

waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

evaluatie van methoden voor hoogwaterberekeningen

berekeningen met WAQUA voor de IJssel tussen
Doesburg en Dieren (kmr 903.00 - kmr 911.35)

nota

R 1520

juli 1981

INHOUD

blz.

SAMENVATTING

1.	<u>Inleiding</u>	1
2.	<u>Het rekenprogramma WAQUA</u>	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Vergelijkingen	3
2.3	Door het Waterloopkundig Laboratorium aangebrachte wijzigingen	5
2.3.1	Ruwheid	5
2.3.2	Energieverliezen achter overlaten	6
2.3.3	Randvoorwaarden	6
2.3.4	Stabiliteit	7
3.	<u>Berekeningen voor de IJssel tussen Doesburg en Dieren</u>	8
3.1	Schematisatie	8
3.1.1	Bodemligging	8
3.1.2	Begroeiingsweerstand	9
3.1.3	Overlaten	10
3.2	Berekeningen	11
3.2.1	Hoogwater 1980	11
3.2.2	Hoogwater 1979	12
3.2.3	Extreem hoogwater	12
3.3	Nauwkeurigheid van de berekeningen	14
3.3.1	Vergelijkingen	14
3.3.2	Schematisatie	17
4.	<u>Konklusies en aanbevelingen</u>	19

LITERATUUR

TABELLEN

1. Randvoorwaarden en overige gegevens van uitgevoerde hoogwaterberekeningen
2. Grootte van de resttermen op een aantal plaatsen in het rekenmodel
3. Vergelijking van termen uit de bewegingsvergelijking met de coëfficiënt c_{uo}
4. Vergelijking van termen uit de continuïteitsvergelijking met de coëfficiënt $c_{(\zeta+H)o}$

FIGUREN

1. Bodemligging in perspectief
2. Hoogtelijnenkaart na schematisatie
3. Middeling van C-waarden en verloop waterstanden

Hoogwater 1980:

4. Waterstanden als functie van de tijd
5. Waterstanden in het zomerbed
6. Lijnen van gelijke waterstand
7. Lijnen van gelijk energieniveau
8. Lijnen van gelijke snelheid
9. Snelheidsveld met stroombanen
10. Bodem- en snelheidsprofielen
11. Afvoer door het zomerbed

Hoogwater 1979

12. Waterstanden als functie van de tijd
13. Waterstanden in het zomerbed
14. Lijnen van gelijke waterstand
15. Lijnen van gelijk energieniveau
16. Lijnen van gelijke snelheid
17. Snelheidsveld met stroombanen

Extreem hoogwater ($k_w = 0,20 \text{ m}$; $\varepsilon = 1 \text{ m}^2/\text{s}$)

18. Waterstanden als functie van de tijd
19. Waterstanden in het zomerbed
20. Lijnen van gelijke waterstand
21. Lijnen van gelijk energieniveau
22. Lijnen van gelijke snelheid
23. Snelheidsveld met stroombanen
24. Bodem- en snelheidsprofielen
25. Afvoer door het zomerbed

Extreem hoogwater ($k_w = 0,07 \text{ m}$; $\varepsilon = 2 \text{ m}^2/\text{s}$)

26. Waterstanden als functie van de tijd
27. Lijnen van gelijke waterstand
28. Lijnen van gelijk energieniveau
29. Lijnen van gelijke snelheid

FIGUREN (vervolg)

30. Snelheidsveld met stroombanen
31. Dwarsprofiel, snelheidsprofiel en verloop van snelheidsafgeleiden;
regel 60
32. Variatie van dwarsprofiel en capaciteit

BIJLAGE

1. Rivierkaart

SAMENVATTING

Met het programma WAQAU zijn berekeningen uitgevoerd voor de IJssel tussen Doesburg en Dieren (kml 903.00 - kml 911.35). Met de berekeningen moest worden aangetoond dat het rekenprogramma geschikt is voor de berekening van de waterbeweging in rivieren in twee horizontale dimensies.

Een zeer globale beschrijving wordt gegeven van het rekenprogramma met vermelding van de vergelijkingen die in het rekenprogramma worden opgelost, en de wijzigingen die in het programma zijn aangebracht. De aangebrachte wijzigingen omvatten:

- een keuzemogelijkheid voor de te gebruiken ruwheidsrelatie (Manning of White-Colebrook)
- een procedure waarmee de energieverliezen achter overlaten kunnen worden berekend volgens het "tabellenboek" van de Rijkswaterstaat
- het uitbreiden van de mogelijke randvoorwaarden met een afvoerrand en een niet-reflecterende waterstandsrand
- een wijziging van het differentieschema voor de advektieve termen om de stabiliteit van het programma te verbeteren.

De resultaten van berekeningen met fysisch reële waarden, voor de turbulente viscositeit ($\epsilon = 1 \text{ à } 2 \text{ m}^2/\text{s}$) en de ruwheid voor zomer- en winterbed (0,30 m respectievelijk 0,20 m), gebaseerd op schattingen uit het prototype worden gepresenteerd. Er zijn berekeningen uitgevoerd voor het hoogwater 1980, 1979 en extreem hoogwater. Met de invloed van begroeiing in het winterbed is rekening gehouden door de ruwheid van het winterbed te verhogen. Gezien de acceptabele overeenkomst in waterstanden van prototypemetingen en berekeningen en de doelstelling van de berekeningen zijn geen ijkingsberekeningen uitgevoerd.

Aan de nauwkeurigheid van de berekening, zowel wat betreft de oplossing van de vergelijkingen als de schematisatie van het zomerbed, is ruime aandacht besteed. De onnauwkeurigheid bij de oplossing van de vergelijkingen is in orde van grootte gelijk aan de invloed van de Coriolis-term. Lokaal, bij de overgang van het zomerbed naar het winterbed, is de onnauwkeurigheid wat groter, maar nog steeds klein ten opzichte van de advektieve termen, die dan de oplossing van de vergelijkingen beheersen.

Op grond van de resultaten van de berekeningen en de geschatte onnauwkeurigheden in de oplossing van de bewegingsvergelijkingen kan worden gekonkludeerd,

dat het programma WAQUA geschikt is voor het uitvoeren van twee-dimensionale hoogwaterberekeningen.

Aanbevolen wordt om:

- het programma WAQUA te gebruiken voor tweedimensionale hoogwaterberekeningen
- de middeling van C-waarden in het programma te herzien
- de waterstanden ten gevolge van begroeiing door het programma te laten berekenen
- bij maaswijdten groter dan $1/3 \approx 1/5$ van de breedte van het zomerbed, de schematisatie zodanig uit te voeren dat de capaciteit van het zomerbed waarborgd blijft.
- het rekenprogramma zodanig te wijzigen dat alleen de actieve rekenpunten het geheugen van de computer belasten.

EVALUATIE VAN METHODEN VOOR HOOGWATERBEREKENINGEN

BEREKENINGEN MET WAQUA VOOR DE IJSSSEL TUSSEN BOESBURG EN DIEREN (KMR 903.00-KMR 911.35)

1. Inleiding

In december 1979 heeft Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, opdracht verleend tot het uitvoeren van een proefberekening met een computerprogramma, waarmee de waterbeweging in twee horizontale dimensies kan worden bepaald. Bij deze proefberekening, uitgevoerd voor de Maas nabij Venlo (kmr 105.50 - kmr 110.00), is uitgegaan van het programma TWOFLOW, een door het Waterloopkundig Laboratorium op een aantal punten gewijzigde versie van het door Leendertse ontwikkelde rekenprogramma [1].

De resultaten van deze berekening zijn vervat in het verslag R 1520: "Evaluatie van methoden voor hoogwaterberekeningen", [2].

Op grond van de goede overeenkomst tussen metingen uit het schaalmodel van de Maas en de berekeningen met TWOFLOW mag worden verondersteld dat TWOFLOW geschikt is voor het berekenen van permanenties in rivieren. Daar het programma WAQUA vergelijkbaar is met het programma TWOFLOW werd de verwachting uitgesproken dat WAQUA eveneens geschikt is. Het programma WAQUA is vervaardigd door Leendertse en de Rand Corporation [3,4].

Teneinde na te gaan of WAQUA inderdaad geschikt is, is besloten om voor een riviergedeelte van de IJssel nabij Doesburg (kmr 903.00 - kmr 911.35) een proefberekening uit te voeren met het programma WAQUA. Uit praktische overwegingen, verband houdende met aan te brengen wijzigingen, is besloten om voor de proefberekening uit te gaan van de bij het Waterloopkundig Laboratorium in gebruik zijnde versie van WAQUA (WL-versie), die in grote lijnen overeenkomt met WAQUA-4 van de Rand Corporation.

Op grond van het gekozen riviertraject, waarvoor de proefberekening moet worden uitgevoerd, mag bij succesvolle afsluiting van deze berekening ervan worden uitgegaan dat berekeningen met het programma WAQUA voor de overige te schematiseren riviergedeelten van de Nederlandse grote rivieren, eveneens met succes kunnen worden uitgevoerd.

In het navolgende wordt verslag gedaan van de uitgevoerde berekeningen. In hoofdstuk 2 wordt een globaal overzicht gegeven van het rekenprogramma. Boven-

dien wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de wijzigingen, die in de WAQUA versie van het Waterloopkundig Laboratorium ten behoeve van de berekening van permanente stroming in rivieren zijn aangebracht. In hoofdstuk 3 worden de schematisatie van het betreffende riviertrajekt en de uitgevoerde berekeningen beschreven. In hetzelfde hoofdstuk wordt bovendien een indruk gegeven van de nauwkeurigheid waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd. Tenslotte worden in hoofdstuk 4 de konklusie en aanbevelingen, voortvloeiend uit de uitgevoerde berekeningen, geformuleerd.

Het onderzoek stond onder leiding van ir. J.H.A. Wybenga, die tevens zorg heeft gedragen voor de voorliggende verslaggeving. De verschiltermen tussen differentiaalvergelijkingen en differentievergelijkingen zijn bepaald door ir. H. Gerritsen. De in het programma aangebrachte wijzigingen zijn verzorgd door P. Koole en ir. G.S. Stelling.

2. Het rekenprogramma WAQUA

2.1 Algemeen

Het rekenprogramma WAQUA bestaat uit een deel dat de waterbeweging in 2 horizontale dimensies bepaald en een hieraan gekoppeld deel, waarmee waterkwaliteitsberekeningen kunnen worden uitgevoerd. Bij de hier te beschrijven berekeningen is van het laatstgenoemde deel geen gebruik gemaakt.

Tijdens het uitvoeren van berekeningen met het programma WAQUA wordt de gebruiker snel geconfronteerd met modellen, die relatief veel geheugenruimte van de computer vragen. Deze grote modellen kunnen in het algemeen alleen 's nachts worden verwerkt. Teneinde te voorkomen dat in de beginfase van de schematisatie, wanneer gegevens moeten worden ingevoerd en gecontroleerd zonder dat daadwerkelijk wordt gerekend slechts één maal per dag een programma kan worden aangeboden, is het programma WAQUA in verschillende delen gesplitst.

Het eerste deel omvat het invoerprogramma (Input Data Processor = IDP). Dit programma maakt de invoergegevens klaar voor het eigenlijke rekenprogramma (Simulation of 2-Dimensional Computation = SIM2D). Voorts controleert de IDP de ingevoerde gegevens en bepaalt de geheugenruimte, die voor de SIM2D moet worden gereserveerd. Doordat in de IDP niet werkelijk wordt gerekend, is de benodigde geheugenruimte van dit programma zo klein dat het overdag door de computer kan worden verwerkt. Zodra in de IDP geen fouten meer aanwezig zijn, wordt de SIM2D door middel van een startopdracht geactiveerd. Deze berekening wordt 's nachts uitgevoerd. De gewenste uitvoer voor de regeldrukker is in de IDP opgegeven. Nadat de berekeningen zijn voltooid, kunnen verschillende tekeningen met een "plotter" worden vervaardigd. Voor een uitgebreide handleiding van IDP en SIM2D kan worden verwezen naar [5].

2.2 Vergelijkingen

In het rekengedeelte van het programma WAQUA worden de over de vertikaal gemiddelde impulsvergelijking in x-richting en y-richting tezamen met de over de vertikaal gemiddelde continuïteitsvergelijking en de geldende randvoorwaarden opgelost.

De impulsvergelijkingen in x- en y-richting luiden als volgt:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 (H + \zeta)} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = F(x) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 (H + \zeta)} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = F(y) \quad (2.2)$$

De over de vertikaal gemiddelde continuïteitsvergelijking wordt gegeven in vergelijking (2.3):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(H + \zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(H + \zeta)V]}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

Hierin is:

C = coëfficiënt van Chézy

f = coëfficiënt, die de Coriolisin invloed weergeeft

$F(x), F(y)$ = op het water werkende uitwendige krachten in respektievelijk de x- en y-richting; bijvoorbeeld de invloed van wind of luchtdrukverschillen

g = versnelling van de zwaartekracht

H = bodemhoogte

t = tijd

U = stroomsnelheid in x-richting

V = stroomsnelheid in y-richting

x, y = orthogonaal coördinatenstelsel

ϵ = diffusiecoëfficiënt

ζ = niveau van de waterspiegel

In grote lijnen wordt het stelsel vergelijkingen (2.1) ... (2.3) in twee halve tijdstappen als volgt opgelost (zie ook [2]). Tijdens de eerste halve tijdstap worden ζ en U impliciet bepaald uit de vergelijkingen (2.1) en (2.2) en de op te geven randvoorwaarden. Vervolgens wordt V expliciet berekend uit vergelijking (2.3). In de tweede halve tijdstap worden ζ en V impliciet bepaald aan de hand van vergelijking (2.1) en (2.3) en de randvoorwaarden, waarna U expliciet kan worden berekend met vergelijking (2.2).

In beginsel kan het stelsel vergelijkingen (2.1) ... (2.3) tijdsafhankelijk worden opgelost. Voor het uitvoeren van hoogwaterberekeningen kan de afvoer in het beschouwde riviervak echter als kwasi-stationair worden beschouwd. Afgezien van de eerste 60 tijdstappen (de aanloopfase) worden de randvoorwaarden (afvoer bovenstrooms, waterstand benedenstrooms) dan ook konstant gehouden.

2.3 Door het Waterloopkundig Laboratorium aangebrachte wijzigingen

Op grond van de ervaringen met het programma TWOFLOW, opgedaan tijdens de berekening voor de Maas nabij Venlo [2], is aanbevolen om het programma WAQUA op een aantal punten te wijzigen en aan te vullen. Voorts bleek uit een eerste oriënterende berekening dat de stabiliteit van het rekenprogramma moest worden verbeterd. In het navolgende zullen de wijzigingen en aanvullingen kort worden toegelicht.

2.3.1 Ruwheid

Voor het berekenen van de weerstanden moet een weerstandscoefficient (Chézy-coëfficiënt) worden opgegeven. In het programma WAQUA wordt de Chézy-coëfficiënt bepaald met de formule van Manning. In deze formule wordt de grootte van de ruwheid bij gelijkblijvende waterdiepte bepaald door de Manning coëfficiënt n . Aan deze coëfficiënt kan geen fysische betekenis worden toegekend in de zin van de k -waarde in de White-Colebrook relatie.

In Nederland wordt de laatstgenoemde formule voor de bepaling van de Chézy-coëfficiënt algemeen gebruikt:

$$C = 18 \log \left\{ \frac{12(H+\zeta)}{k} \right\} \quad (2.4)$$

Hierin is k een maat voor de ruwheid. De grootte van de ruwheidsmaat k kan worden gerelateerd aan de oneffenheden van de bodem. Hoe groter de oneffenheden, des te groter de ruwheidsmaat.

In de WL-versie van WAQUA is ten behoeve van de onderhavige berekeningen een keuze-mogelijkheid ingebouwd, waardoor de WAQUA gebruiker de door hem gewenste ruwheidsformule kan specificeren in de IDP.

2.3.2 Extra energieverliezen

Bij de stroming van water door het hoog- en laagwaterbed kunnen lokaal energieverliezen voorkomen die voortvloeien uit een plotselinge stroomvertraging. Dergelijke verliezen treden onder meer benedenstrooms van bruggen en overlaten op. Bij het oplossen van de bewegingsvergelijkingen kan hiermee rekening worden gehouden door het invoeren van extra weerstand, zoals beschreven in [2].

Het in het rekenprogramma TWOFLOW ondervonden bezwaar dat de vervangende ruwheid (Chézy-waarde) tijdens het rekenproces werd gemiddeld met de ruwheid van naastliggende vakken is in de WL-versie van WAQUA ondervangen door de middeling van de C-waarde uit te voeren vóórdat de extra energieverliezen in rekening worden gebracht (zie vergelijking (2.7) ... (2.9), (A-18) en (A-19) en bijlage B van [2]). De wijze waarop de extra ruwheden worden berekend stemt overeen met het tabellenboek van de Rijkswaterstaat. Voor een beschrijving van deze berekeningswijze kan worden verwezen naar [6] en naar bijlage B van [2].

De berekening van de vervangende ruwheden wordt door het rekengedeelte SIM2D van WAQUA automatisch uitgevoerd. De gebruiker dient in de IDP te specificeren waar en in welke richting (x of y) de vertragsverliezen in rekening moeten worden gebracht. Het verlies wordt steeds loodrecht op de kruin van de overlaat in rekening gebracht.

2.3.3 Randvoorwaarden

Met het programma WAQUA moeten berekeningen worden uitgevoerd voor permanente stromingsomstandigheden (constante afvoer). De beschikbare randvoorwaarden in het rekenprogramma bestaan uit het opgeven van snelheden en/of waterstanden.

