2.92	2.30	3.64	2.31	3.64	2.36	2.89	1.62	2.22	1.66
28	2.14	2.46	2.19	2.73	2.21	2.80	2.24	3.44	2.25	3.53	2.30	2.76	1.37	2.18	1.39

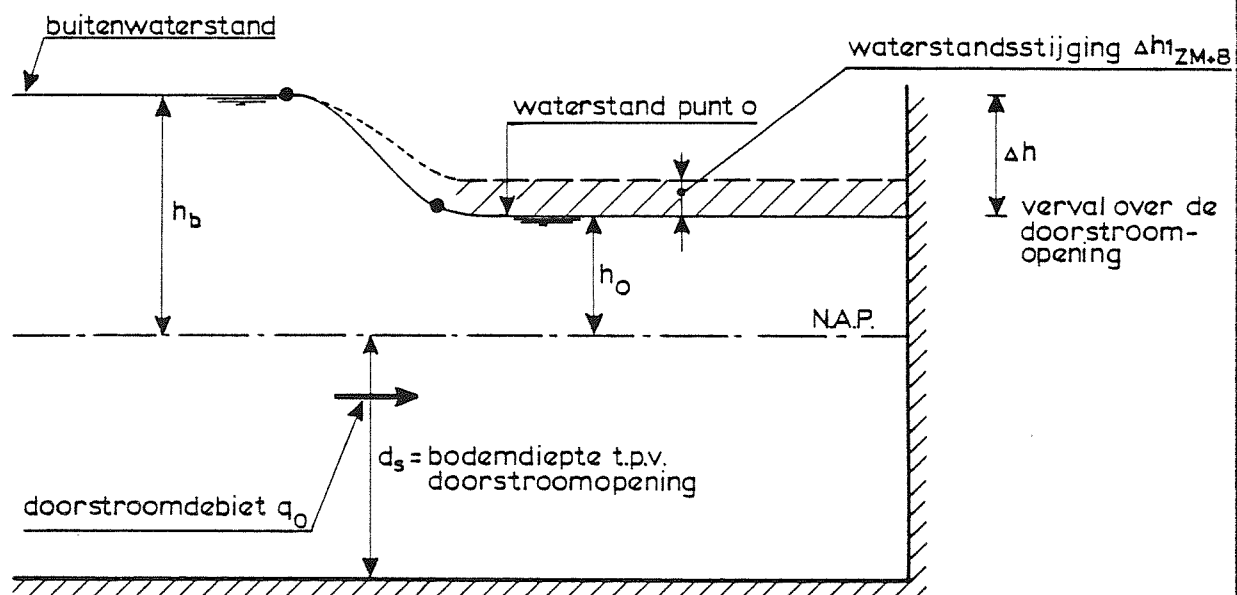
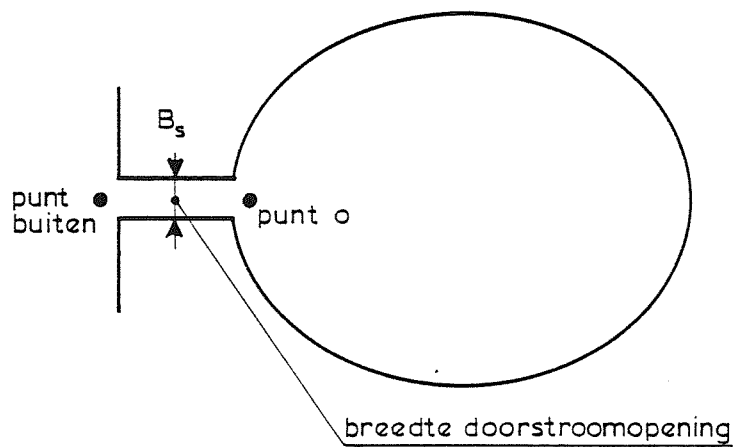
freq.: 10th

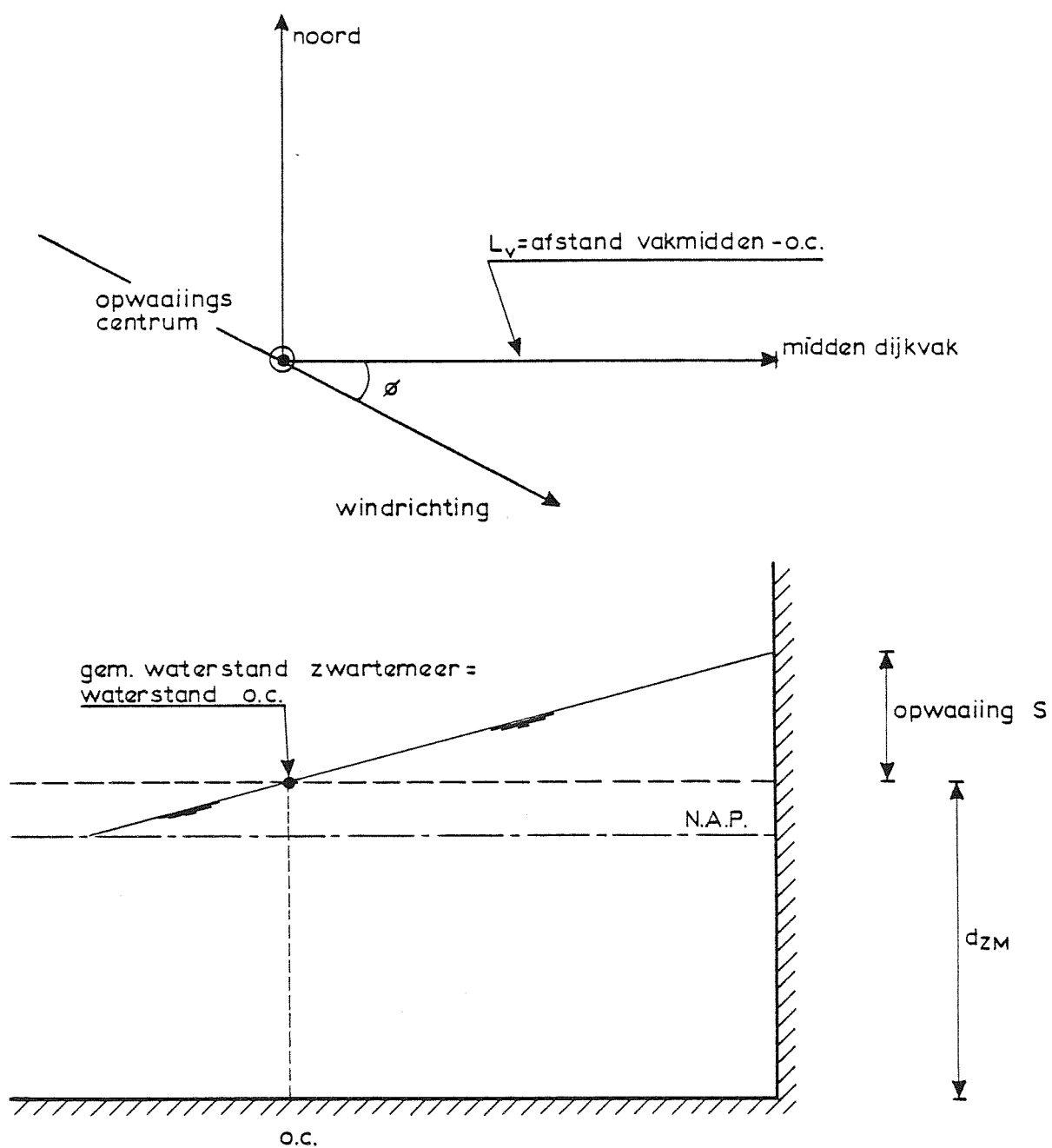
stormtype: b

windrichting: NW

Tabel 7: Voorbeeld van een berekeningsresultaat





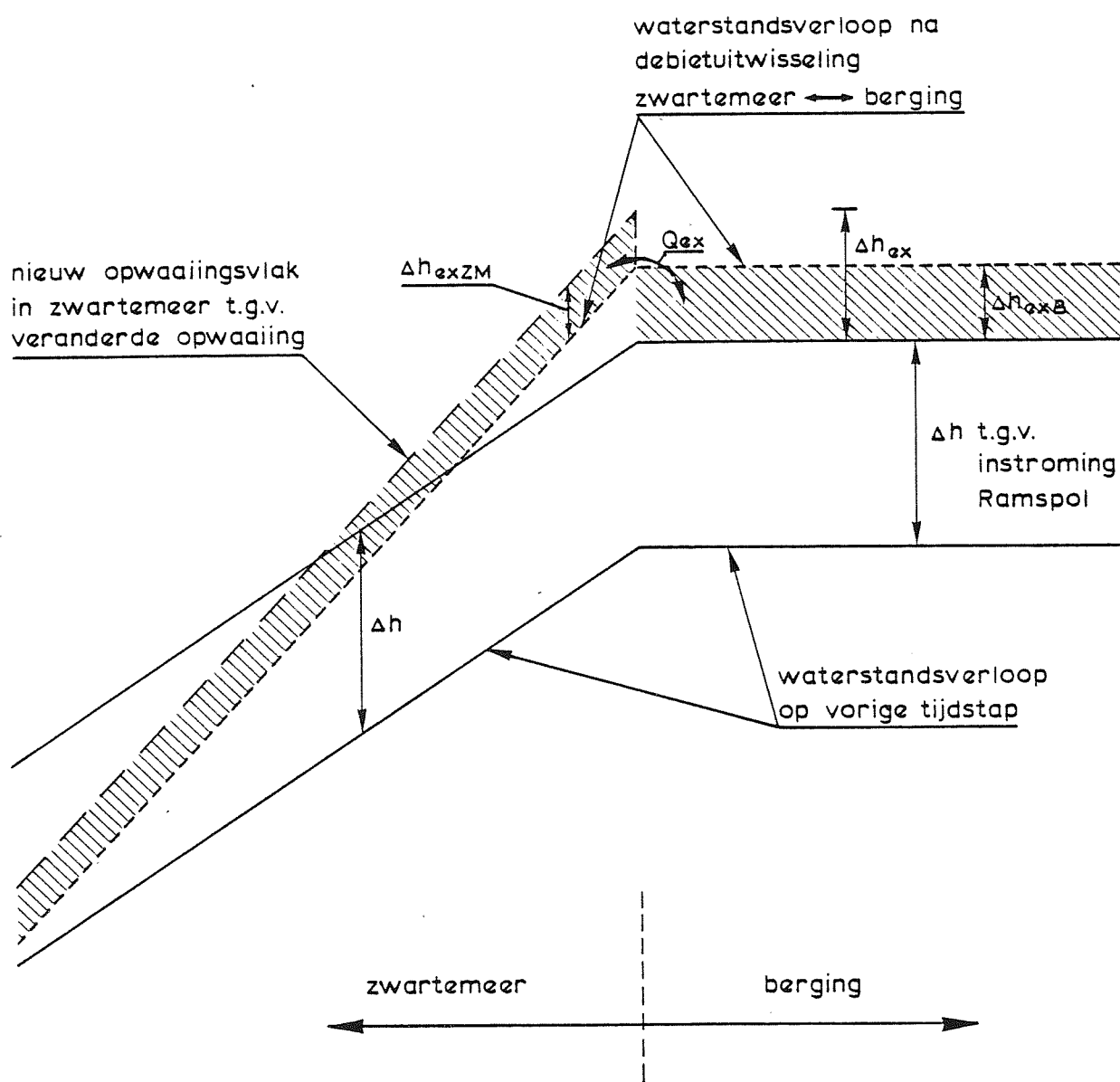


PRINCIPESCHETS OPWAAIING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG. 4