De afvoer op plaatsen waar de snelheid wordt opgegeven, wordt bepaald door de opgegeven snelheid, de lokale waterdiepte en de maaswijdte. Helaas zijn de door WAQUA berekende waterstanden en dus ook de waterdiepten ter plaatse van de snelheidsrand(en) niet vooraf bekend, zodat het opleggen van een vooraf gekozen afvoer met de beschikbare randvoorwaarden op iteratieve wijze zou moeten geschieden. Daarom is in de WL-versie van WAQUA de mogelijkheid ingebouwd om de afvoer als randvoorwaarde op te geven. De gewenste permanente afvoer kan derhalve direkt worden opgelegd.

Met betrekking tot de waterstanden was uit berekeningen met een één-dimensionaal rekenprogramma (NETFLOW) gebleken dat de stationaire fase uitgaande van stilstaand water sneller wordt bereikt wanneer een zwak- of niet-reflekterende waterstand als randvoorwaarde wordt gehanteerd, zie [7]. Naast de bestaande randvoorwaarden is daarom in de WL-versie van WAQUA een zwak reflecterende randvoorwaarde ingebouwd. Met deze randvoorwaarde zijn enkele oriënterende berekeningen uitgevoerd. Daar de permanente fase niet in minder tijdstappen werd bereikt, zijn de uiteindelijke berekeningen met de oorspronkelijke reflecterende randvoorwaarde uitgevoerd.

2.3.4 Stabiliteit

Uit een eerste oriënterende berekening met het programma WAQUA bleek het toegepaste differentieschema, waarmee de advektieve termen in het rekenprogramma worden benaderd (centrale differentie), instabiel te zijn. Op grond hiervan is de benadering van de advektieve termen in de WL-versie van WAQUA zodanig gewijzigd dat een stabiel rekenprogramma is ontstaan. Voor een gedetailleerde beschrijving van de in WAQUA aangebrachte wijzigingen wordt verwezen naar [8].

Ondanks de aangebrachte wijzigingen kan onder extreme omstandigheden het rekenprogramma een instabiele oplossing geven. Deze instabiele oplossing is dan het gevolg van een onjuiste keuze van de diffusie-coëfficiënt, de ruwheid van het model en de tijdstap of een combinatie van deze factoren. Als extreme omstandigheid kan bijvoorbeeld worden aangemerkt:

- zeer kleine turbulente viscositeitscoëfficiënt ($\varepsilon \rightarrow 0 \text{ m}^2/\text{s}$)
- zeer geringe ruwheid in het model ($k\text{-waarde} \rightarrow 0 \text{ m}$)
- grote tijdstap ($\Delta t \gg 20 \text{ s}$).

Door aanpassing van één of meerdere van bovenstaande parameters kan een aanvankelijk instabiele oplossing stabiel worden gemaakt.

3. Berekeningen voor de IJssel tussen Doesburg en Dieren

De proefberekening met het programma WAQUA is uitgevoerd voor een gedeelte van de IJssel tussen Doesburg en Dieren (kmr 903.00 - kmr 911.35). Van het betreffende riviergedeelte is een rivierkaart als bijlage toegevoegd. In figuur 1 wordt de bodemligging in perspectief gegeven en in figuur 2 door middel van hoogtelijnen. In het navolgende zal een overzicht worden gegeven van de schematisatie en de uitgevoerde berekeningen.

3.1 Schematisatie

Voor een uitgebreide beschrijving van de schematisatie van het betreffende riviergedeelte kan naar [2] worden verwezen.

Het klaarmaken van het invoerprogramma, de IDP, omvat het opgeven van:

- de bodemligging;
- de modelrand;
- de bodemruwheid van zowel zomer- als winterbed, de laatste inclusief de ruwheid ten gevolge van begroeiing;
- extra energieverliezen, door stroomvertraging achter konstrukties (overlaten);
- randvoorwaarden;
- tijdstap;
- turbulente viscositeit coëfficiënt en
- gewenste uitvoer.

Van de bovenstaande aspecten zullen enkele nader worden toegelicht. Voor de overige aspecten kan worden verwezen naar hetgeen hierover in de WAQUA-handleiding [5] staat vermeld.

3.1.1 Bodemligging

Voor de hier uitgevoerde berekeningen is de bodemligging als volgt geschematiseerd:

- Op de rivierkaarten van het betreffende gebied (schaal 1:5000) is het verloop van de hoogtelijnen getekend, zie figuur 2.
- Met behulp van een zogenaamde lijnenvolger is hiervan een digitaal terreinmodel gemaakt met een onregelmatig roosterwerk. Uitgaande hiervan is met gebruikmaking van een computerprogramma een digitaal terreinmodel met een ge-

lijkmatic roosternet vervaardigd. De maaswijdte van dit model bedraagt $\Delta x = \Delta y = 30$ m. De grootte van de maaswijdte is gekozen op grond van de grootte van het te schematiseren gebied en de beschikbare geheugenruimte van de computer.

- Vervolgens is de bodemligging van kaden en bandijken waar nodig gekorrigeerd.
- Aan de schematisatie van het zomerbed is als eis gesteld dat de werkelijke doorstroomcapaciteit, gedefinieerd als:

$$\text{capaciteit} = \int_{\text{linkeroever}}^{\text{rechteroever}} C h^{3/2} dy \quad (3.1)$$

ook in het rekenmodel aanwezig is. Doordat de doorstroomcapaciteit afneemt bij toenemende roosterafstand (zie figuur 32 en paragraaf 3.3.2) moest de bodemligging van het zomerbed lokaal in geringe mate worden aangepast. Hierdoor is de doorstroomcapaciteit van het zomerbed in het rekenmodel bij benadering gelijk aan de werkelijke doorstroomcapaciteit. De aldus geschematiseerde bodemligging is toegevoerd aan het invoerprogramma.

3.1.2 Begroeiingsweerstand

Bij het opgeven van de ruwheden voor het winterbed is met de aanwezigheid van begroeiing rekening gehouden door de ruwheid van begroeide plaatsen te verhogen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in bomen, struiken en heggen. Voor de wijze waarop de vervangende ruwheid, Chézy-waarde, ter plaatse van de begroeiing kan worden berekend, wordt verwezen naar [7]. In het rekenprogramma worden de C-waarden van naast elkaar gelegen velden gemiddeld, waardoor de gekoncentreerde ruwheid verhoudingsgewijs teveel wordt uitgesmeerd. Met dit effect kan rekening worden gehouden door in het rekenmodel een k-waarde k'_t op te geven, die wordt bepaald uit:

$$C'_t = C_t C_{gr} \sqrt{\frac{8}{C_t^2 + C_{gr}^2}} - C_{gr} \quad (3.2)$$

en de White-Colebrook formule:

$$C'_t = 18 \log \left\{ \frac{12(\zeta + H)}{k'_t} \right\} \quad (3.3)$$

Hierin is:

C_{gr} = Chézy-coëfficiënt van gras

C_t = Chézy-coëfficiënt van gras met begroeiing indien het rekenprogramma

geen Chézy-coëfficiënten zou middelen

C'_t = Chézy-coëfficiënt van gras met begroeiing vóór de middelingsprocedure

H = bodemhoogte

k'_t = in het rekenmodel op te geven bodemruwheid

ζ = waterstand

Vergelijking (3.2) wordt afgeleid uit de eis dat het energieverlies over twee vaklengten Δx met begroeiing en zonder middeling van Chézy-waarden in het rekenprogramma (2 vakken met een respektievelijke ruwheid C_{gr} en C_t) gelijk is aan het energieverlies over twee vakken met begroeiing en met middelingsprocedure (2 vakken met ruwheid $(C_{gr} + C'_t)/2$). De middeling van Chézy-coëfficiënten en het verloop van de waterstanden wordt in figuur 3 weergegeven.

Voor boomgaarden, die zich in twee richtingen over meerdere rekenvakken uitstrekken, leidt een combinatie van de vergelijkingen (3.2) en (3.3) tot te grote ruwheden. Voor deze omstandigheden wordt de k-waarde van gras met begroeiing rechtstreeks bepaald uit de berekende C_t en de White-Colebrook formule (vergelijking (3.3)).

3.1.3 Overlaten

Met het optreden van energieverliezen door stroomvertraging achter overlaten kan in het rekenprogramma rekening worden gehouden. Voor de wijze, waarop de energieverliezen werden berekend, kan naar paragraaf 2.3.2 en [2,6] worden verwezen. Het opnemen van overlaten in de schematisatie verloopt als volgt.

Het verloop van de kruin wordt in het roosternet door middel van een trapjeslijn benaderd. De bodemhoogte van de punten op deze lijn komen overeen met de kruinhoogten, zoals vermeld op de rivierkaarten. Vervolgens wordt in het invoerprogramma aangegeven op welke plaatsen en in welke richting energieverlies als beschreven in paragraaf 2.3.2 in rekening moet worden gebracht.

3.2 Berekeningen

3.2.1 Hoogwater 1980

Nadat de schematisatie is voltooid en de randvoorwaarden zijn geformuleerd kan het rekenprogramma SIM2D worden aangeroepen. De voor het hoogwater 1980 gebruikte randvoorwaarden zijn vermeld in tabel 1. Opgemerkt dient te worden dat bij het opgeven van de afvoer ter plaatse van de brug te Doesburg abusievelijk $50 \text{ m}^3/\text{s}$ meer is opgegeven dan op grond van de metingen van 1980 zou zijn gerechtvaardigd. Hierdoor werd tevens de totale afvoer met $50 \text{ m}^3/\text{s}$ verhoogd. Gezien het relatief geringe verschil tussen beide totaalafvoeren wordt aangenomen dat dit niet tot wezenlijke verschillen aanleiding zal geven.

De ruwheid van het winterbed, $k_w = 0,20 \text{ m}$, is gebaseerd op de resultaten van door Rijkswaterstaat uitgevoerde metingen en literatuuronderzoek. De ruwheid van het zomerbed, $k_z = 0,30 \text{ m}$, komt in orde van grootte overeen met de vertikale afmetingen van gemeten beddingvormen. De orde van grootte van de diffusiecoëfficiënt kan slechts worden geschat.

De resultaten van de berekening voor 1980 worden in grafische vorm gepresenteerd in de figuren 4 ... 12. Teneinde de resultaten van de berekening te kunnen beoordelen is van het betreffende riviergedeelte een transparante rivierkaart als bijlage toegevoegd, die over de figuren heen kan worden gelegd.

Doordat de geheugencapaciteit van de Univac maar voor een beperkt deel kon worden gebruikt, moest het oorspronkelijke rekenmodel worden verkleind. Een deel van de oude zomerbedgeul neemt daarom geen deel aan de stroming.

Ten aanzien van figuur 4, waar de waterstanden in 3 stations (punten (3,48), (31,64) en (36,109) als functie van de tijd worden weergegeven, moet worden opgemerkt dat de werkelijke tijd in het rekenmodel tweemaal zo klein is. Dit kan als volgt worden toegelicht. Als beschreven in paragraaf 2.2 worden de bewegingsvergelijkingen in twee halve tijdstappen opgelost. Nadat een volledige tijdstap is uitgevoerd, wordt de oplossing op de halve tijdstap gebruikt als begintoestand voor de berekening van de volgende tijdstap. De effectieve tijdstap is dus tweemaal zo klein, waardoor de in figuur 4 uitgezette tijd tweemaal zo groot wordt weergegeven.

In figuur 5 zijn de waterstanden in het zomerbed uitgezet. Gezien de overeenkomst tussen gemeten en berekende waarden en gelet op het feit dat een nauwkeurige ijking van het model bij deze proefberekening niet vereist is om een uitspraak te kunnen doen omtrent de geschiktheid van het rekenprogramma WAQUA voor de berekening van permanente stroming, zijn geen berekeningen uitgevoerd met andere waarden voor de ruwheid van het zomer- en/of winterbed.

In de figuren 6 ... 11 worden achtereenvolgens weergegeven:

- 6 lijnen van gelijke waterstand
- 7 lijnen van gelijk energieniveau
- 8 lijnen van gelijke snelheid
- 9 snelheidsveld met stroombanen
- 10 bodem- en snelheidsprofielen
- 11 afvoer door het zomerbed.

3.2.2 Hoogwater 1979

De berekening van het hoogwater 1979 stemt met uitzondering van de benedenstroomse en bovenstroomse randvoorwaarden overeen met de berekening voor het hoogwater 1980. Voor de verschillen in randvoorwaarden kan naar tabel 1 worden verwezen. De resultaten van de berekening worden in grafische vorm weergegeven in de figuren 12 ... 17:

- 12 waterstanden als functie van de tijd
- 13 waterstanden in het zomerbed
- 14 lijnen van gelijke waterstand
- 15 lijnen van gelijk energieniveau
- 16 lijnen van gelijke snelheid
- 17 snelheidsveld met stroombanen.

Waar mogelijk zijn de resultaten voor het hoogwater 1979 gekombineerd met die van het hoogwater 1980. Dit geldt met name voor de bodem- en snelheidsprofielen en de afvoer door het zomerbed.

3.2.3 Extreem hoogwater

Met de schematisatie, waarmee de hoogwaters van 1980 en 1979 zijn nagerekend, zijn een tweetal extreem hoogwaterberekeningen uitgevoerd.

De schematisatie voor de eerste extreem hoogwaterberekening is, met uitzondering van de bovenstroomse en benedenstroomse randvoorwaarde, identiek aan de berekeningen voor de eerder beschreven hoogwaters. Voor de gebruikte randvoorwaarden wordt verwezen naar tabel 1.

De resultaten van de eerste extreem hoogwaterberekening worden weergegeven in de figuren 18 ... 25:

- 18 waterstanden als functie van de tijd
- 19 waterstanden in het zomerbed
- 20 lijnen van gelijke waterstanden
- 21 lijnen van gelijk energieniveau
- 22 lijnen van gelijke snelheid
- 23 snelheidsveld met stroombanen
- 24 bodem- en snelheidsprofiel
- 25 afvoer door het zomerbed.

Teneinde de voor dit riviergedeelte uitgevoerde stroombaanberekening enigszins te kunnen vergelijken met de resultaten van het programma WAQUA is een tweede berekening uitgevoerd. De ruwheid van het winterbed in de tweede berekening bedroeg $k_w = 0,07$ m. De ruwheid van het zomerbed is voorshands gelijk gehouden aan de zomerbedruwheid voor de berekening van het hoogwater 1980. De grootte van de zomerbedruwheid onder extreme omstandigheden moet nog worden vastgesteld. Tevens moest om de berekening bij deze tijdstap voldoende stabiel te houden de grootte van de turbulente viscositeitscoëfficiënt worden verhoogd tot $\epsilon = 2 \text{ m}^2/\text{s}$. Doordat het zomerbed slechts een beperkt deel beslaat van het gehele model heeft de verhoging van de turbulente viscositeitscoëfficiënt een beperkte invloed (brede platte bak). De overige gegevens zijn identiek aan de eerste extreem hoogwater berekening.

De resultaten van de tweede berekening worden gepresenteerd in de figuren 26 ... 30:

- 26 waterstanden als functie van de tijd
- 27 lijnen van gelijke waterstand
- 28 lijnen van gelijk energieniveau
- 29 lijnen van gelijke snelheid
- 30 snelheidsveld met stroombanen.

De resultaten voor de bodem- en snelheidsprofielen en de afvoerverdeling zijn opgenomen in respectievelijk de figuren 24 en 25.

Zoals mag worden verwacht neemt de afvoer door het zomerbed toe bij toenemende ruwheid in het winterbed.

3.3 Nauwkeurigheid van de berekeningen

In de resultaten, die met de WL-versie van het programma WAQUA worden verkregen, komen onnauwkeurigheden voor die enerzijds hun oorzaak vinden in de wijze waarop het stelsel vergelijkingen wordt opgelost en anderzijds voortvloeien uit de wijze van schematiseren van het model, met name van de bodemligging. In het navolgende worden beide aspecten nader onderzocht.

3.3.1 Vergelijkingen

Voor het volledige stelsel vergelijkingen, dat moet worden opgelost, kan naar hoofdstuk 2 worden verwezen. In algemene vorm kan het stelsel vergelijkingen worden geschreven als:

$$L(U) = 0 ; \quad (3.4)$$

$$L(V) = 0 ; \quad (3.5)$$

en

$$L(\zeta+H) = 0. \quad (3.6)$$

De differentiaalvergelijkingen (3.4) ... (3.6) worden omgezet in een stelsel differentievergelijkingen, die numeriek worden opgelost.

$$L_h(U) = 0 \quad (3.7)$$

$$L_h(V) = 0 \quad (3.8)$$

en

$$L_h(\zeta+H) = 0 \quad (3.9)$$

Zoals in paragraaf 2.2 is beschreven, wordt het stelsel vergelijkingen (3.7) ... (3.9) in twee halve tijdstappen opgelost. De onnauwkeurigheid in de oplossing van de differentiaalvergelijking bestaat uit het verschil van genoemde vergelijking en de differentiaalvergelijking:

$$L(U) - L_h(U) = C_{U0} + C_{U1}\Delta t + C_{U2}\Delta t^2 \quad (3.10)$$

$$L(V) - L_h(V) = C_{V0} + C_{V1}\Delta t + C_{V2}\Delta t^2 \quad (3.11)$$

$$L(\zeta+H) - L_h(\zeta+H) = C_{(\zeta+H)0} + C_{(\zeta+H)1}\Delta t + C_{(\zeta+H)2}\Delta t^2 \quad (3.12)$$

Omdat de resttermen uit vergelijking (3.11) identiek zijn aan de resttermen uit vergelijking (3.10), zij het met verwisseling van U met V en x met y, kan worden volstaan met een nauwkeurighedsbeschouwing voor de bewegingsvergelijking in x-richting en de continuïteitsvergelijking.

Uit een nauwkeurighedsanalyse blijken de coëfficiënten C_{U0} en $C_{(\zeta+H)0}$ in de permanente fase ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) de volgende afgeleiden te bevatten:

$$\begin{aligned} C_{U0} = & \frac{\Delta x^2}{24} \left[R \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k \left(\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + 2f \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - 3U \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} + \right. \\ & + V \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial y^2} - 9 \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \left. \right] + \\ & + \frac{\Delta y^2}{24} \left[2k \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} + 3f \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} - 3 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} - 4V \frac{\partial^3 U}{\partial y^3} - 6 \frac{\partial^3 U}{\partial y^3} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} C_{(\zeta+H)0} = & - \frac{\Delta x^2}{24} \left[\frac{\partial^3}{\partial x^3} (U(\zeta+H)) + 3 \frac{\partial}{\partial x} \left(U \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right) + 3 \frac{\partial}{\partial y} \left(V \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) \right] + \\ & - \frac{\Delta y^2}{24} \left[\frac{\partial^3}{\partial y^3} (V(\zeta+H)) + 3 \frac{\partial}{\partial y} \left(U \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) + 3 \frac{\partial}{\partial x} \left(U \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

De coëfficiënten C_{U1} , C_{U2} en $C_{(\zeta+H)1}$ blijken afgeleiden naar de tijd te bezitten en verdwijnen in de permanente fase. De coëfficiënt $C_{(\zeta+H)2}$ bestaat uit een niet onaanzienlijk aantal termen met en zonder afgeleiden naar de tijd die naar alle waarschijnlijkheid tijdens de nauwkeurighedsanalyse worden gegeneerd door de coëfficiënten $C_{(\zeta+H)0}$ en $C_{(\zeta+H)1}$. Daar de coëfficiënten C_{U1} , C_{U2} en $C_{(\zeta+H)1}$ in de permanente fase verdwijnen lijkt het aannemelijk dat dan ook $C_{(\zeta+H)2}$ verdwijnt.

De termen in het rechterlid van de vergelijkingen (3.13) en (3.14) dienen aan de hand van de oplossing van het stelsel differentiaalvergelijkingen $L(U) = 0$ en $L(\zeta+H) = 0$ lokaal te worden bepaald. Hierbij wordt men direkt met twee problemen geconfronteerd:

- De oplossing van de differentiaalvergelijkingen is niet bekend. Bij gebrek aan beter moeten de termen daarom met de diskrete oplossing van de differentiaalvergelijkingen worden geschat;
- Doordat in plaats van de gewenste continue oplossing slechts een diskrete benadering voorhanden is, kunnen de termen niet lokaal worden bepaald. De

termen moeten door numerieke differentiatie van de diskrete oplossing worden berekend. De gevolgen hiervan voor de coëfficiënt C_{U0} zullen aan de hand van een voorbeeld, ontleend aan de eerste extreem hoogwaterberekening, worden toegelicht.

In figuur 31 is voor een bepaald dwarsprofiel het verloop weergegeven van de bodemligging, U , $\frac{\partial U}{\partial y}$, $\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$, $\frac{\partial^3 U}{\partial y^3}$ en $\frac{\partial^4 U}{\partial y^4}$ op regel 60 vanaf kolom 115 tot 138. De eerste afgeleide van U naar y wordt berekend uit het snelheidsverschil van twee naast elkaar gelegen punten waarop de snelheid bekend is. De eerste afgeleide wordt dus bepaald over een gebied $\Delta y = 30$ m. Aangetoond kan worden dat voor de bepaling van $\frac{\partial^n U}{\partial y^n}$ informatie wordt gebruikt uit een gebied $n\Delta y$. Van een lokale bepaling van de hogere afgeleiden is dus geen sprake.

Uit figuur 31 kan worden afgeleid dat de nauwkeurigheid waarmee de snelheidsafgeleiden kunnen worden bepaald afneemt naarmate vaker numeriek wordt gedifferentieerd. De maximale waarde van de hogere afgeleiden wordt daarbij te groot weergegeven.

Met bovenstaande in gedachten moet de grootte van de coëfficiënt C_{U0} die voor een aantal willekeurig gekozen punten is bepaald worden beoordeeld, zie tabel 2. Uit de tabel blijkt dat bij de gevolgde rekenprocedure de coëfficiënt C_{U0} over het algemeen $0(10^{-5})$ à $0(10^{-4})$ bedraagt. Het belangrijkste aandeel in deze coëfficiënt wordt geleverd door de termen met de derde afgeleide van de snelheid in x- of y-richting, waarvan reeds is aangetoond dat de orde van grootte door numerieke differentie niet goed kan worden bepaald.

Gelet op het voorgaande moet derhalve worden gesteld dat de coëfficiënt C_{U0} naar alle waarschijnlijkheid te groot zal worden weergegeven. Een betere schatting van de coëfficiënt kan onder de gegeven omstandigheden echter niet worden gegeven.

In tabel 3 worden de berekende coëfficiënten vergeleken met de termen uit de bewegingsvergelijking in x-richting. Uit tabel 3 kan worden afgeleid dat C_{U0} veelal in orde van grootte overeenstemt met de Coriolisin invloed (fV). De laatste heeft in rivieren over het algemeen een verwaarloosbare invloed. In deze punten bezit het rekenmodel ondanks de te grote schatting van de coëfficiënt C_{U0} voldoende nauwkeurigheid.

Lokaal - met name op de overgang van het zomerbed naar het winterbed, punt (50,10) - waar de grootte van de coëfficiënt belangrijk groter wordt dan de Coriolisin invloed, is de coëfficiënt relatief klein ($C_{U0} < 0,06$ advektieve termen) ten opzichte van de advektieve termen, die op deze plaatsen voor een goede weergave van de stroming het belangrijkste zijn. Gelet op de grootte van de advektieve termen en de in grootte overschatte coëfficiënt van C_{U0} kan in redelijk vertrouwen worden gesteld dat op deze plaatsen het stroombeeld met voldoende nauwkeurigheid wordt weergegeven.

Résumerend kan derhalve worden gesteld dat in het rekenprogramma de onnauwkeurigheid in de oplossing van de bewegingsvergelijking in gebieden met beperkte bodemveranderingen (het winterbed en het midden van het zomerbed) kleiner dan of gelijk is aan de Coriolisin invloed. In gebieden waar sterke bodemveranderingen optreden (overgang zomerbed naar winterbed) lijkt de berekende nauwkeurigheid in absolute zin minder, maar wordt de oplossing van de bewegingsvergelijking zodanig door de advektieve termen beheerst dat dit geen enkel bezwaar is.

Bovendien moet gesteld worden dat de in het rekenprogramma gebruikte vergelijkingen voor ondiep water zijn afgeleid onder de veronderstelling dat de versnellingen in verticale richting klein zijn. Juist op plaatsen waar sterke bodemveranderingen optreden wordt deze veronderstelling geweld aangedaan.

Wat betreft de nauwkeurigheid in de oplossing van de continuïteitsvergelijking is de coëfficiënt $C_{(\zeta+H)0}$ bepaald in het punt (50,10) op de overgang van het zomerbed naar het winterbed. In tabel 4 wordt deze coëfficiënt vergeleken met de termen uit de continuïteitsvergelijking (zie vergelijking (2.3)), waaruit blijkt dat de grootte van de berekende coëfficiënt circa 0,025 maal de kleinste term van de continuïteitsvergelijking bedraagt. Gelet hierop en gezien het feit dat de grootte van de coëfficiënt $C_{(\zeta+H)0}$ op dezelfde wijze als C_{U0} zal worden overschat kan worden gesteld dat de nauwkeurigheid bij de oplossing van de continuïteitsvergelijking voldoende is gewaarborgd.

3.3.2 Schematisatie

In WAQUA dient de bodemligging in een aantal diskrete punten te worden opgegeven. Het dwarsprofiel krijgt daardoor een geknikte vorm. Indien op de roosterpunten steeds de werkelijke bodemhoogte wordt opgegeven zal bij toenemende

maaswijdte steeds meer van het dwarsprofiel worden "afgesnoten". Voor een gefin-
geerd dwarsprofiel, waarvan de afmetingen zodanig zijn gekozen dat het profiel
vergelijkbaar is met een dwarsprofiel van de IJssel, zal worden nagegaan wat
hiervan de gevolgen zijn voor de berekening en wat hiertegen moet worden ge-
daan.

In het geval van permanente stroming in een prismatisch kanaal met willekeurige
dwarsdoorsnede maken de weerstanden en de term voor turbulente viscositeit e-
venwicht met het verhang van de waterspiegel, zie vergelijking (2.1) en (2.2).
De Coriolis term wordt gemakshalve verwaarloosd. De turbulente viscositeitsterm
is klein ten opzichte van de beide overige termen. Onder verwaarlozing van de
turbulente viscositeitsterm ontstaat de weerstandsrelatie volgens Chézy

$$Q = \int_{\text{linkeroever}}^{\text{rechteroever}} h^{3/2} C i^{1/2} dx \quad (3.15)$$

De verdeling van de afvoer door het zomer- en winterbed wordt niet aangetast
indien het rechterlid van de vergelijking constant blijft. Onder gelijkblijvend
verhang mag derhalve de navolgende capaciteit niet wijzigen

$$\text{capaciteit} = \int_{\text{linkeroever}}^{\text{rechteroever}} h^{3/2} C dx$$

In figuur 32 is de relatieve capaciteit uitgezet als functie van de gekozen
maaswijdte. Uit figuur 32 kan worden afgeleid dat de capaciteit afneemt bij
toenemende maaswijdte en dat het effect kleiner is bij grotere waterdiepte.

Met het verlies aan capaciteit kan rekening worden gehouden door tijdens het
schematiseren het dwarsprofiel aan te passen aan de gekozen maaswijdte (zie
figuur 32). Doordat de invloed van de waterdiepte het sterkst doorwerkt bij
de bepaling van de capaciteit is een geringe aanpassing in het midden van het
zomerbed het meest effectief.

4. Konklusies en aanbevelingen

Op grond van de uitgevoerde berekeningen kunnen de navolgende konklusies worden geformuleerd.

- De resultaten van de berekeningen voor het hoogwater van 1979 en 1980 kunnen slechts worden getoetst aan gemeten waterstanden. Uit de resultaten van het programma TWOFLOW, zie [2] is gebleken, dat het juist weergeven van de waterstanden voor dit programma een zwaarder criterium is dan het juist weergeven van de snelheidsprofielen. Op grond van de figuren 5 en 13 kan worden gesteld dat waterstanden door de WL-versie van WAQUA onder gebruikmaking van fysisch verantwoorde waarden van de turbulente viscositeit en ruwheid van zomer- en winterbed ($\epsilon = 1 \text{ m}^2/\text{s}$, $k_w = 0,20 \text{ m}$ en $k_w = 0,30 \text{ m}$) goed worden weergegeven.
- Een berekening van het Extreem Hoogwater voor een riviervak met 4000 m lengte is bij tijdstappen van 20 s in circa 455 tijdstappen op evenwicht, zie de figuren 18 en 26. Bij het in dit model aanwezige aantal rekenpunten (circa 7000) werd de berekening uitgevoerd in 57 minuten ("CPU-time"). De totaal-tijd ("total time") bedroeg 62 minuten. Het aantal gebruikte "CbSubs" bedroeg $8,34 \cdot 10^9$. Ten opzichte van de oorspronkelijk geraamde 2 à 3 uur blijkt het programma een faktor 2 sneller te zijn.
- Op grond van de uitgevoerde nauwkeurighedsanalyse blijkt het programma een onnauwkeurigheid te bezitten die in orde van grootte overeenkomt of kleiner is dan de invloed van de Corioliskrachten en kan dus worden verwaarloosd. Lokaal, op de overgang van zomer- en winterbed, is de onnauwkeurigheid iets groter, doch in die gevallen is zij klein ten opzichte van de advektieve termen die daar ter plaatse het stroombeeld bepalen.
- Gelet op het bovenstaande kan derhalve worden gekonkludeerd dat de WL-versie van het rekenprogramma WAQUA geschikt is voor de uitvoering van tweedimensionale hoogwaterberekeningen.

Op grond van de uitgevoerde berekeningen met de WL-versie WAQUA kunnen voor het gebruik van het programma nog de navolgende aanbevelingen worden gedaan:

- Voor het oplossen van de bewegingsvergelijking wordt in het programma een

middeling van C-waarden uitgevoerd (zie ook [2], bijlage A, vergelijking (A-20)), waarbij de C-waarde wordt bepaald aan de hand van de bodemligging in vier omliggende punten. Zodra een van deze punten hoger ligt dan de waterstand wordt het betreffende vak droog gezet. Voor lagere hoogwaters kan de doorstroomcapaciteit van het zomerbed direkt naast de zomerkade daardoor nadelig worden beïnvloed. Door een relatief geringe wijziging in het programma kan dit bezwaar worden weggenomen.

- Bij groter wordende maaswijdten moet in de schematisatie van de bodemligging van het zomerbed rekening worden gehouden met het verlies aan doorstroomcapaciteit. Dit verlies kan door aanpassing van de bodemligging worden gecompenseerd.
- Met de invloed van begroeiing op de stroming wordt in het rekenprogramma rekening gehouden door lokaal de winterbedruwheid (k_w) te verhogen. De begroeiingsweerstand is afhankelijk van de soort begroeiing en de optredende waterdiepten. In de hier uitgevoerde berekening zijn de begroeiingsweerstand met de hand uitgerekend. Het verdient aanbeveling om de berekeningsprocedure door het programma WAQUA te laten uitvoeren.
- Nadat het riviertraject Doesburg-Dieren was geschematiseerd, bleek de vereiste geheugencapaciteit niet door de Univac geleverd te kunnen worden. Op grond hiervan is het rekenmodel verkleind, waardoor een deel van het oude zomerbed niet in de berekening kon worden betrokken. Het geheugengebruik wordt in WAQUA bepaald door de grootte van het rekenmodel bestaande uit het aantal actieve en niet-actieve rekenpunten. Aanbevolen wordt om in de berekening alleen de gegevens van de actieve rekenpunten in het geheugen op te slaan. Bij dezelfde belasting van het geheugen, kunnen dan grotere rekenmodellen worden gemaakt. Inmiddels wordt deze aanbeveling gerealiseerd.

LITERATUUR

1. LEENDERTSE, J.J.
"Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation"
The Rand Corporation, Santa Monica, California, 1967
2. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
"Evaluatie van methoden voor hoogwaterberekeningen"
Waterloopkundig Laboratorium, verslag onderzoek R 1520, juli 1981
3. LEENDERTSE, J.J.
"A water-quality model for well-mixed estuaries and coastal seas:
Volume I, Principles of Computation"
The Rand Corporation, RM-6230-RC, February 1970
4. LEENDERTSE, J.J. en GRITTON, E.C.
"A water-quality model for well-mixed estuaries and coastal seas"
The Rand Corporation, R 709-NYC, July 1971
5. THE RAND CORPORATION
"User's guide to SIMSYS2D: two-dimensional water quality simulation
system for well-mixed estuaries and coastal seas"
The Rand Corporation, Santa Monica, California, 1967
6. RIJKSWATERSTAAT
"De ontwikkeling van de stroombaanberekening met een rekenvoorbeeld van
de huidige methode"
Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 73.6,
oktober 1973
7. OGINK, H.J.M.
"Evaluatie van hoogwaterberekeningsmethoden"
Rijkswaterstaat, District Zuidoost, december 1980
8. STELLING, B.
"Numerical changes of and additions to WAQUA"
Waterloopkundig Laboratorium (in voorbereiding)

		Hoogwater			
		1980	1979	Extreem Hoogwater	
				eerste	tweede
totale afvoer	(m ³ /s)	1360 ^{*)}	965	3300	3300
afvoer bij brug te Doesburg	(m ³ /s)	860 ^{*)}	965	1765	1765
afvoer door Carbenterdoorlaat	(m ³ /s)	500	–	1535	1535
beneden waterstand kmr 911.35	(m)	9,77	9,16	11,27	11,27
ruwheid zomerbed k_z	(m)	0,30	0,30	0,30	0,30
ruwheid winterbed zonder be- groeiing k_w	(m)	0,20	0,20	0,20	0,07
coëfficiënt voor turbulente viscositeit ε	(m ² /s)	1	1	1	2
tijdstap	(s)	20	20	20	20
aantal tijdstappen in de be- rekening		630	450	450	450
^{*)} In het rekenprogramma is een totale afvoer ingevoerd van 1360 m ³ /s. De in 1980 gemeten afvoer bedraagt 1310 m ³ /s respectievelijk 810 m ³ /s.					