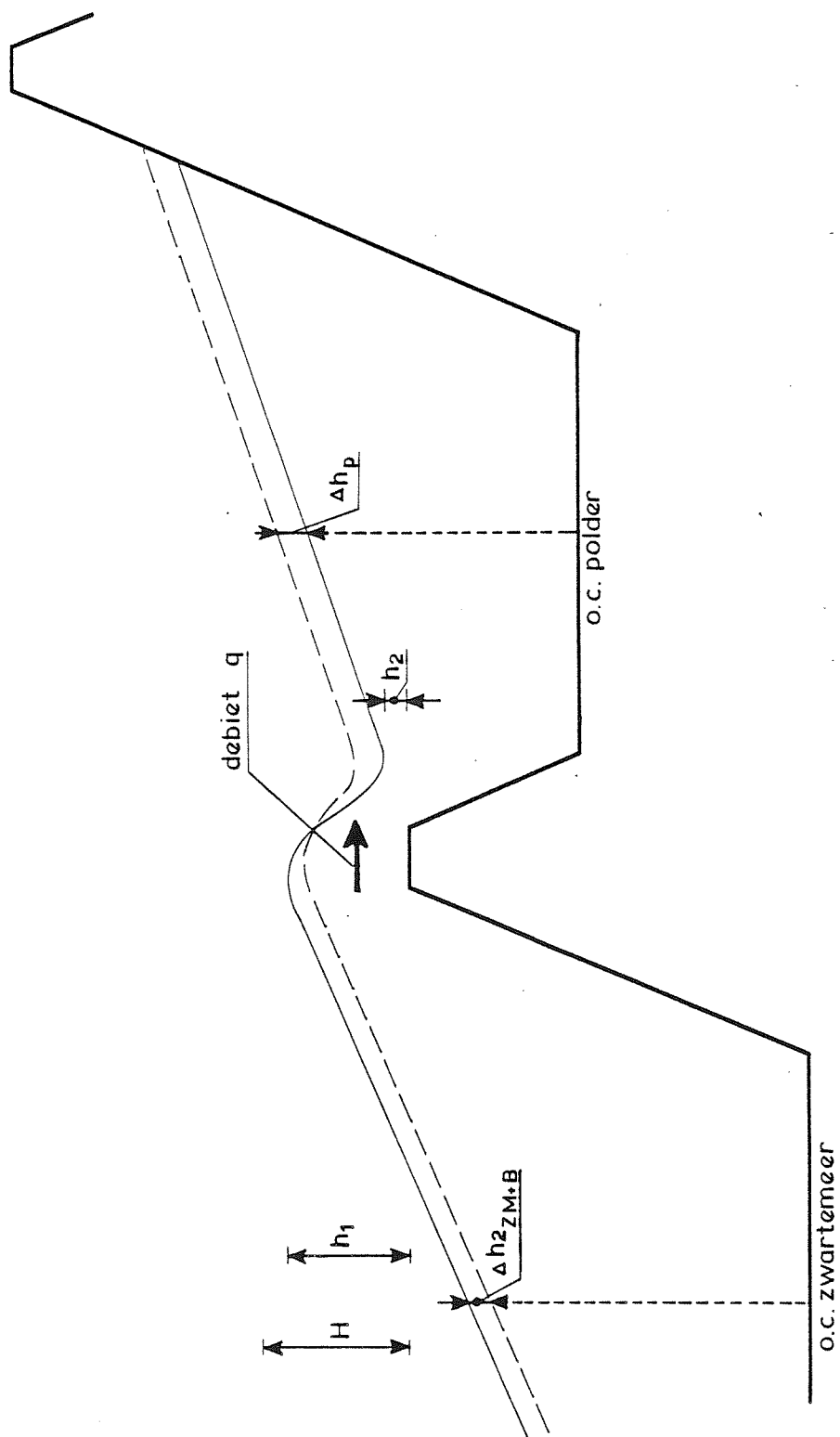


PRINCIPESCHETS UITWISSELINGSDEBIET
ZWARTEMEER ↔ BERGING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG. 5

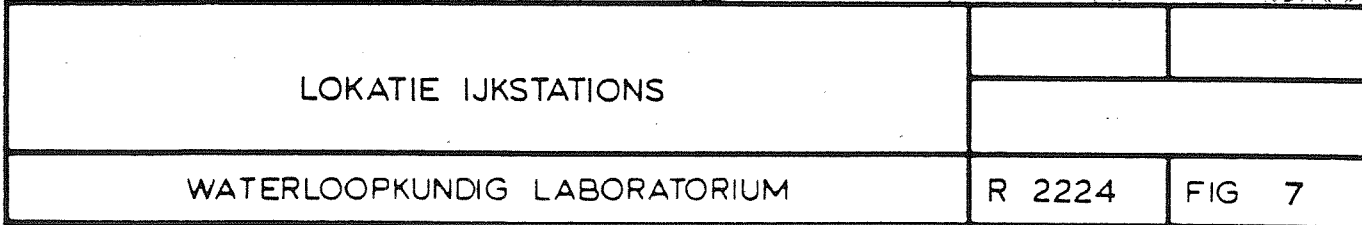


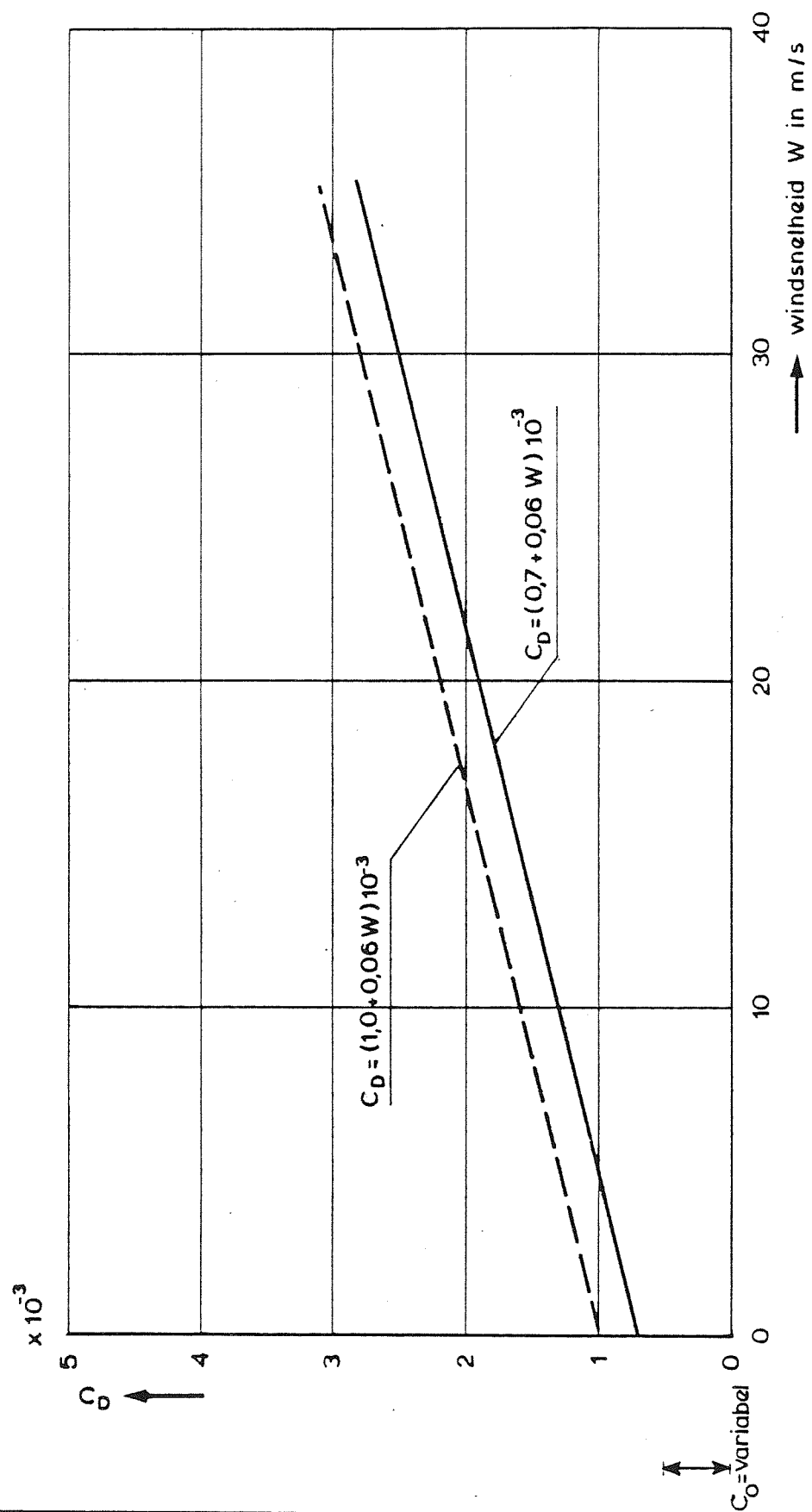
PRINCIPESCHETS INUNDATIE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 2224