Tabel 1 Randvoorwaarden en overige gegevens van uitgevoerde hoogwaterberekeningen

term	punt (kolom,regel)	(50,10)	(75,10)	(100,10)	(30,30)	(60,30)	(90,30)	(120,30)	(40,50)	(80,50)	(120,50)
R $\partial^2 U / \partial x^2$	(10^{-6})	0	0	-0,004	0,019	0	0,065	0	0,0032	0	0,077
k $\partial^4 U / \partial x^4$	(10^{-6})	4,500	-0,280	0,150	0	-0,410	0,430	0,037	0	0,001	-0,001
-k $\partial^4 U / \partial x^2 \partial y^2$	(10^{-6})	-0,170	-0,012	0,012	0,012	0,270	0,150	-0,049	0,025	0,025	0,012
2k $\partial^4 U / \partial y^4$	(10^{-6})	0	0,220	-0,120	-0,100	0,440	0,440	-0,025	-0,049	0,025	0,250
2f $\partial^2 V / \partial x^2$	(10^{-6})	0,110	0	0,033	-0,007	-0,140	0,033	-0,027	0,013	0,013	0,007
3f $\partial^2 V / \partial y^2$	(10^{-6})	-0,180	0,030	0	-0,030	0,100	-0,050	0	-0,010	-0,010	-0,150
-3U $\partial^3 U / \partial x^3$	(10^{-6})	-1,600	0,086	0	0,059	-2,200	0,640	0,840	0	0,039	2,500
V $\partial^3 U / \partial x^2 \partial y$	(10^{-6})	0,340	0,056	0,084	-0,098	0,170	0,500	0	0	0	0,640
-9 $\partial U / \partial x \cdot \partial^2 U / \partial x^2$	(10^{-6})	0	0	0,054	0	0,004	0	0	0,019	0,054	-0,900
2 $\partial^2 U / \partial x \partial y \cdot \partial V / \partial x$	(10^{-6})	0	-0,081	0	0,046	0,410	-0,093	0	0	0	0,050
-2 $\partial^2 V / \partial x^2 \cdot \partial U / \partial y$	(10^{-6})	1,800	0	0,009	0,004	0,170	0,028	0	-0,002	0,004	-0,007
-3 $\partial^2 V / \partial y^2 \cdot \partial U / \partial y$	(10^{-6})	-3,100	-0,050	0	0,017	-0,130	-0,042	0	0,001	-0,003	0,170
-4V $\partial^3 U / \partial y^3$	(10^{-6})	-19,000	-2,200	1,300	0,130	3,100	1,300	-0,260	0	0,260	-1,000
-6 $\partial^3 U / \partial y^3 \cdot \partial V / \partial y$	(10^{-6})	8,800	0,048	0,028	0	0,530	0,015	0	0	0	0,044
$C_{U0} = \frac{\Delta x^2}{24}$ x som van de termen (* 10^{-6})		- 320	- 86	49	2,1	86	86	19	-0,9	18	53

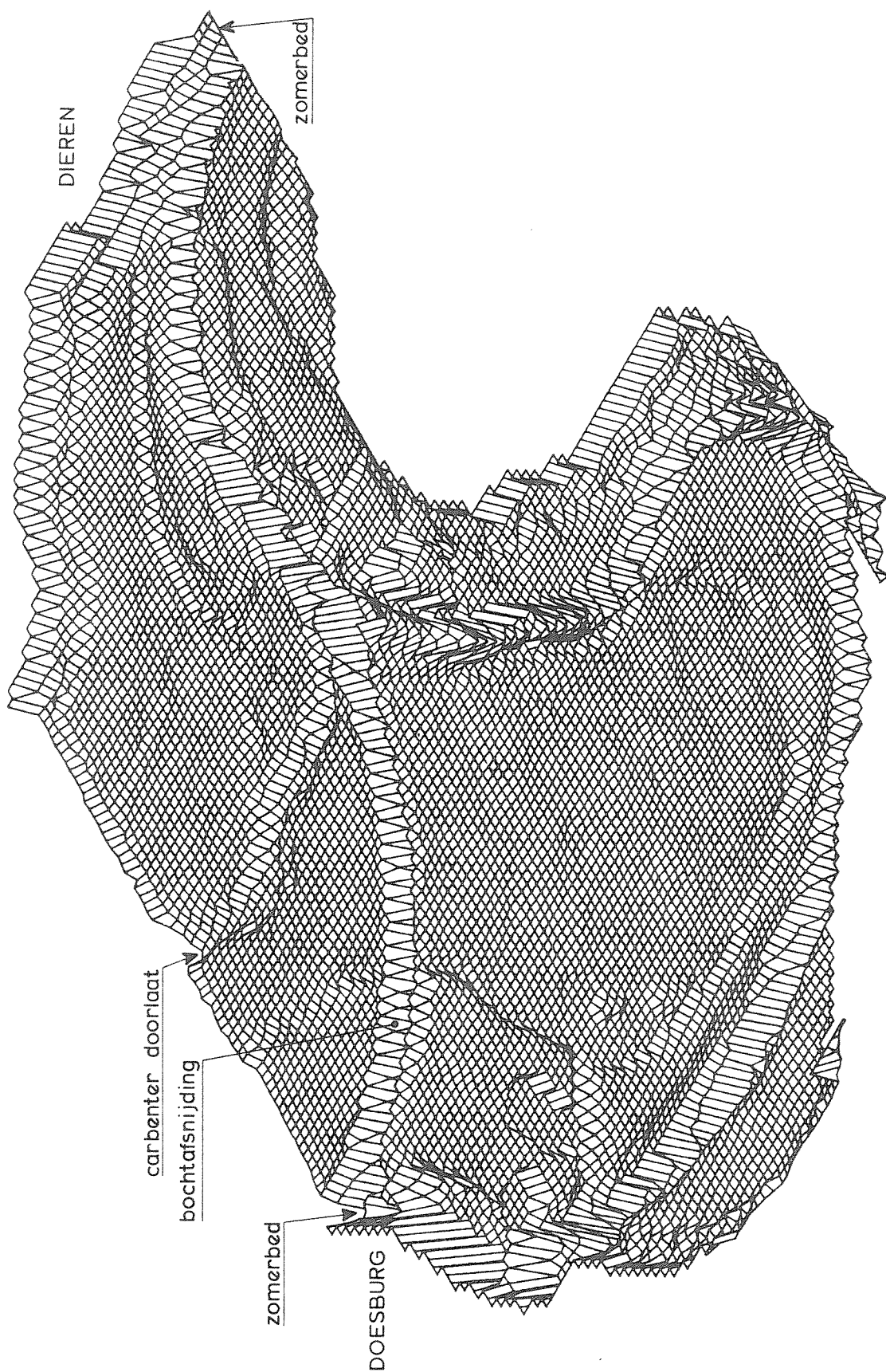
Tabel 2 Grootte van de resttermen op een aantal plaatsen in het rekenmodel

punt (kolom, regel)		(50,10)	(75,10)	(100,10)	(30,30)	(60,30)	(90,30)	(120,30)	(40,50)	(80,50)	(120,50)
term											
$U \partial U / \partial x$	advektie (10^{-3})	4,80	0	0,07	0	-1,5	0	0	-0,02	0,035	1,2
$V \partial U / \partial y$	advektie (10^{-3})	-4,80	0,2	-0,15	-0,12	0,69	-0,46	0	0,013	-0,12	0,90
$\frac{g \partial \zeta}{\partial x}$	verhang (10^{-3})	kan niet lokaal worden berekend orde van grootte: $0,8 \text{ à } 3$									
$\frac{g U^2}{C^2 (H+\zeta)}$	weerstand (10^{-3})	0,5	0,04	0,05	0,2	0,8	0,2	0,1	0,04	0,002	0,9
$-fV$	Coriolis (10^{-3})	-0,03	-0,01	-0,05	0,02	-0,06	0,06	-0,04	-0,009	-0,04	-0,08
$-\varepsilon (\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2)$	turbulente viscositeit (10^{-3})	0	-0,04	-0,01	-0,01	-0,08	-0,18	0	-0,02	-0,01	-0,0034
C_{U0}	(10^{-3})	0,3	-0,09	0,05	0,002	0,09	0,09	0,02	-0,001	0,02	0,05

Tabel 3 Vergelijking van termen uit de bewegingsvergelijking met de coëfficiënt C_{U0}

termen in de continuïteitsvergelijking	punt (50,10)
$\frac{\partial}{\partial x} \{U(\zeta+H)\} \quad (10^{-3})$	89
$\frac{\partial}{\partial y} \{V(\zeta+H)\} \quad (10^{-3})$	56
$C_{(\zeta+H)0} \quad (10^{-3})$	1,5

Tabel 4 Vergelijking van termen uit de continuïteitsvergelijking met de coëfficiënt $C_{(\zeta+H)0}$

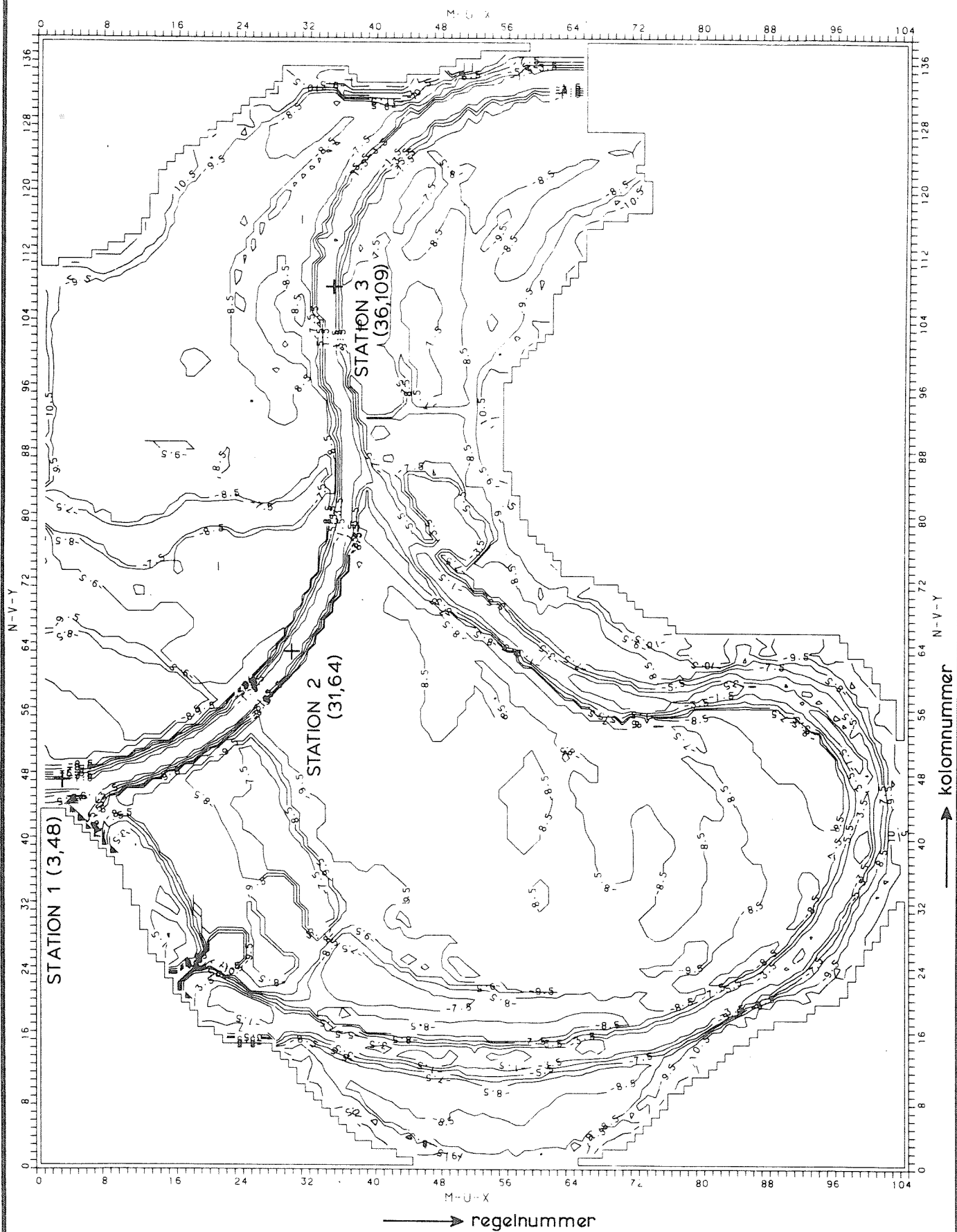


BODEMLIGGING IN PERSPECTIEF

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 1

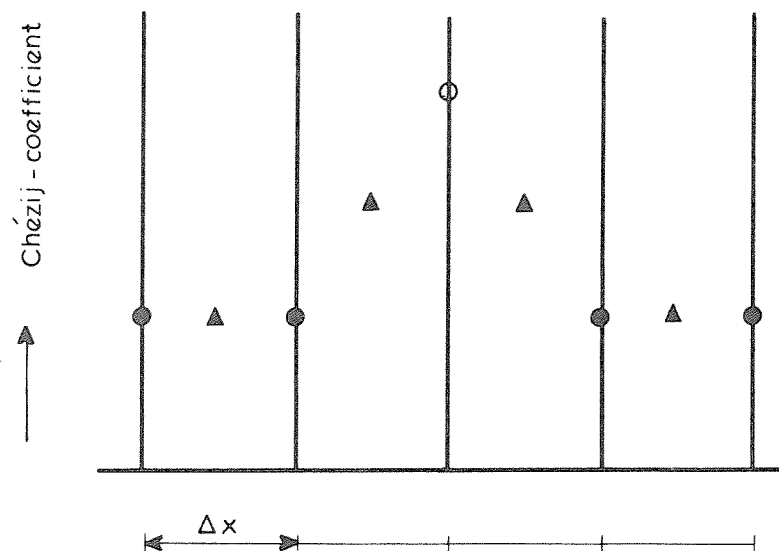


HOOGTELUNENKAART NA SCHEMATISATIE

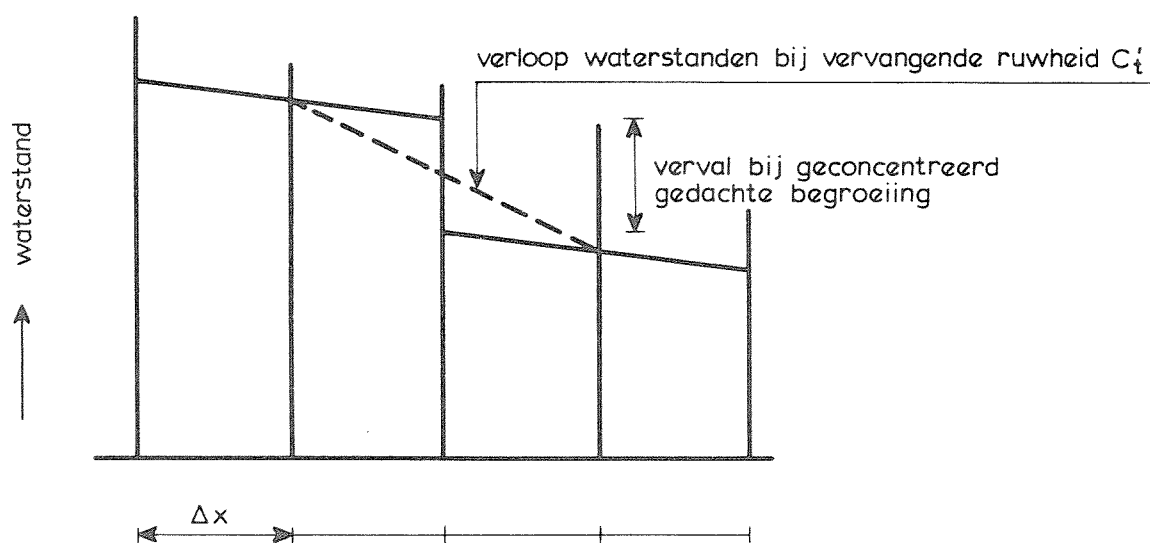
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 2



- Chézy - waarde gras zonder begroeiing C_{gr}
- Chézy - waarde gras met begroeiing, zoals het lokaal door het programma wordt berekend C'_t
- ▲ Chézy - waarde in de bewegingsvergelijking C_t