FIG. 6



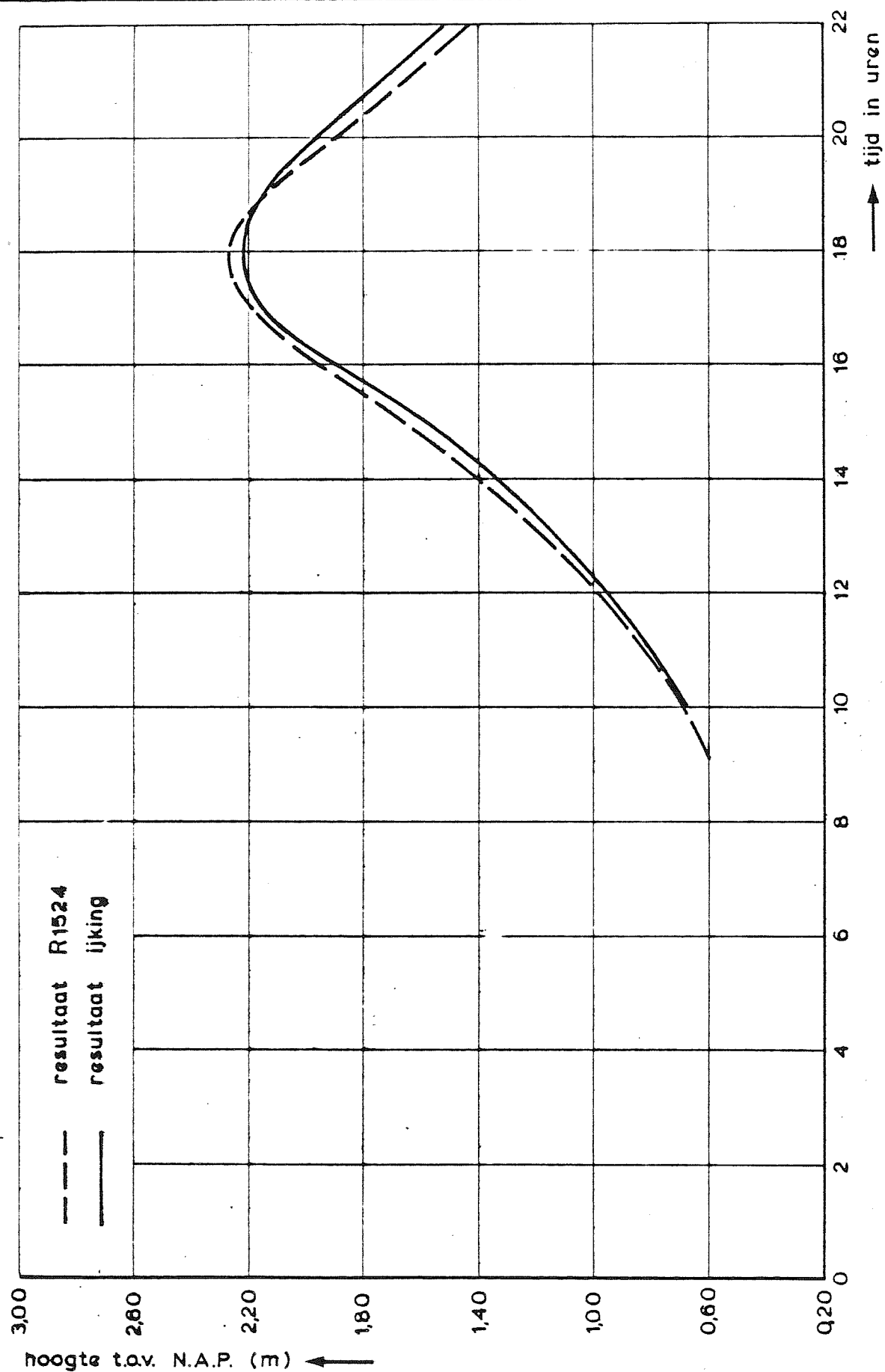


VERLOOP WINDSCHUIFSPANNINGSKOEFFICIENT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG. 8

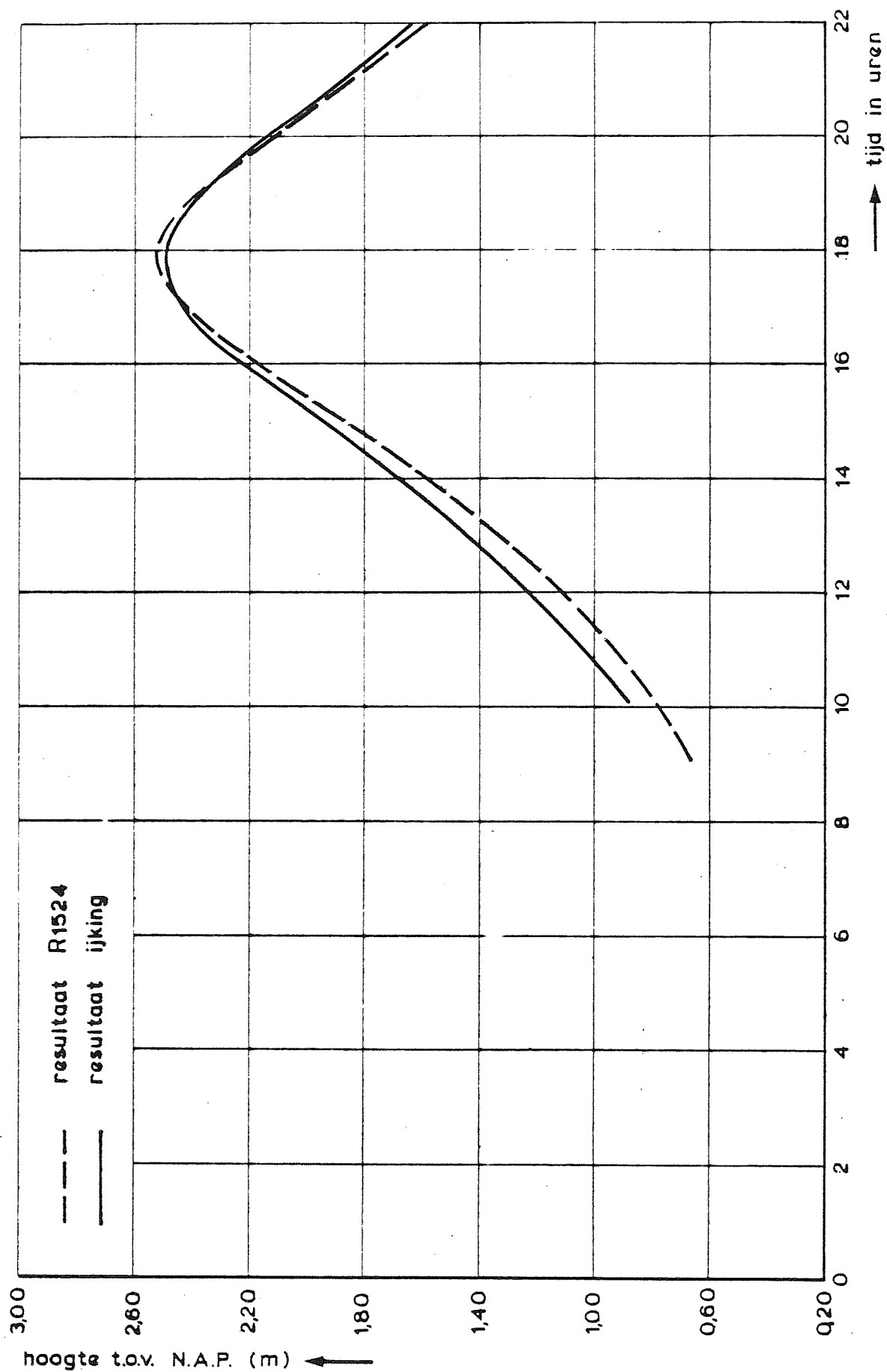


RESULTAAT IJKINGSBEREKENING IJKPUNT A
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-3}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG 9

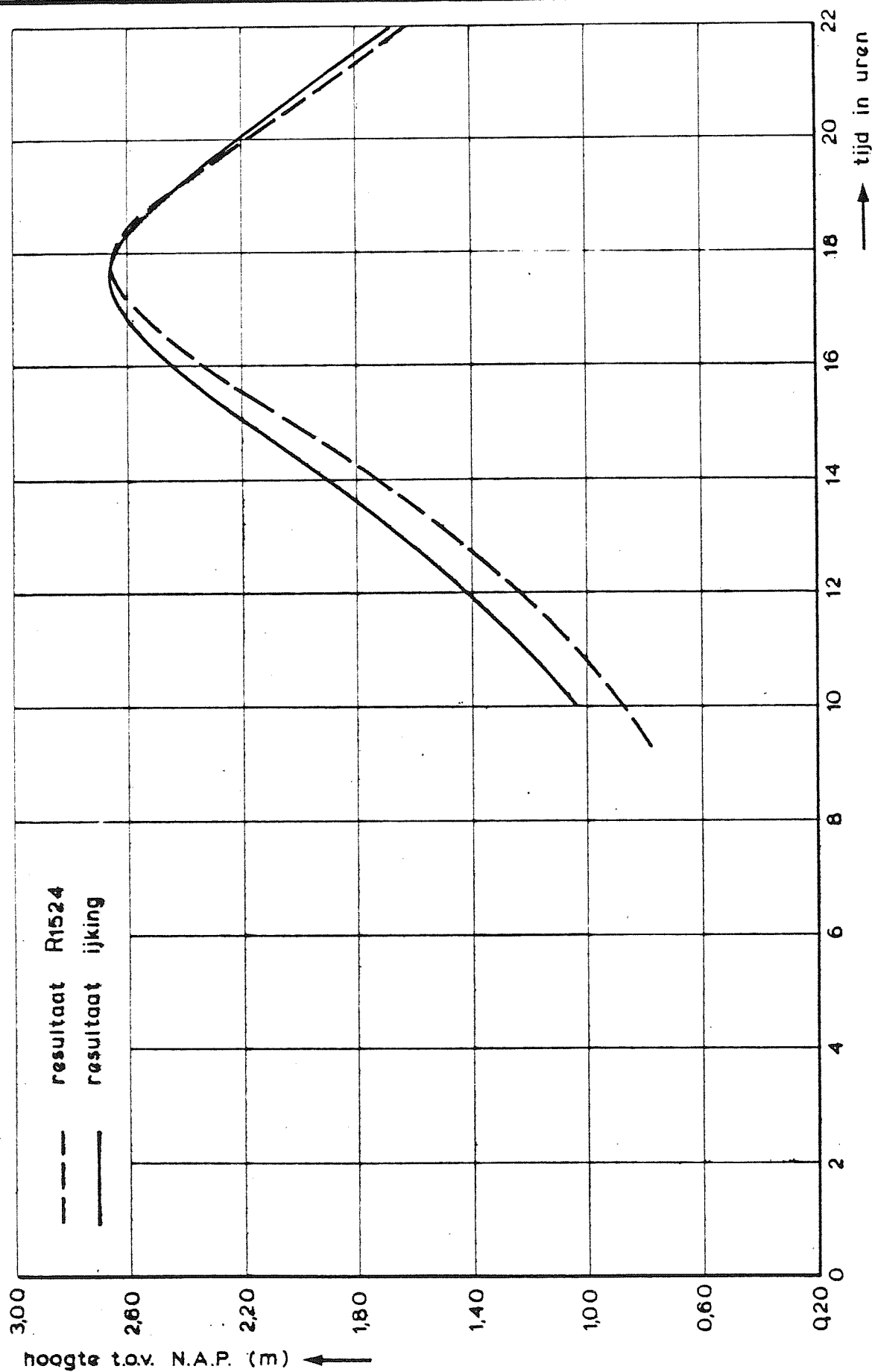


RESULTAAT IJKINGSBEREKENING IJKPUNT B
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-3}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG 10

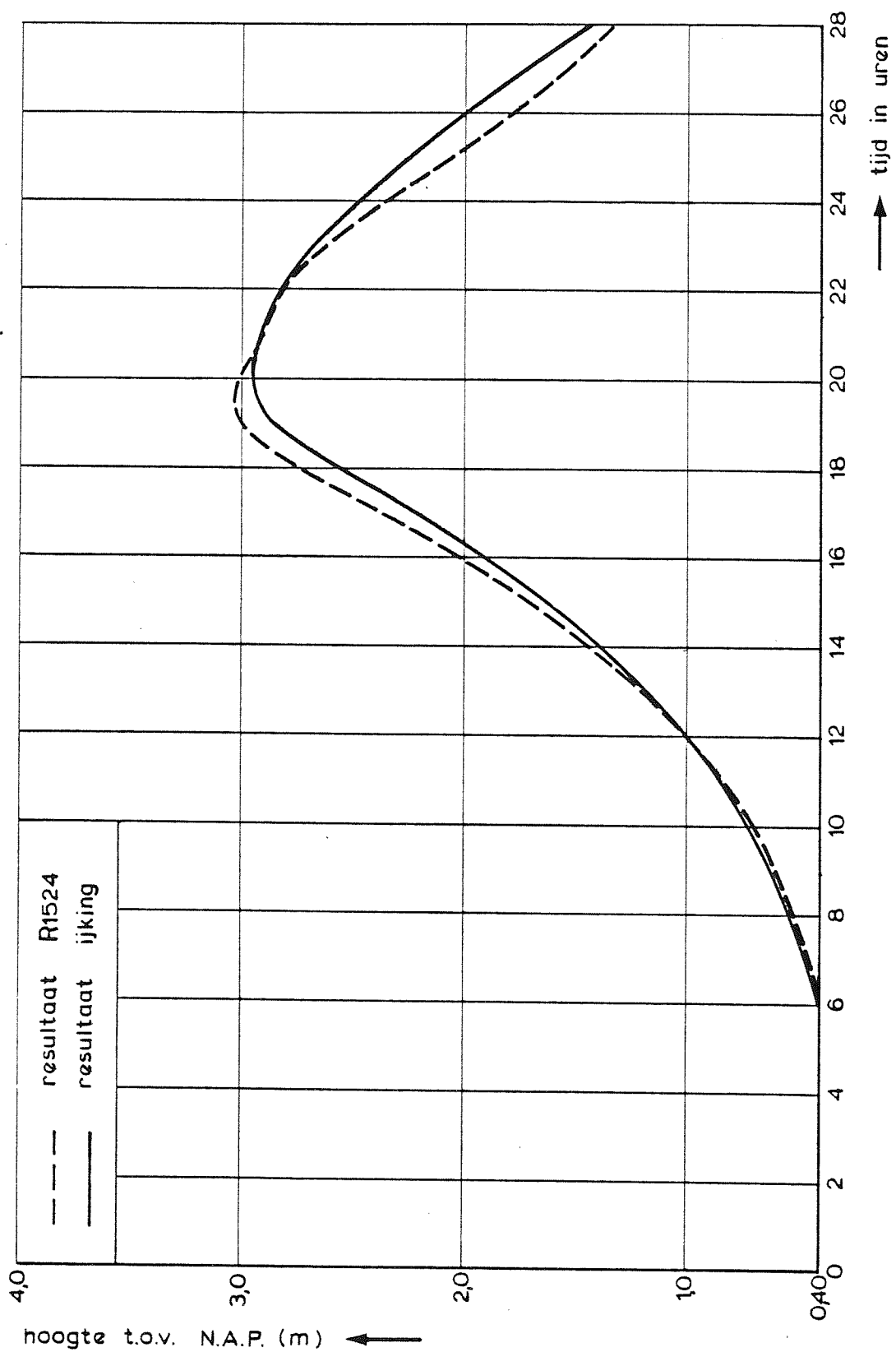


RESULTAAT IJKINGSBEREKENING IJKPUNT C
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-3}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG 11