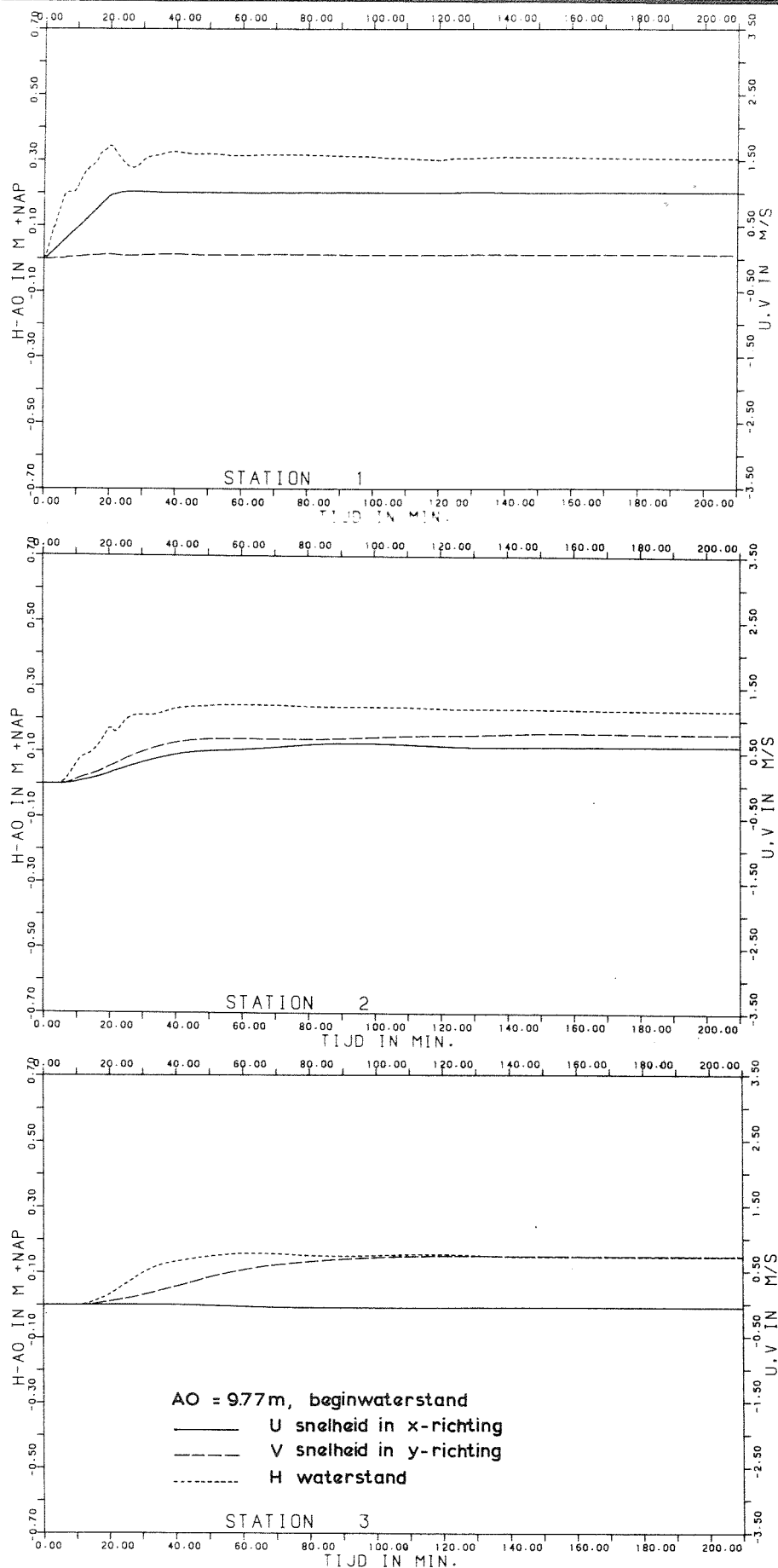


MIDDELING VAN C - WAARDEN EN VERLOOP
VAN WATERSTANDEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 3



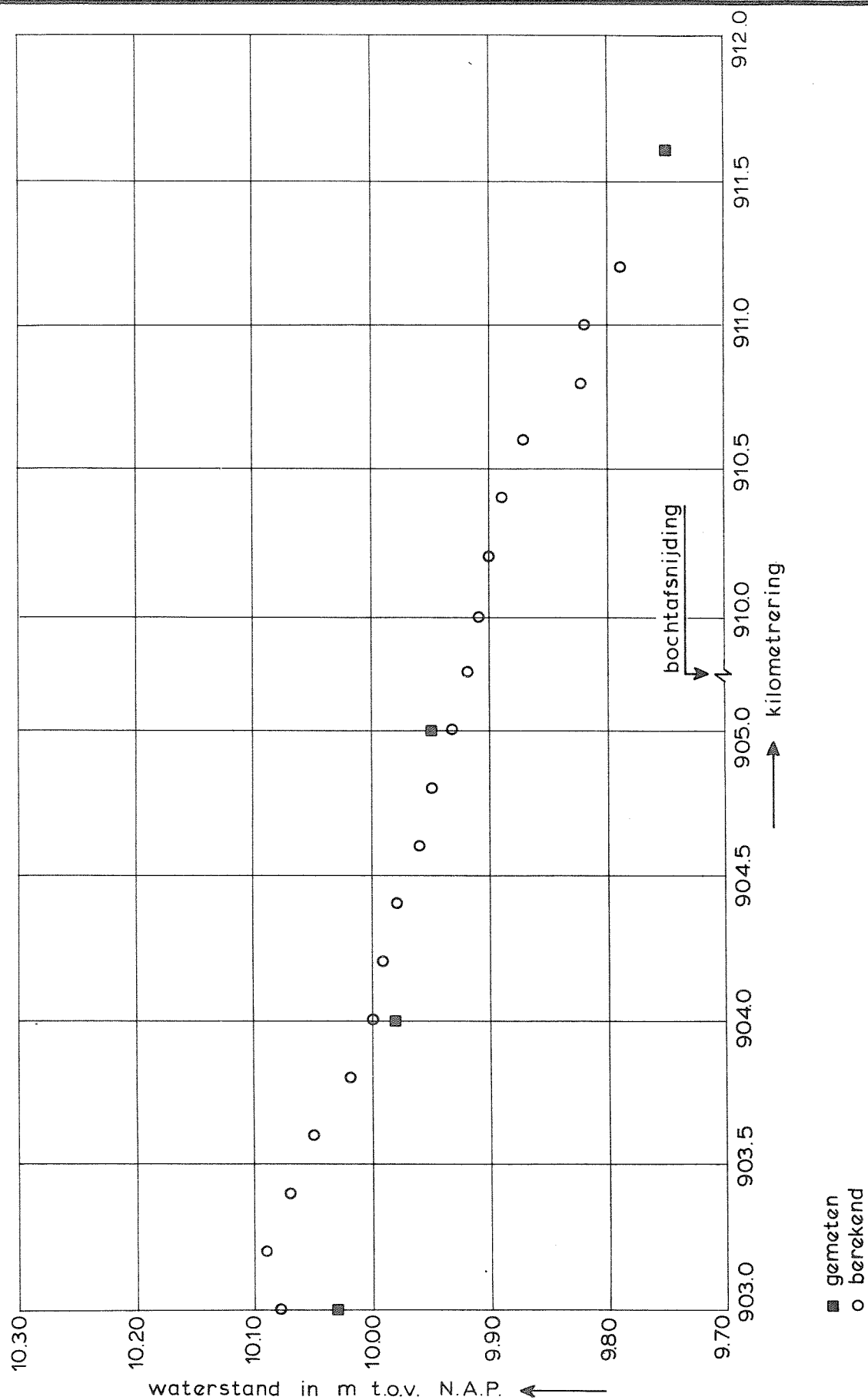
HOOGWATER 1980 :

WATERSTANDEN ALS FUNKTIE VAN DE TIJD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 4

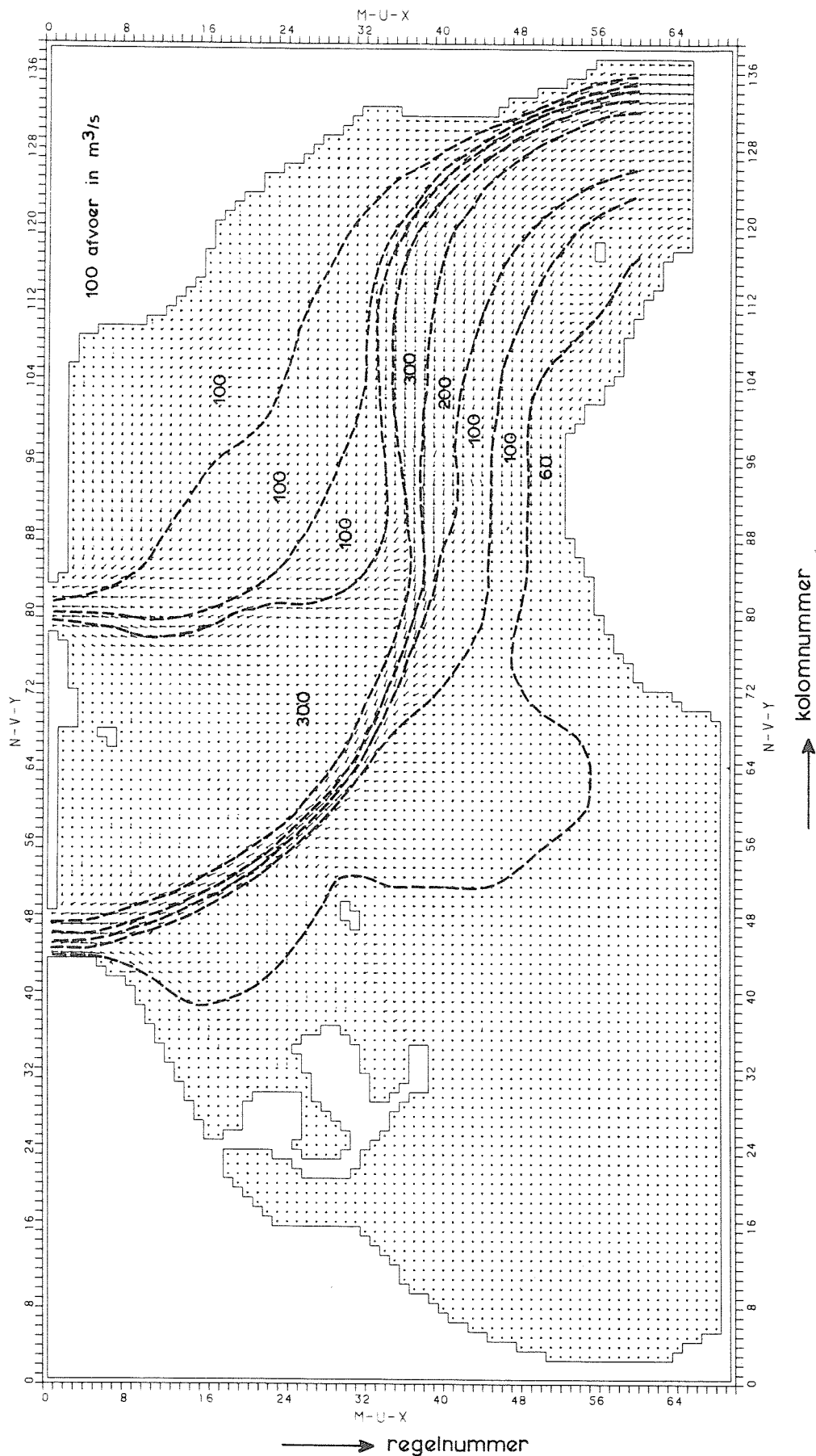


HOOGWATERSTAND 1980:
WATERSTANDEN IN HET ZOMERBED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 5

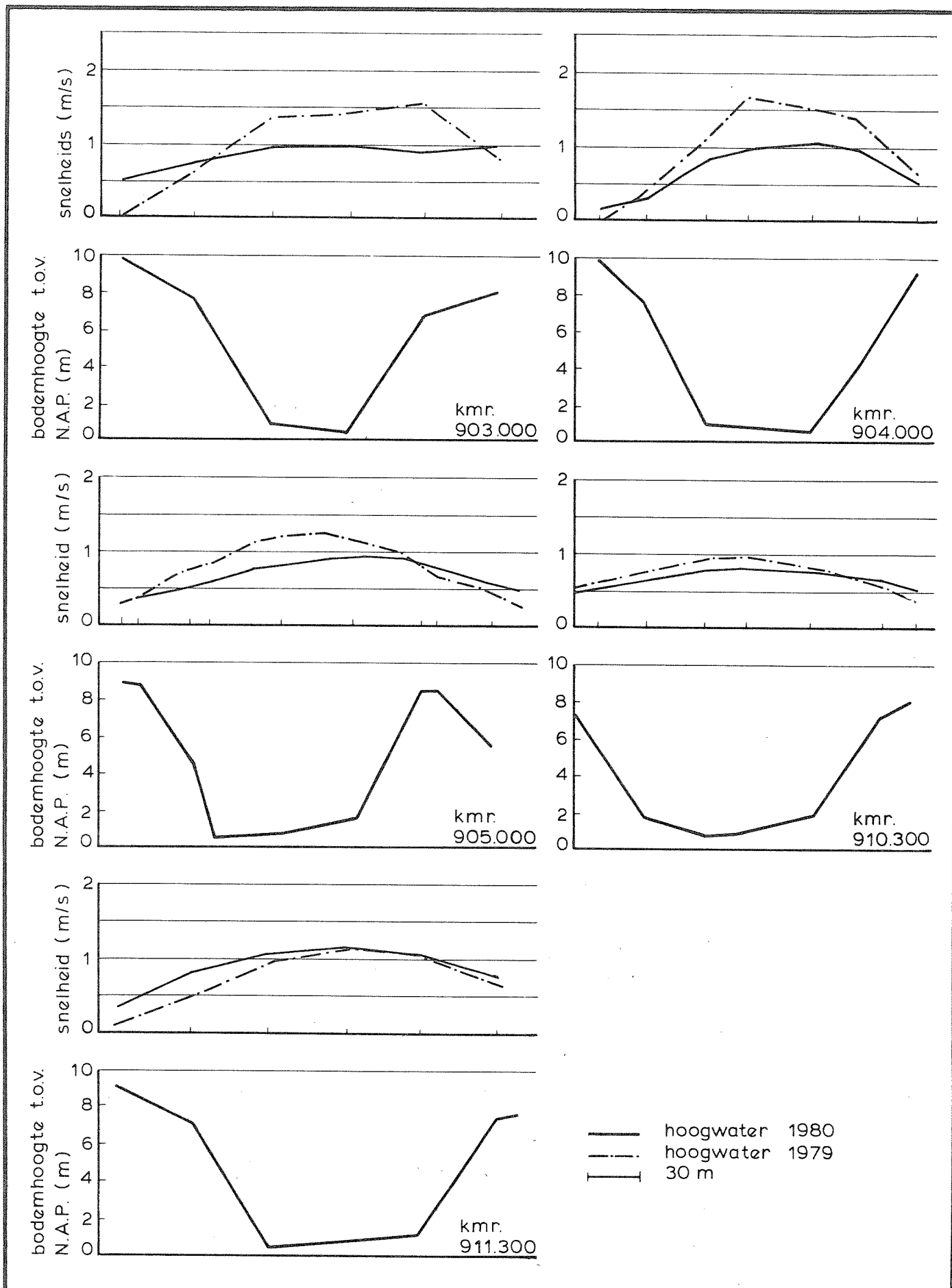


HOOGWATER 1980 :
SNELHEIDSVELD MET STROOMBANEN

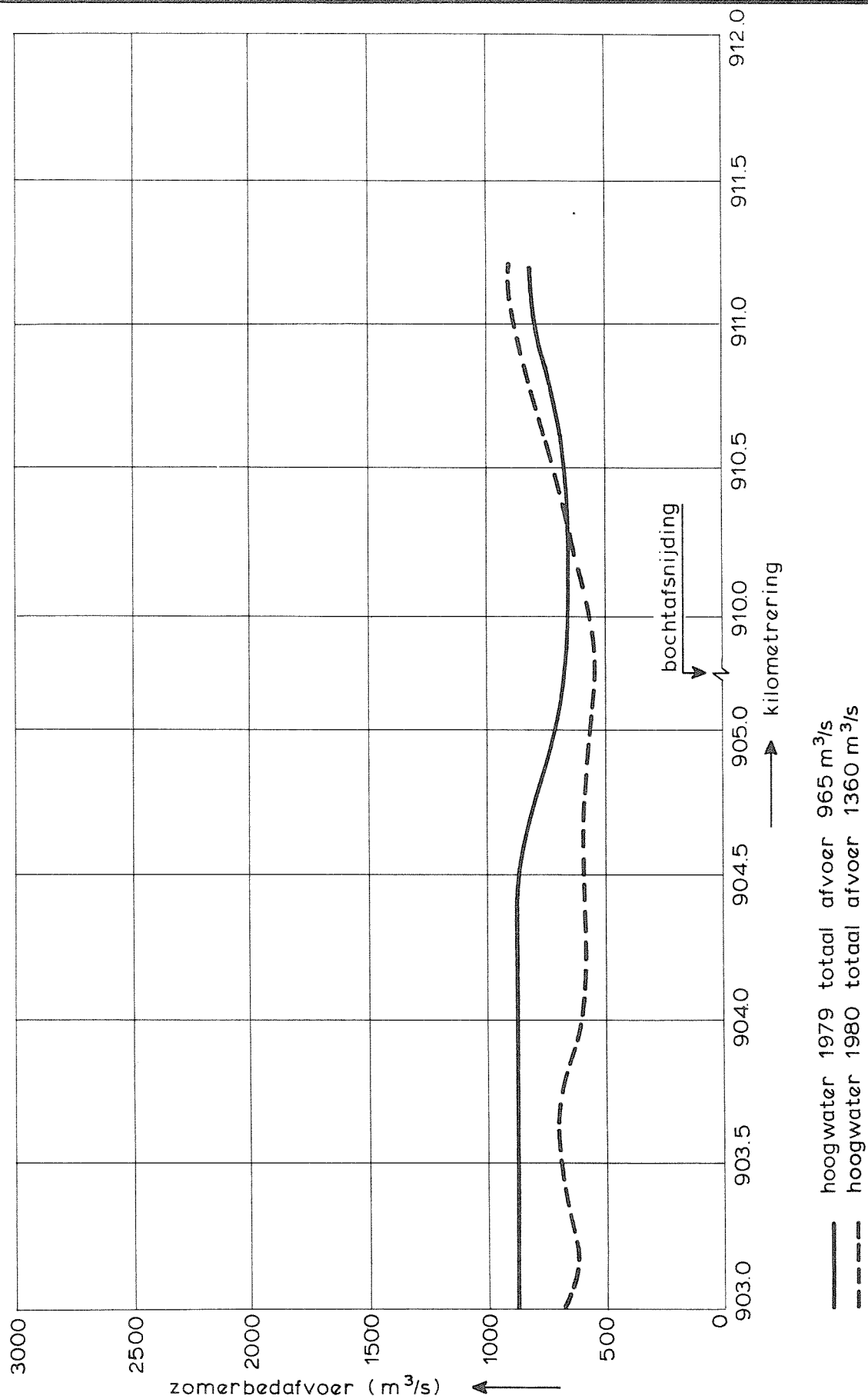
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 9