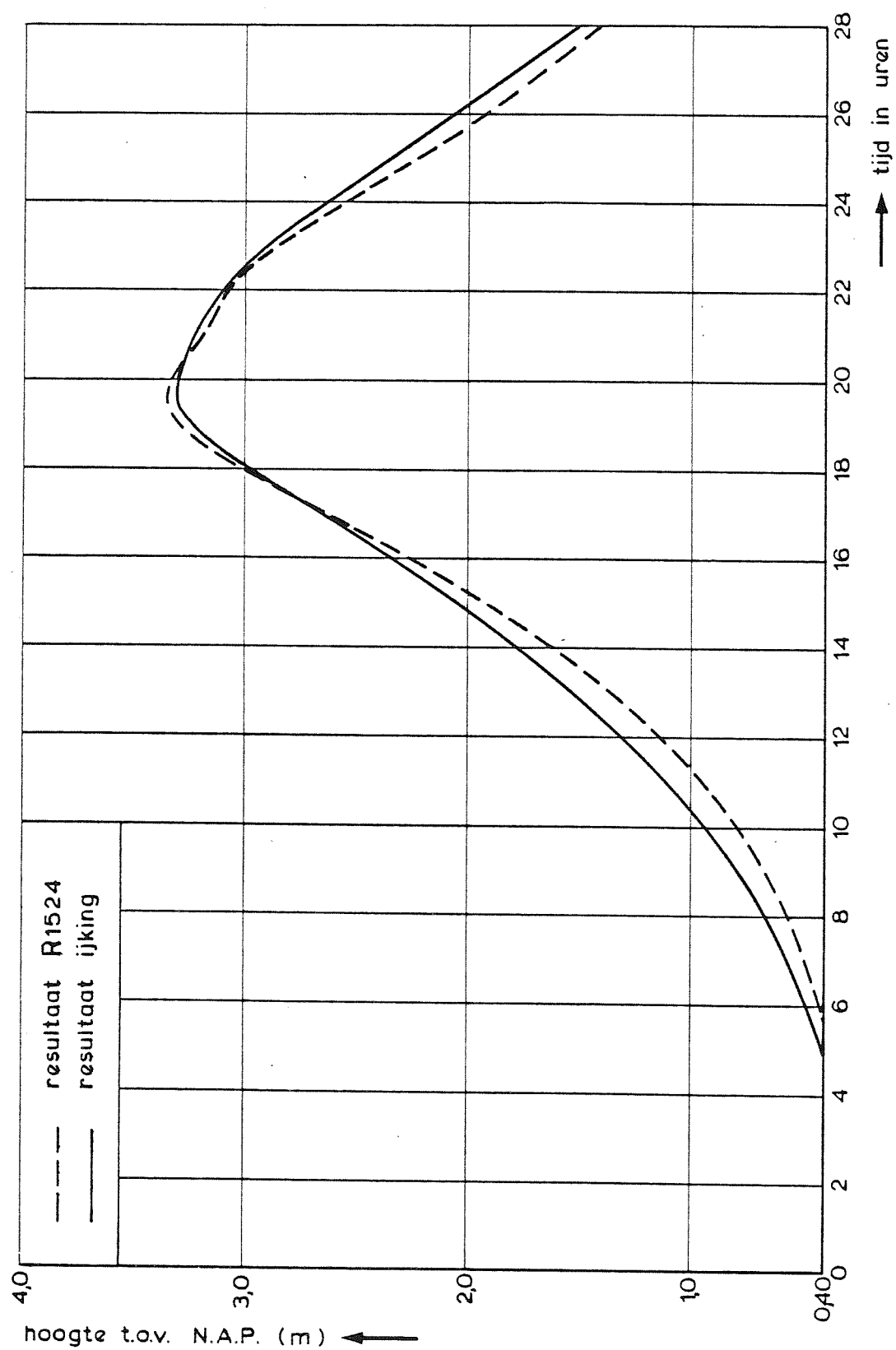


RESULTAAT VERIFIKATIEBEREKENING IJKPUNT A
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-4}

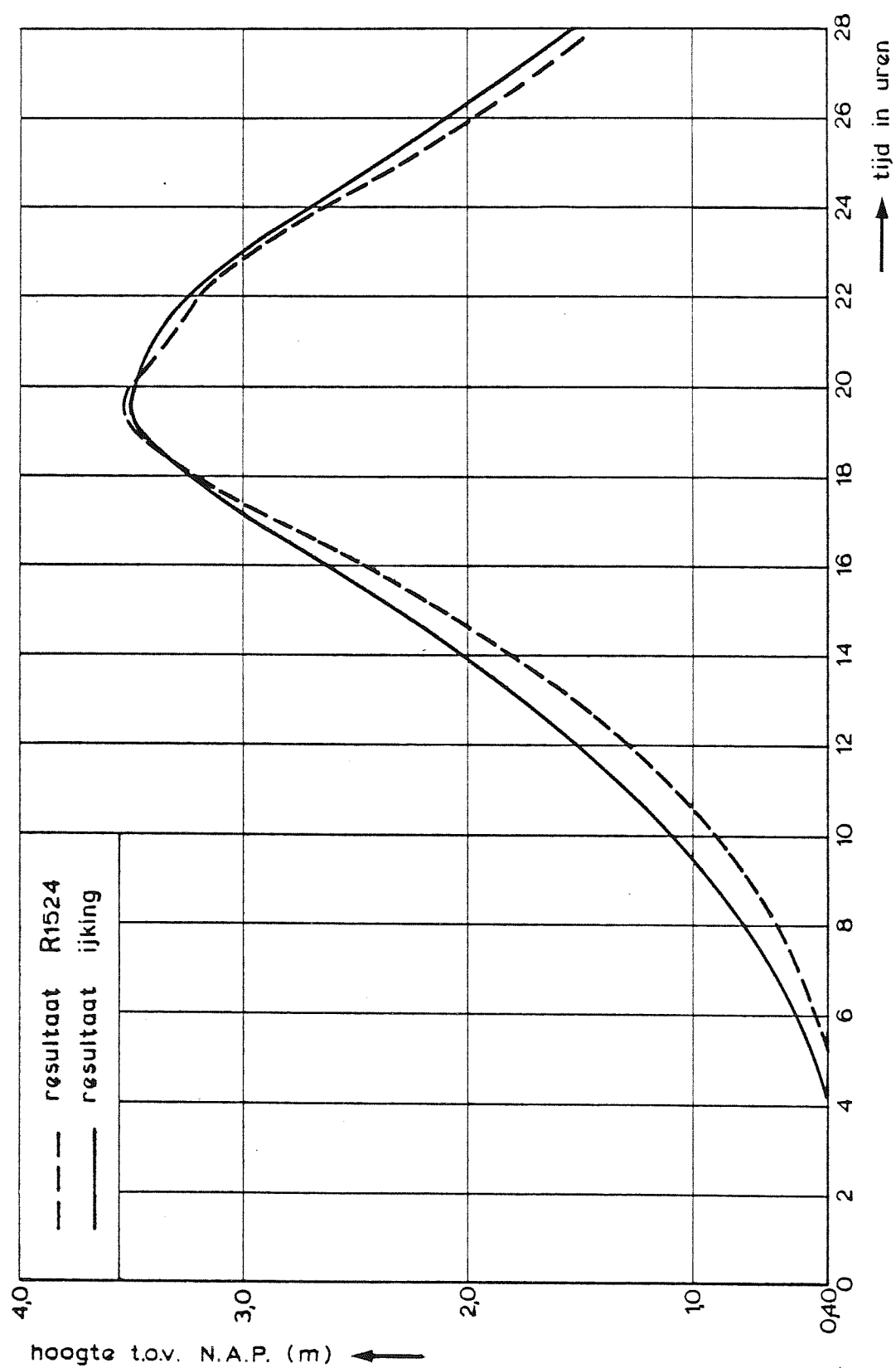
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

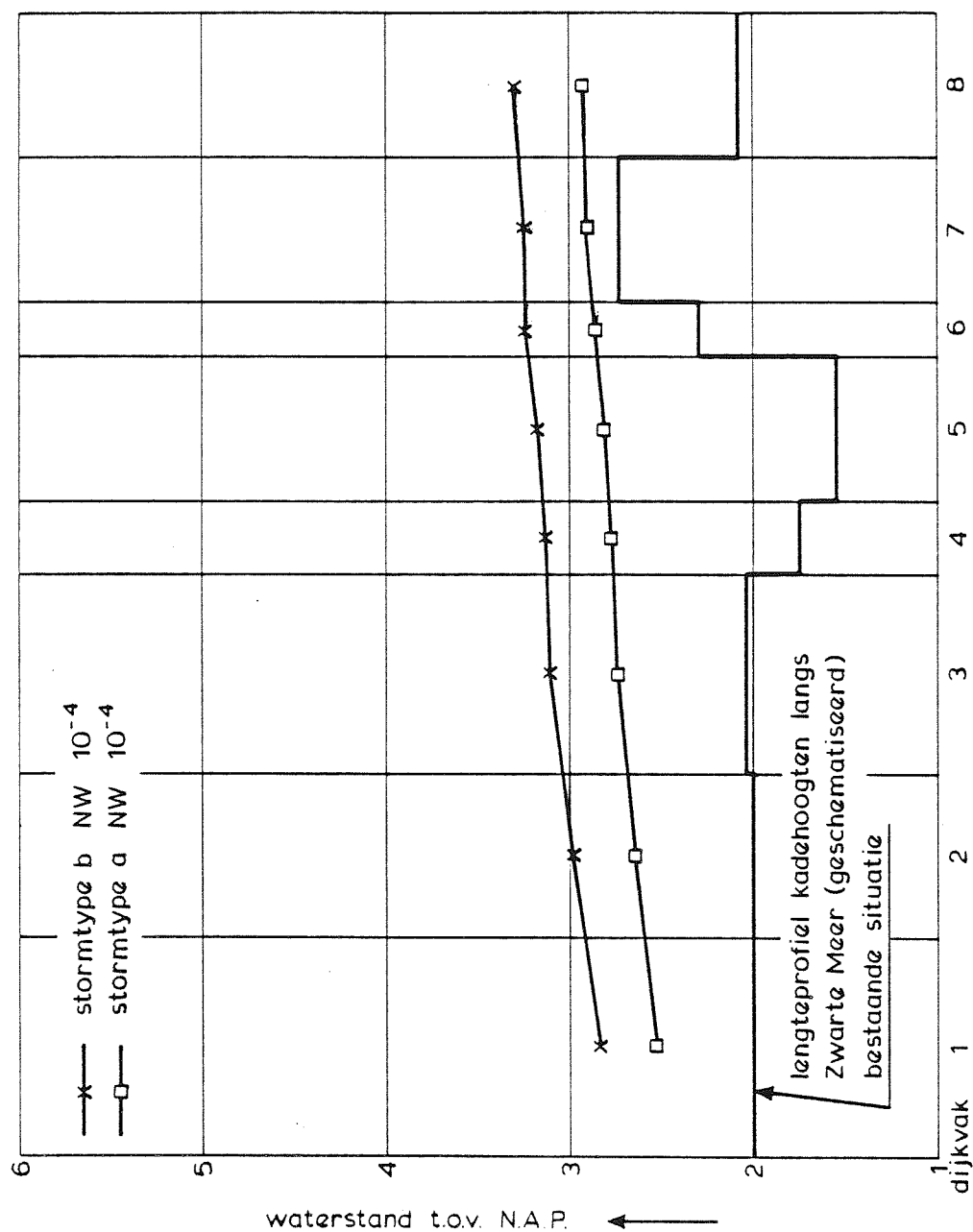
FIG. 12



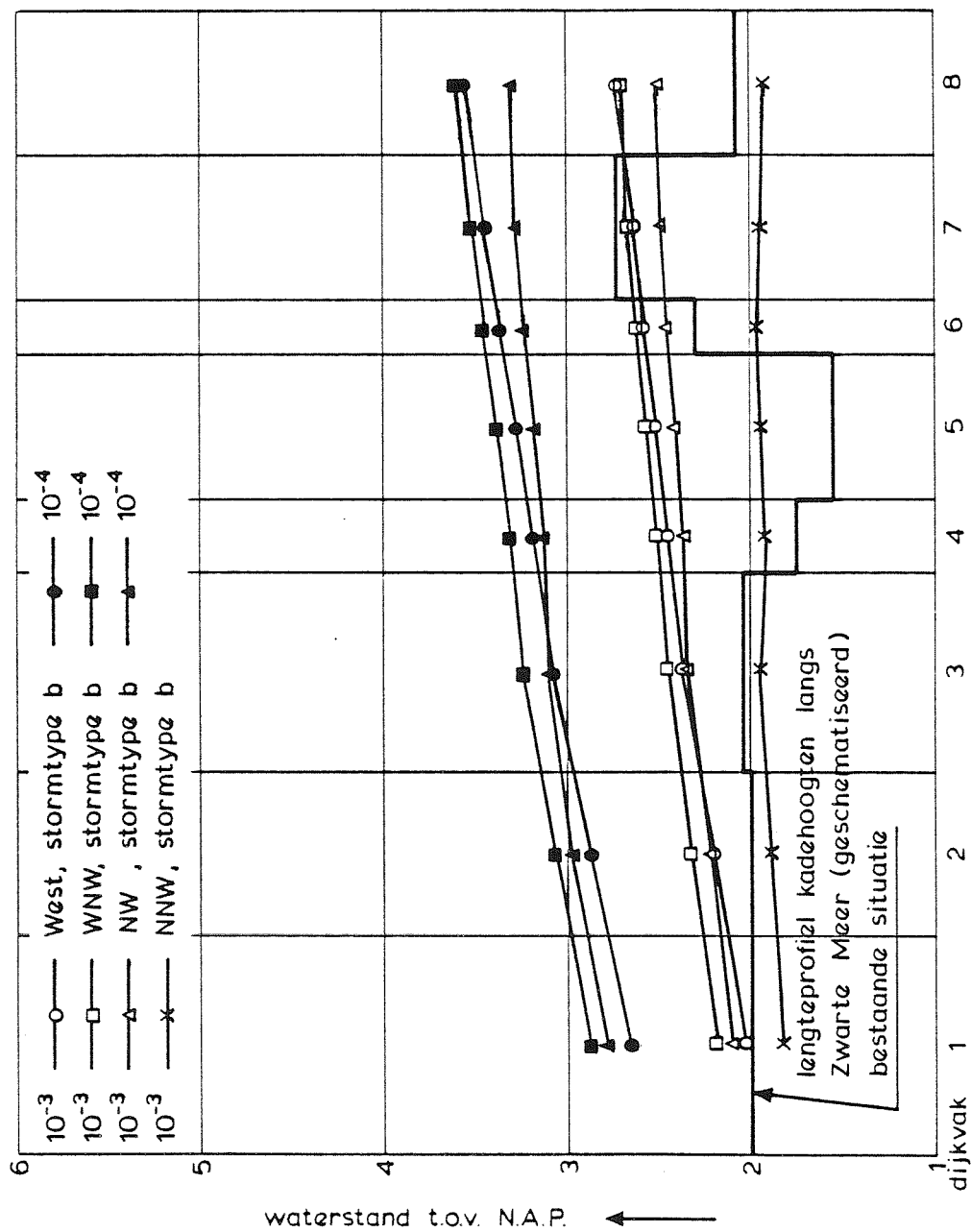
RESULTAAT VERIFIKATIEBEREKENING IJKPUNT B
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-4}