HOOGWATER 1980 EN 1979
BODEM- EN SNELHEIDSPROFIELEN

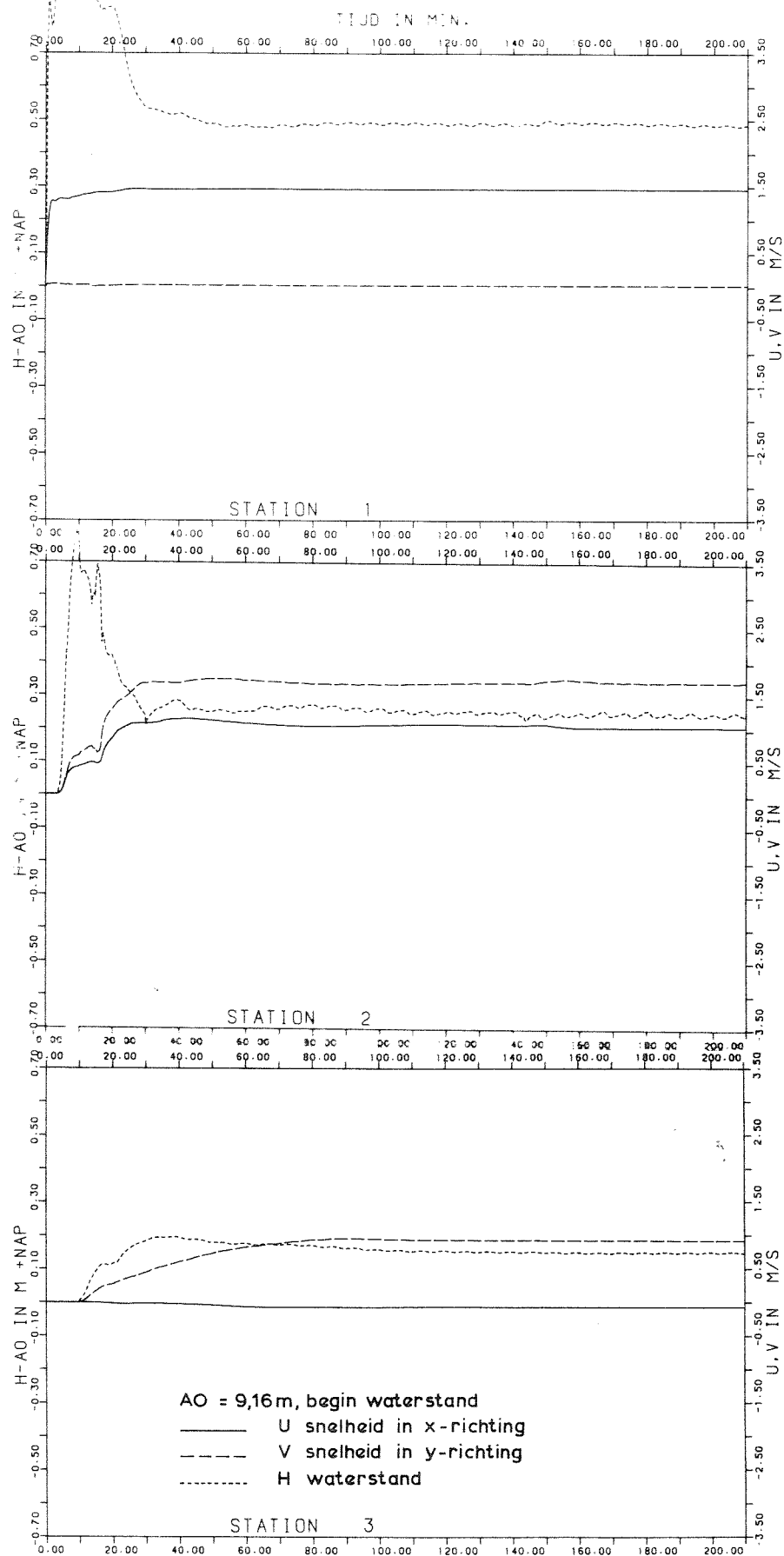


HOOGWATER 1980 EN 1979
AFVOER DOOR HET ZOMERBED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 11



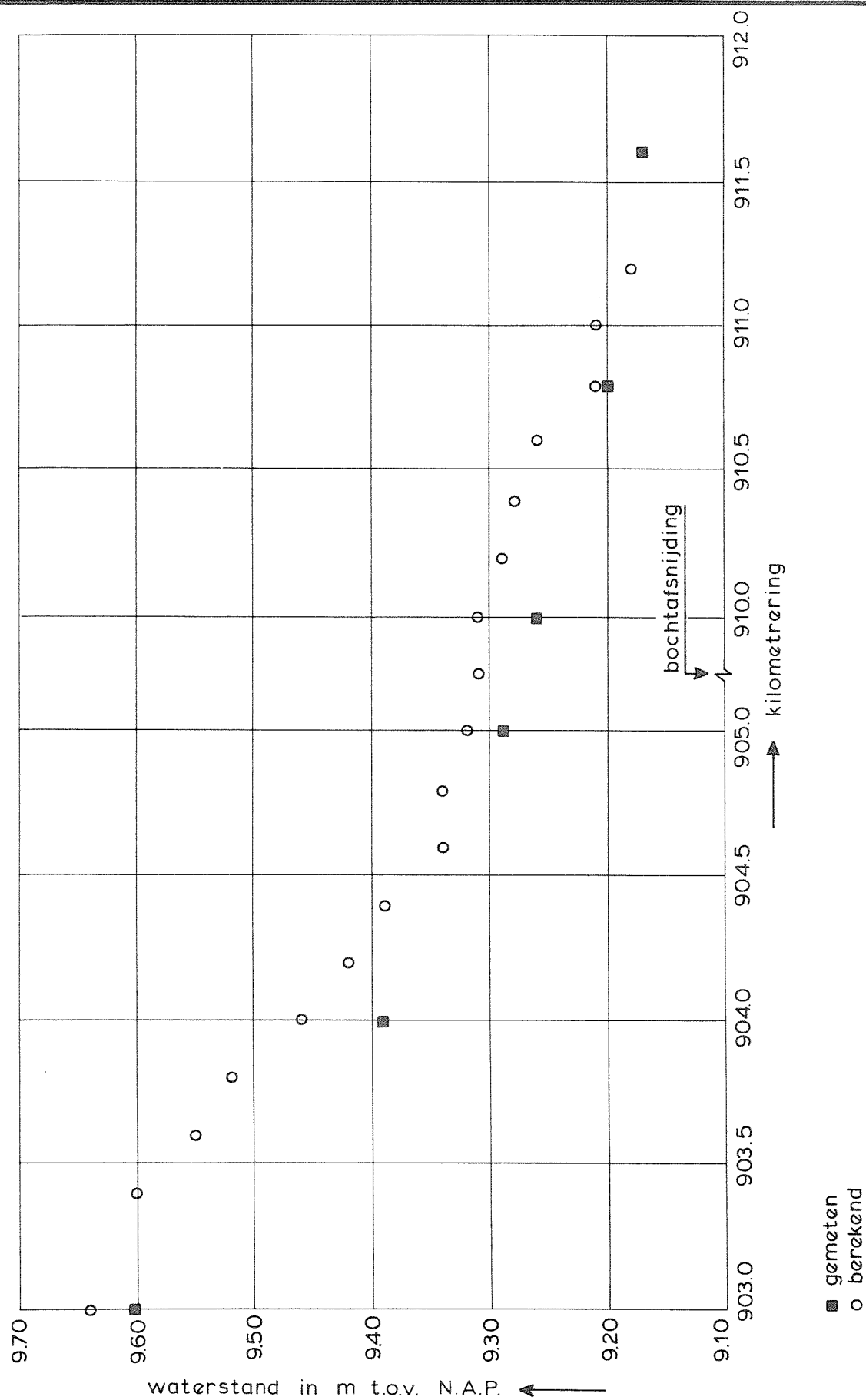
HOOGWATER 1979 :

WATERSTANDEN ALS FUNKTIE VAN DE TIJD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 12

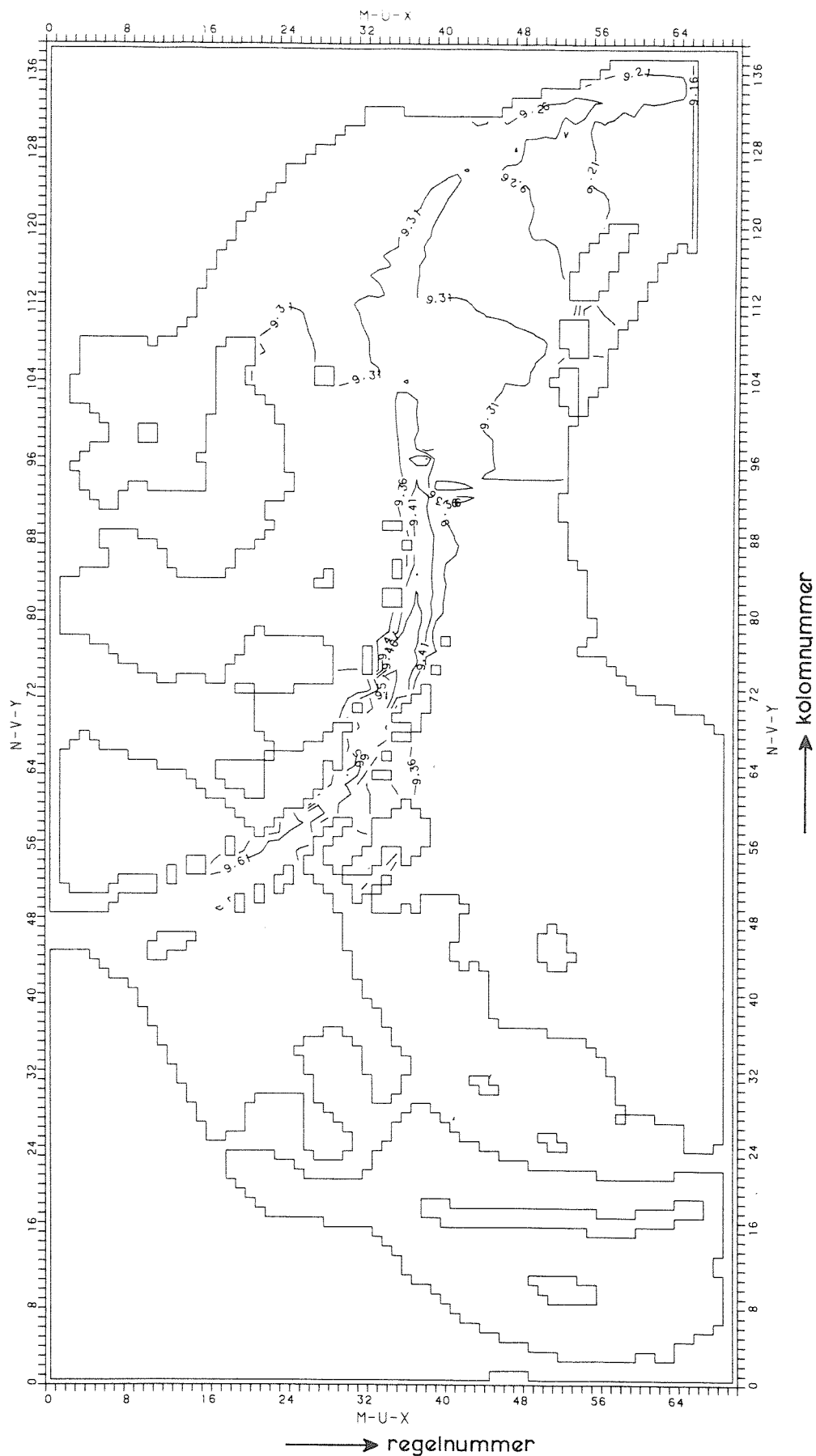


HOOGWATER 1979 ;
WATERSTANDEN IN HET ZOMERBED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 13

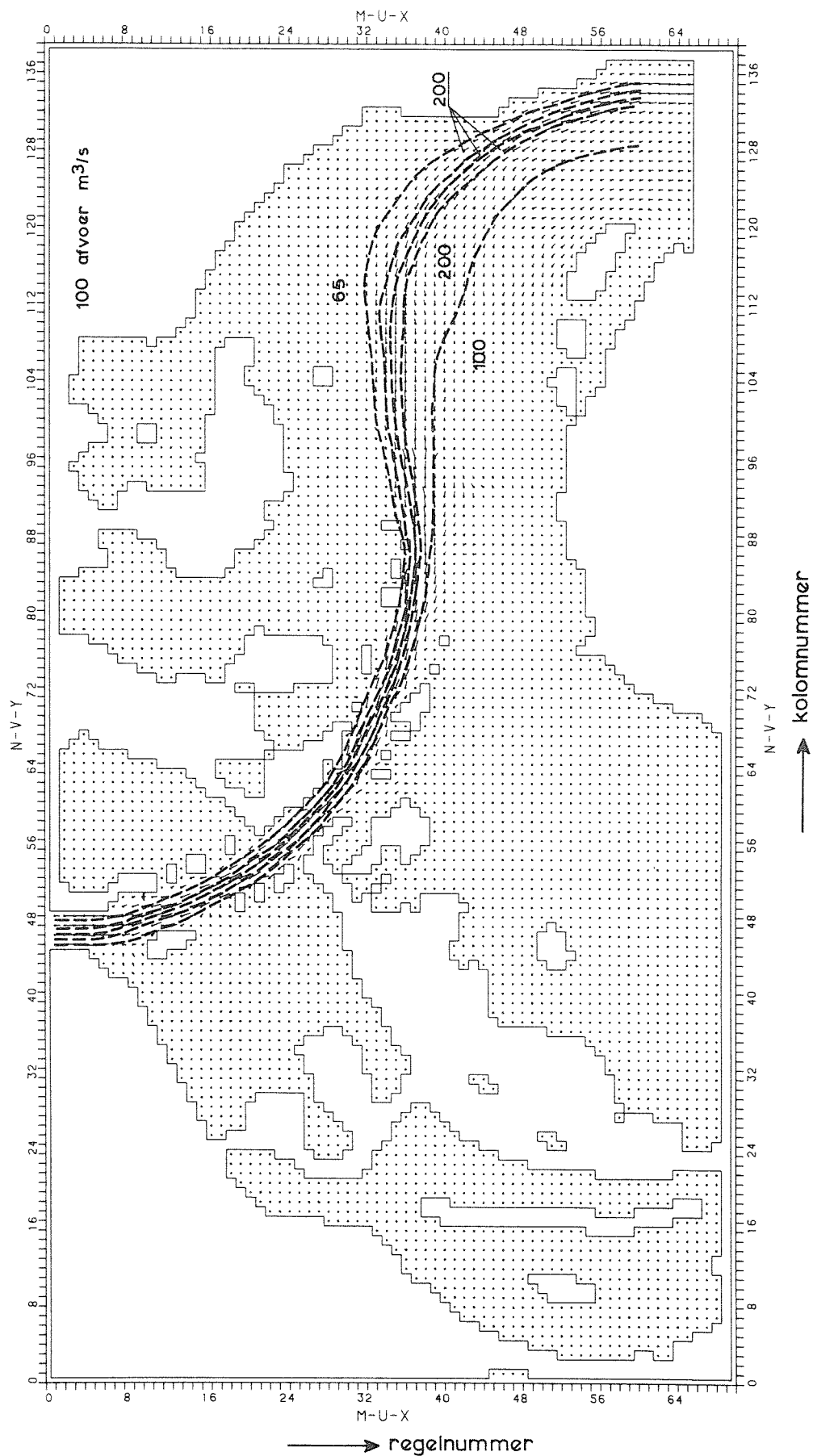


HOOGWATER 1979 :
LUNEN VAN GELUK ENERGIE NIVEAU

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 15

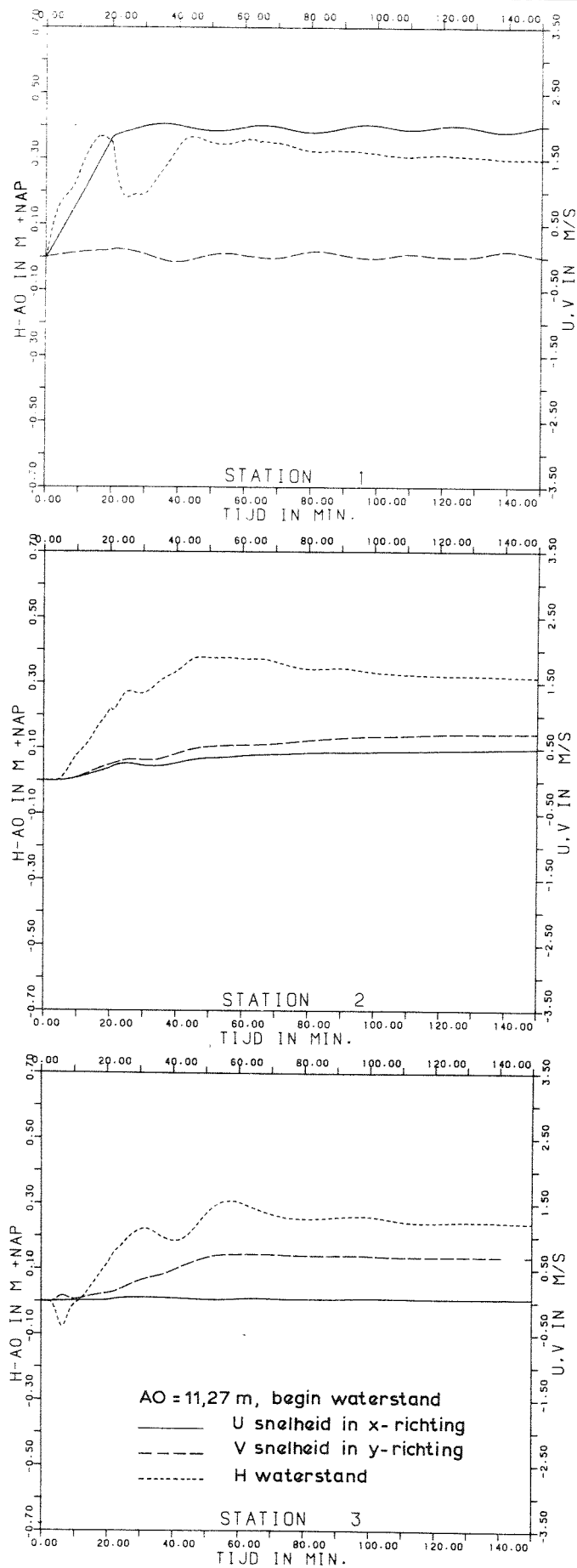


HOOGWATER 1979 :
SNELHEIDSVELD MET STROOMBANEN

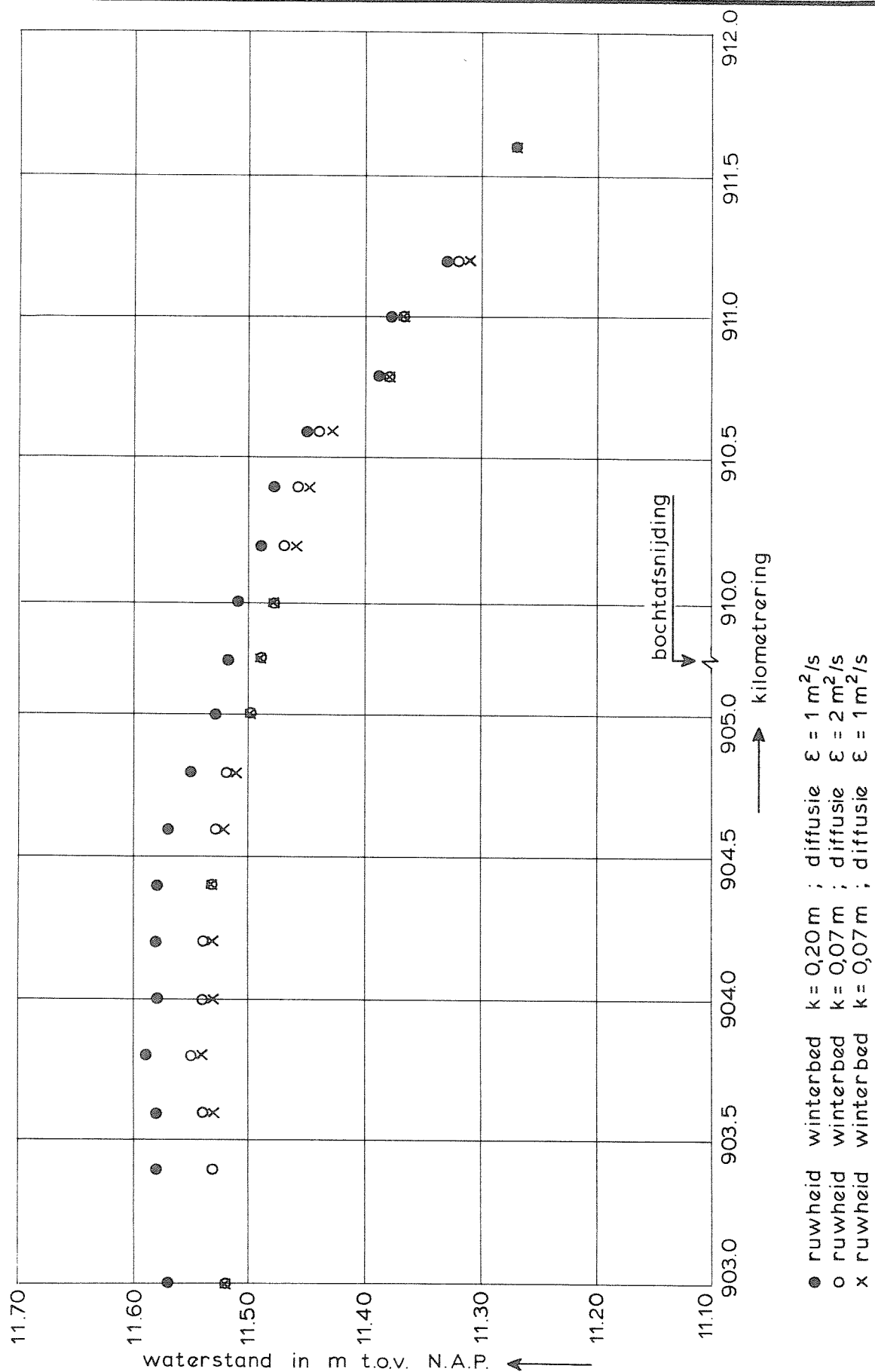
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 17



EXTREEM HOOGWATER ($k_w = 0,20 \text{ m}$, $\varepsilon = 1 \text{ m}^2/\text{s}$)
 WATERSTANDEN ALS FUNKTIE VAN DE TIJD



EXTREEM HOOGWATER ($k_w=0,20\text{m}$; $\epsilon=1\text{m}^2/\text{s}$)
WATERSTANDEN IN HET ZOMERBED

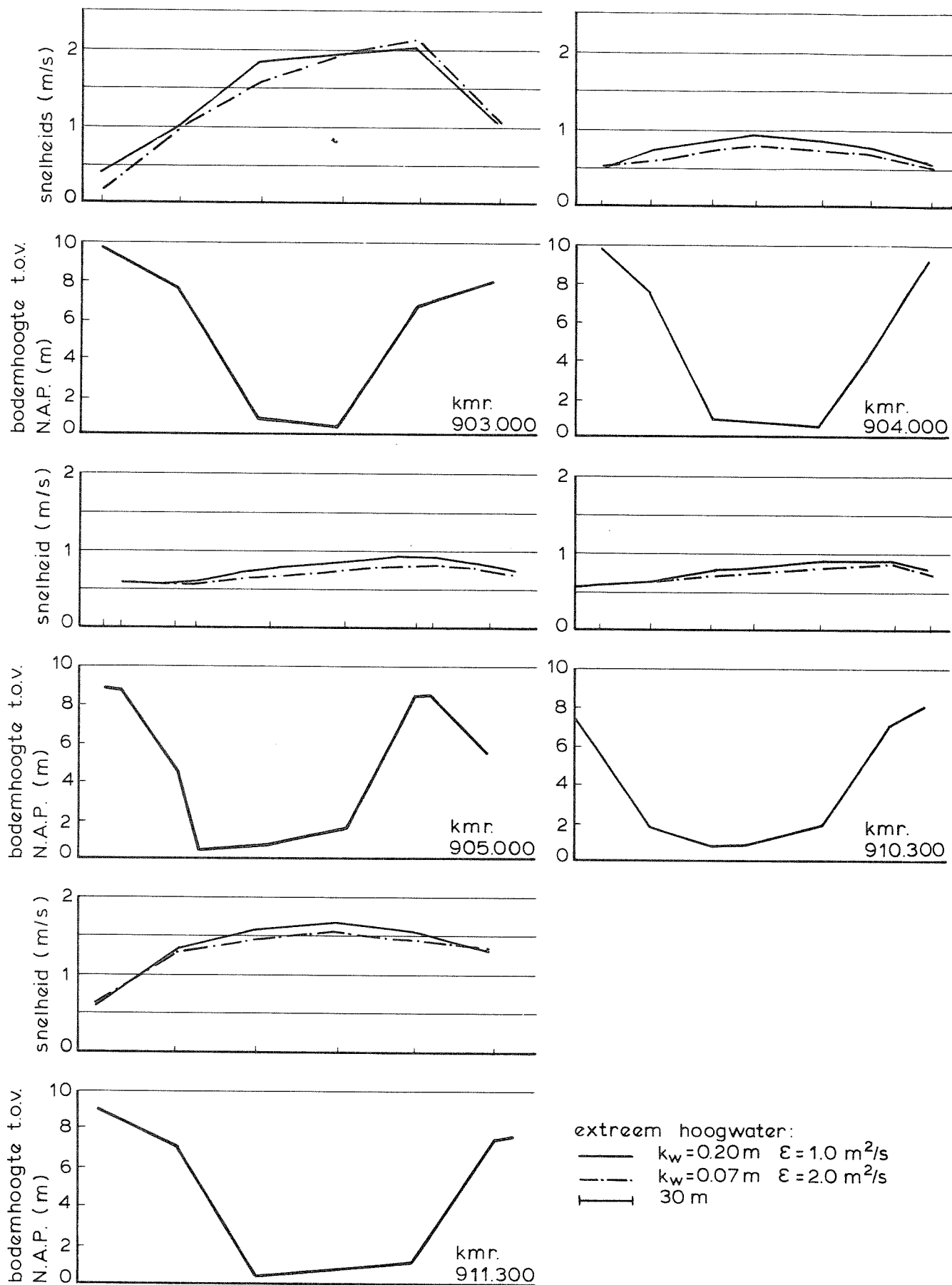


EXTREEM HOOGWATER ($k_w = 0,20 \text{ m}$, $\varepsilon = 1 \text{ m}^2/\text{s}$)
 SNELHEIDSVELD MET STROOMBANEN

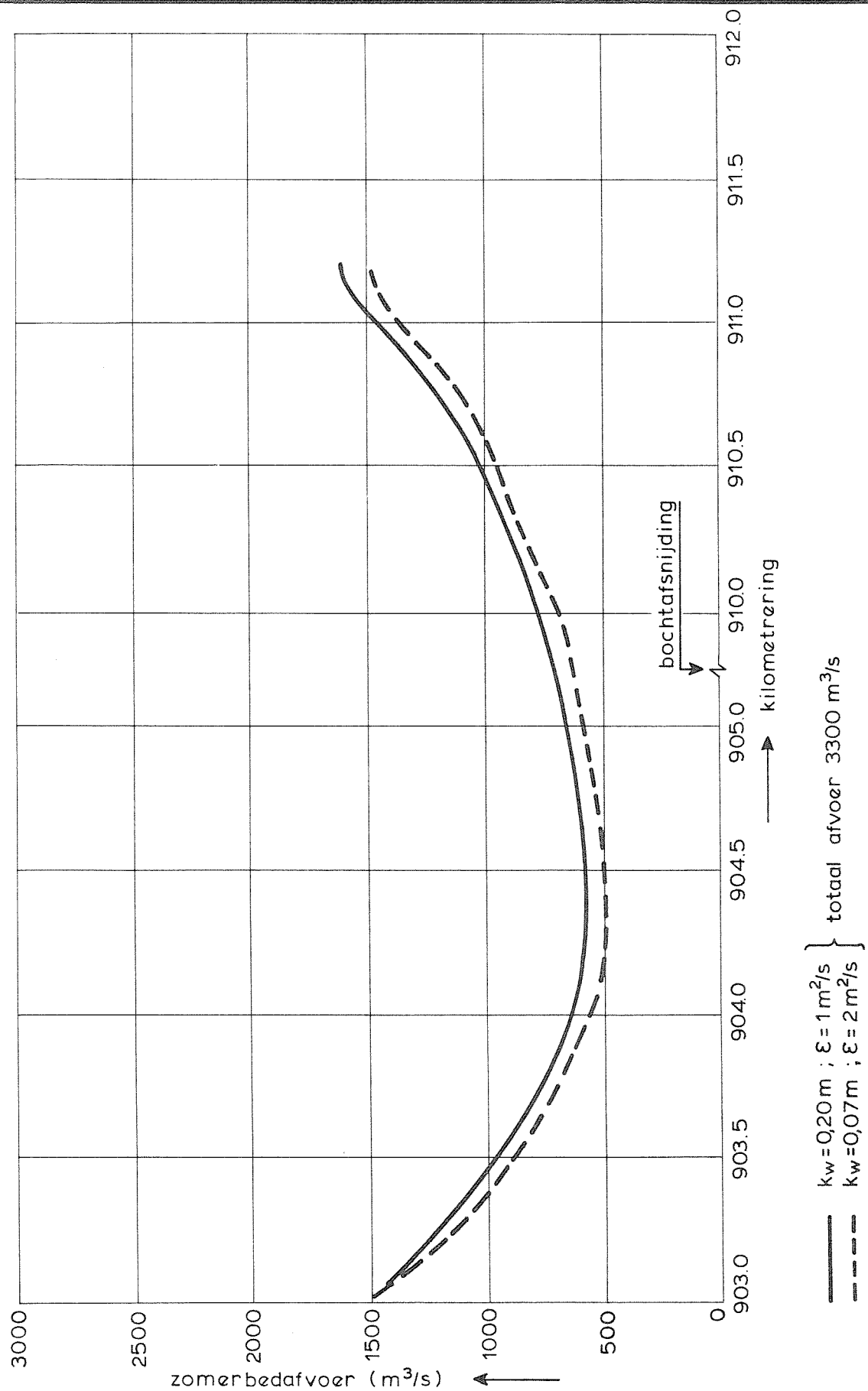
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 23



EXTREEM HOOGWATER
BODEM- EN SNELHEIDSPROFIELEN

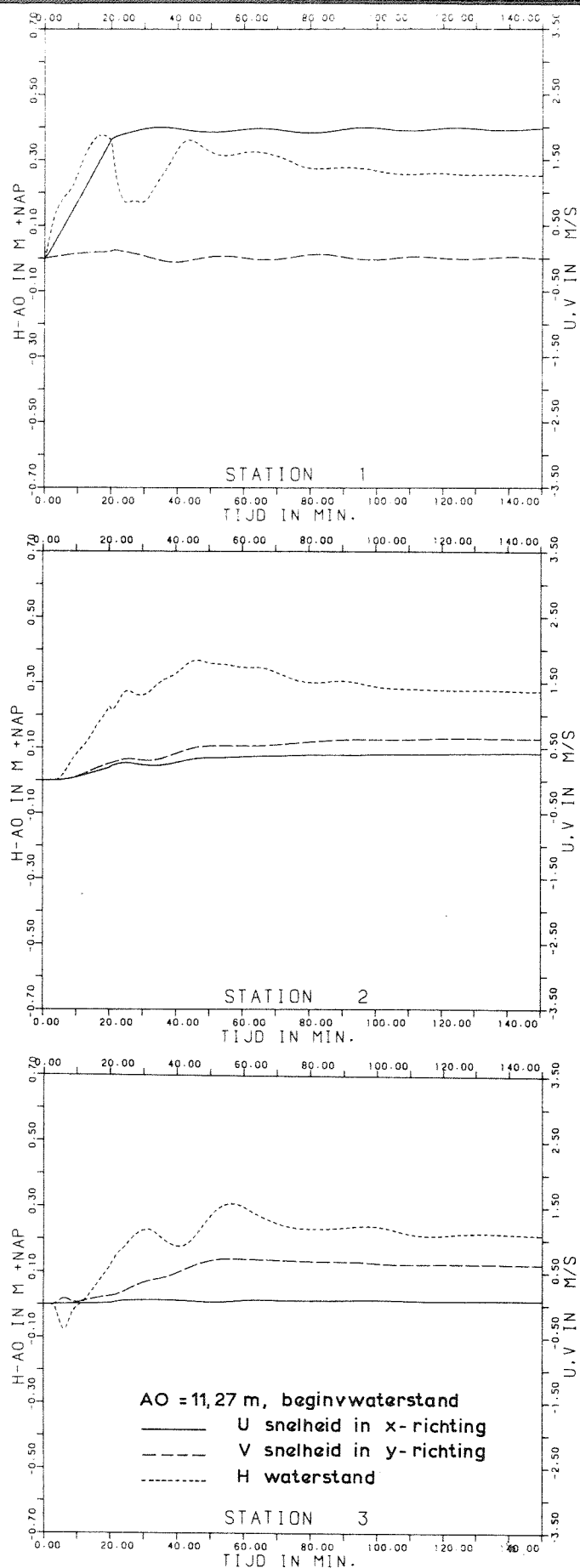


EXTREEM HOOGWATER
AFVOER DOOR HET ZOMERBED

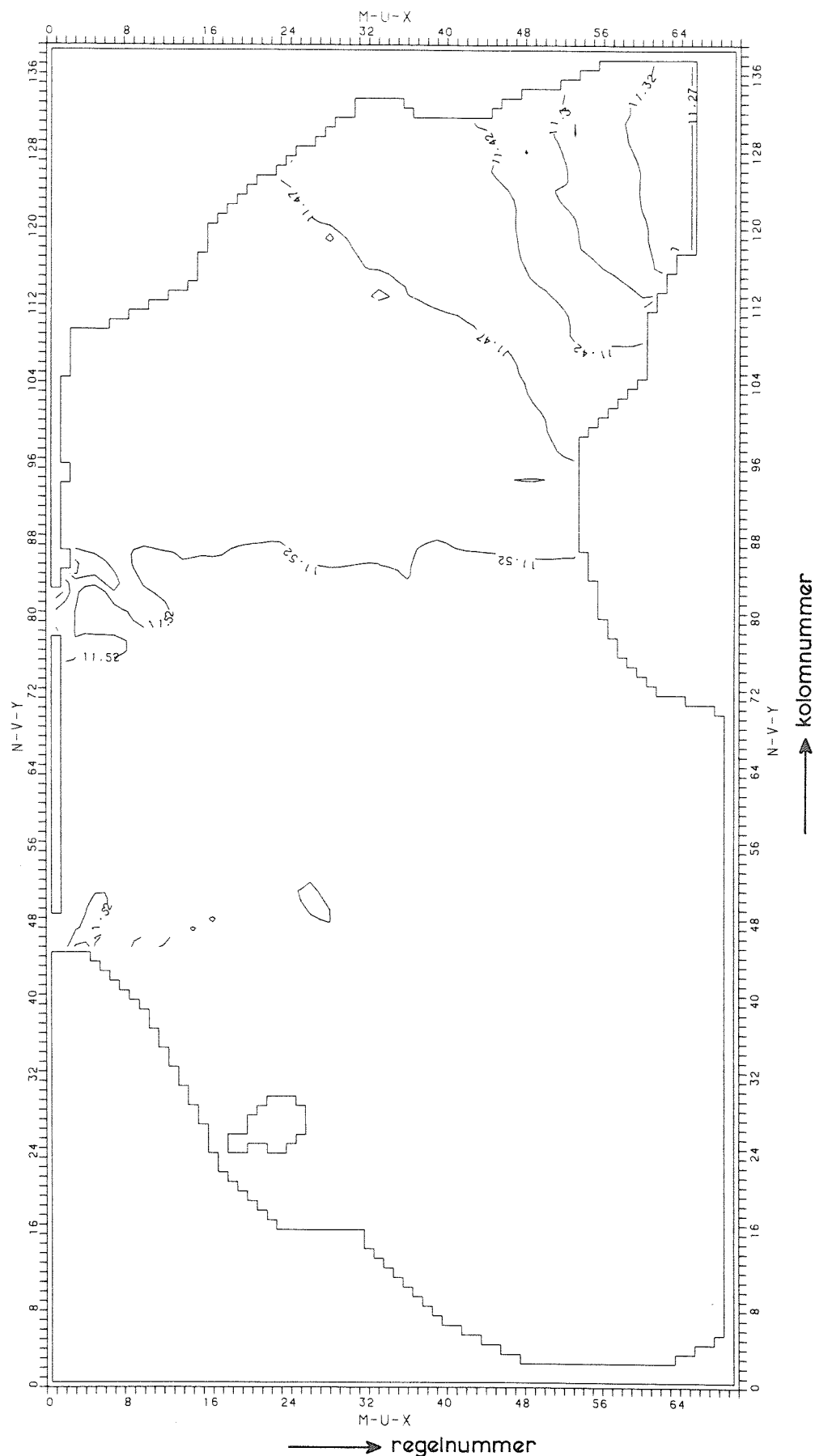
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 25