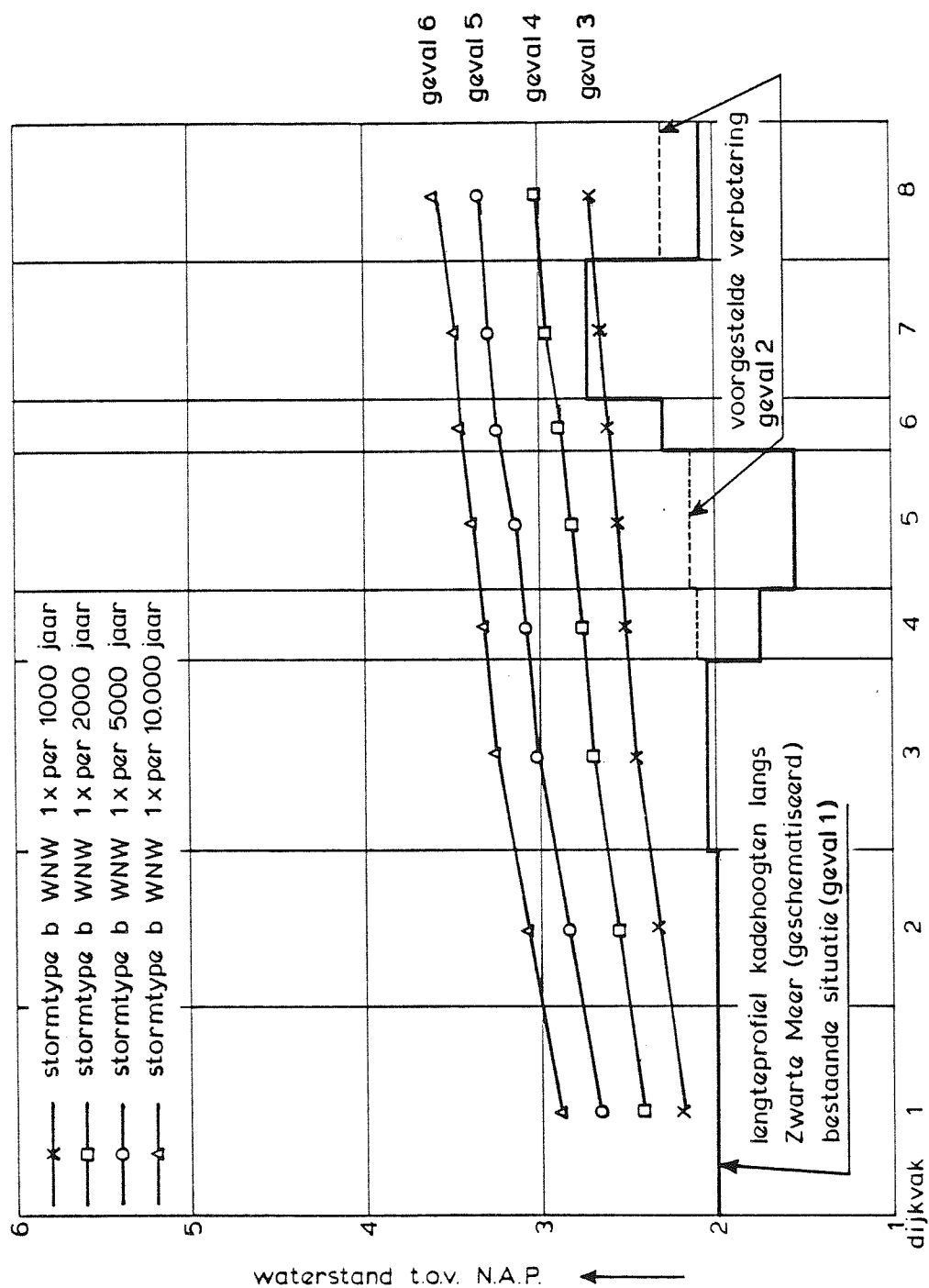
RESULTAAT VERIFIKATIEBEREKENING IJKPUNT C
STORMTYPE B, RICHTING WNW, FREQ. 10^{-4}



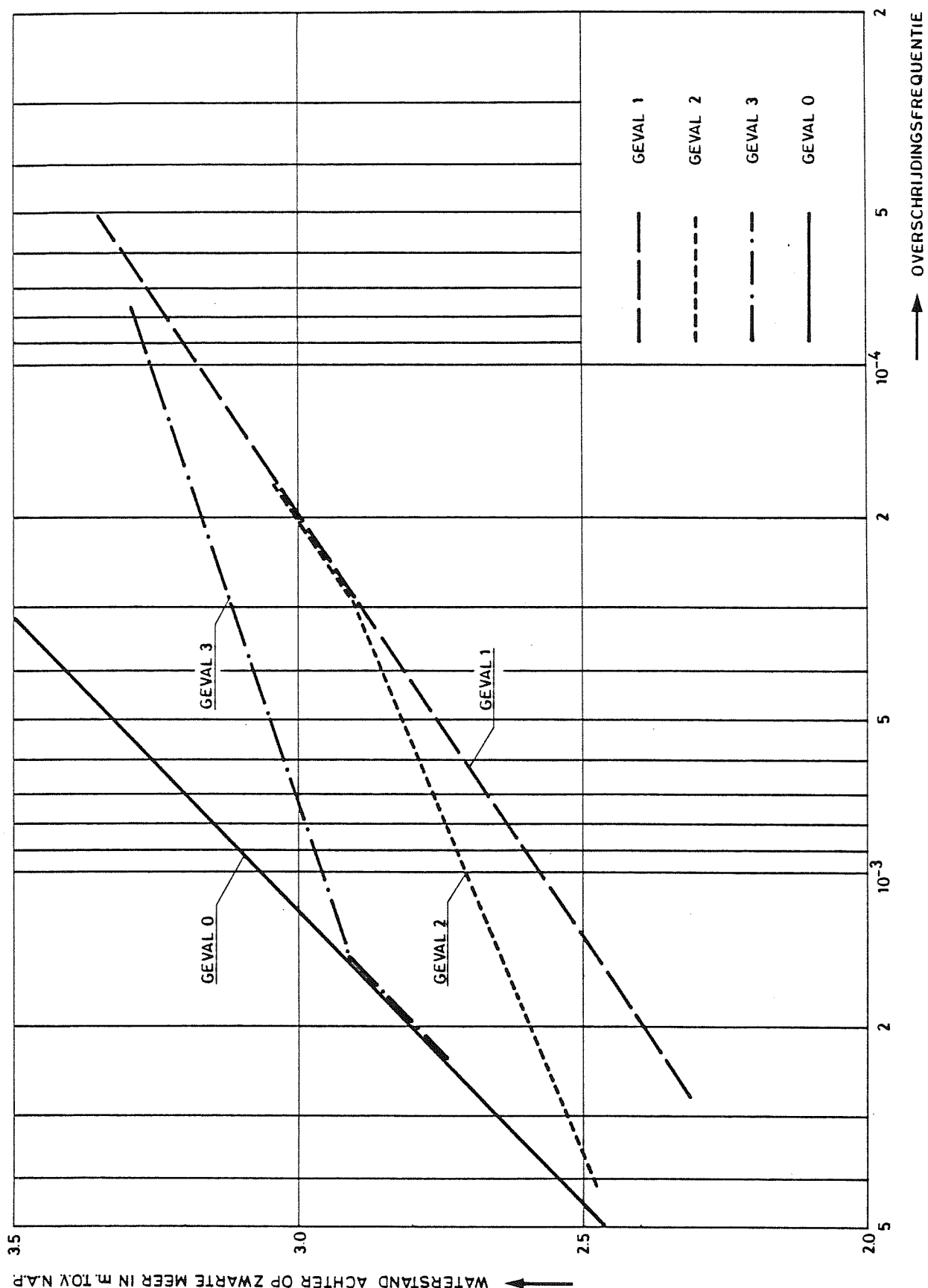
WATERSTANDEN ZWARTE MEER ; VERGELUKING
STORMTYPE a ↔ TYPE b



WATERSTANDEN ZWARTE MEER ;
 INVLOED WINDRICHTING



WATERSTANDEN ZWARTE MEER ; INVLOED
 FREQUENTIE VAN VOORKOMEN.
 TEVENS KADEHOOGTE VERBETERINGSPLAN



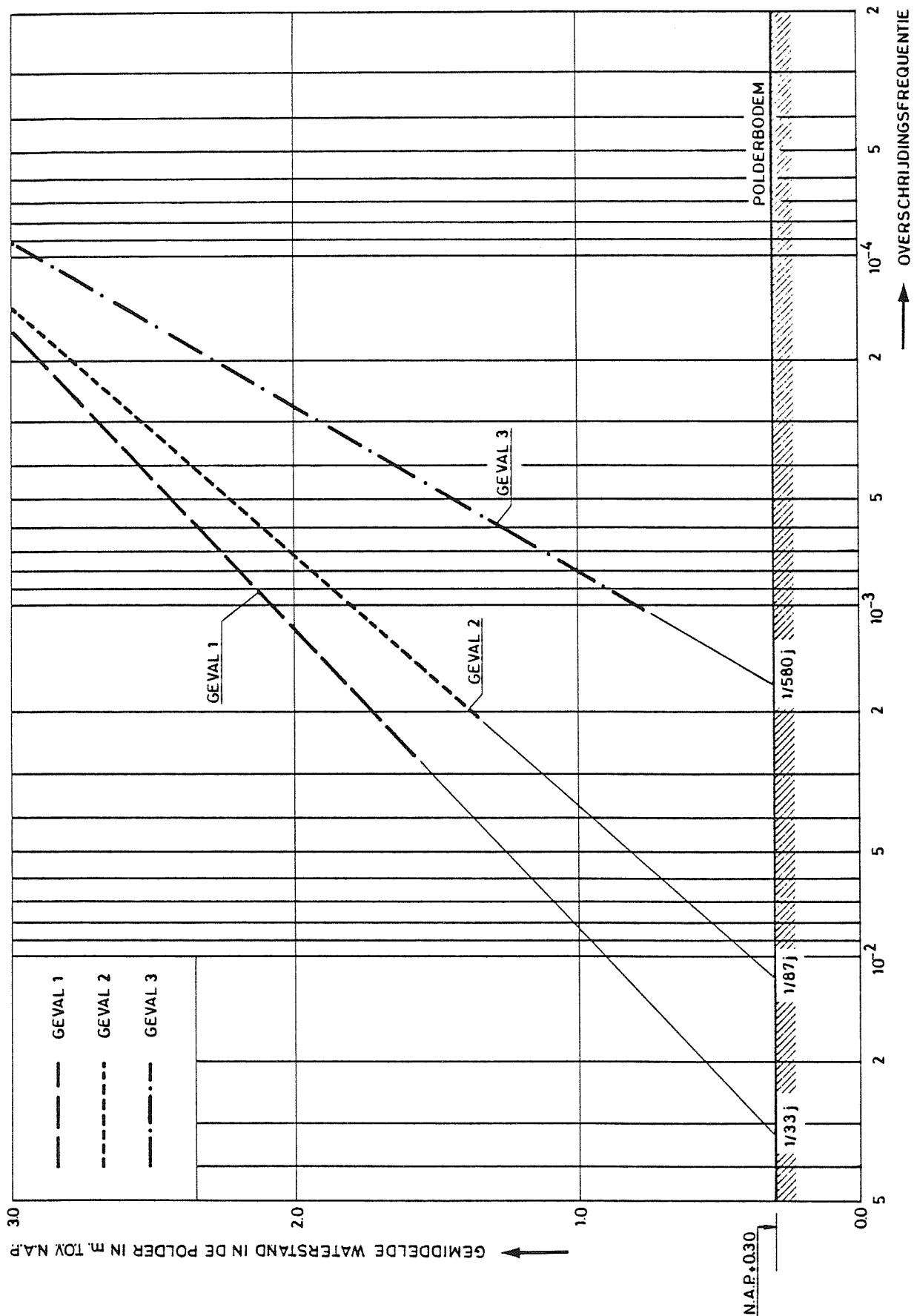
MAXIMALE WATERSTAND ACHTER OP HET ZWARTE MEER VOOR VERSCHILLENDE GEVALLEN VAN KADEVERBETERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG.19

A4



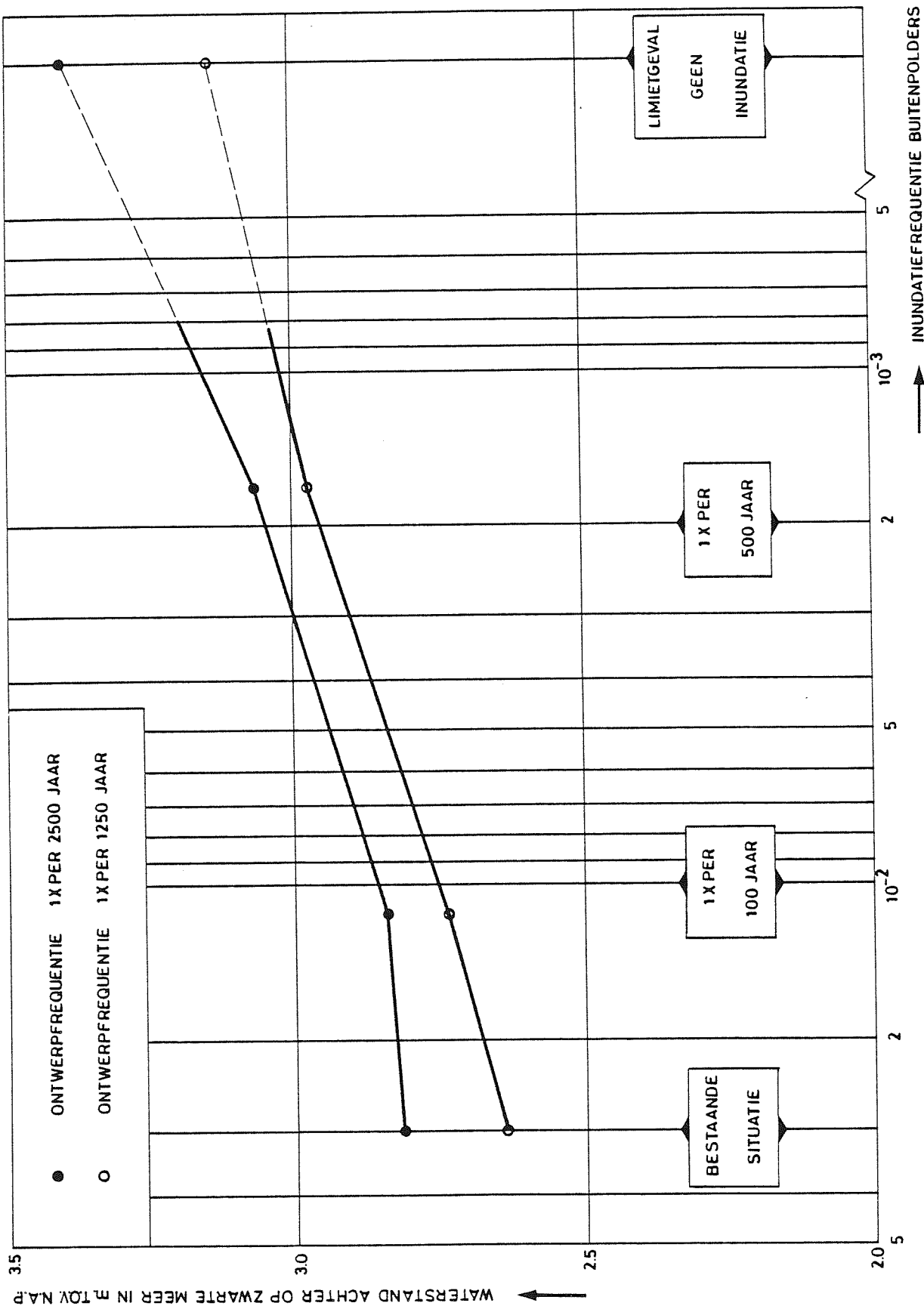
INUNDATIEDIEPTE POLDERS VOOR VERSCHILLENDE
GEVALLEN VAN KADEVERBETERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