EXTREEM HOOGWATER ($k_w = 0,07 \text{ m}$, $\varepsilon = 2 \text{ m}^2/\text{s}$)
 WATERSTANDEN ALS FUNKTIE VAN DE TIJD

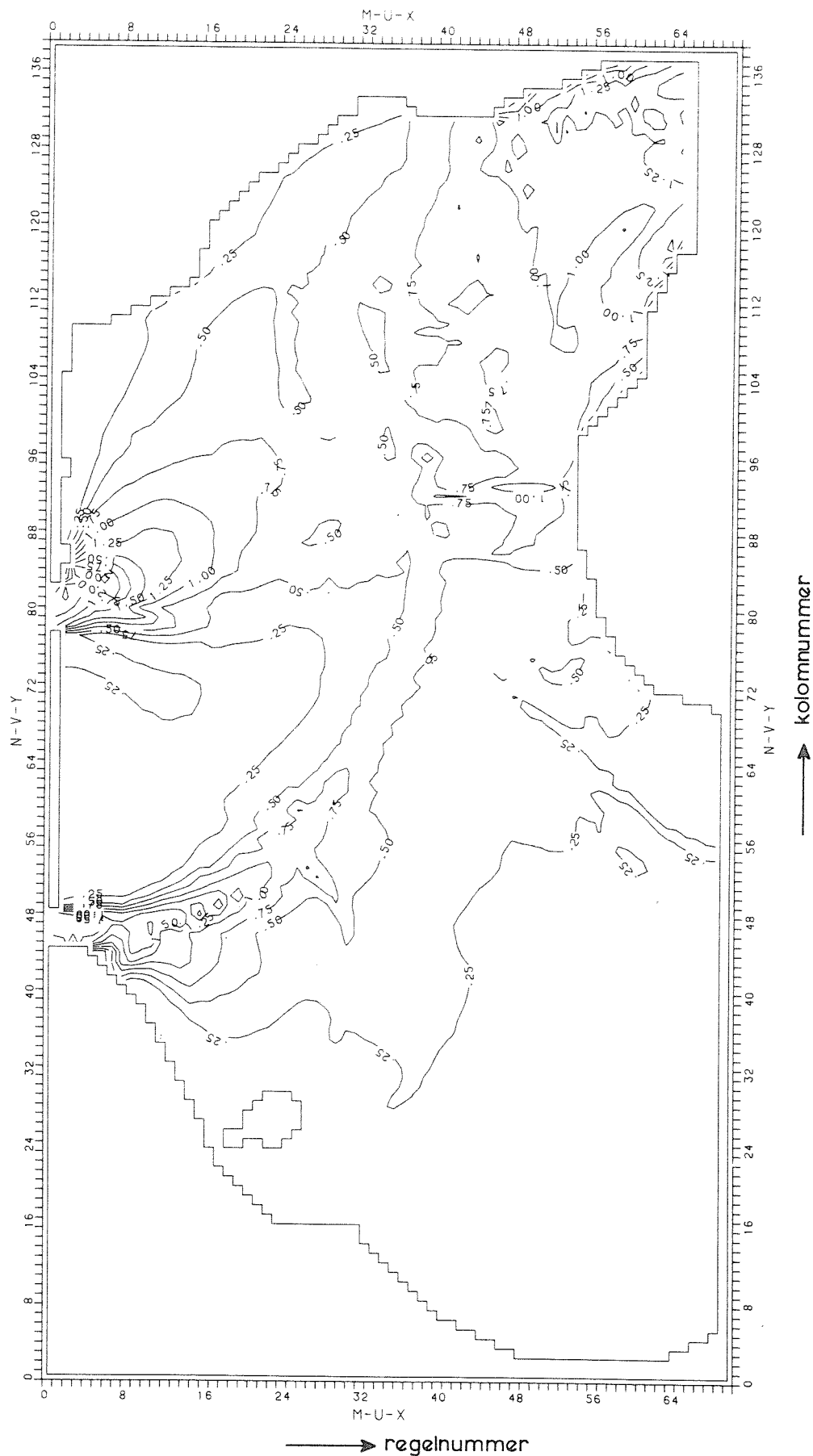


EXTREEM HOOGWATER ($k_w = 0,07 \text{ m}$, $\epsilon = 2 \text{ m}^2/\text{s}$)
LUNEN VAN GELUKE WATERSTAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 27

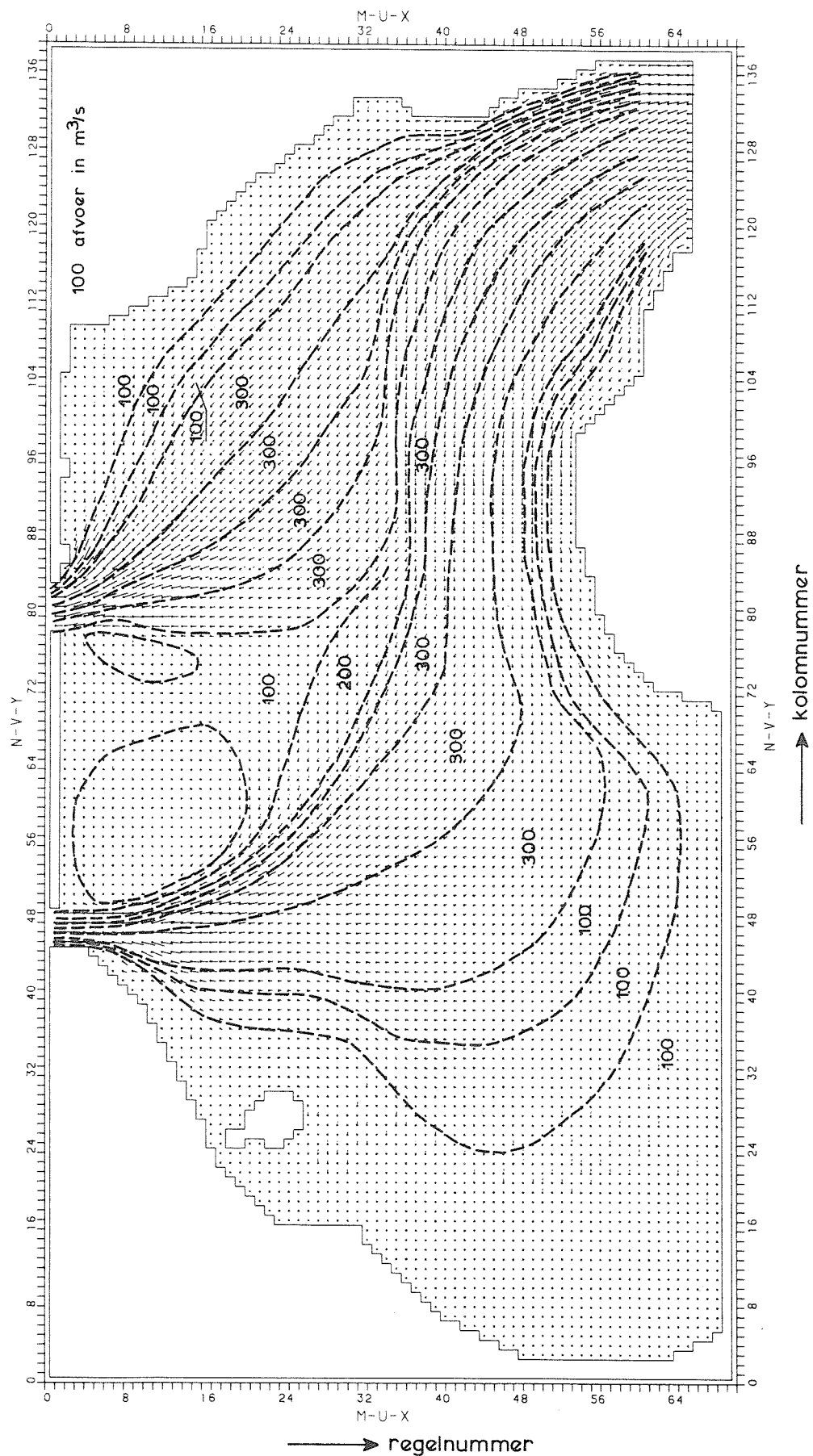


EXTREEM HOOGWATER ($k_w = 0,07 \text{ m}$, $\varepsilon = 2 \text{ m}^2/\text{s}$)
 LUNEN VAN GELUKE SNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 29

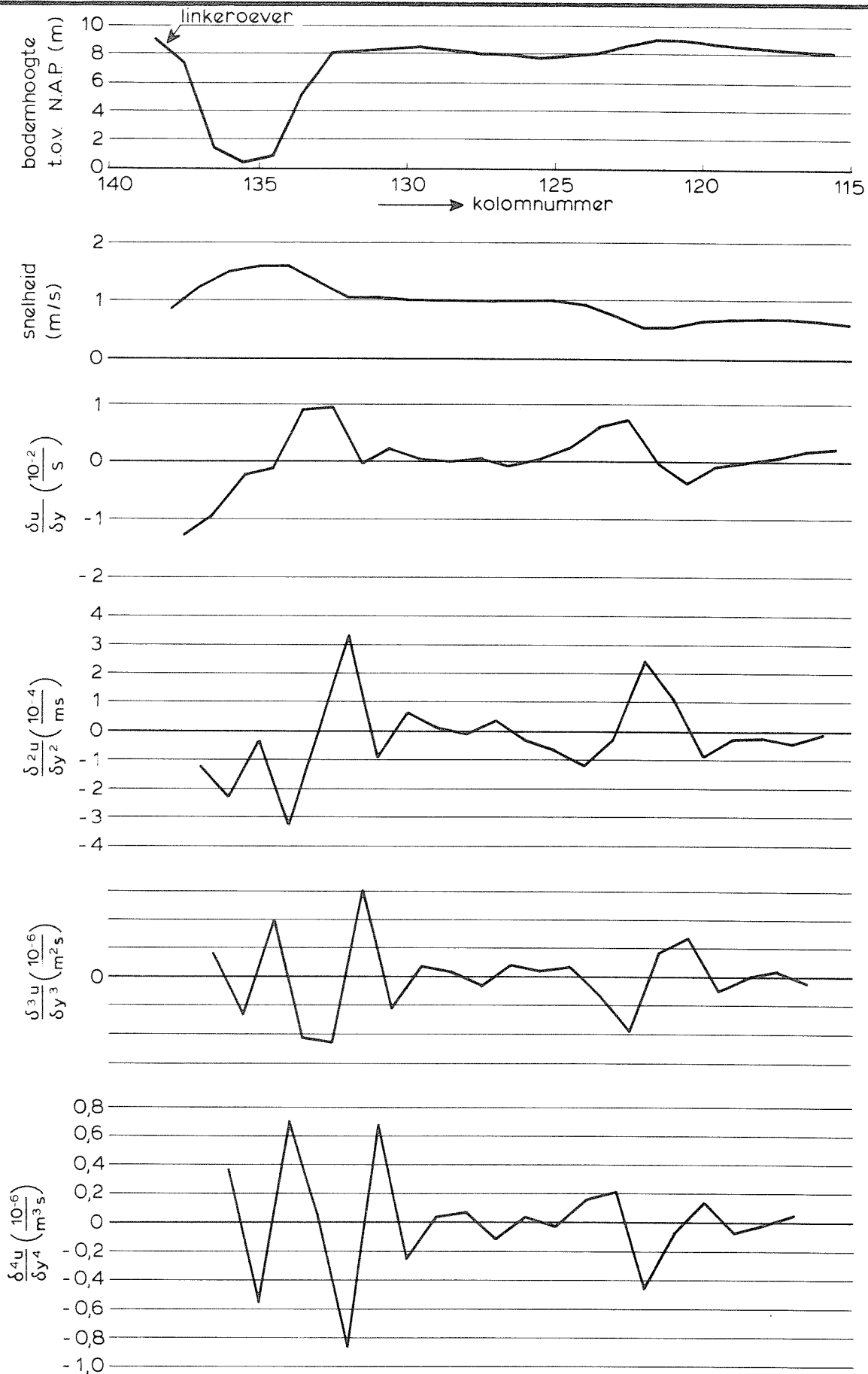


EXTREEM HOOGWATER ($k_w=0,07 \text{ m}$, $\varepsilon=2 \text{ m}^2/\text{s}$)
 SNELHEIDSVELD MET STROOMBANEN

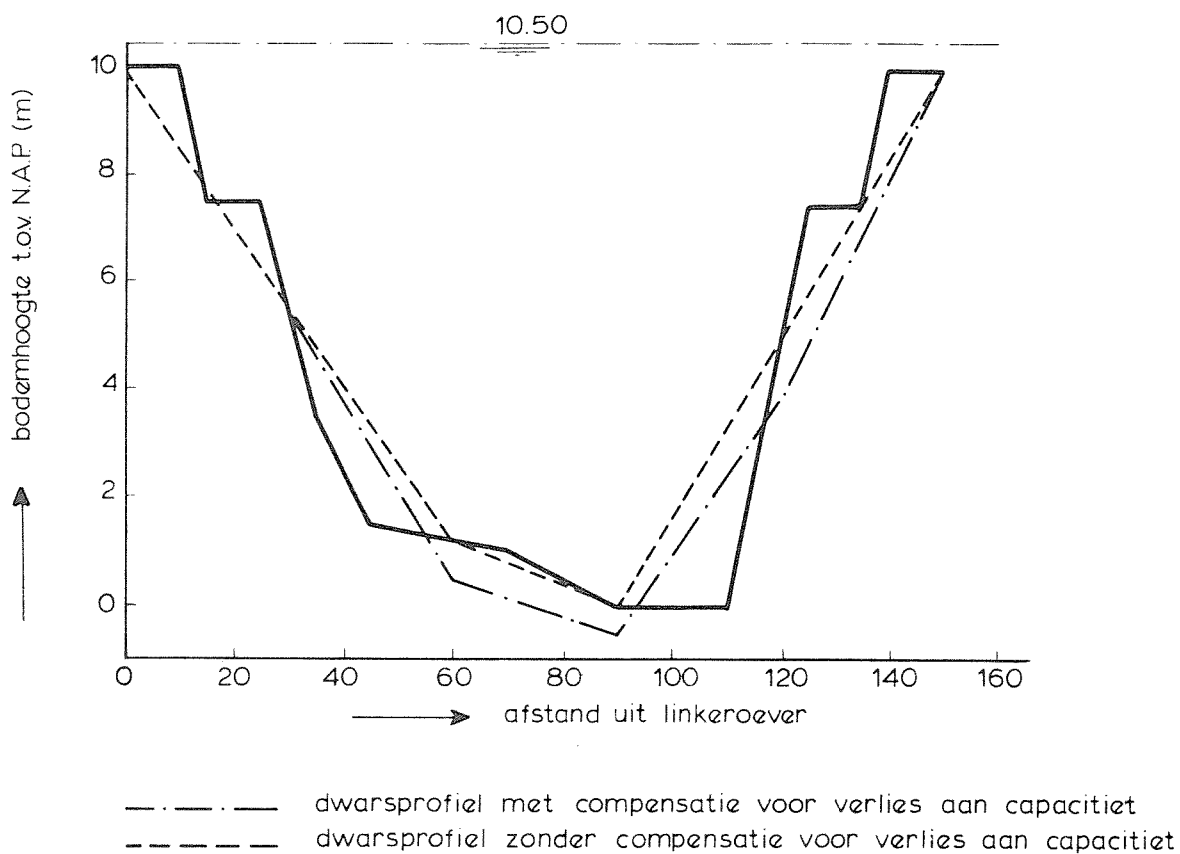
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1520

FIG. 30



DWARSPROFIEL, SNELHEIDSPROFIEL EN VERLOOP VAN
SNELHEIDSAFGELEIDEN (REGEL 60)



VARIATIE VAN DWARSPROFIEL EN CAPACITEIT

BIJLAGE