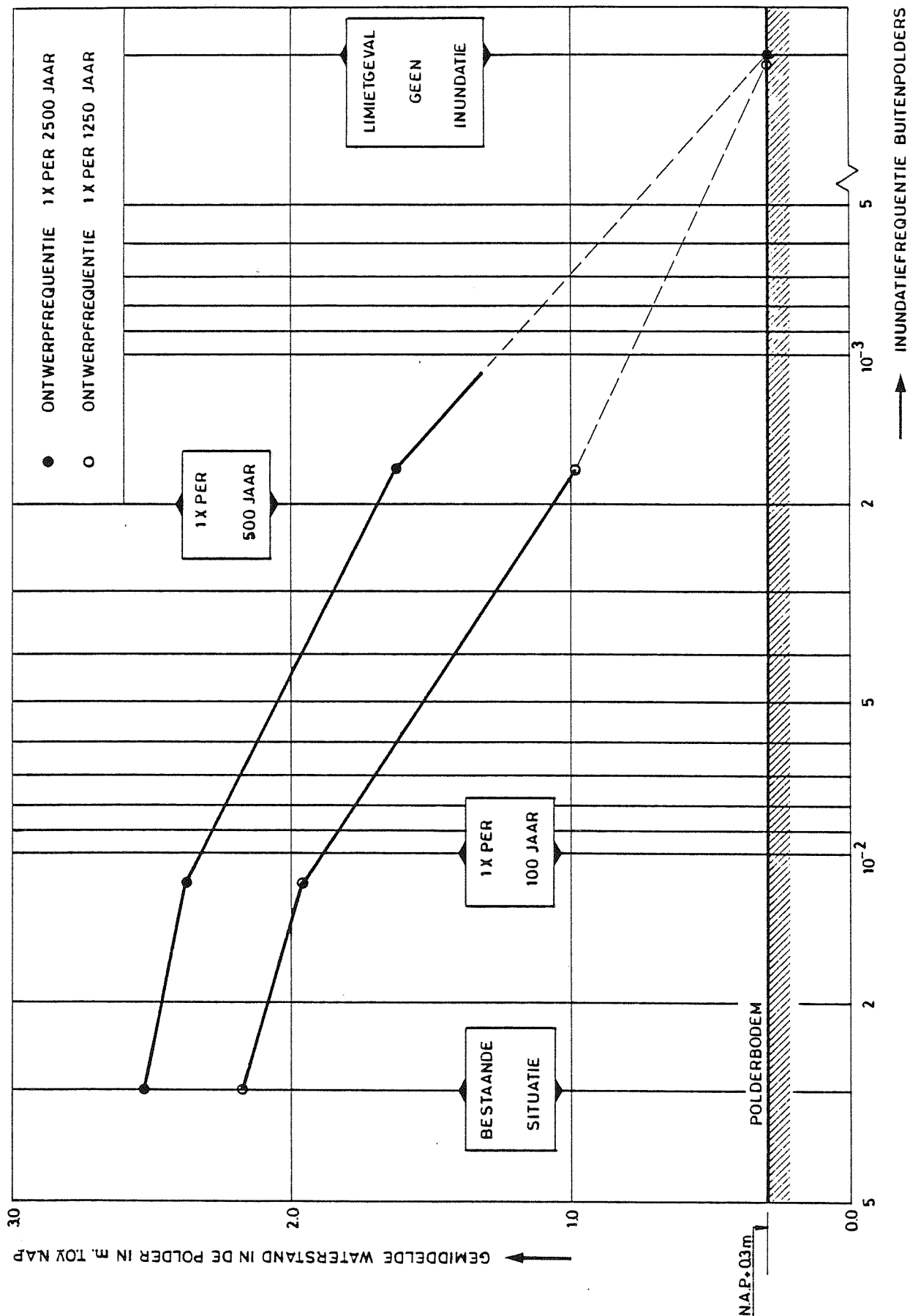
R 2224

FIG.20

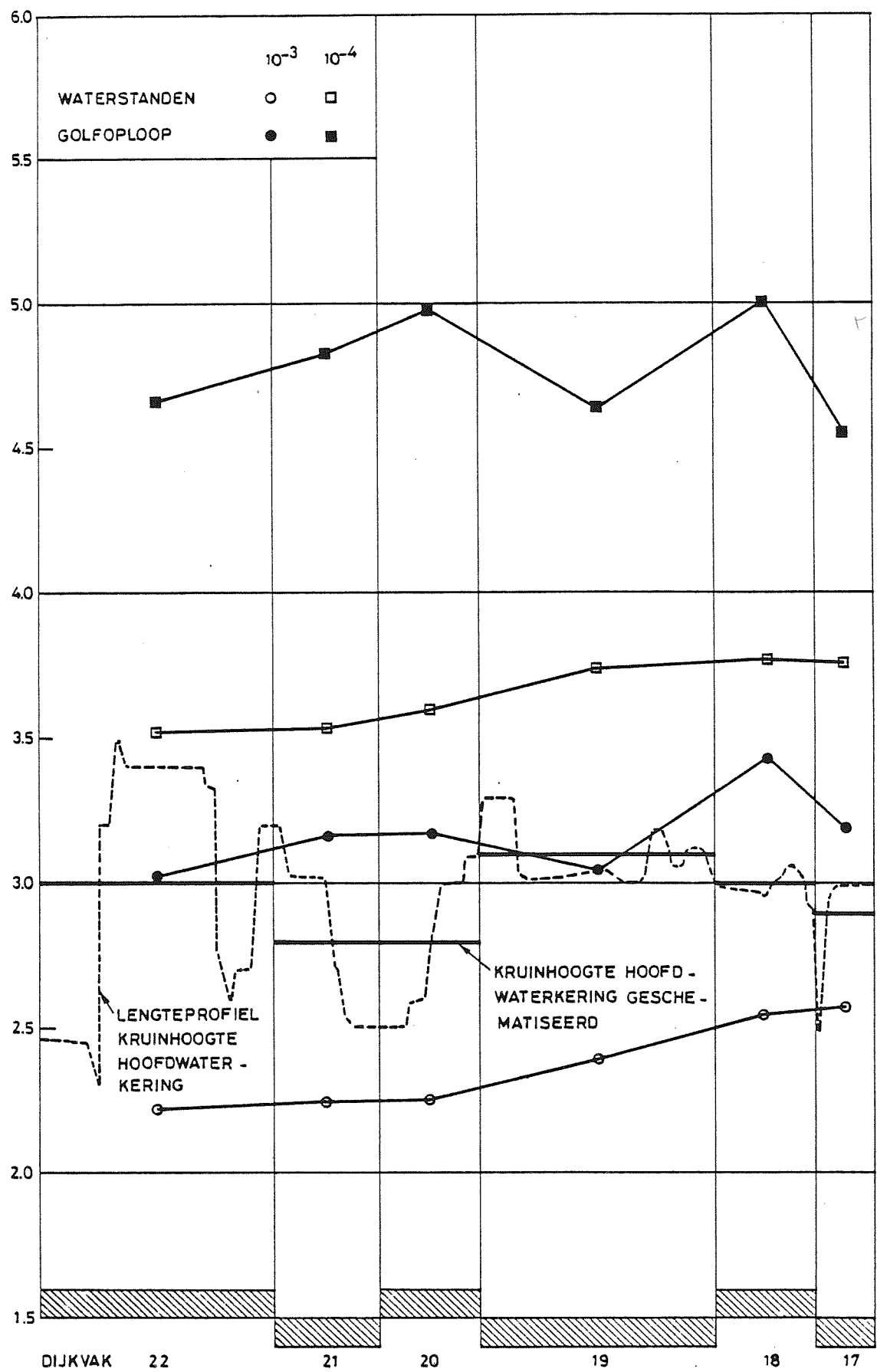
A4



WATERSTAND ACHTER OP HET ZWARTE MEER ALS
FUNKTIE VAN DE INUNDATIEFREQUENTIE VAN DE
BUITENPOLDERS



INUNDATIEDIEPTE IN DE BUITENPOLDERS ALS
FUNKTIE VAN DE INUNDATIEFREQUENTIE VAN DE
BUITENPOLDERS



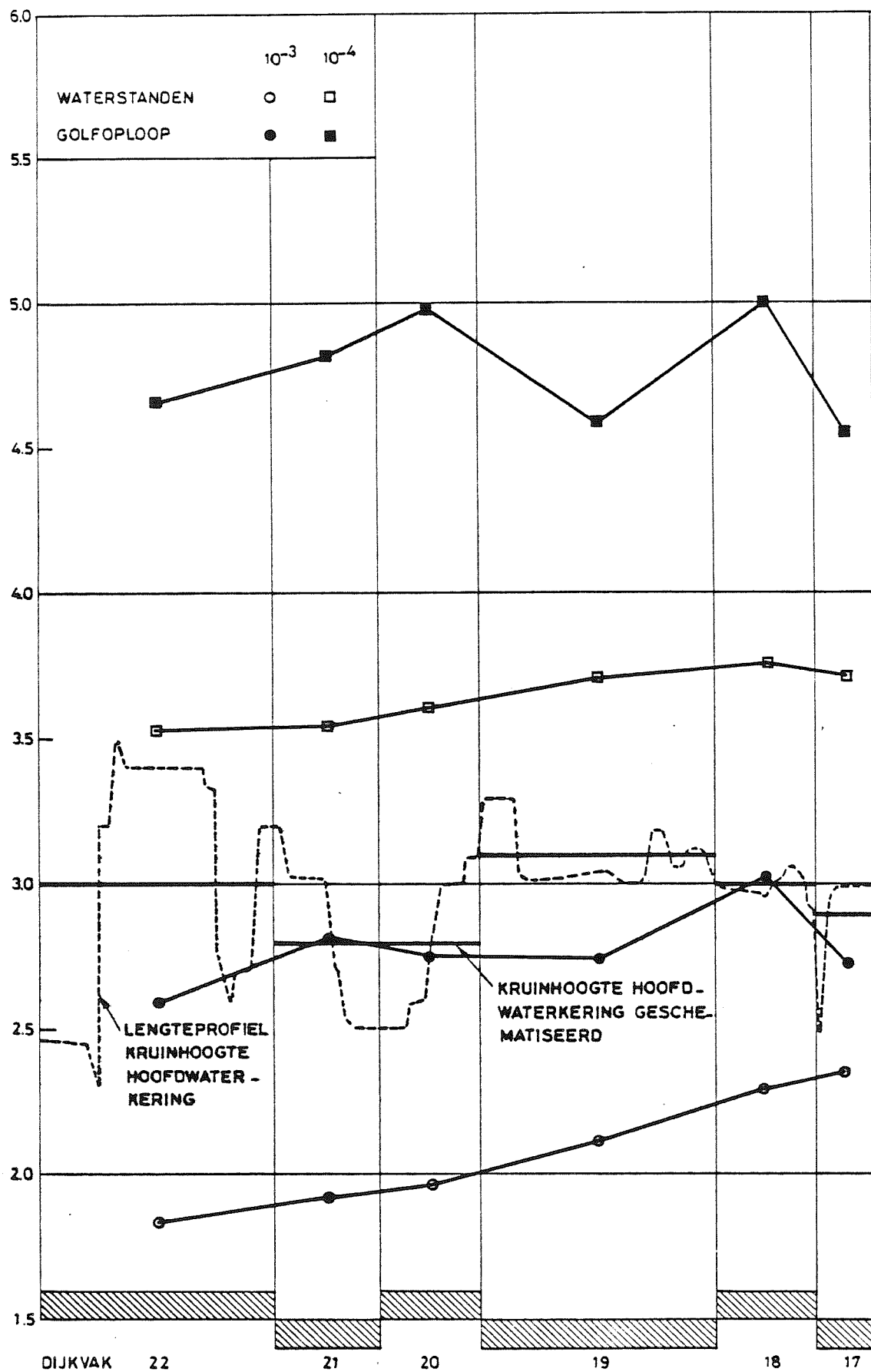
GOLFOPLOOP TEGEN DE HOOFDWATERKERING :
BESTAANDE SITUATIE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG.23

A4



GOLFOPLOOP TEGEN DE HOOFDWATERKERING :
GEVAL 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2224

FIG.24

A4

BIJLAGE 1

Typering stormverloop uit 50 jaar windmeting te Den Helder.

In het kader van een eerder door het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerde studie, R1524 [2], heeft op grond van 50 jaar windmeting te Den Helder een stormtypering plaatsgevonden. Daarbij werd zowel op basis van de originele windregistraties uit de KNMI archieven alsmede op basis van de getabeleerde uurwaarden voor windsnelheid en windrichting de vorm van het windsnelheids- en windrichtingsverloop, alsmede de bijkomende maximale windsnelheid geparametriseerd. Genoemde typering heeft alleen plaatsgevonden voor stormen uit de sektor tussen West en Noord. In overleg met het KNMI zijn deze stormen vervolgens geëxtrapoleerd naar ontwerpomstandigheden behorend bij overschrijdingsfrequenties 10^{-3} /jaar en 10^{-4} /jaar en omgerekend naar IJsselmeeromstandigheden.

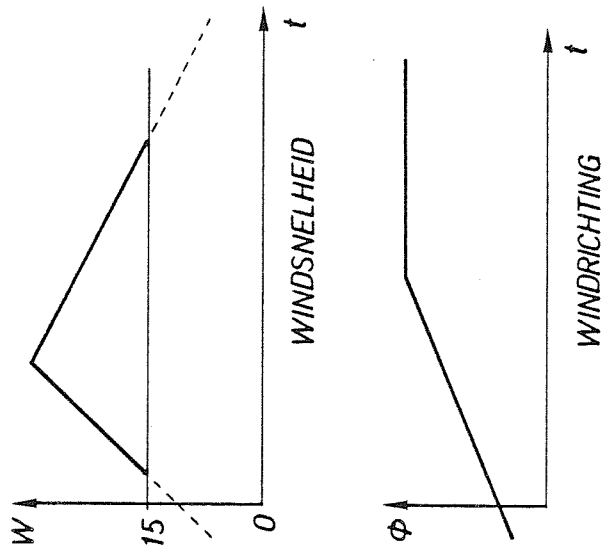
In verband met het bealng van de windrichting werden de stormen ingedeeld in sectoren van $22,5^\circ$. Voor de sektor tussen West en Noord bleek voor de verschillende richtingssectoren van $22,5^\circ$ (West, WNW, NW en NNW) onderling geen significant verschil te bestaan. Bij de stormanalyse bleken 3 verschillende typen stormen te kunnen worden onderscheiden.

Een ontwerpstorm wordt dan dus bepaald door:

- overschrijdingsfrequentie
- stormtype
- windrichting (d.i. de windrichting, als veelvoud van $22,5^\circ$), die optreedt op het moment dat de windsnelheid (voor het eerst) maximaal is.

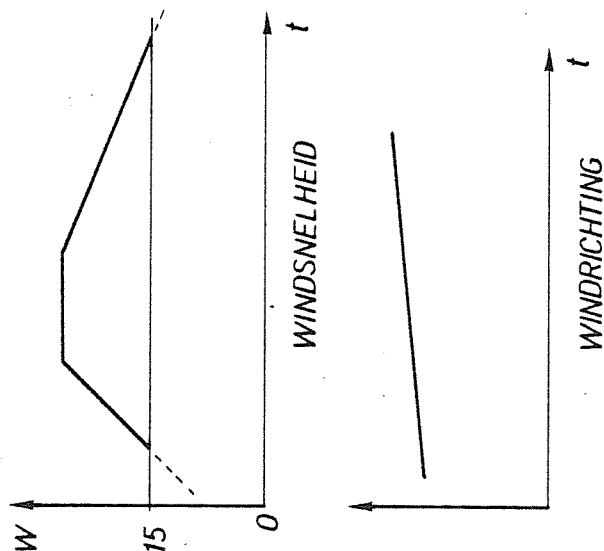
In het hierna volgende wordt een schematische weergave gegeven van de verschillende typen en worden de karakteristieken van deze 3 storm- typen voor ontwerpomstandigheden (10^{-3} en 10^{-4} /jaar) gegeven. Voor een gedetailleerde beschrijving van de stormtypering wordt verwezen naar het genoemde WL-rapport R1524 [2].

TYPE a



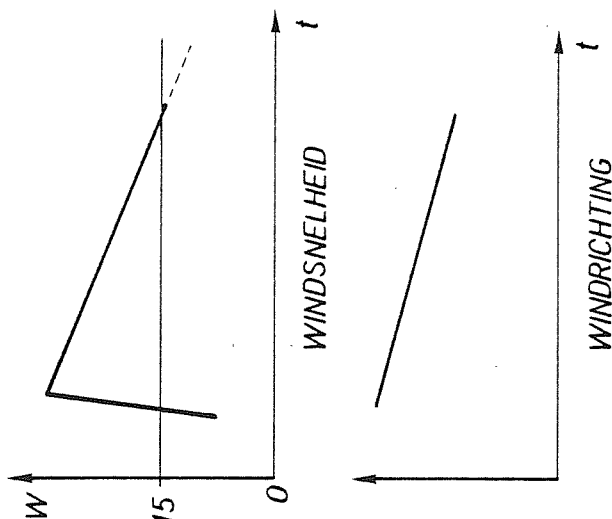
- WINDSNELHEID HEEFT
DUIDELIJKE PIEK
- WINDRICHTING RUIJT VR'J
SNEL EN BLIJFT DAARNA
CONSTANT

TYPE b



- MAX. WIND HOUDT GEDURENDE
ENIGE UREN AAN
- WINDRICHTING RUIJT ZEER
GELEIDELIJK

TYPE c



- ZEER STEILE VOORFLANK
- WINDRICHTING KRIMPT
VANUIT NOORD

OVERZICHT STORMTYPEN

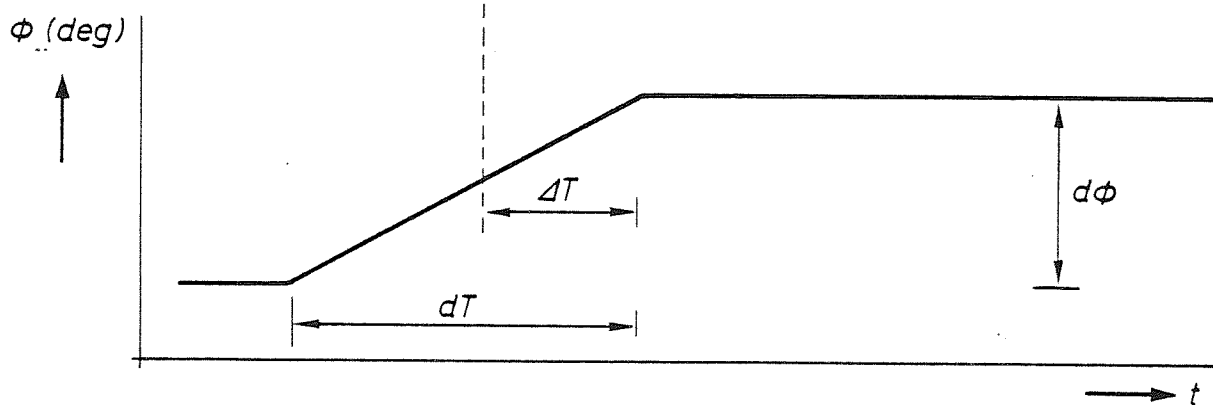
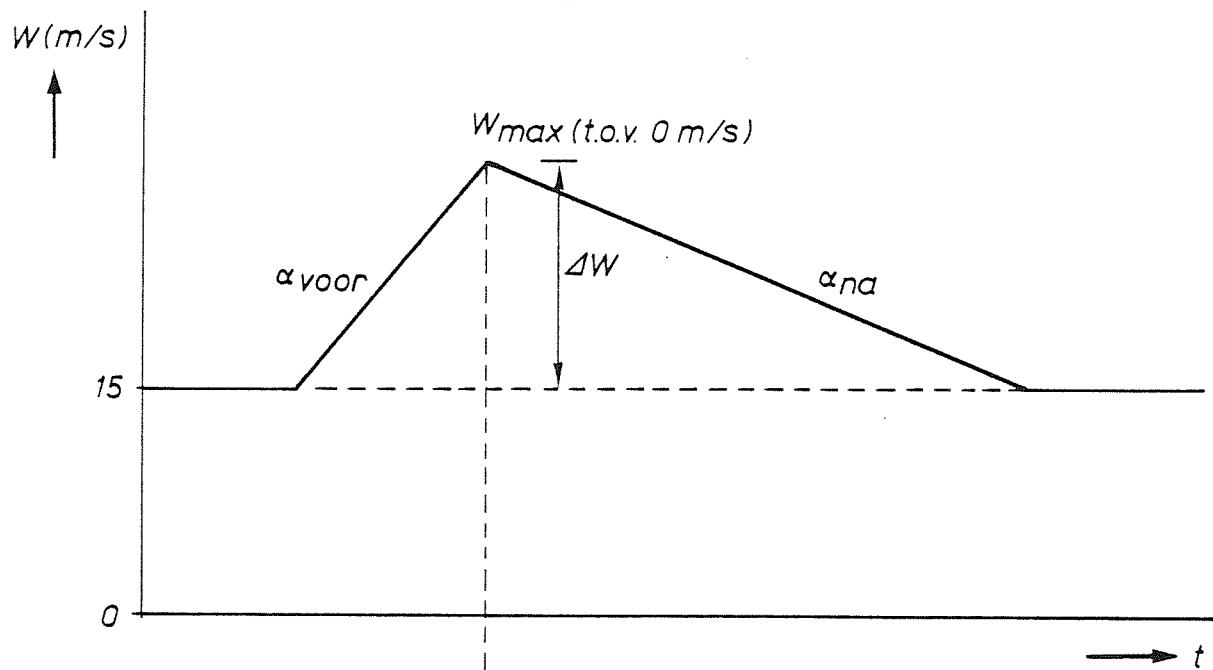
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R2224 -1004

FIG. A0



KARAKTERISERING STORM TYPE α

WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R2224 - 1005

FIG. A1

Invoergegevens voor stormen van type a

Windrichting

$\Delta T_{\text{gem.}}$	0.056 uur
$d\phi_{\text{gem.}}$	42,2°
$dT_{\text{gem.}}$	2,16 uur
$d\phi/dT_{\text{gem.}}$	22,5 graden per uur

Windsnelheid (voor een sektor van 22,5°)

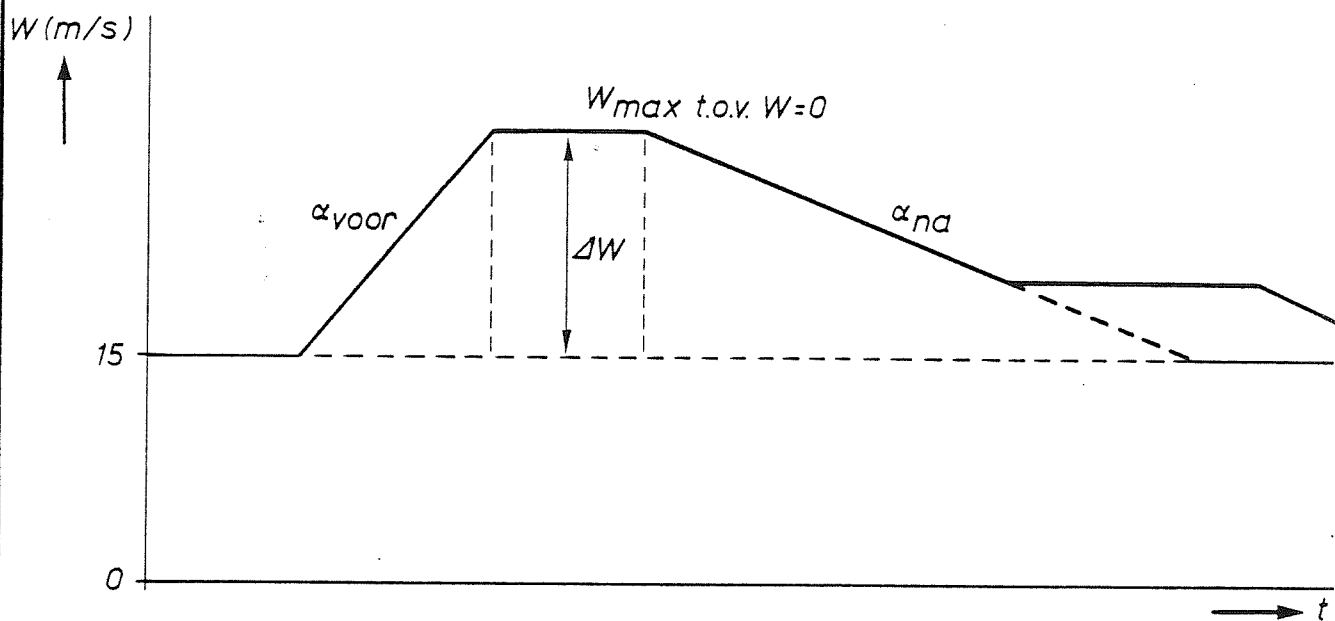
- Bij een overschrijdingsfrequentie van	10^{-3} jr^{-1}
$W_{\text{max.}}$ (Den Helder, gemeten)	31,9 m/s
α_{voor}	3,25 m/s/uur
α_{na}	2,25 m/s/uur
- Bij een overschrijdingsfrequentie van	10^{-4} jr^{-1}
$W_{\text{max.}}$ (Den Helder, gemeten)	36,7 m/s
α_{voor}	3,75 m/s/uur
α_{na}	2,50 m/s/uur

Voor IJsselmeeromstandigheden

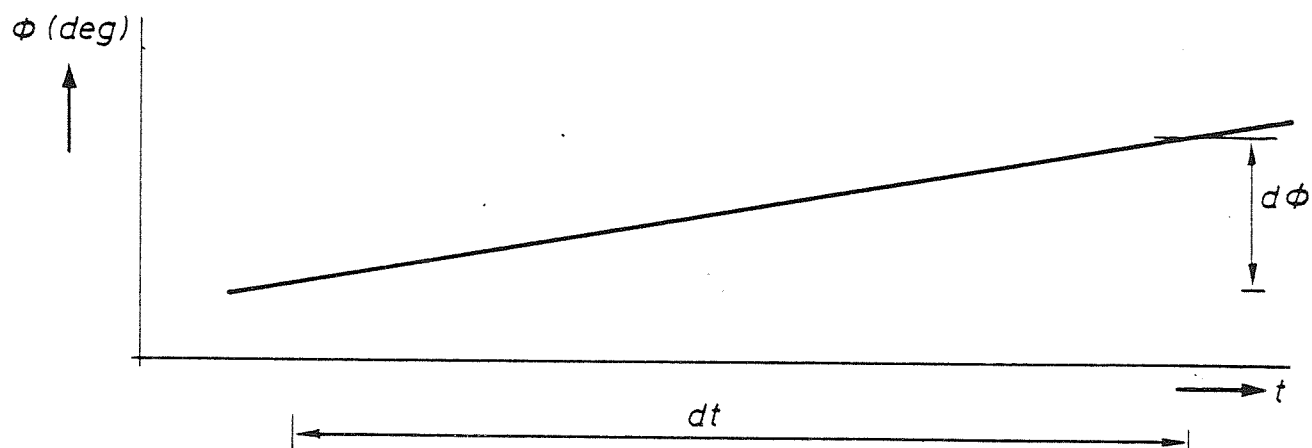
Maximale windsnelheid voor een sektor van 22,5° omgerekend naar Lelystad (gemeten) met faktor 0,94 t.o.v. Den Helder (gemeten),

- Bij een overschrijdingsfrequentie van	10^{-3} jr^{-1}
$W_{\text{max.}}$	30,0 m/s
- Bij een overschrijdingsfrequentie van	10^{-4} jr^{-1}
$W_{\text{max.}}$	34,5 m/s

Table A1: karakteristieken stormtype a



T_{voor} T_0 T_{na}



KARAKTERISERING STORM TYPE b

WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R2224 - 1006

FIG. A2

Invoergegevens voor stormen van type b

Windrichting

$d\Phi/dT$ gem. 2,78 graden per uur

Windsnelheid (voor een sektor van $22,5^\circ$)

- Bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-3}jr^{-1}
 $W_{\text{max.}}$ (Den Helder, gemeten) 31,2 m/s
 α_{voor} 1,75 m/s/uur
 T_o 2,5 uur
 α_{na} 1,75 m/s/uur

- Bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4}jr^{-1}
 $W_{\text{max.}}$ (Den helder, gemeten) 36,0 m/s
 α_{voor} 1,875 m/s/uur
 T_o 2,0 uur
 α_{na} 2,0 m/s/uur

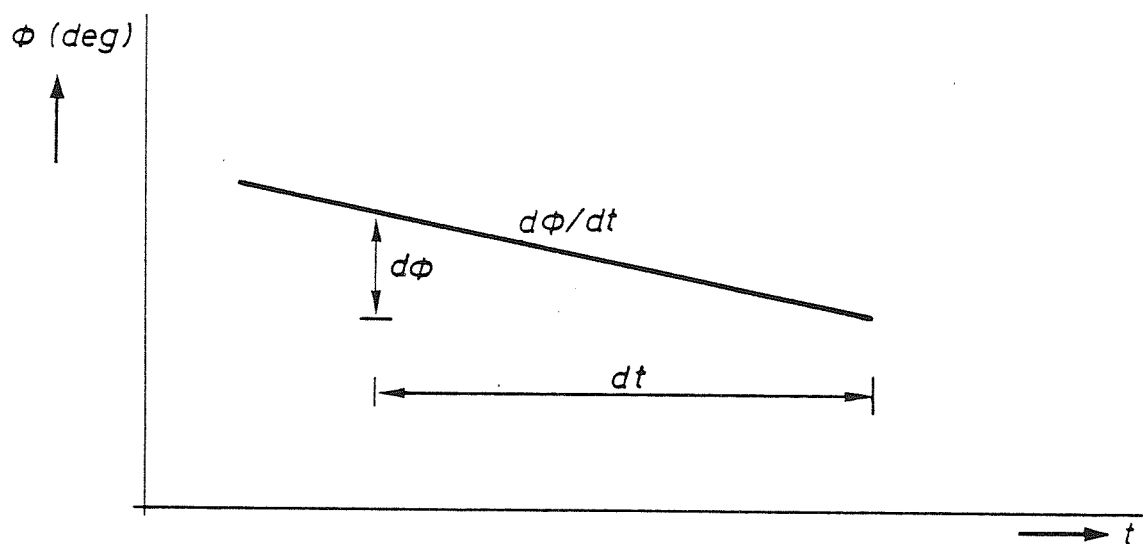
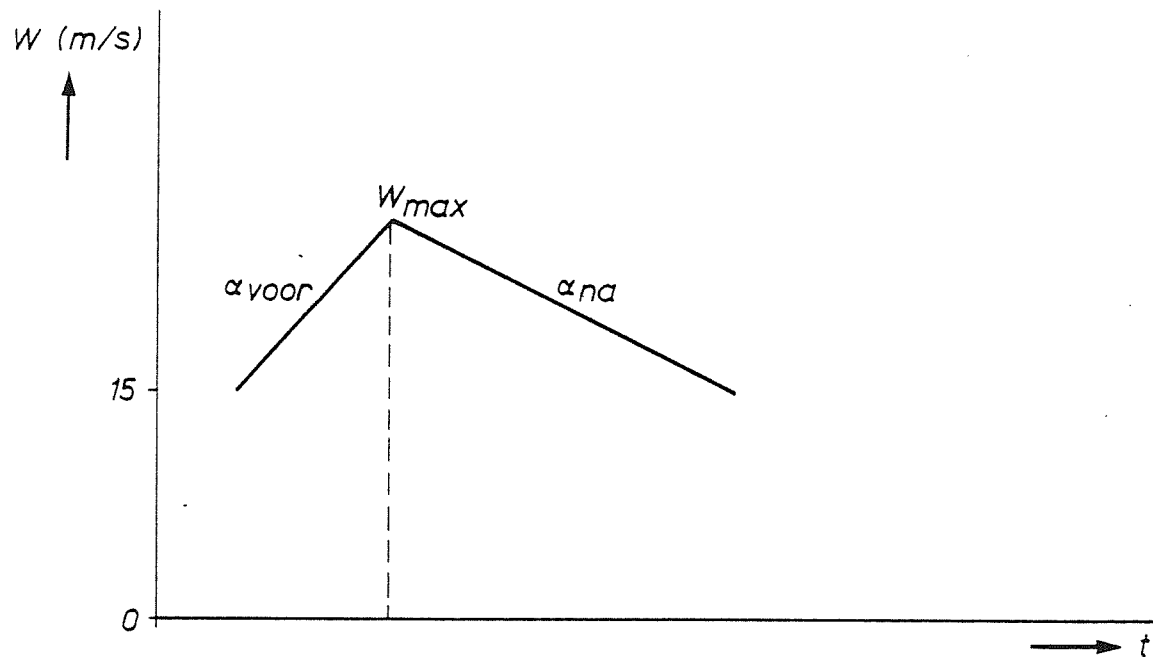
Voor IJsselmeeromstandigheden

Maximale windsnelheid voor een sektor van $22,5^\circ$, omgerekend naar Lelystad (gemeten) met een faktor 0,94 t.o.v. Den Helder (gemeten),

- Bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-3}jr^{-1}
 $W_{\text{max.}}$ 29,3 m/s

- Bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4}jr^{-1}
 $W_{\text{max.}}$ 33,8 m/s

Table A2: karakteristieken stormtype b



KARAKTERISERING STORM TYPE C

WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R2224-1007

FIG. A3

Invoergegevens voor stormen van het type c

Windrichting

$d\phi/dT$ gem. - 6 graden per uur

Windsnelheid (voor een sektor van $22,5^\circ$)

- | | |
|---|-------------------------|
| - Bij een overschrijdingsfrequentie van | 10^{-3}jr^{-1} |
| $W_{\text{max.}}$ (Den Helder gemeten) | 27,9 m/s |
| α_{voor} | (10,95 m/s/uur) |
| α_{na} | (1,875 m/s/uur) |
| | |
| - Bij een overschrijdingsfrequentie van | 10^{-4}jr^{-1} |
| $W_{\text{max.}}$ (Den Helder, gemeten) | 32,5 m/s |
| α_{voor} | (10,95 m/s/uur) |
| α_{na} | (2,0 m/s/uur) |

Voor IJsselmeeromstandigheden

Maximale windsnelheid voor een sektor van $22,5^\circ$ omgerekend naar Lelystad (gemeten) met een faktor 0,94 t.o.v. Den Helder (gemeten),

- | | |
|---|-------------------------|
| - Bij een overschrijdingsfrequentie van | 10^{-3}jr^{-1} |
| $W_{\text{max.}}$ | 26,2 m/s |
| | |
| - Bij een overschrijdingsfrequentie van | 10^{-4}jr^{-1} |
| $W_{\text{max.}}$ | 30,6 m/s |

Tabel A3: karakteristiek stormtype c

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands