SCHATTING DISPERSIE-KOËFFICIËNTEN EENDRACHT/ SCHELDE-RIJN-VERBINDING

ww2w

Notanummer 24.001.26

Dordrecht, oktober 1984

Direktie Waterhuishouding
en Waterbeweging
Distrikt Zuidwest

I N H O U D

blz.

Lijst van bijlagen

1. Samenvatting 1

2. Inleiding 3

3. Achtergronden 5

4. Invloed scheepvaart op de dispersiekoëfficiënt 8

5. Invloed wind op de dispersiekoëfficiënt 10

6. Dichtheidsverschil in de vertikaal 12

7. Evaluatie en konklusies 18

Literatuur 19

Appendix A : Theoretische achtergronden

Appendix B : Bepaling dispersiekoëfficiënt uit metingen in het Amsterdam-Rijnkanaal

LIJST VAN BIJLAGEN

1. Gemiddelde windsnelheid en windrichting
in de periode 18 t/m 22 november 1968
te De Bilt.
2. Gemiddelde windsnelheid en windrichting
in de periode 15 t/m 19 september 1969
te De Bilt.
3. Gemiddelde windsnelheid en windrichting
in de periode 6 t/m 10 april 1970
te De Bilt.
4. Gemiddelde windsnelheid en windrichting
in de periode 28 september t/m 1 oktober 1970
te De Bilt.

1. SAMENVATTING

In deze nota is een onderzoek ingesteld naar de aan te houden dispersiekoëfficiënten op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding ten behoeve van berekeningen naar de chloridekoncentraties op het Volkerak/Zoommeer.
Daarbij is gezocht naar ongeveer vergelijkbare situaties op andere wateren, waarna de aldaar gevonden grootheden zijn vertaald naar de specifieke situatie in het onderzoekgebied.

In het verleden zijn op het Amsterdam-Rijnkanaal een aantal metingen uitgevoerd ter bepaling van de warmte-uitwisselingskoëfficiënt. Als hulpmiddel hierbij zijn volumina water gemerkt met Rhodamine-B. De destijds gemeten koncentratieprofielen kunnen, naast het bepalen van de gemiddelde snelheid, ook dienen ter bepaling van een longitudinale dispersiekoëfficiënt. Van deze laatste mogelijkheid is in deze nota gebruik gemaakt.
Tevens is in deze nota nagegaan of de scheepvaart op het Amsterdam-Rijnkanaal een invloed uitoefent op de dispersiekoëfficiënt. Hiertoe zijn op een drietal manieren dispersiekoëfficiënten bepaald, namelijk:

1° een bepaling uit literatuurgegevens;
2° een bepaling uit het verloop van de maximale koncentratie;
3° een bepaling uit het verloop van de standaardafwijking van de koncentratieverdeling.

De eerstgenoemde benadering gaat uit van in de literatuur bekende formuleringen, die bepaald zijn in kanalen en rivieren, waarvan gezien de afmetingen en konfiguratie aangenomen mag worden dat de scheepvaart weinig tot geen invloed zal uitoefenen op de dispersiekoëfficiënt.
Aangezien het Amsterdam-Rijnkanaal wel een druk bevaren kanaal is, zal in de op de tweede en derde wijze berekende dispersiekoëfficiënten impliciet de scheepvaart-invloed opgenomen zijn.

Uit de berekeningen blijkt dat de dispersiekoëfficiënt op het Amsterdam-Rijnkanaal kan worden geschreven als:

$$E = (106 \pm 68)\ hu_*$$

Uit de onderlinge vergelijking (1^o ten opzichte van 2^o en 3^o) blijkt dat de dispersiekoëfficiënten bepaald uit de metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal aan de ondergrens liggen van de range die in de literatuur wordt gevonden voor de dispersiekoëfficiënten in kanalen en rivieren zonder scheepvaart, namelijk: $E = (100 - 500)\ hu_*$
Er kan derhalve worden gesteld dat de invloed van scheepvaart op de longitudinale dispersiekoëfficiënt niet kan worden aangetoond.

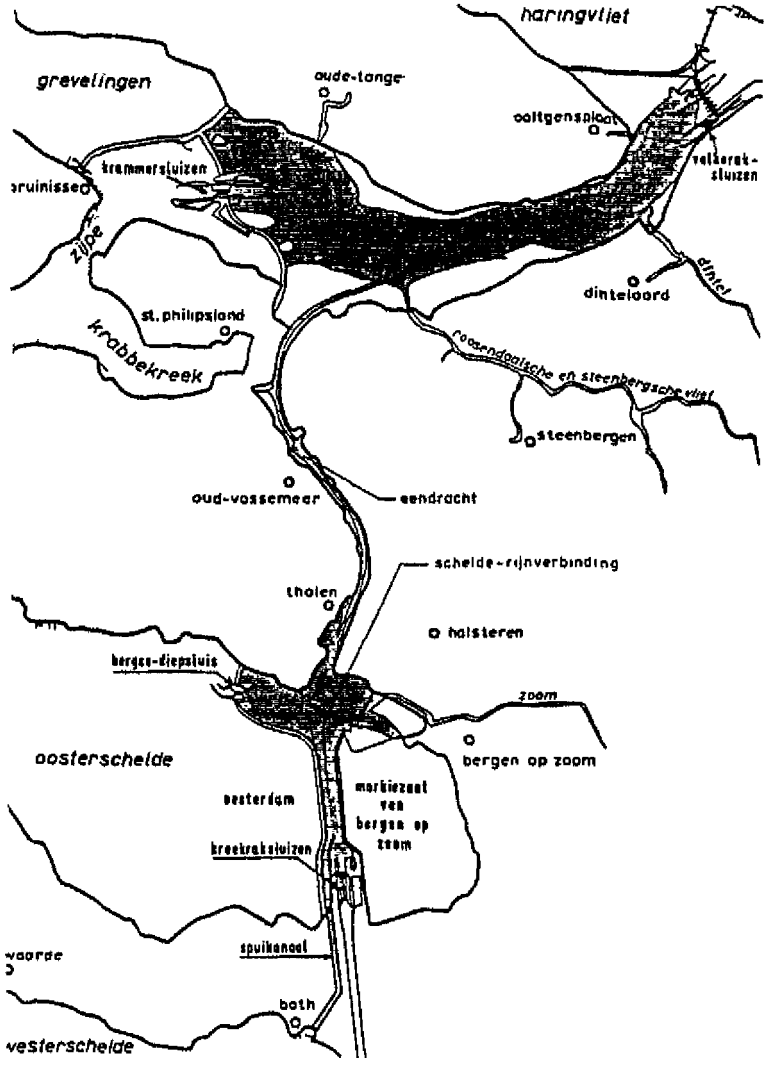
Voor de vertaling van bovenvermelde formulering naar de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding is in deze nota aandacht besteed aan mogelijke windinvloeden en aan het eventueel optreden van een gelaagde toestand ten gevolge van het dichtheidsverschil over de Kreekraksluizen.
Ten aanzien van de mogelijke gelaagdheid op het kanaal wordt aangetoond dat, gezien de geringe dichtheidsverschillen en de optredende windsnelheden in het betreffende gebied, de kans hierop als erg klein moet worden ingeschat.

Rekening houdend met deze bevindingen is voor de dispersiekoëfficiënt van de Eendracht de volgende formulering aanbevolen:

$$E = (100 - 500)\ hu_*$$

2. INLEIDING

Ten behoeve van de berekening van de chloridekoncentraties in het Volkerak-Zoommeer met het ééndimensionale advektie-diffusiemodel ZWENDL is het noodzakelijk een schatting te maken van de dispersiekoëfficiënten in de diverse delen van het bekken. In deze nota zal worden ingegaan op de keuze van de koëfficiënten voor de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding.



figuur 1 : Situatie Volkerak-Zoommeer.

Thans (1984) is de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding een vaarweg die onder invloed staat van het getij. Na aanleg van de kompartimenteringsdammen verandert deze situatie en ontstaat een stagnant water. In verband met deze wijziging is het thans niet mogelijk door middel van metingen ter plaatse een dispersiekoëfficiënt te bepalen voor de toekomstige situatie. Er dient dus teruggevallen te worden op andere bronnen, waarvoor een tweetal mogelijkheden aanwezig zijn, namelijk:

- literatuuronderzoek,
- metingen op vergelijkbare vaarwegen.

In de literatuur is vrij veel bekend over dispersiekoëfficiënten in kanalen, doch de invloed van scheepvaart hierop is een nog weinig besproken onderwerp. Aangezien de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding een druk bevaren scheepvaartweg is moet een eventuele invloed van de scheepvaart op de dispersiekoëfficiënt worden meegenomen.
Een met de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding vergelijkbare vaarweg is het Amsterdam-Rijnkanaal. Op dit kanaal zijn in het verleden een aantal metingen uitgevoerd, waaruit mogelijk een dispersiekoëfficiënt kan worden bepaald. Er hebben enkele keren Rhodamine-lozingen plaatsgevonden, waarvan in lit. 1 de gemeten profielen zijn gegeven. Door de hieruit te berekenen koëfficiënten te vergelijken met waarden die in de literatuur (voor wateren zonder scheepvaart) worden gevonden kan een konklusie worden getrokken met betrekking tot de invloed van de scheepvaart in de dispersiekoëfficiënt. Gebruik makend van deze konklusie kunnen dan dispersiekoëfficiënten worden bepaald voor de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding.
In deze nota wordt ingegaan op:

- de theoretische achtergrond van de bepaling van de dispersiekoëfficiënt;
- berekening van de dispersiekoëfficiënten op het Amsterdam-Rijnkanaal;
- interpretatie van de berekende koëfficiënten (invloed scheepvaart en wind);
- bepaling van de dispersiekoëfficiënt voor de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding.

3. ACHTERGRONDEN

Voor onderzoek naar de aan te houden waarden voor de longitudinale dispersiekoëfficiënt op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding staan een tweetal mogelijkheden open, namelijk literatuuronderzoek en analyse van metingen op vergelijkbare vaarwegen.
In appendix A is een uitwerking gegeven van de gegevens die aan de literatuur kunnen worden ontleend alsmede een beschrijving van de wijze waarop uit metingen een dispersiekoëfficiënt kan worden bepaald.
In het volgende zal worden volstaan met een korte samenvatting.

In de literatuur zijn voor de meest uiteenlopende typen riviertjes, kanalen en beken formuleringen gegeven voor de longitudinale dispersiekoëfficiënt (zie bijv. bijlage 1 van appendix A). De verschillende formuleringen kunnen worden herleid tot de algemene formule:

$$E = k * hu_*$$

waarin:

E	=	longitudinale dispersiekoëfficiënt	[m^2/s]
k	=	konstante	[-]
h	=	waterdiepte	[m]
u_*	=	schuifspanningssnelheid	[m/s]

De dimensieloze parameter k zal variëren per rivier en kanaal, onder andere afhankelijk van de afmetingen.
Uit tabel 1, die is ontleend aan lit. 5, kan worden afgeleid dat k zal liggen in de range 100 - 500.

tabel 1 : k-waarden voor diverse kanalen en rivieren (ontleend aan lit. 5).

kanaal/rivier	diepte in m	breedte in m	k (in E = khu_*)
Chicago Ship Canal	8,07	48,8	20
Sacramento River	4,00		74
River Derwent	0,25		131
South Platte River	0,46		510
Yuma Mesa A Canal	3,45		8,6
Green-Duwamish River, Washington	1,10	20	120-160
Missouri River	2,70	200	7500
Copper Creek, Virginia	0,49	16	500
(below gage)	0,85	18	250
	0,49	16	245
Clinch River, Tennessee	0,85	47	235
	2,10	60	245
	2,10	53	210
Copper Creek, Virginia (above gage)	0,40	34	220
Powell River, Tennessee	0,85	34	200
Clinch River, Virginia	0,58	36	280
Coachella Canal, California	1,56	24	140

De grootte van de dispersiekoëfficiënt op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding wordt beïnvloed door een drietal faktoren, namelijk:

a) de scheepvaart,
b) de wind en
c) met name in het zuidelijk deel het dichtheidsverloop over de vertikaal.

Nagegaan zal moeten worden of deze invloeden aanwezig zijn en of deze zodanig groot zijn dat ze moeten worden meegenomen.

ad a) Voor wat betreft de scheepvaart kan - gezien de afmetingen - uit tabel 1 worden gekonkludeerd dat op vrijwel alle genoemde waterwegen geen sprake zal zijn van intensieve scheepvaart. Dit betekent dat invloed van de scheepvaart op de dispersiekoëfficiënt in de gegeven waarden niet aanwezig is. Uit vergelijking met dispersiekoëfficiënten op een kanaal waar wel sprake is van scheepvaart kan nu een konklusie worden getrokken omtrent de invloed ervan. Hierop zal in het volgende hoofdstuk nader worden ingegaan.

ad b) Aangezien de in tabel 1 gegeven koëfficiënten zijn bepaald uit metingen zijn de meteorologische omstandigheden, zoals wind impliciet in de formulering aanwezig. In hoeverre er sprake is van windinvloed kan niet uit de gegeven koëfficiënten worden afgeleid. In hoofdstuk 5 zal op grond van metingen in het Amsterdam-Rijnkanaal nader op deze invloed worden ingegaan.

ad c) Ten gevolge van het dichtheidsverschil ter weerszijden van de Kreekraksluizen is de mogelijkheid aanwezig dat met name in het zuidelijk deel van de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding sprake is van een gelaagde situatie. Een dergelijke toestand heeft een verhogende invloed op de dispersiekoëfficiënt. Of deze situatie zal optreden zal in hoofdstuk 6 nader worden aangegeven.

Voorshands kan worden gesteld dat, in het geval geen sprake is van invloed van scheepvaart en wind en er geen dichtheidsverschillen in de vertikaal zullen optreden, de dispersiekoëfficiënt op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding kan worden geschreven als:

$$E = k * hu_*$$

waarbij k varieert van 100 - 500.

4. INVLOED SCHEEPVAART OP DE DISPERSIEKOËFFICIËNT

In appendix B is een uitwerking gegeven van de bepaling van de dispersiekoëfficiënt uit Rhodamine-metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal. Het blijkt dat de koëfficiënt kan worden geschreven als:

$$E = (106 \pm 68)\ hu_* \qquad (4.1)$$

indien uitgegaan wordt van een bepaling uit de maximale concentratie.
Wordt de koëfficiënt bepaald uit de standaardafwijking van de koncentratieverdeling dan kan deze worden geschreven als:

$$E = (158 \pm 82)\ hu_* \qquad (4.2)$$

De onderlinge verschillen tussen de twee koëfficiënten zijn derhalve niet erg groot.

Bekend is dat op het Amsterdam-Rijnkanaal sprake is van een drukke scheepvaart, die mogelijk de dispersiekoëfficiënt beïnvloedt.

In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat op grond van waarnemingen in diverse kanalen en rivieren, waarbij geen sprake is van scheepvaart de dispersiekoëfficiënten liggen in het trajekt:

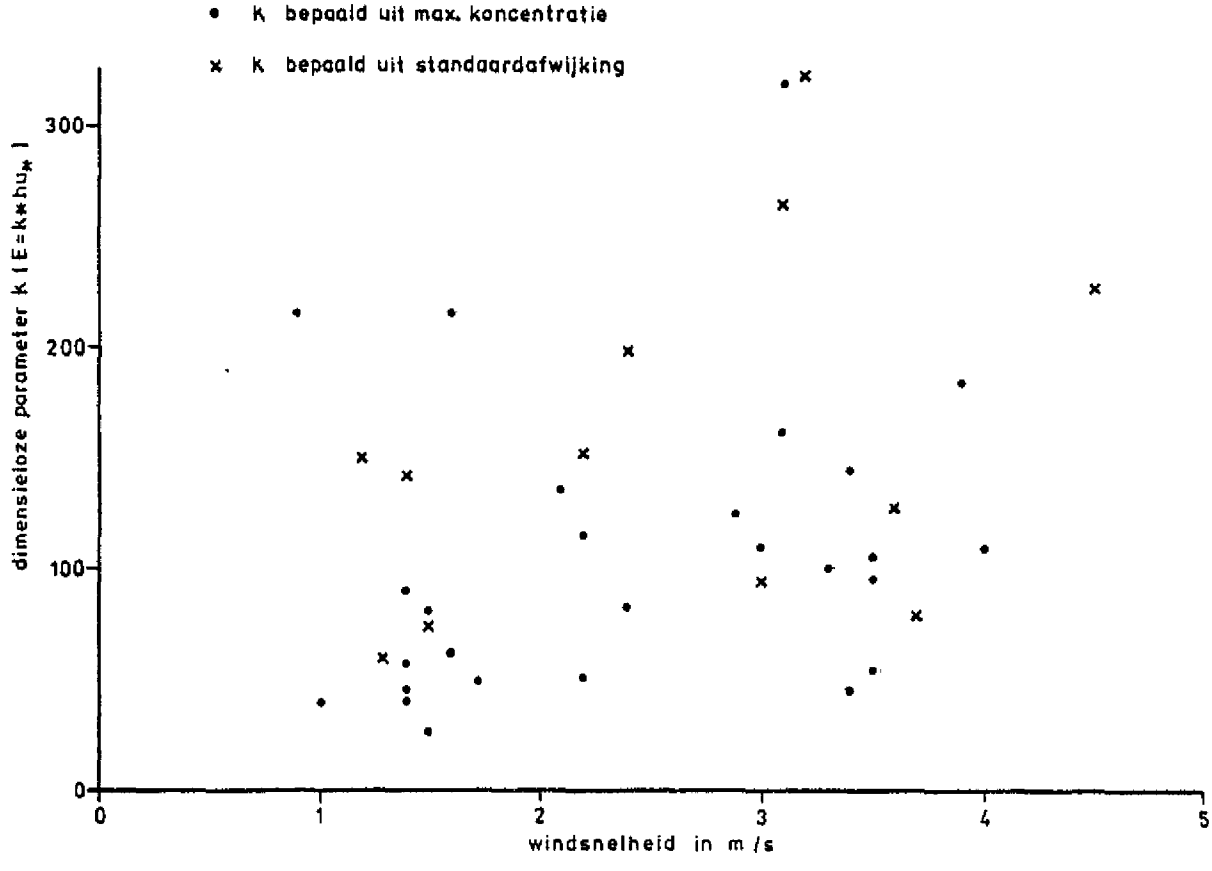
$$E = (100 - 500)\ hu_* \qquad (4.3)$$

Wordt deze laatste formule geplaatst tegenover de twee voorgaande, dan blijkt dat de dispersiekoëfficiënt van het druk bevaren Amsterdam-Rijnkanaal aan de ondergrens ligt van de range van koëfficiënten die worden gevonden op scheepvaartloze rivieren en kanalen.

Uit de metingen naar de warmteverspreiding op het Amsterdam-Rijnkanaal kan derhalve de konklusie worden getrokken dat een invloed van de scheepvaart op de longitudinale dispersiekoëfficiënt niet is aan te tonen.
Voor de bepaling van de dispersiekoëfficiënt op de eveneens druk bevaren Eendracht/Schelde-Rijnverbinding zal, gelet op deze konklusie, met de invloed van de scheepvaart geen rekening worden gehouden.

5. INVLOED WIND OP DE DISPERSIEKOËFFICIËNT

Naast de scheepvaart kan ook de wind invloed uitoefenen op de dispersiekoëfficiënt. Teneinde na te gaan of er een relatie bestaat tussen de wind en de dispersiekoëfficiënt, zijn de optredende windsnelheden tijdens metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal (appendix B) verzameld. Er is daarbij gebruik gemaakt van gegevens van het KNMI van het station De Bilt. Op de bijlagen 1 t/m 4 zijn de uurgemiddelde windsnelheid en de windrichting (gemiddeld tijdens de laatste 10 minuten van het uur) tijdens de meetperioden uitgezet.



figuur 2 : Verband dimensieloze parameter k en windsnelheid op het Amsterdam-Rijnkanaal.

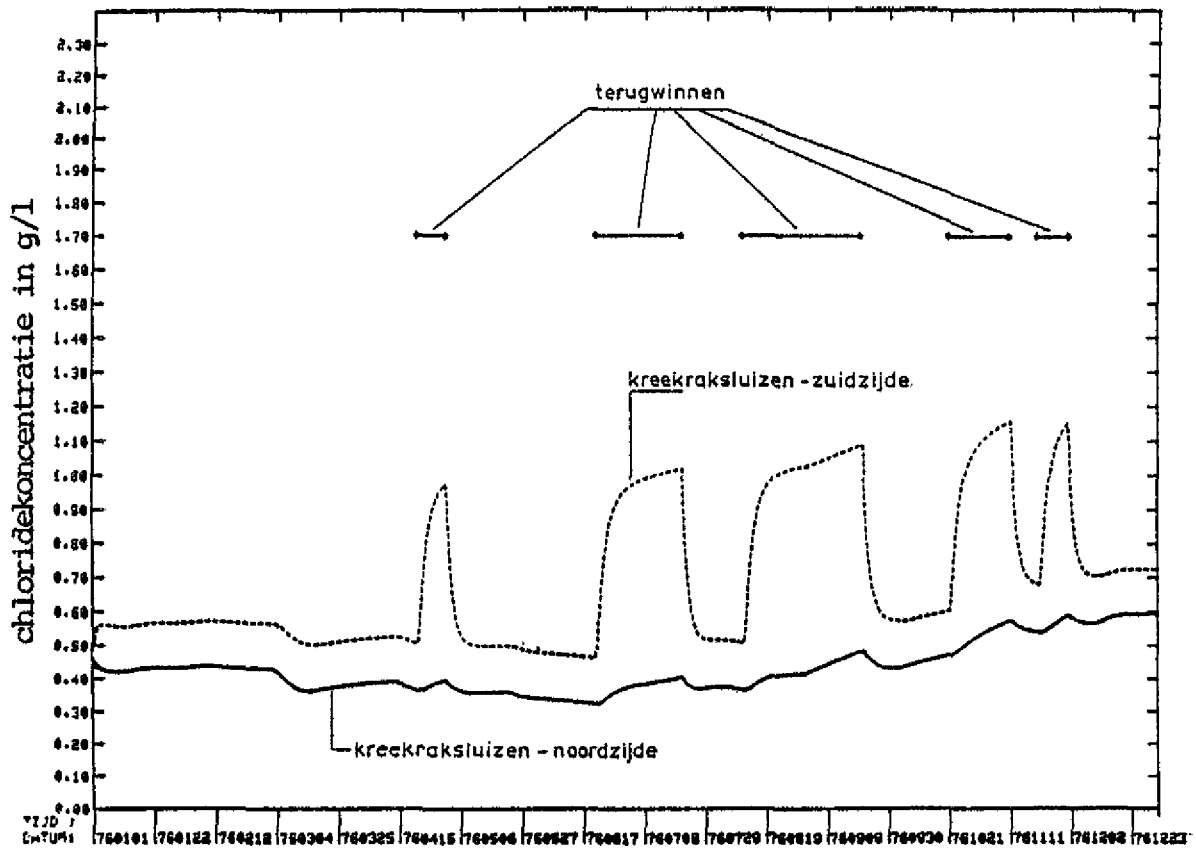
In bovenstaande figuur 2 zijn de gemiddelde windsnelheden tijdens de meetperioden uitgezet tegen de uit de metingen bepaalde dimensieloze parameters k (zie appendix B).

Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de k-waarden die bepaald zijn uit de maximale koncentratie en die welke zijn bepaald uit de standaardafwijking.
Uit figuur 2 blijkt dat een verband tussen de windsnelheid en de dimensieloze parameter k moeilijk is vast te stellen. Bij alle opgetreden windsnelheden komen hoge en lage k-waarden voor. Of bij hogere windsnelheden dan die zijn opgetreden wel een verband aanwezig is, is onbekend, zodat gekonkludeerd moet worden dat over een mogelijke relatie tussen de dimensieloze parameter k (dus de dispersiekoëfficiënt) en de windsnelheid geen uitspraak kan worden gedaan.

6. DICHTHEIDSVERSCHIL IN DE VERTIKAAL

In het voorgaande is er alleen sprake geweest van een homogene situatie in het dwarsprofiel. De dispersiekoëfficiënten die zijn bepaald, gelden dan ook uitsluitend voor een dergelijke situatie.
Op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding bestaat echter de mogelijkheid dat met name in perioden waarin zoet water wordt teruggewonnen bij de Kreekraksluizen, in het zuidelijk deel een gelaagde situatie ontstaat. Hierdoor zal de dispersiekoëfficiënt een hogere waarde krijgen.
In het volgende zal worden nagegaan of een gelaagde situatie kan ontstaan en als dit het geval is of deze situatie dan van blijvende aard is.

Het water ter weerszijden van de Kreekraksluizen heeft een verschil in dichtheid. Doordat het water in het Antwerpskanaalpand via de Boudewijn- en Zandvlietsluizen wordt beïnvloed door het water in de Westerschelde, zal dit een hogere dichtheid hebben dan het water in het Volkerak-Zoommeer.
Om een indruk te krijgen van het dichtheidsverschil is in figuur 3 een voorbeeld gegeven van de situatie die op zou kunnen treden. Voor de hydrologische omstandigheden van 1976 is voor een bepaald beheersscenario voor het Volkerak-Zoommeer het verloop van de chloridekoncentratie ter weerszijden van de Kreekraksluizen weergegeven.



figuur 3 : Verloop chlorideconcentratie ter weerszijden van de Kreekraksluizen in 1976.

Het blijkt dat in perioden waarin geen water hoeft te worden teruggewonnen het verschil in profielgemiddelde chlorideconcentratie circa 150 mg/l bedraagt. Gezien dit verschil mag worden verondersteld dat op het zuidelijk deel van de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding geen gelaagde situatie zal optreden.
In perioden waarin sprake is van terugwinnen loopt het verschil in profielgemiddelde chlorideconcentratie op tot circa 400-600 mg/l. Opgemerkt dient te worden dat voor de chlorideconcentratie van de Westerschelde 5 g/l is aangehouden en dat voor het Antwerpskanaalpand is gerekend met een dispersiekoëfficiënt van 150 m^2/s.
Een dergelijk verschil in chlorideconcentratie kan mogelijk een gelaagde situatie doen ontstaan. Zoals in figuur 3 is te zien kan een periode van terugwinnen 1 à 2 maanden duren. In lit. 8 is aangegeven dat nog langere perioden mogelijk zijn.

Indien aangenomen wordt dat een mogelijk gelaagde situatie zich zal uitstrekken over een lengte van 6 km (afstand Kreekraksluizen tot Zoommeer), dan is na 1 maand terugwinnen (zoutuitwisselingsdebiet 2,5 m^3/s) een laagdikte opgebouwd van circa 4 m, indien dit ongestoord kan geschieden.

De afbraak van de onderlaag kan plaatsvinden door turbulente menging en door entrainment ten gevolge van wind. Hierop zal in het volgende worden ingegaan.

- Turbulente menging

  In lit. 7 is aangegeven in welke situaties een gelaagde situatie stabiel is. Aangegeven is dat bij elk snelheidsverschil tussen boven- en onderlaag een "scherpe" grenslaag overgaat in een kontinue gelaagdheid (eindige tussenlaagdikte). Deze gelaagdheid is stabiel indien overal in de vertikaal geldt:

$$R_i = \frac{g \frac{d\rho}{dz}}{\rho \left(\frac{du}{dz}\right)^2} > \frac{1}{4} \qquad (6.1)$$

  Stel in het onderhavige geval, dat $\Delta\rho = 1$ kg/m^3.
  In perioden van terugwinnen is geen sprake van doorspoeling van het meer en zijn de snelheden in de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding derhalve erg gering (0,01-0,02 m/s); zo ook de gradiënt van de snelheid in de vertikaal.
  Wordt aangehouden dat:

$$\frac{d\rho}{dz} = 0{,}5 \quad kg/m^3/m^1$$

$$\frac{du}{dz} = 0{,}04 \quad m/s\ /m^1$$

$$\rho = 1001 \quad kg/m^3$$

  dan wordt $R_i \simeq 3$ en dus veel groter dan $\frac{1}{4}$.
  De ontstane gelaagdheid mag derhalve stabiel worden verondersteld en zal ten gevolge van de stroomsnelheidsverschillen in de onder- en bovenlaag niet opmengen.

- Entrainment

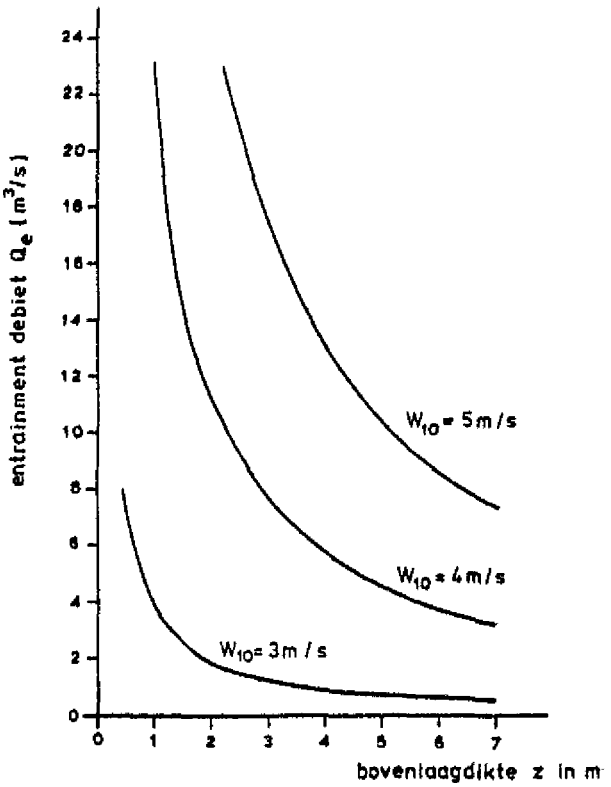
Ten gevolge van wind ontstaat een stromende en turbulente bovenlaag. De onderlaag kan worden afgebroken doordat de vloeistof uit de onderlaag wordt meegesleurd met de turbulente bovenlaag.
De snelheid waarmee dit gebeurt kan worden beschreven met:

$$Q_e = \frac{A * 2 * u^3 * \rho}{g * \Delta\rho * z} \qquad (6.2)$$

waarin:

Q_e	=	entrainmentdebiet	[m^3/s]
A	=	oppervlakte grensvlak	[m^2]
u	=	$7 * 10^{-4}\ W_{10}^{1,25}$	[m/s]
W_{10}	=	windsnelheid op 10 m hoogte	[m/s]
ρ	=	dichtheid	[kg/m^3]
g	=	zwaartekrachtversnelling	[m/s^2]
$\Delta\rho$	=	dichtheidsverschil	[kg/m^3]
z	=	dikte bovenlaag	[m]

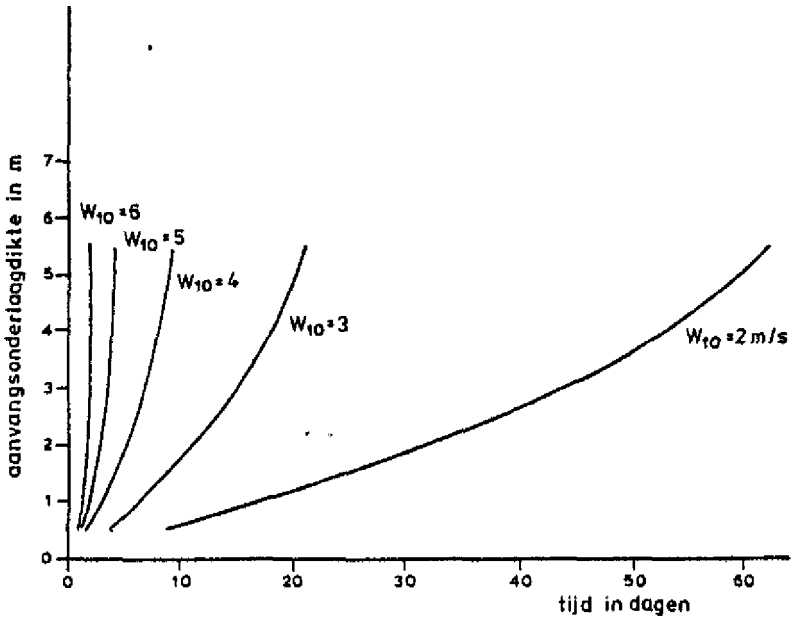
In figuur 4 is het entrainmentdebiet Q_e uitgezet tegen de bovenlaagdikte z bij een aangenomen oppervlakte van de grenslaag van $18 * 10^5$ m^2 (6000 * 300) en verschillende windsnelheden. De debieten zijn rechtevenredig met de oppervlakte van de grenslaag.



figuur 4 : Entrainmentdebiet (Q_e) bij verschillende bovenlaagdikten en stroomsnelheden.

Uit figuur 4 blijkt dat bij geringe windsnelheden (3 m/s of minder) bij bovenlaagdikten groter dan circa 1,5 m het entrainmentdebiet geringer is dan het zoutwaterdebiet (2,5 m^3/s), zodat in die situatie de onderlaag niet resulterend wordt afgebroken.
Lange perioden met geringe windsnelheden komen in werkelijkheid in het beschouwde gebied niet voor, zodat het ontstaan van een toestand met kleine bovenlaagdikten niet erg waarschijnlijk zal zijn.

Mocht dit incidenteel toch het geval zijn, dan kan uit figuur 5 een indruk worden verkregen van de snelheid waarmee een bepaalde laagdikte bij verschillende windsnelheden wordt afgebroken. Bij het opstellen van figuur 5 is gebruik gemaakt van formule 6.2, waarbij verondersteld is dat geen aanvoer van zout water plaatsvindt.



figuur 5 : Afbraaksnelheid gelaagde situatie bij verschillende windsnelheden.

Uit figuur 5 blijkt dat bij windsnelheden van 4 m/s of hoger binnen enkele dagen een gelaagde situatie ten gevolge van entrainment is afgebroken.

Konkluderend kan worden gesteld dat de kans op het ontstaan van een gelaagde situatie in het zuidelijk deel van de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding gering is. Een nevenfaktor die de kans op het ontstaan van de gelaagdheid nog vermindert is de scheepvaart die voor een sterke vertikale menging zorgt.

7. EVALUATIE EN KONKLUSIES

- Op grond van literatuuronderzoek kan worden vastgesteld dat de dispersiekoëfficiënt voor wateren zonder intensieve scheepvaartbeweging kan worden geschreven als:

$$E = (100 - 500)\ hu_*$$

- Op grond van vergelijking van de uit metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal bepaalde dispersiekoëfficiënten met in de literatuur gevonden waarden voor kanalen en rivieren, waarin geen sprake kan zijn van scheepvaart, kan worden gekonkludeerd dat een belangrijke invloed van de scheepvaart op de longitudinale dispersiekoëfficiënt onwaarschijnlijk is.

- Bij gemiddelde windsnelheden lager dan circa 5 m/s is geen verband gevonden tussen de windsnelheid en de dispersiekoëfficiënt van het Amsterdam-Rijnkanaal.

- Het gedurende langere tijd optreden van een gelaagde situatie op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding ten gevolge van de chloridelast van de Kreekraksluizen lijkt erg onwaarschijnlijk.

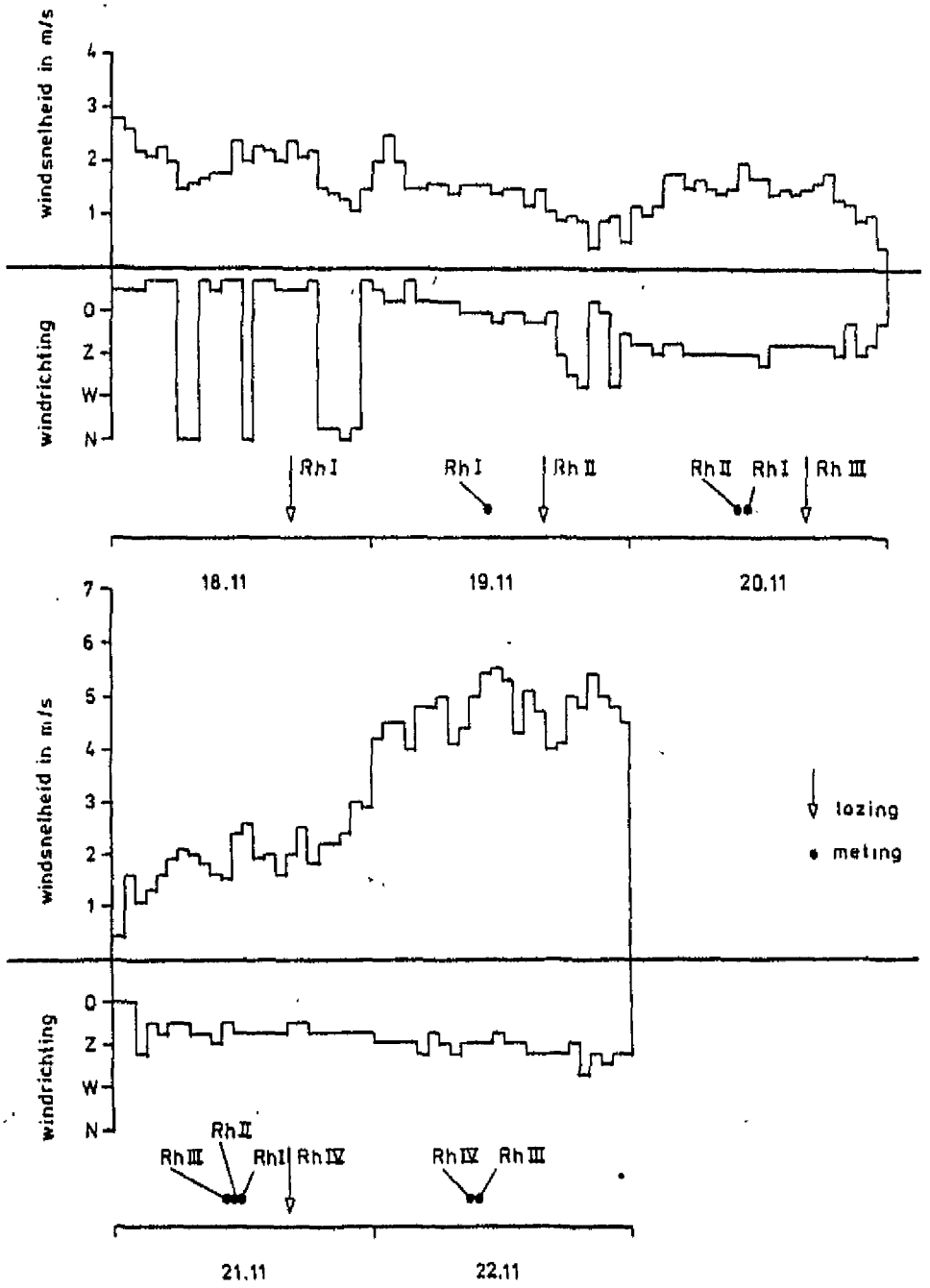
- Het voorgaande samenvattend leidt tot de konklusie: Op de Eendracht/Schelde-Rijnverbinding kan worden gerekend met een dispersieformulering volgens:

$$E = k * hu_*$$

waarbij k varieert van 100 (ondergrens) tot 500 (bovengrens).

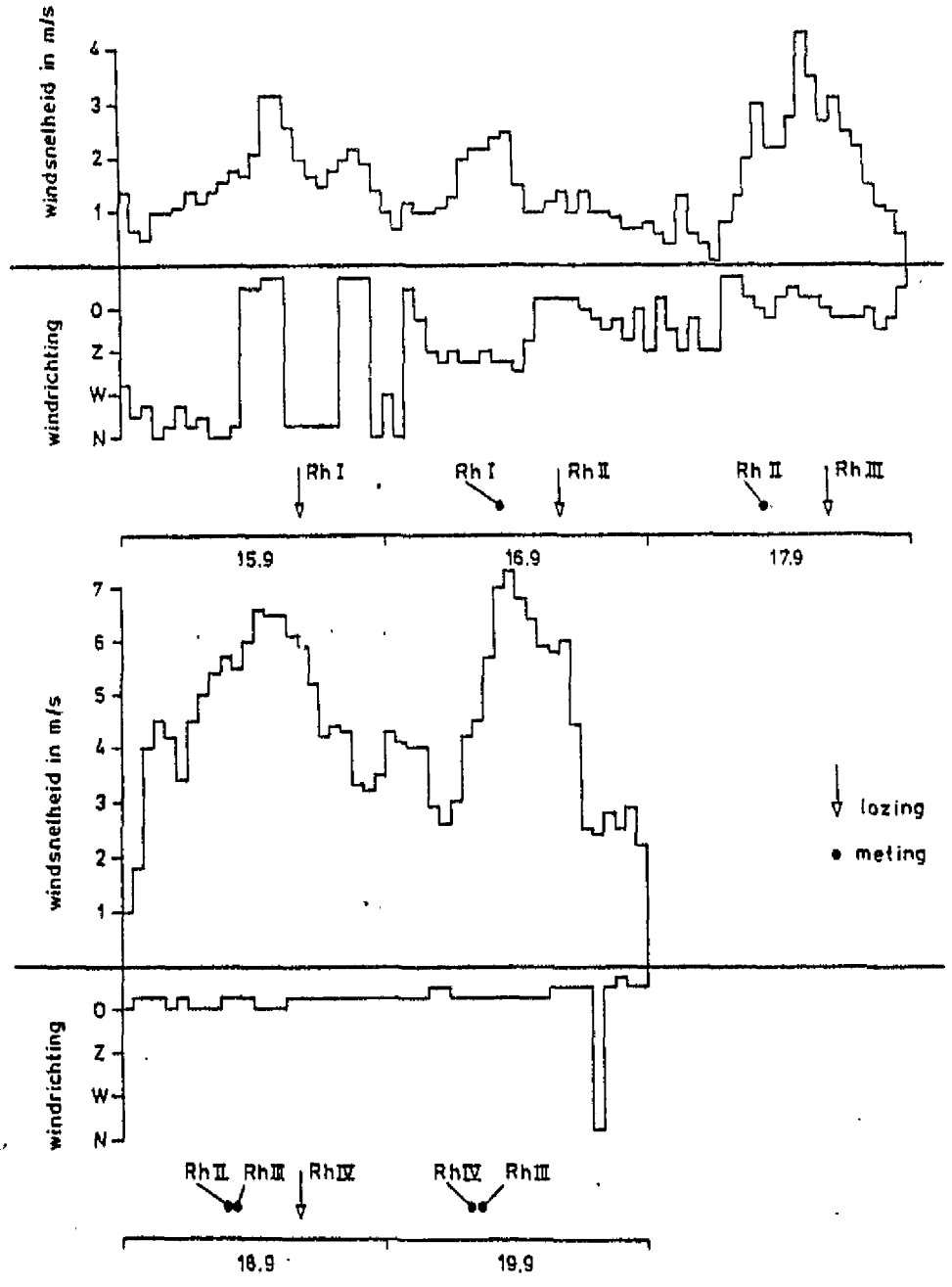
LITERATUUR

1. Rapport betreffende de afkoeling van geloosd koelwater door warmte-overdracht aan de atmosfeer. (Deel 1: Experimentele bepaling van de warmte-uitwisselingskoëfficiënt aan de hand van varend gemeten temperatuurprofielen). KEMA, juli 1973.
2. Strömungsmechanische Aspekte der Wasserqualität. Mark Markofsky, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1980.
3. Predicting dispersion coefficient of streams. H. Liu, Journal of the Environmental Division. ASCE, Vol 103, february 1977.
4. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusiemodel. Deel 2: Homogene permanente stroming. Waterloopkundig Laboratorium, nota M896-41-2, november 1979.
5. Mixing in inland and coastal waters. H.B. Fischer e.a., Academic Press, 1979.
6. Toepasbaarheid één-dimensionaal model. Deel 1: Overzichtsverslag. Waterloopkundig Laboratorium, nota M896-41-1, april 1982.
7. Dichtheidsstromen en interne golven. Handleiding college b81, J.C. Schönfeld/C. Kranenburg, Technische Hogeschool Delft, juli 1981.
8. De noodzaak tot terugwinnen van "zoet" water uit het oogpunt van peilbeheer op het Volkerak en Zoommeer. Rijkswaterstaat, Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest, notanummer 24.001.21, maart 1982.



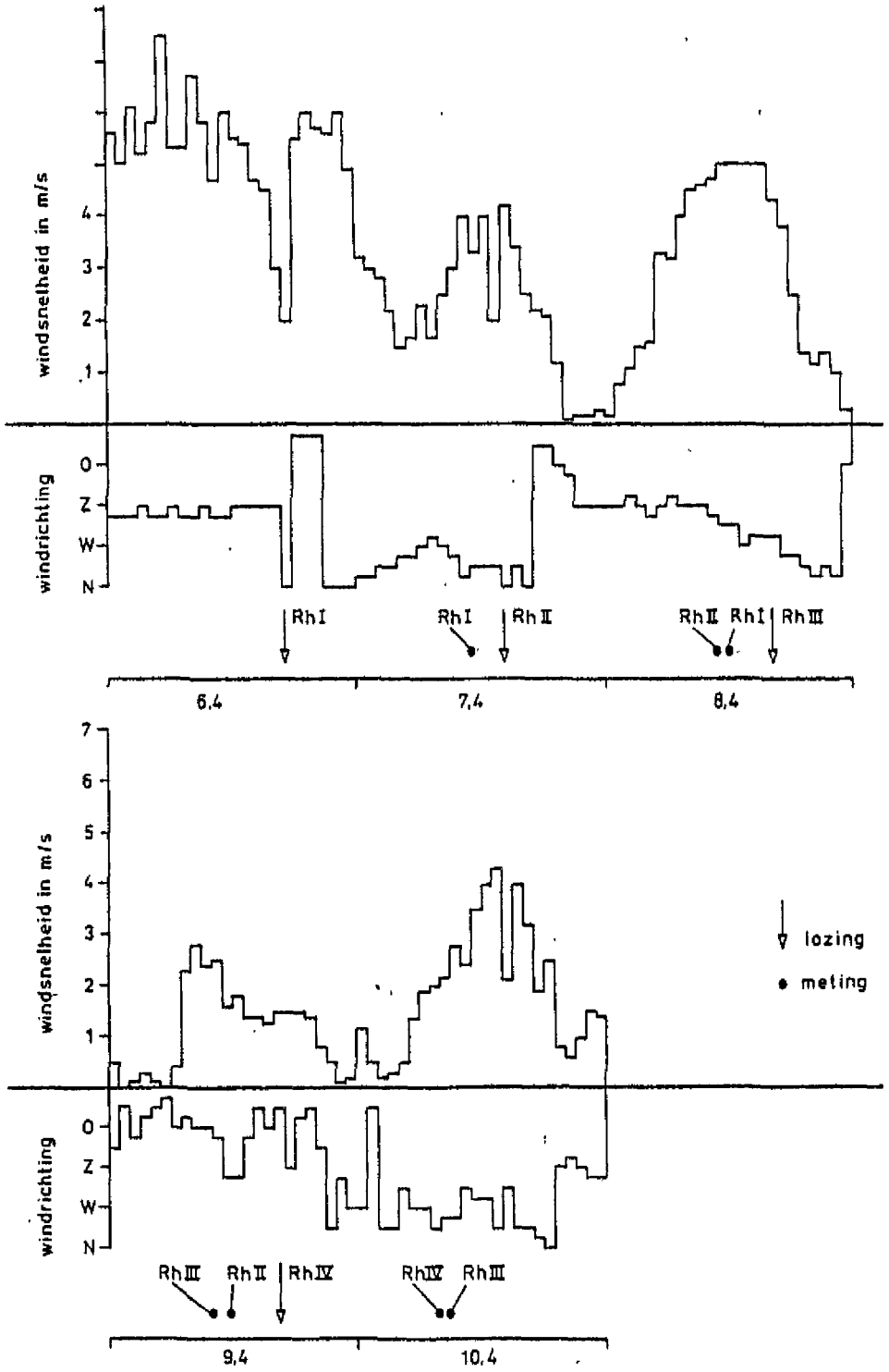
gemiddelde windsnelheid en windrichting in de periode 18 t/m 22 november 1968 te de bilt

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest		nota nr. 24.001.26
	nr.	bijlage nr. 1



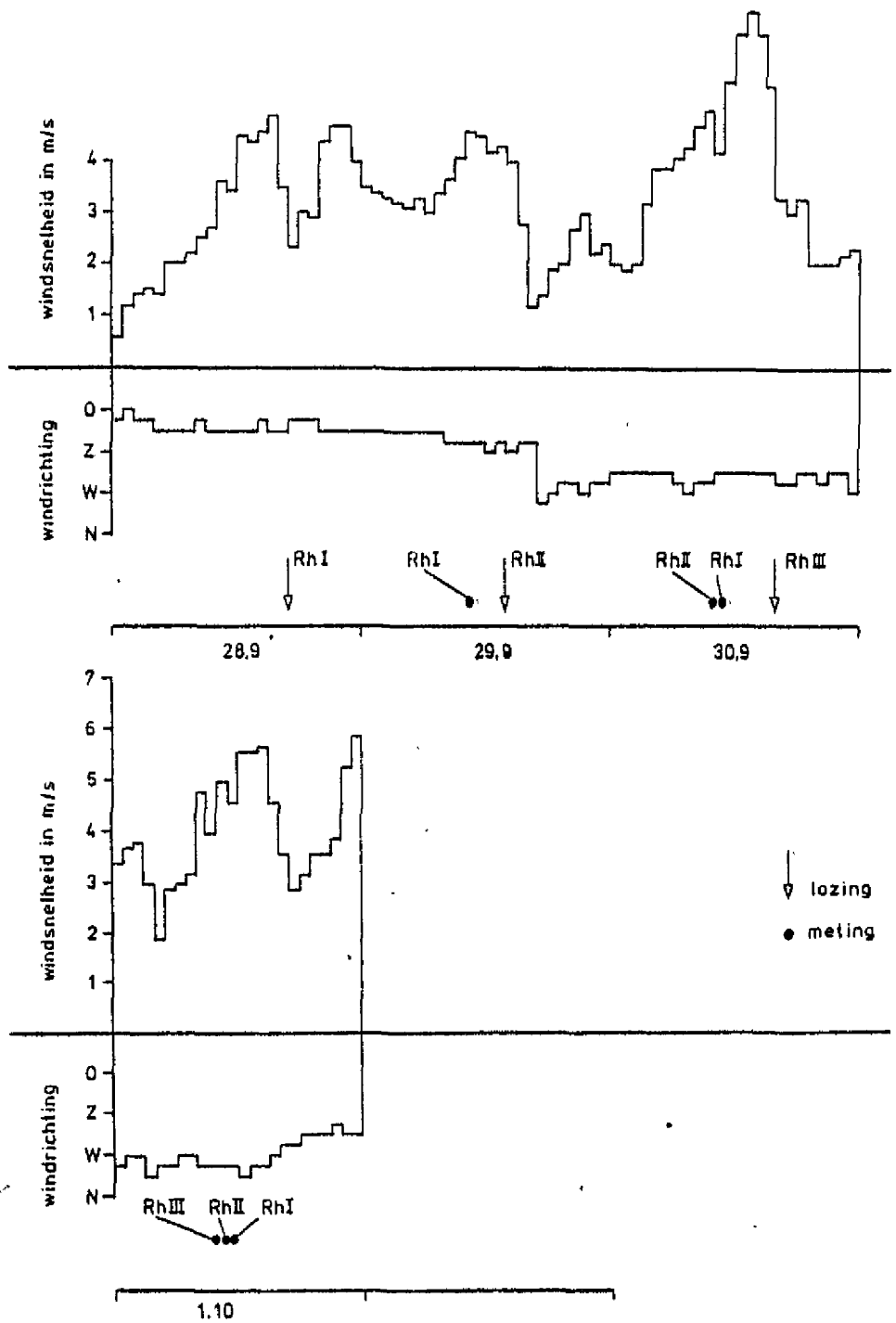
gemiddelde windsnelheid en windrichting in de periode
15 t/m 19 september 1969 te de bilt

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest		**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 2



gemiddelde windsnelheid en windrichting in de periode
6 t/m 10 april 1970 te de bilt

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest		**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 3



gemiddelde windsnelheid en windrichting in de periode
28 september t/m 1 oktober 1970 te de bilt

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest		**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 4

APPENDIX A

THEORETISCHE ACHTERGRONDEN

Inhoud blz.

1. Inleiding A-1

2. Dispersieformuleringen in de literatuur A-2

3. Dispersiekoëfficiënt uit metingen A-5

4. Mengtijd A-8

Literatuur A-12

Bijlagen

1. Formuleringen longitudinale dispersiekoëfficiënt

2. Experimental measurements of longitudinal dispersion in open channels

1. Inleiding

In deze appendix zal worden ingegaan op de wijze waarop de longitudinale dispersiekoëfficiënt kan worden bepaald. Allereerst worden formuleringen gegeven die in de literatuur worden gevonden en vervolgens wordt ingegaan op de bepaling van de koëfficiënt uit metingen.
Verder is een beschouwing over de mengtijd opgenomen. Dit houdt verband met het feit dat geverifieerd moet worden of bij de metingen sprake is van een ééndimensionale situatie, met andere woorden of de gemeten koncentratieverdeling representatief is voor het gehele dwarsprofiel; één en ander is benodigd om de metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal (zie appendix B) juist te kunnen interpreteren.

2. Dispersieformuleringen in de literatuur

In het verleden zijn door vele onderzoekers formuleringen voor dispersiekoëfficiënten opgesteld (zie bijlage 1, ontleend aan lit. 2).
In het algemeen kunnen deze formuleringen worden herleid tot de vorm:

$$E = k * hu_* \qquad (1)$$

waarin:	E	=	dispersiekoëfficiënt	$[m^2/s]$
	k	=	dimensieloze parameter	[-]
	h	=	waterdiepte	[m]
	u_*	=	schuifspanningssnelheid	[m/s]

Op bijlage 2 is een overzicht gegeven van k-waarden, die voor diverse kanalen en rivieren zijn gevonden (ontleend aan lit. 5). Uit de bijlage blijkt dat k voor de meeste wateren ligt in de range 100-500.

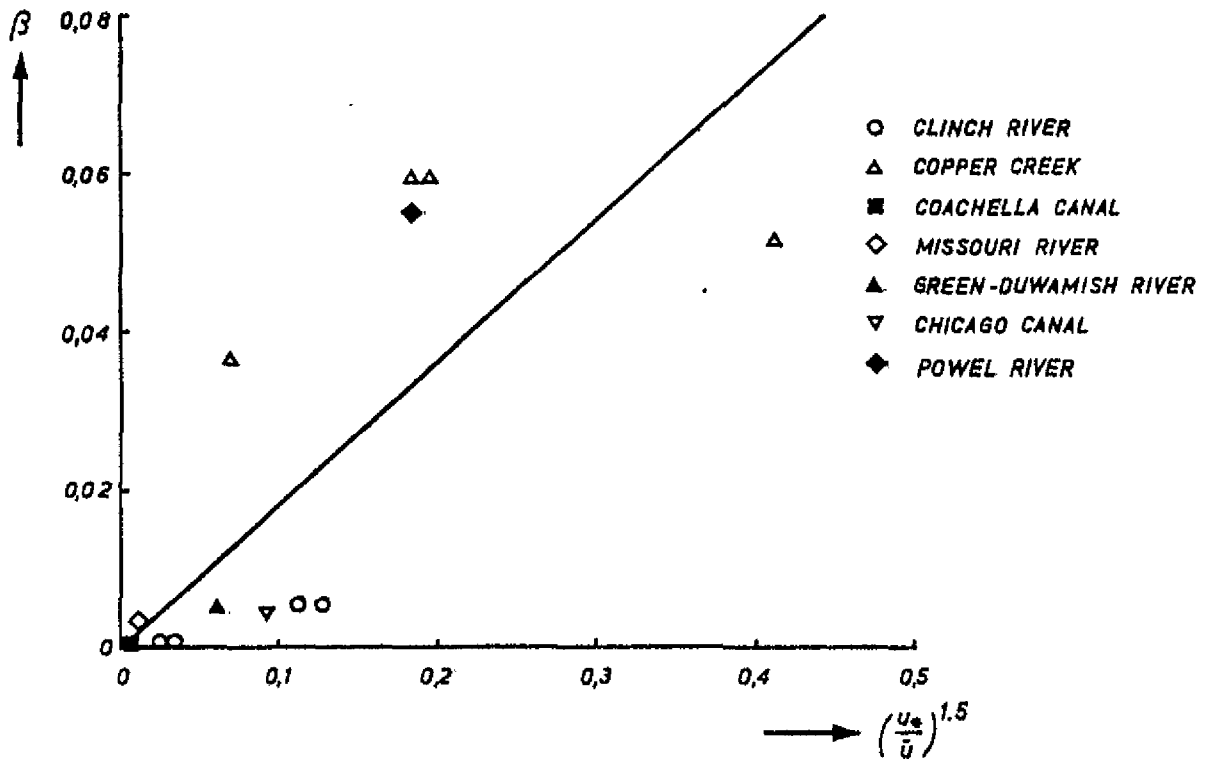
Teneinde te komen tot een algemene formulering heeft Liu (lit. 3) aan de hand van 14 in de natuur uitgevoerde experimenten de door Fischer gevonden relatie (bijlage 1, Fischer, 1968) gekalibreerd.
Omwerken van de relatie volgens Fischer resulteert in:

$$E = \frac{\beta\, \bar{u}^2\, b^3}{u_*\, A} \qquad (2)$$

waarin:	β	=	dimensieloze koëfficiënt	[-]
	$\bar{u}$	=	gemiddelde snelheid	[m/s]
	b	=	breedte waterloop	[m]
	A	=	dwarsprofiel waterloop	$[m^2]$

Liu vond dat:
$$\beta \simeq 0{,}18 \left(\frac{u_*}{\bar{u}}\right)^{1{,}5} \qquad (3)$$

zoals is weergegeven in figuur 1.



figuur 1 : Vergelijking dispersieparameter β volgens Liu met resultaten van experimenten (lit. 4).

Vergelijking 3 ingevuld in vergelijking 2 geeft de volgende vergelijking van de dispersiekoëfficiënt:

$$E = \frac{0{,}18\ b^2\ \sqrt{\bar{u}\ u_*}}{h} \qquad (4)$$

Het blijkt uit de literatuur dat vergelijking 4 de experimenteel verkregen dispersiekoëfficiënten op een faktor 6 benadert.

Deze formule herleid naar de vorm $E = k * hu_*$ geeft voor k de formulering:

$$k = 0{,}18\ \frac{b^2\ \left(\frac{\bar{u}}{u_*}\right)^{\frac{1}{2}}}{h^2}$$

ofwel, met $\frac{|\bar{u}|}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}}$:

$$k = 0{,}18\ \frac{b^2}{h^2}\ \left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

In lit. 4 worden nog een tweetal formuleringen genoemd waarmee voor een lateraal systeem, waarin de laterale snelheidsgradiënten de vertikale snelheidsgradiënten domineren, de dispersiekoëfficiënt kan worden bepaald, namelijk:

$$E = \frac{0{,}058\ g\ R\ h\bar{u}}{u_*^2} \qquad (6)$$

en

$$E = \frac{0{,}011\ \bar{u}^2\ b^2}{hu_*} \qquad (7)$$

In lit. 5 wordt vermeld dat vergelijking 7 uit metingen verkregen dispersiekoëfficiënten met een faktor 4 benaderd, terwijl in lit. 4 wordt vermeld dat vergelijking 6 een faktor 10 verschilt van de experimenteel bepaalde E van 18 rivieren.

Samengevat kan worden gesteld dat op grond van de literatuur (onafhankelijk van metingen) voor een homogene toestand een redelijke schatting van een waarde van de longitudinale dispersiekoëfficiënt kan worden gemaakt, in aanmerking genomen dat in berekeningen naar de chloridekoncentratie op de beschouwde wateren (Eendracht/Schelde-Rijnverbinding) de verschillen ten gevolge van de aangegeven onnauwkeurigheid in de dispersiekoëfficiënt niet meer tot uitdrukking komen.

3. Dispersiekoëfficiënt uit metingen

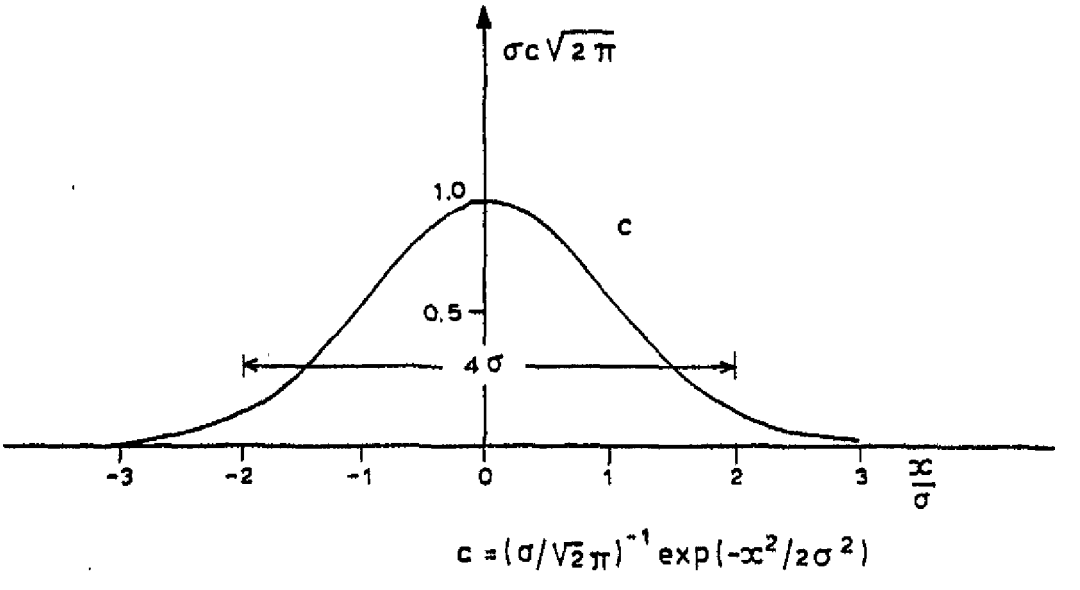
In lit. 5 is afgeleid dat de oplossing van de ééndimensionale dispersievergelijking in stromend water (gemiddelde snelheid $\bar{u}$) voor een momentane lozing van een massa M op een tijdstip t = 0 op plaats x = 0 kan worden geschreven als:

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi E t}} \; e^{-\left[\frac{(x-\bar{u}t)^2}{4Et}\right]} \qquad (8)$$

De in vergelijking 8 beschreven koncentratieverdeling is gelijk aan een Gauss-verdeling, of, ingeval van de eenheid van massa, gelijk aan de normale verdeling (figuur 2), die in formulevorm als volgt luidt:

$$C = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \; e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \qquad (9)$$

waarin: σ^2 = variantie



figuur 2 : Normale verdeling.

De variantie is een maat voor de spreiding van de verdeling. Een spreiding van 4σ (σ = standaardafwijking) omvat bij een normale verdeling ongeveer 95% van de totale massa, ofwel 95% van de totale oppervlakte onder de koncentratieverdeling (figuur 2).
Onder de aanname dat een gemeten koncentratieverdeling normaal is, kan op eenvoudige wijze de dispersiekoëfficiënt worden bepaald door de breedte 4σ te bepalen en deze gelijk te stellen aan $4\sqrt{2Et}$. Dit gaat dus op indien voldaan wordt aan de in het begin van deze paragraaf gestelde voorwaarden, zoals momentane lozing e.d.

Naast de berekening van de dispersiekoëfficiënt uit de standaardafwijking van de koncentratieverdeling kan deze koëfficiënt ook worden berekend uit de maximale koncentratie.
Uit vergelijking 10 blijkt dat de maximale koncentratie zich verplaatst met de gemiddelde stroomsnelheid $\bar{u}$ en na een tijd $t = t_1$ gelijk is aan:

$$C_{max} = C(\bar{u}*t_1, t_1) = \frac{M}{\sqrt{4\pi E t_1}} \qquad (10)$$

Enig omwerken levert een waarde voor de dispersiekoëfficiënt, namelijk:

$$E = \frac{M^2}{4\pi t_1 C_{max}^2} \qquad (11)$$

Vergelijking 11 gaat alleen op indien aangenomen mag worden dat de koncentratie normaal is verdeeld.

Indien de koncentratie niet normaal verdeeld is kan ook uit de standaardafwijking van de verdeling een dispersiekoëfficiënt worden berekend.

In lit. 5 is vermeld dat wel voldaan moet worden aan de voorwaarde dat de algemene advektie-diffusievergelijking opgaat in een ééndimensionaal systeem en de koncentratie op $x = \pm \infty$ altijd nul is.

Uitgaande van de koncentratieverdelingen op twee tijdstippen kan voor de tussenliggende periode de dispersiekoëfficiënt worden berekend met:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{t_2 - t_1} \qquad (12)$$

waarin:

σ_2	=	standaardafwijking op tijdstip t_2	$[m^2]$
σ_1	=	standaardafwijking op tijdstip t_1	$[m^2]$

4. Mengtijd

Indien uit metingen een ééndimensionale longitudinale dispersiekoëfficiënt moet worden bepaald, dient eerst geverifieerd te worden of sprake is van een ééndimensionale situatie, ofwel, volledige menging over het dwarsprofiel. Voor een beoordeling hiervan is de mengtijd van belang. De mengtijd kan worden gedefinieerd als de tijd tussen het tijdstip van lozing en het tijdstip van volledige menging over het dwarsprofiel. Dit laatste tijdstip is gedefinieerd als het tijdstip waarop evenwicht ontstaat tussen de toename van stofkoncentratie ten gevolge van het longitudinaal advektief transport en de afname van de koncentratie ten gevolge van het vertikaal diffusief transport.
Er is bij een lozing aan de wateroppervlakte sprake van menging over de diepte en de breedte. In lit. 6 wordt de mengtijd over een diepte gedefinieerd als:

$$T_z = \frac{h^2}{\varepsilon_z} \qquad (13)$$

en de mengtijd over de breedte (bij lozing in het midden van een kanaal) als:

$$T_y = \frac{\left(\frac{b}{2}\right)^2}{\varepsilon_y} \qquad (14)$$

waarin:

T_z, T_y	=	mengtijd over diepte resp. breedte	[s]
h	=	waterdiepte	[m]
b	=	waterbreedte	[m]
ε_z, ε_y	=	effektieve stofuitwisselingskoëfficiënt in resp. z- en y-richting	[m^2/s]

De mengtijd over de breedte is over het algemeen veel groter dan de mengtijd over de diepte, zoals blijkt uit het volgende voorbeeld.

Uit lit. 6 blijkt dat de effektieve stofuitwisselingskoëfficiënten ε_z en ε_y van gelijke orde zijn.
Grofweg kan dan worden gesteld dat:

$$\frac{T_z}{T_y} \leqslant \frac{h^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} \qquad (15)$$

Bij een breedte van 100 m en een diepte van 5 m is de mengtijd over de breedte circa 100 keer zo groot als die over de diepte.

In het vervolg zal derhalve uitsluitend de mengtijd over de breedte (T_y) worden beschouwd.
Naast vergelijking 13 uit lit. 6 wordt voor de bepaling van de mengtijd ook wel gebruik gemaakt van de menglengte (lit. 5) die gedefinieerd is als de afstand tussen het punt van lozing en het punt waarbij sprake is van volledige menging. Bij een lozing in het midden van het kanaal is deze lengte gelijk aan:

$$L = \frac{0{,}1\ \bar{u}\ b^2}{\varepsilon_y} \qquad (16)$$

waarin: L = menglengte [m]

Als mengtijd geldt dan:

$$T_y = \frac{L}{\bar{u}} = \frac{0{,}1\ b^2}{\varepsilon_y} \qquad (17)$$

Vergelijking 14 geeft:

$$T_y = \frac{0{,}25\ b^2}{\varepsilon_y} \qquad (18)$$

Voor ε_y worden in lit. 6 enige formuleringen gegeven.

a) Uit laboratoriummetingen blijkt dat afhankelijk van de ruwheid, de breedte- en diepteverhouding en de geometrie van de doorsnede:

$$\varepsilon_y = (0{,}15 \text{ à } 0{,}5)\ hu_* \tag{19}$$

met de schuifspanningssnelheid u_* gekoppeld aan de Chézy-koëfficiënt volgens:

$$\frac{|\bar{u}|}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \tag{20}$$

b) Uit natuurmetingen in estuaria blijkt een iets grotere waarde voor ε_y:

$$\varepsilon_y = (0{,}5 \text{ à } 1{,}5)\ hu_* \tag{21}$$

In lit. 5 wordt vermeld dat:

c) In rechthoekige irrigatiekanalen ε_y gelijk is aan:

$$\varepsilon_y = 0{,}15\ hu_* \pm 50\% \tag{22}$$

d) Door bochten en onregelmatigheden in het profiel neemt ε_y toe. In lit. 5 wordt dan ook voorgesteld om bij praktische toepassingen gebruik te maken van de relatie:

$$\frac{\varepsilon_y}{hu_*} = 0{,}6 \pm 50\% \tag{23}$$

Deze relatie (23) zal dan ook voor het onderhavige onderzoek worden gebruikt.

De vergelijkingen 14, 17, 18 en 23 toegepast op het Amsterdam-Rijnkanaal met de volgende gegevens leveren:

$\bar{u}$ = 0,06 m/s (zie tabellen 2 t/m 4 van appendix B)

C = 40 $m^{\frac{1}{2}}/s$

h = 3,95 m (zie bijlage 2 van appendix B)

b = 72 m (zie bijlage 2 van appendix B)

$$\varepsilon_y = (0,3 - 0,9) * 3,95 * \left(\frac{0,06*\sqrt{g}}{40}\right) \approx 10^{-2} \quad m^2/s$$

$$T_y = (0,1 - 0,25) * \frac{72^2}{10^{-2}} * \frac{1}{3600} = 14,4 - 36 \text{ uren}$$

Het blijkt dus dat de mengtijd van een lozing in het midden van het kanaal een halve tot anderhalve dag bedraagt.
Van dit gegeven zal bij de berekening van de dispersiekoëfficiënten in het Amsterdam-Rijnkanaal gebruik worden gemaakt (zie appendix B).

Literatuur

1. Rapport betreffende de afkoeling van geloosd koelwater door warmte-overdracht aan de atmosfeer. (Deel 1: Experimentele bepaling van de warmte-uitwisselingskoëfficiënt aan de hand van varend gemeten temperatuurprofielen). KEMA, juli 1973.
2. Strömungsmechanische Aspekte der Wasserqualität. Mark Markofsky, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1980.
3. Predicting dispersion coefficient of streams. H. Liu, Journal of the Environmental Division. ASCE, Vol 103, february 1977.
4. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusiemodel. Deel 2: Homogene permanente stroming. Waterloopkundig Laboratorium, nota M896-41-2, november 1979.
5. Mixing in inland and coastal waters. H.B. Fischer e.a., Academic Press, 1979.
6. Toepasbaarheid één-dimensionaal model. Deel 1: Overzichtsverslag. Waterloopkundig Laboratorium, nota M896-41-1, april 1982.

Gleichung	Literatur	Vermerk
	Rohr-Strömung	
$E_x = 10{,}1\ R_H\ U_*$	Taylor, 1954	Dispersion meist durch diffusiven Transport in der Längsrichtung
$E_x = \frac{U^3\ t^2_{1/2}}{4} \times \ln 2$	Taylor, 1954	
	Laborgerinne	
$E_x = \frac{U\ x}{8}\left(\sqrt{8\sigma^2 - 1} - 1\right)$	Levenspiel et al.,1957	Dispersion durch eine Quergeschwindigkeitsverteilung
$E_x = \frac{H\ U^3}{U_*^2}\ \phi(n) + \frac{H\ U_*^2}{U}\ \psi(n)$	Thomas, 1958	Dispersion durch eine Vertikalgeschwindigkeitsverteilung
$E_x = 5{,}93\ H\ U_*$	Elder, 1959	
$E_x = 6{,}4\ H^{1,24}\ E^{0,3}$	Krenkel	mittlere Einergiedissipation in einem zweidimensionalen Gerinne
$E_x = 14{,}28\ R_H^{3/2}\ \sqrt{2gI}$	Parker, 1961	
$E_x = \left(\frac{x^2}{2}\right)\ \left(\frac{m_2}{m_1^3}\right)$	Parker, 1961	wie bei Taylor, 1954
$E_x = \left(\frac{U}{2}\right)'\ (\hat{U}\ \bar{t} - x)$	Harris, 1963	Berücksichtigung der mittleren Durchlaufzeit statt der Standardabweichung der Konzentrationskurve
$E_x = 11{,}4\ H\ U_*$	Yotsukura, 1964	wie Levenspiel, 1957
$E_x = 0{,}8\ e^{0,34}\ U\sqrt{F}$	Patterson, 1965	Dreidimensionales Modell
$E_x = 29(U)^{0,9}$	Shih, 1967	
$E_x = 3{,}26\ (U)^{0,607}$	Armstrong, 1968	Mittlere Fließgeschwindigkeit in einem zweidimensionalen Gerinne
$E_x = 1{,}8(U)^{0,858}$	Gloyna, 1969	
$E_x = \frac{0{,}2222}{k^3\ b}\alpha + \frac{(1+b)k}{9}\ H\ U_*$	Sooky, 1969	Berücksichtigung des konvektiven Dispersionskoeffizienten
	Natürliche Gewässer	
$E_x = \left(\frac{U^2}{2}\right)\ \left(\frac{\sigma^2_{t2} - \sigma^2_{t1}}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1}\right)$	Fischer, 1964	Konzentration nach einer Anlaufperiode
$E_x = 500\ R_{H_y}\ U_*$	Glover, 1964	wie bei Taylor, 1954
$E_x = C_3 H^{4/3}\ I^{1/3}\ \left(\frac{U}{U_*}\right)^{-1/3}$	Thackston, 1966	Berücksichtigung von Totwasserzonen und einer Quergeschwindigkeitsverteilung
$E_x = -\frac{1}{F}\int_0^B q'(z)dz \int_0^z \frac{1}{E_z dz}\ dz \cdot \int_0^z q'(z)dz$	Fischer, 1968	Quergeschwindigkeitsverteilung

Formuleringen longitudinale dispersiekoëfficiënt

nota 24.001.26
appendix A
bijlage 1

Reference	Channel	Depth, d (m)	Width, B (m)	Mean velocity, $\bar{u}$ (m/sec)	Shear velocity, u^* (m/sec)	Observed dispersion coefficient, K (m^2/sec)	$\frac{K}{du^*}$	K predicted by Eq. (5.16) (m^2/sec)	K predicted by Eq. (5.19) (m^2/sec)
Thomas (1958)	Chicago Ship Canal	8.07	48.8	0.27	0.0191	3.0	20		
State of California (1962)	Sacramento River	4.00		0.53	0.051	15	74		
Owens *et al.* (1964)	River Derwent	0.25		0.38	0.14	4.6	131		
Glover (1964)	South Platte River	0.46		0.66	0.069	16.2	510		
Schuster (1965)	Yuma Mesa A Canal	3.45		0.68	0.345	0.76	8.6		
Fischer (1967a)	Trapezoidal laboratory channel with roughened sides	0.035	0.40	0.25	0.0202	0.123	174	0.131	
		0.047	0.43	0.45	0.0359	0.253	150	0.251	
		0.035	0.40	0.45	0.0351	0.415	338	0.371	
		0.035	0.34	0.44	0.0348	0.250	205	0.250	
		0.021	0.33	0.45	0.0328	0.400	392	0.450	
		0.021	0.19	0.46	0.0388	0.220	270	0.166	
Fischer (1968b)	Green-Duwamish River, Washington	1.10	20		0.049	6.5-8.5	120–160	7.8	
Yotsukura *et al.* (1970)	Missouri River	2.70	200	1.55	0.074	1500	7500		3440
Godfrey and Frederick (1970) (predicted values of K from Fischer, 1968a)	Copper Creek, Virginia (below gage)	0.49	16	0.27	0.080	20	500	6.0	
		0.85	18	0.60	0.100	21	250	28	
		0.49	16	0.26	0.080	9.5	245	11.4	
	Clinch River, Tennessee	0.85	47	0.32	0.067	14	235	15	22
		2.10	60	0.94	0.104	54	245	86	73
		2.10	53	0.83	0.107	47	210	55	28
	Copper Creek, Virginia (above gage)	0.40	19	0.16	0.116	9.9	220	2.8	
	Powell River, Tennessee	0.85	34	0.15	0.055	9.5	200	9.1	
	Clinch River, Virginia	0.58	36	0.21	0.049	8.1	280	30	
	Coachella Canal, California	1.56	24	0.71	0.043	9.6	140	3.9	
Fukuoka and Sayre (1973)	Sinuous rectangular laboratory channel, smooth sides, smooth and rough bottoms – 25 experiments	0.023 to 0.070	0.13 to 0.25		0.011 to 0.027				
McQuivey and Keefer (1974) (predicted values of K from Fischer 1975)	Bayou Anacoco	0.94	26	0.34	0.067	33			13
		0.91	37	0.40	0.067	39			38
	Nooksack River	0.76	64	0.67	0.27	35			98
	Wind/Bighorn Rivers	1.10	59	0.88	0.12	42			232
		2.16	69	1.55	0.17	160			340
	John Day River	0.58	25	1.01	0.14	14			88
		2.47	34	0.82	0.18	65			20
	Comite River	0.43	16	0.37	0.05	14			16
	Sabine River	2.04	104	0.58	0.05	315			330
		4.75	127	0.64	0.08	670			190
	Yadkin River	2.35	70	0.43	0.10	110			44
		3.84	72	0.76	0.13	260			68

Experimental measurements of longitudinal dispersion in open channels (ontleend aan lit. 5)

nota 24.001.26
appendix A
bijlage 2

APPENDIX B

BEPALING DISPERSIEKOËFFICIËNT UIT METINGEN IN HET AMSTERDAM-RIJNKANAAL

Inhoud blz.

Lijst van bijlagen

1. Inleiding B-1

2. Geloosde hoeveelheid stof B-2

3. Dispersiekoëfficiënt uit maximale koncentratie B-5

4. Dispersiekoëfficiënt uit standaardafwijking B-7

5. Resumé B-10

Literatuur B-11

Lijst van bijlagen

1. Situatie Amsterdam-Rijnkanaal.
2. Dwarsprofielen Amsterdam-Rijnkanaal.
3. Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 18 en 19 november 1968 (ontleend aan lit. 1).
4. Idem, op 20 november 1968.
5. Idem, op 21 november 1968.
6. Idem, op 22 november 1968.
7. Idem, op 16 september 1969.
8. Idem, op 17 september 1969.
9. Idem, op 18 september 1969.
10. Idem, op 19 september 1969.
11. Idem, op 7 april 1970.
12. Idem, op 8 april 1970.
13. Idem, op 9 april 1970.
14. Idem, op 10 april 1970.
15. Idem, op 29 september 1970.
16. Idem, op 30 september 1970.
17. Idem, op 1 oktober 1970.
18. Berekeningsgegevens dispersiekoëfficiënten Amsterdam-Rijnkanaal uit maximale koncentratie in november 1968 en september 1969.
19. Idem, in april en oktober 1970.
20. Verband E en hu_* voor het Amsterdam-Rijnkanaal bij berekening uit de maximale koncentratie.
21. Gegevens voor berekening dispersiekoëfficiënten Amsterdam-Rijnkanaal uit de standaardafwijking van de koncentratieverdeling.
22. Verband E en hu_* voor het Amsterdam-Rijnkanaal bij berekening uit de standaardafwijking.

1. Inleiding

Ten behoeve van de bepaling van de warmte-uitwisselingskoëfficiënt op het Amsterdam-Rijnkanaal (bijlagen 1 en 2) zijn in het verleden een aantal metingen uitgevoerd.
Als hulpmiddel hierbij zijn volumina water gemerkt met Rhodamine-B. De destijds gemeten Rhodamine-profielen kunnen, naast het bepalen van de gemiddelde stroomsnelheid, ook dienen ter bepaling van een longitudinale dispersiekoëfficiënt. Van deze laatste mogelijkheid is gebruik gemaakt.
De dispersiekoëfficiënten worden op een tweetal manieren bepaald, namelijk: uitgaande van de maximale koncentratie en uitgaande van de standaardafwijking van de koncentratieverdeling.
Bij de berekening uit de maximale koncentratie is het noodzakelijk de geloosde massa te kennen. Uit het verloop van de metingen blijkt dat tussen opeenvolgende metingen Rhodamine is verdwenen. Derhalve wordt in de volgende paragraaf eerst ingegaan op de bepaling van de geloosde hoeveelheid, waarna vervolgens op twee manieren de dispersiekoëfficiënt wordt bepaald.

2. Geloosde hoeveelheid stof

In lit. 1 zijn meetresultaten gegeven op basis waarvan in de onderhavige nota dispersiekoëfficiënten worden bepaald.
Op de bijlagen 3 t/m 17 zijn de gemeten Rhodamine-profielen weergegeven die tijdens de metingen zijn geregistreerd.
Van de metingen in 1968 en 1969 is bekend welke hoeveelheden er zijn geloosd. De lozing van de Rhodamine heeft lokaal in de as plaatsgevonden en niet verspreid over het dwarsprofiel. Gezien de koncentraties van de Rhodaminelozingen (0,2 kg/l) mag aangenomen worden dat een belangrijk deel van de Rhodamine niet in oplossing komt maar op de bodem zal vallen. De hoeveelheid massa die derhalve in rekening wordt gebracht bij de berekening van de dispersiekoëfficiënt volgens de formule:

$$E = \frac{M^2}{4\pi t_1 C_{max}^2}$$

is dus geringer dan de geloosde hoeveelheid.
Uit de gemeten Rhodamine-profielen kan door integratie van het oppervlak onder de kromme en vermenigvuldiging met de gemiddelde dwarsdoorsnede, de totale hoeveelheid opgeloste Rhodamine worden berekend. Hierbij wordt er dan van uitgegaan dat sprake is van volledige menging over het dwarsprofiel van het kanaal (zie appendix A, paragraaf 2).

In tabel 1 zijn de berekende opgeloste hoeveelheden weergegeven. Bij die waarden waarvan de geloosde hoeveelheid bekend is, is deze laatste tevens aangegeven.

tabel 1

Geloosde en opgeloste hoeveelheden Rhodamine in het Amsterdam-Rijnkanaal.

bij-lage-nummer	volg-nummer	lozing	tijd na lozen [uren]	opge-loste massa [kg]	ge-loosde massa
4	1	RhI	18,2	0,10	0,2
5	2	RhI	42,7	0,10	0,2
6	3	RhI	67,1	0,06	0,2
5	4	RhII	18,8	0,22	0,4
6	5	RhII	43,2	0,16	0,4
6	6	RhIII	17,8	0,22	0,4
7	7	RhIII	40,7	0,18	0,4
7	8	RhIV	16,4	0,25	0,4
8	9	RhI	18,2	0,38	0,5
9	10	RhI	41,8	-*1	0,5
9	11	RhII	18,1	0,54*2	0,5
10	12	RhII	42,4	0,22	0,5
10	13	RhIII	17,7	0,22	0,4
11	14	RhIII	40,8	0,13	0,4
11	15	RhIV	16,4	0,24	0,35
12	16	RhI	17,8	0,65	
13	17	RhI	42,8	0,38	
13	18	RhII	20,0	0,51	
14	19	RhII	45,1	0,32	
14	20	RhIII	18,1	0,36	
15	21	RhIII	41,0	0,21	
15	22	RhIV	17,0	0,19	
16	23	RhI	17,2	0,95	
17	24	RhI	41,4	0,57	
18	25	RhI	64,8	0,40	
17	26	RhII	17,9	0,79	
18	27	RhII	42,0	0,67	
18	28	RhIII	19,1	0,73	

*1 = niet te bepalen waarde
*2 = geïnterpoleerde waarde

Uit de vergelijking van de opgeloste massa met de geloosde massa blijkt dat de in oplossing zijnde hoeveelheid veel minder is dan de geloosde hoeveelheid.
Verder blijkt dat in vrijwel alle gevallen de opgeloste hoeveelheid geringer is naarmate het tijdstip van lozing verder weg is.

De oorzaak hiervan kan tweeërlei zijn:

1) de mengtijd is langer dan in eerste instantie is aangenomen. Bij de metingen die circa 18 uren na de lozing hebben plaatsgevonden kan eventueel sprake zijn van nog geen volledige menging over het dwarsprofiel, waardoor het aangehouden gemiddelde oppervlak wordt overschat en hierdoor de opgeloste massa een grotere waarde krijgt dan in werkelijkheid het geval is.

2) door adsorptie aan zwevend materiaal kan Rhodamine "verdwijnen" tussen twee metingen. Een aanduiding hiervoor is het verschil in opgeloste hoeveelheid tussen de metingen 2 en 3 resp. 24 en 25, die meer dan twee etmalen na de lozing zijn uitgevoerd en waarbij gezien de mengtijden mag worden aangenomen dat hier sprake is van volledige menging over het dwarsprofiel.

Voor de berekeningen van de dispersiekoëfficiënt zal worden uitgegaan van de opgeloste massa.

3. Dispersiekoëfficiënt uit maximale koncentratie

Uitgaande van een normale verdeling van de gemeten Rhodamine-koncentratie kan met behulp van de formule:

$$E = \frac{M^2}{4\pi t_1 C_{max}^2}$$

de dispersiekoëfficiënt worden berekend. Op de bijlagen 18 en 19 zijn de berekeningsresultaten weergegeven met de gebruikte waarden voor resp. M, t_1 en C_{max}. Tevens is hierbij aangegeven de gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$). Met behulp hiervan kan de faktor k voor de formule $E = k*hu_*$ worden bepaald. In tabel 2 zijn de resultaten samengevat.

tabel 2
Samenvatting dispersiekoëfficiënten en parameter k op het Amsterdam-Rijnkanaal.

metingen november 1968			metingen september 1969		
volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]	volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]
1	0,74	49	9	2,15	217
2	0,44	29	10	-	-
3	1,45	82	11	1,54	217
4	0,64	41	12	1,49	135
5	1,11	57	13	1,80	111
6	0,93	45	14	3,50	185
7	1,57	83	15	1,45	108
8	0,86	44			
metingen april 1970			**metingen oktober 1970**		
volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]	volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]
16	1,59	106	23	0,70	55
17	3,11	125	24	0,99	100
18	1,37	51	25	0,88	93
19	3,06	114	26	1,41	162
20	1,39	63	27	1,14	144
21	2,10	90	28	1,51	319
22	0,91	40			

Uit tabel 2 blijkt dat de dispersiekoëfficiënt varieert van 0,44 tot 3,50 m^2/s.
Gemiddeld bedraagt de koëfficiënt 1,47 m^2/s met een standaardafwijking van 0,76 m^2/s.
De koëfficiënt k (in $E = k*hu_*$) bedraagt gemiddeld 106 met een standaardafwijking van 68.

Een aanname voor deze wijze van berekenen is dat sprake is van een normale verdeling van de koncentratie.
Gezien de grootte van de mengtijd kunnen derhalve de metingen die binnen circa één dag na de lozing zijn uitgevoerd het resultaat in ongunstige zin beïnvloeden.
Worden deze meetresultaten niet in beschouwing genomen dan blijkt dat de gemiddelde dispersiekoëfficiënt $1,7 \pm 1,0$ m^2/s bedraagt en de koëfficiënt k: 103 ± 41.
Deze waarden wijken niet signifikant af van het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald uit alle metingen.

4. Dispersiekoëfficiënt uit standaardafwijking

De gemeten profielen kunnen worden opgevat als frekwentieverdelingen waarvan een standaardafwijking kan worden bepaald. Hiervoor bestaan een aantal mogelijkheden.
Kan de verdeling worden opgevat als een normale verdeling dan kan de standaardafwijking vrij eenvoudig worden bepaald (zie appendix A, paragraaf 3), doch meer algemeen kan de standaardafwijking ook bepaald worden uit de afzonderlijke waarnemingen volgens de formule:

$$\sigma^2 = \frac{I}{\sum_{i=1}^{n} f_i - 1} \sum_{i=1}^{n} f_i (x_i^1 - \bar{x})$$

waarbij:

f_i = aantal waarnemingen in een klasse

x_i^1 = klassemidden

$\bar{x}$ = gemiddelde

De op de bijlagen 3 t/m 17 getekende profielen zijn opgevat als frekwentieverdelingen waarbij op elke 100 m een klassegrens is gekozen en waarbij de gemeten koncentratie in elke klasse opgevat wordt als het aantal waarnemingen in een klasse.
In de volgende tabel 3 is van elke meting de standaardafwijking gegeven.

tabel 3

Standaardafwijkingen van de koncentratieverdeling.

nov. 1968		sep. 1969		apr. 1970		okt. 1970	
volg-nr	σ	volg-nr	σ	volg-nr	σ	volg-nr	σ
1	360	9	611	16	436	23	480
2	537	10	-	17	1151	24	646
3	769	11	467	18	682	25	734
4	422	12	670	19	1100	26	437
5	854	13	514	20	584	27	596
6	492	14	1028	21	969	28	417
7	1011	15	589	22	558		
8	412						

Uit het verschil in variantie van de koncentratieverdeling kan de dispersiekoëfficiënt worden bepaald volgens:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{t_2 - t_1}$$

In de volgende tabel 4 zijn dispersiekoëfficiënten weergegeven die berekend zijn met behulp van bovenvermelde standaardafwijkingen.
Op bijlage 21 zijn de gebruikte waarden van σ_2, σ_1, t_2 en t_1 weergegeven alsmede de waarden van u_*.

tabel 4

Dispersiekoëfficiënten en k-waarden voor het Amsterdam-Rijnkanaal bij bepaling uit de standaardafwijking.

volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]	volg-nr	E [m^2/s]	k [$E=k*hu_*$]
1 - 2	0,90	60	16 - 17	6,30	197
2 - 3	1,72	75	18 - 19	4,11	153
4 - 5	3,14	142	20 - 21	3,62	150
6 - 7	4,73	266	23 - 24	2,56	324
11 - 12	1,32	95	24 - 25	0,72	79
13 - 14	4,75	227	26 - 27	0,95	127

De gemiddelde waarde van de op deze wijze berekende dispersiekoëfficiënt bedraagt 2,9 m^2/s met een standaard-afwijking van 1,8 m^2/s.
Voor k zijn de gemiddelde waarde en de standaardafwijking resp. 158 en 82.

Op bijlage 22 is het verband tussen E en hu_* bij deze wijze van bepaling van de dispersiekoëfficiënten uitgezet.

Worden deze waarden vergeleken met die welke zijn bepaald uit de maximale koncentratie (paragraaf 3) dan blijkt dat de waarden bepaald uit de variantie van de koncentratie-verdeling een faktor 2 groter zijn dan die welke bepaald zijn uit de maximale koncentratie. Voor de k-waarden is dit een faktor 1,5.

5. Resumé

Uit de bepaling van de dispersiekoëfficiënt uit metingen op het Amsterdam-Rijnkanaal blijkt dat deze kan worden geschreven als:

$$E = (106 \pm 68)\ hu_*$$

indien wordt uitgegaan van de maximale koncentratie en als:

$$E = (158 \pm 82)\ hu_*$$

indien wordt uitgegaan van de standaardafwijking van de koncentratieverdeling.

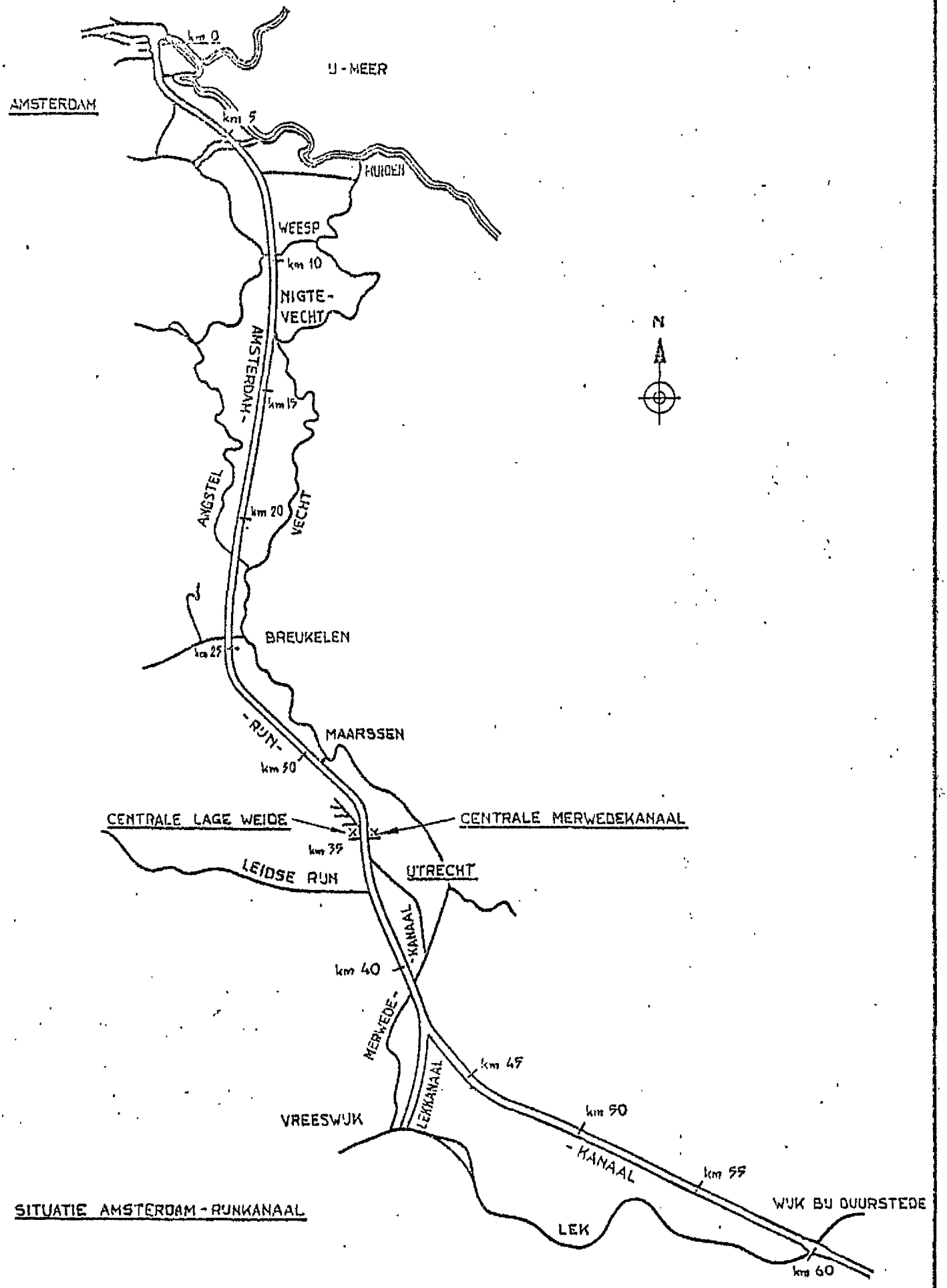
In appendix A is aangegeven dat uit metingen op kanalen en rivieren is gebleken dat:

$$E = (100 - 500)\ hu_*$$

Uit het bovenstaande blijkt dat de dispersiekoëfficiënt op het Amsterdam-Rijnkanaal aan de onderzijde van de gegeven range blijkt te liggen.

Literatuur

1. Rapport betreffende de afkoeling van geloosd koelwater door warmte-overdracht aan de atmosfeer.
(Deel 1: Experimentele bepaling van de warmte-uitwisselingskoëfficiënt aan de hand van varend gemeten temperatuurprofielen).
KEMA, juli 1973.

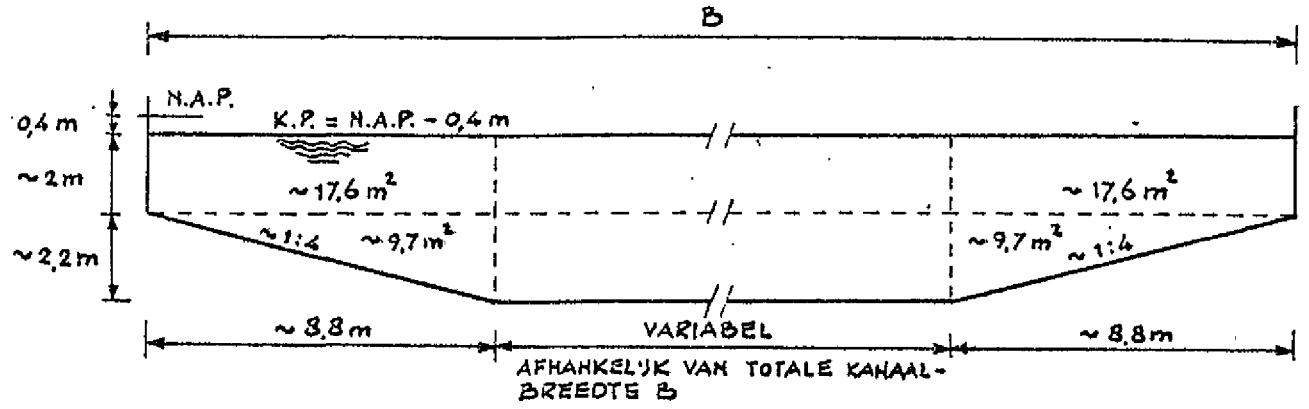


SITUATIE AMSTERDAM - RIJNKANAAL

nota 24.001.26
appendix B
bijlage 1

SCHAAL 1: 200.000

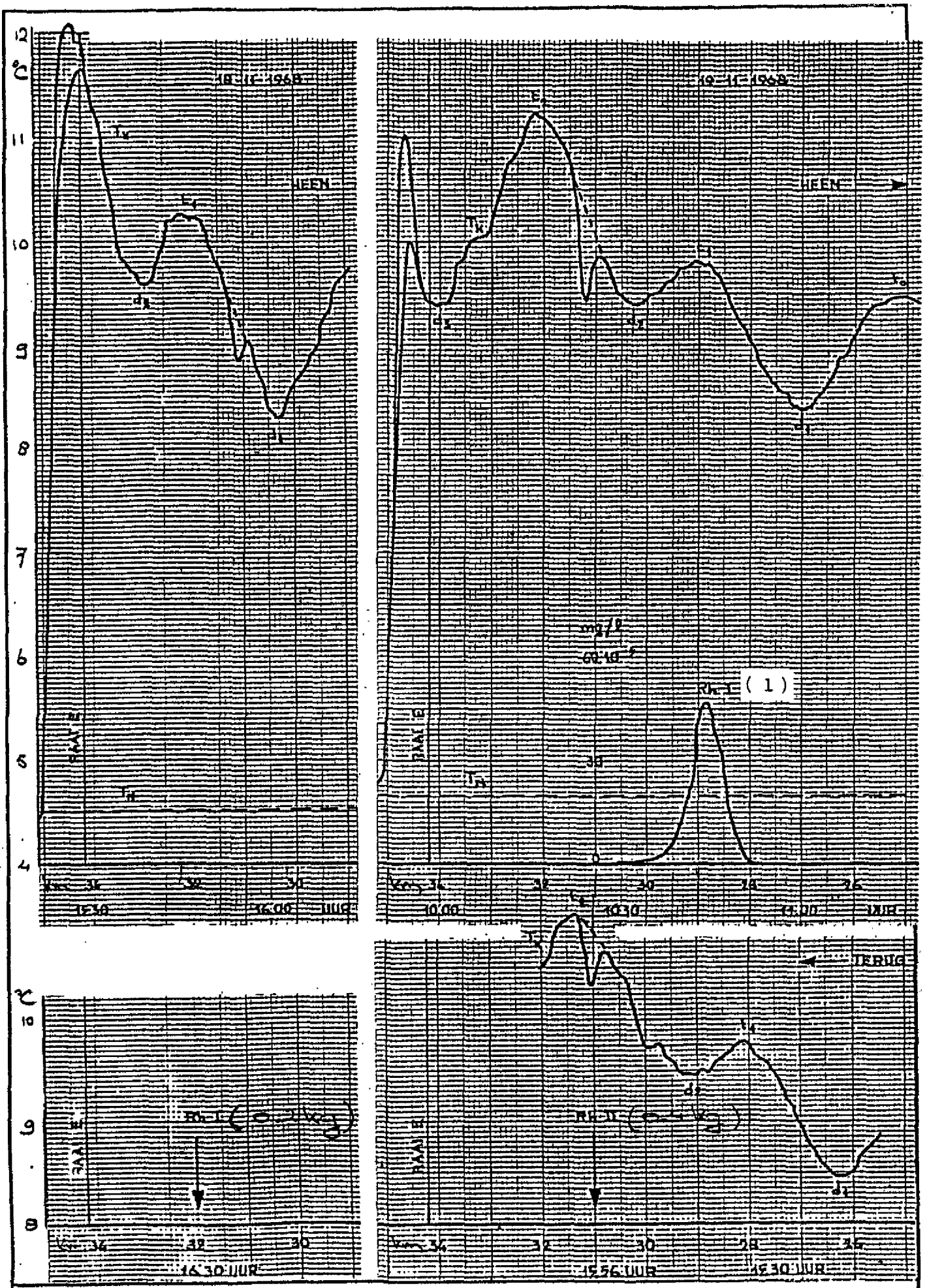
KEMA ARNHEM	Get.: Gec.: 24-7-'73	Beh. bij: RAPPORT Nº 6946	Bestaat uit: A0; A1; A2; 1 A3; 9 A4;	Formaat A 4	Nummer D4108-01



Van km- tot km		Breedte op de waterlijn B (m)	Opp. dwars-profiel A (m^2)	Gem. diepte $h = \frac{A}{B}$ (m)
35,0 - 33,4		100	401	4,01
33,4 - 31,7		95	380	4,00
31,7 - 30,3		75	296	3,95
30,3 - 29,9		72	283	3,93
29,9 - 28,6	tot eind 1969	72	283	3,93
	vanaf eind 1969	100	401	4,01
28,6 - 27,0		72	283	3,93
27,0 - 25,6		76	300	3,95
25,6 - 12,6		72	283	3,93
12,6 - 12,1		100	401	4,01
12,1 - 10,1		72	283	3,93
10,1 - 7,3		77	304	3,95
7,3 - 6,2	gewijzigd in 1972	95	380	4,00
6,2 - 5,0	gewijzigd in 1972	75	296	3,95

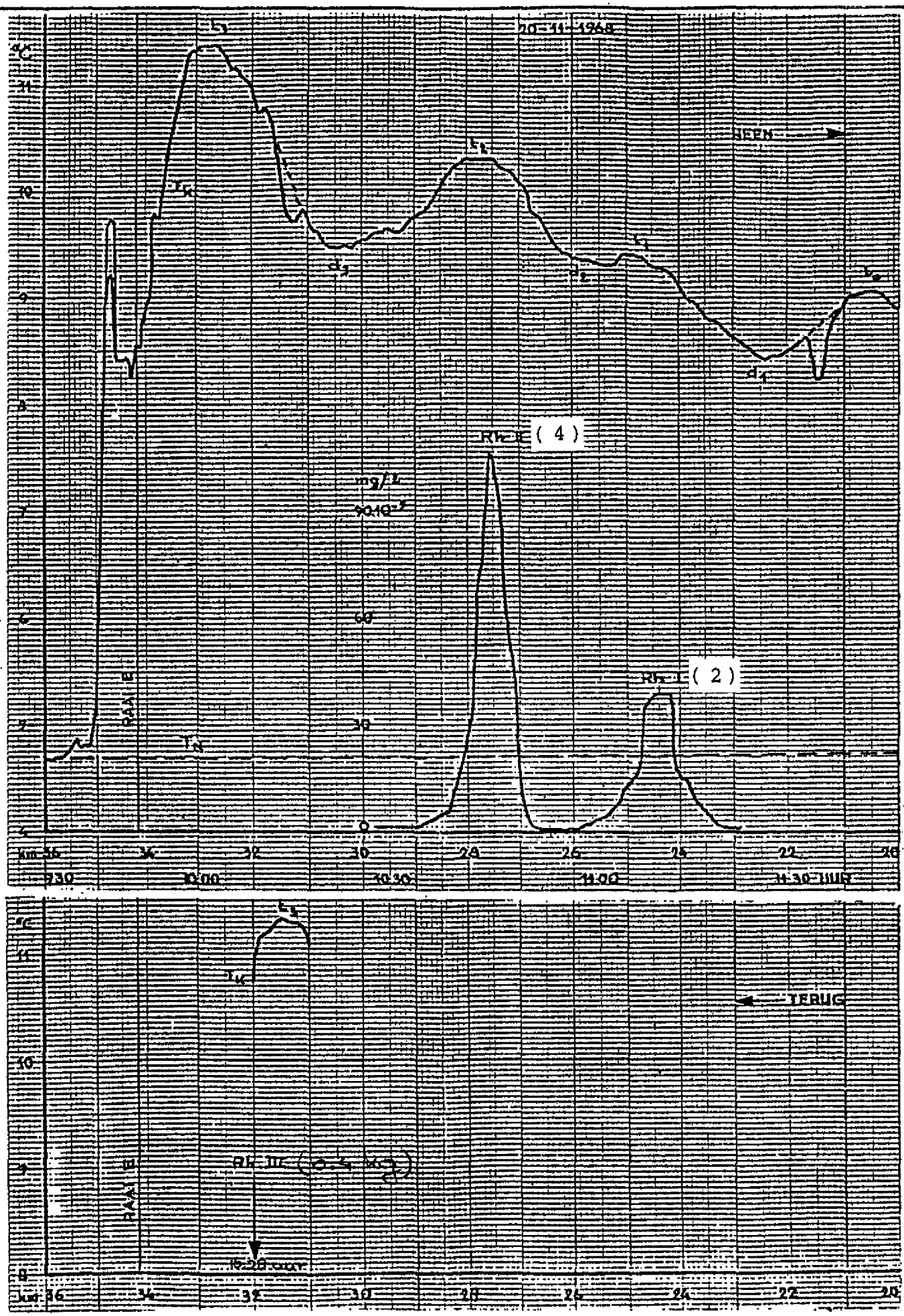
Dwarsprofielen Amsterdam-Rijnkanaal

nota 24.001.26
appendix B
bijlage 2



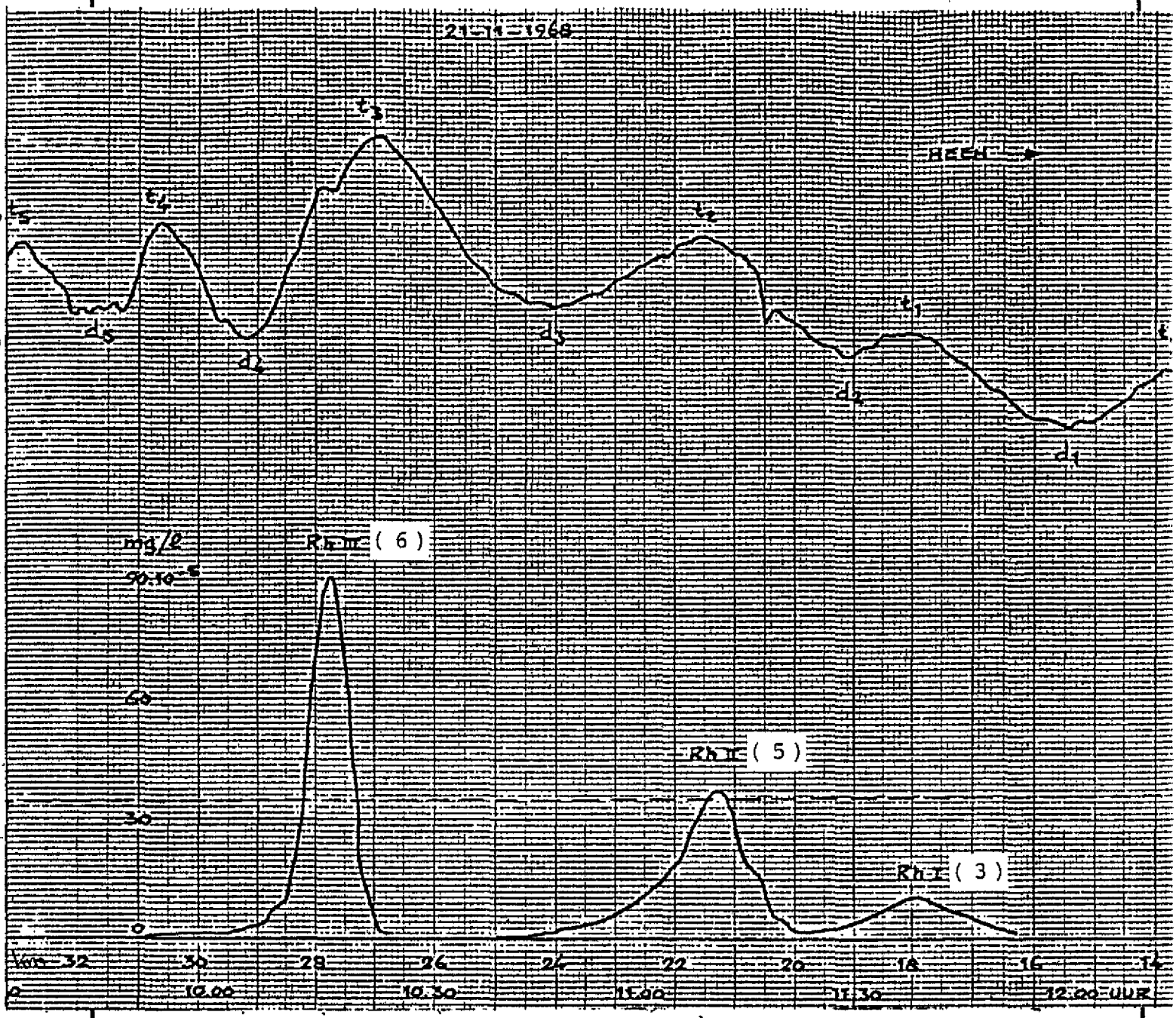
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 18 en 19 november 1968 (ontleend aan lit. 1).

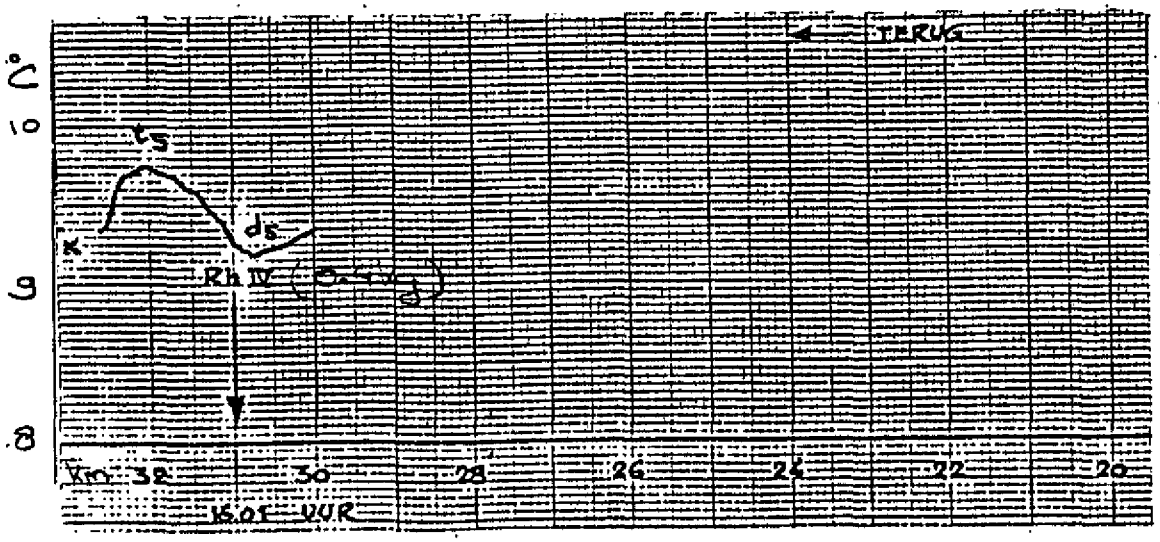
rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 3



Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 20 november 1968 (ontleend aan lit. 1).

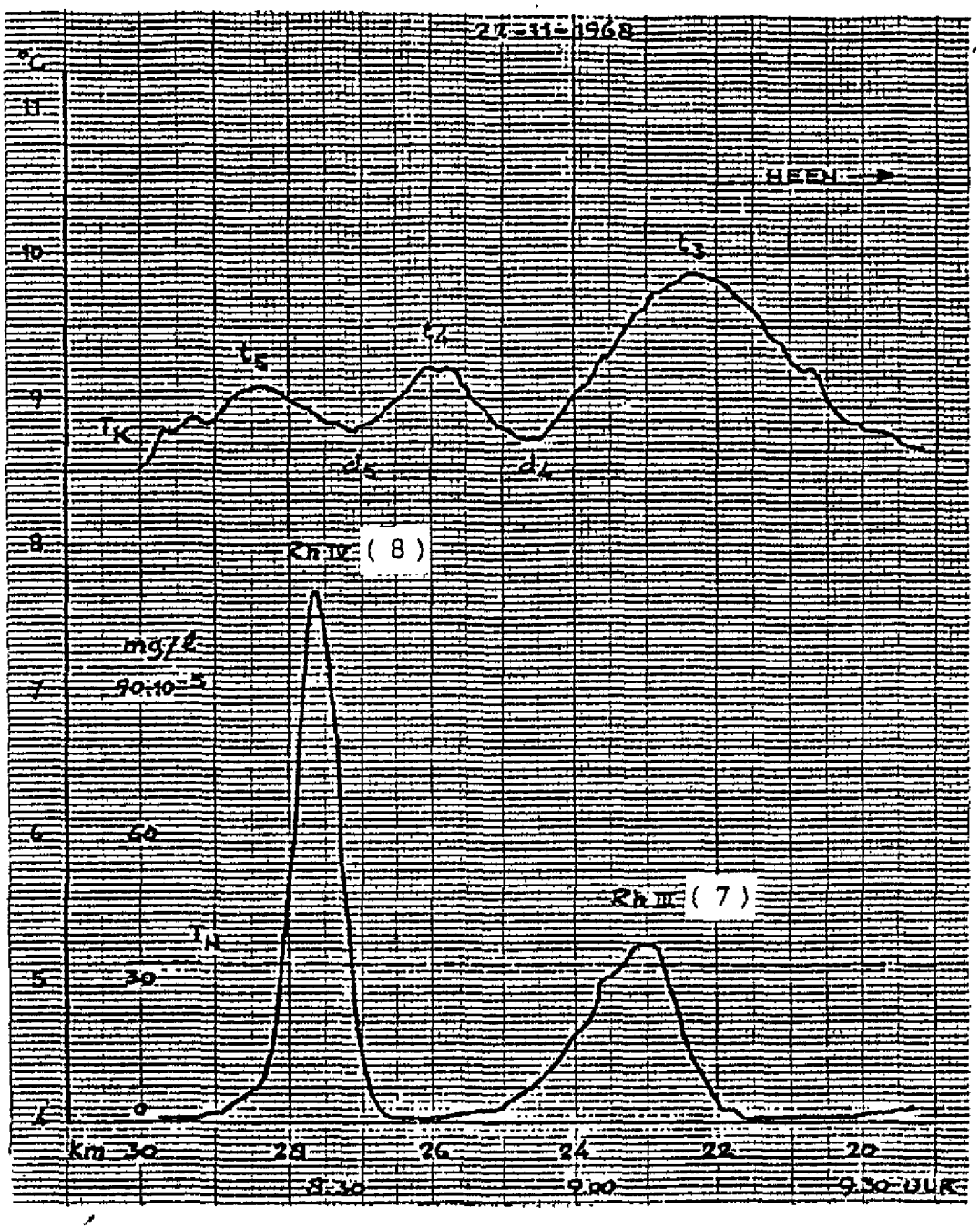
rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B nr.	**nota nr.** 24.001.26 **bijlage nr.** 4





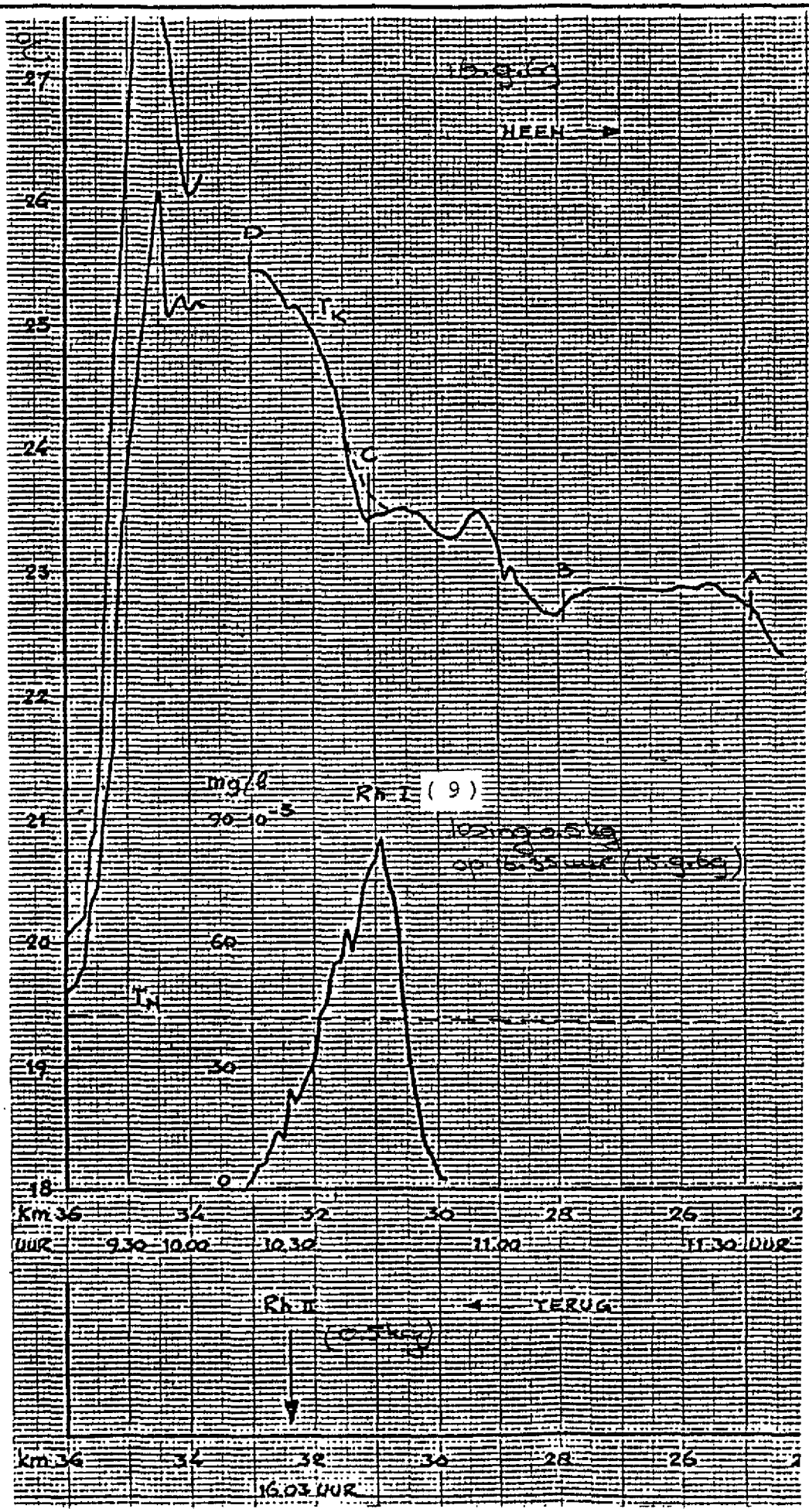
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 21 november 1968 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 5



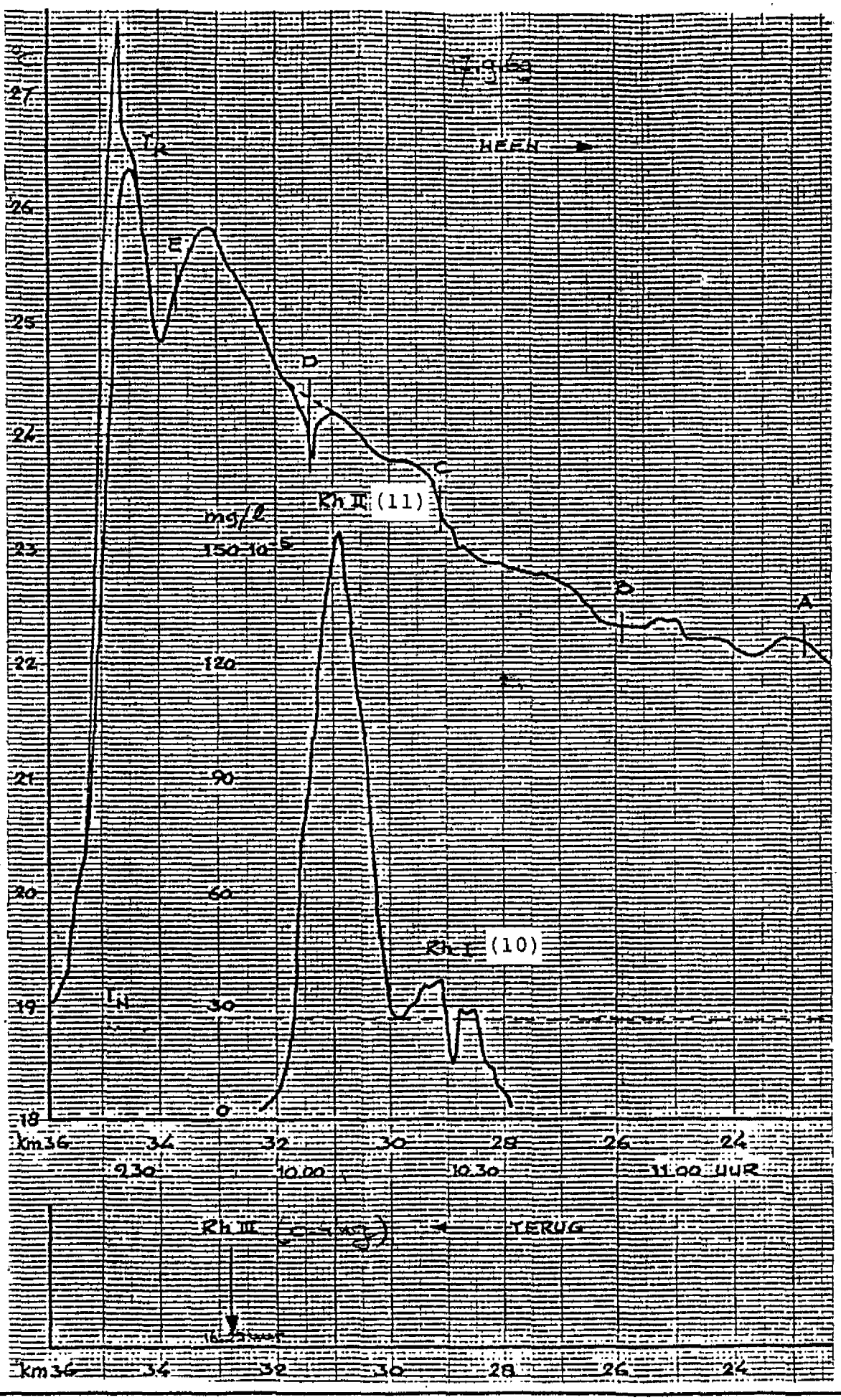
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 22 november 1968 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 6



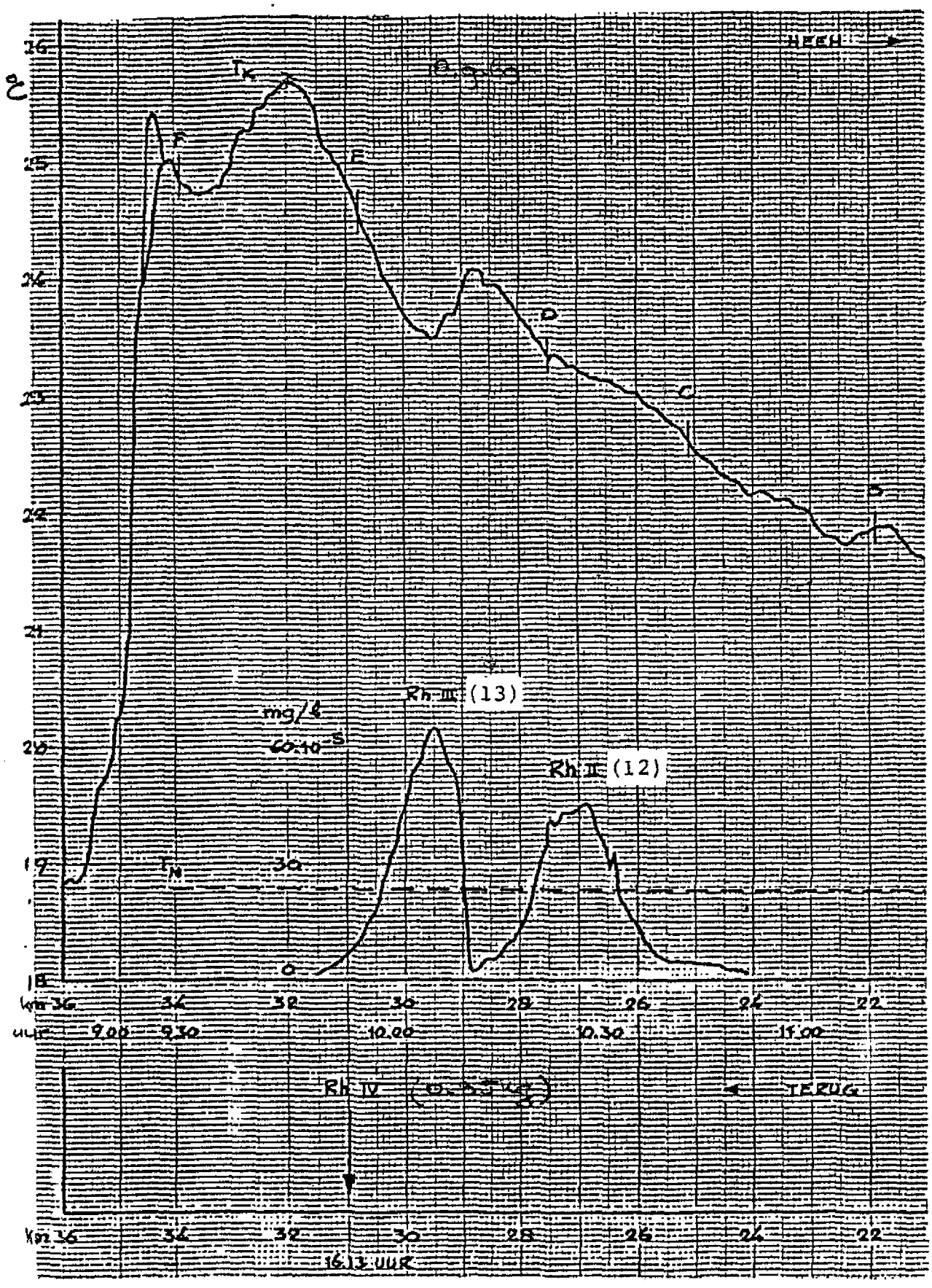
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 16 september 1969 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 7



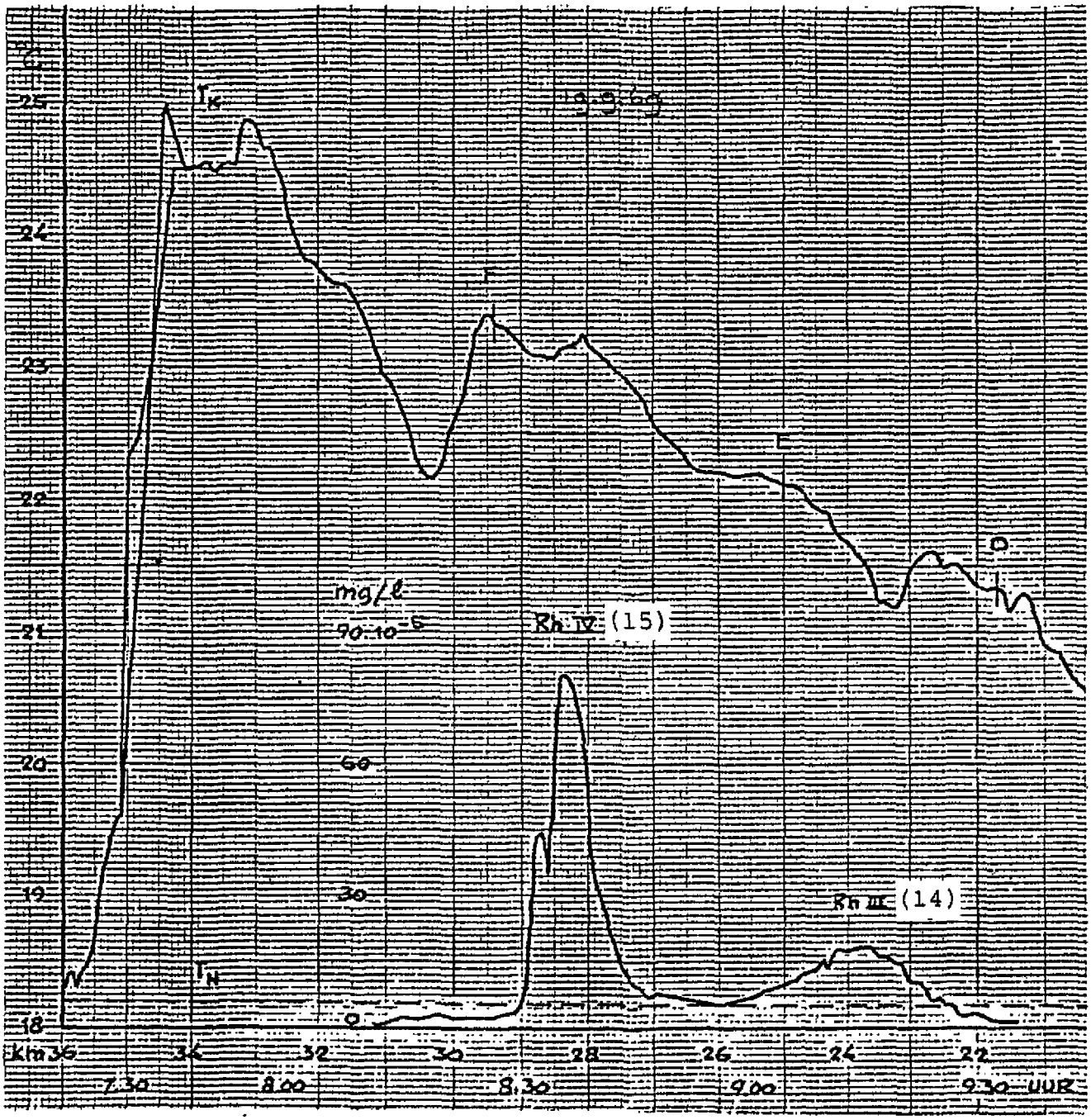
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 17 september 1969 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 8



Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 18 september 1969 (ontleend aan lit. 1).

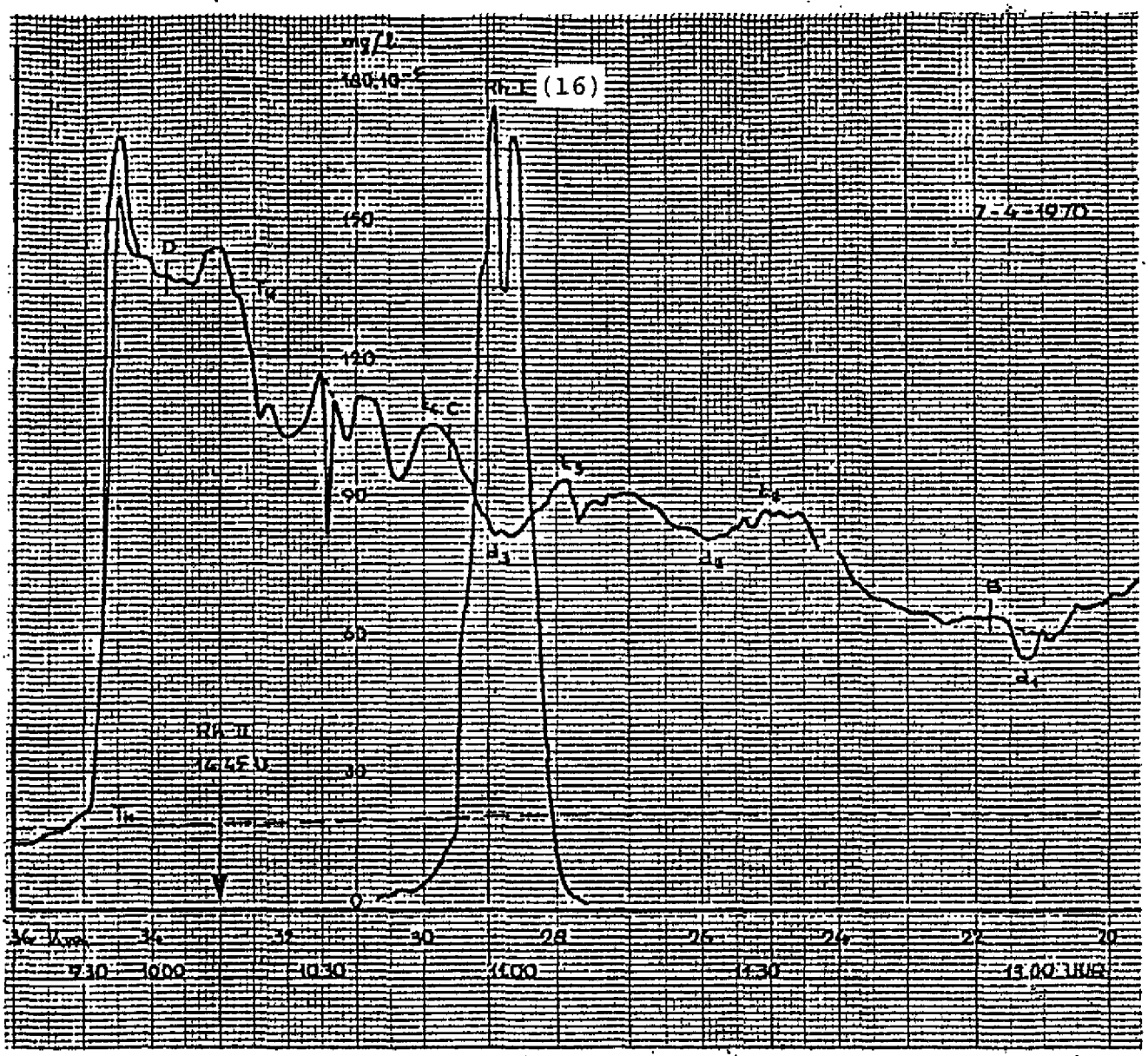
rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 9



Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 19 september 1969 (ontleend aan lit. 1).

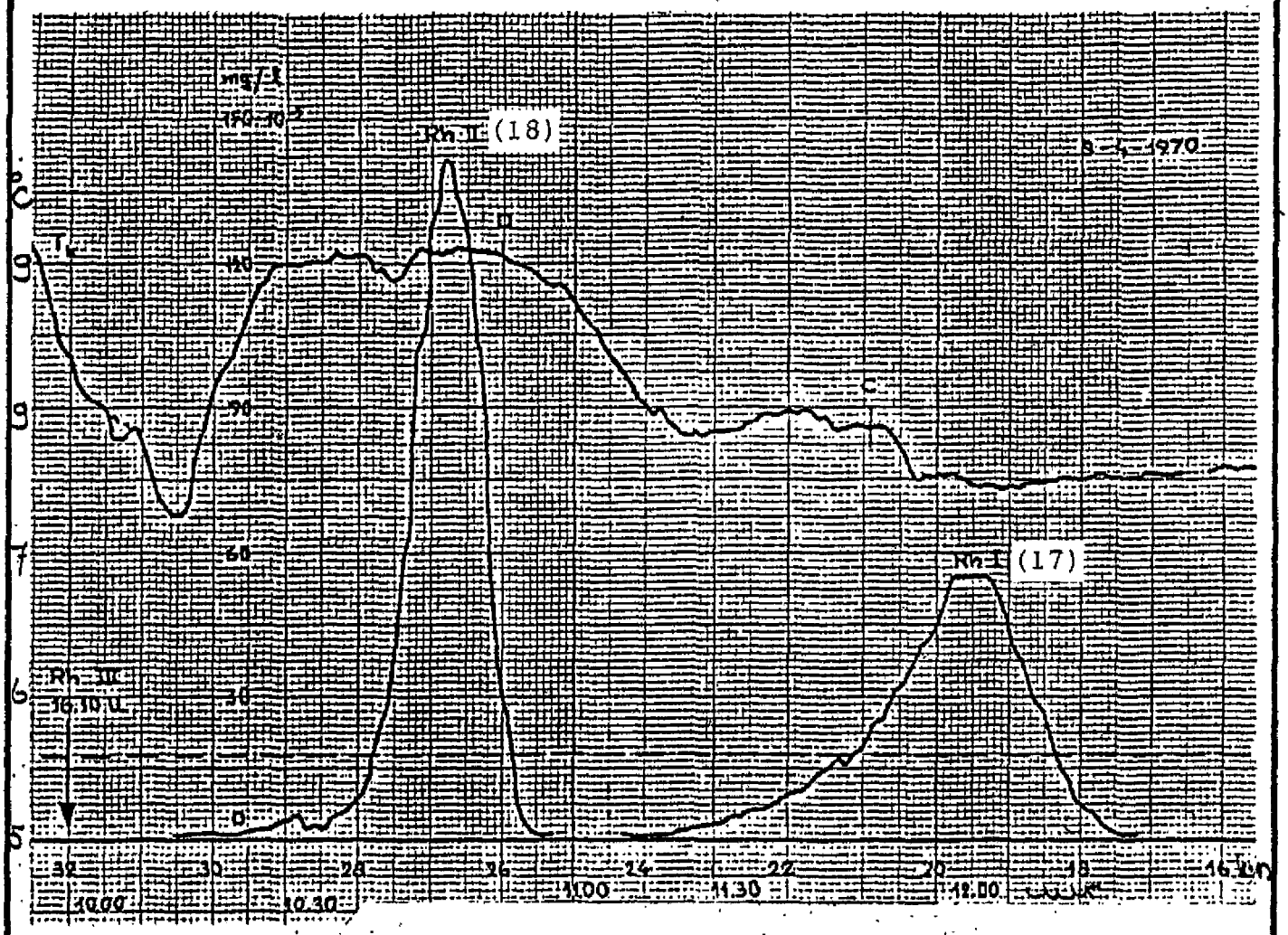
rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 10

RhI geloosd op
6-4-70 om 17.10 (kmr. 32)



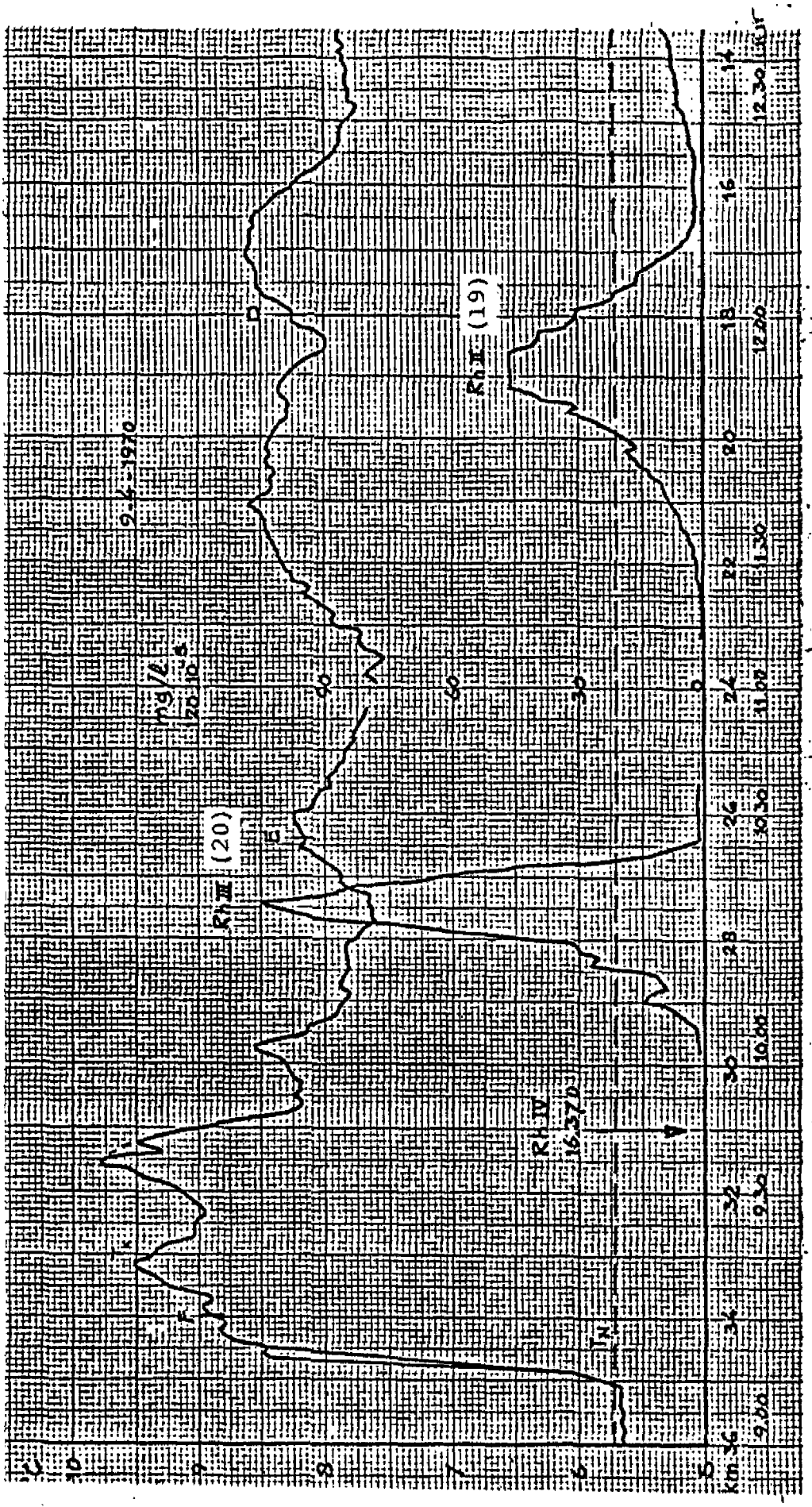
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 7 april 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 11



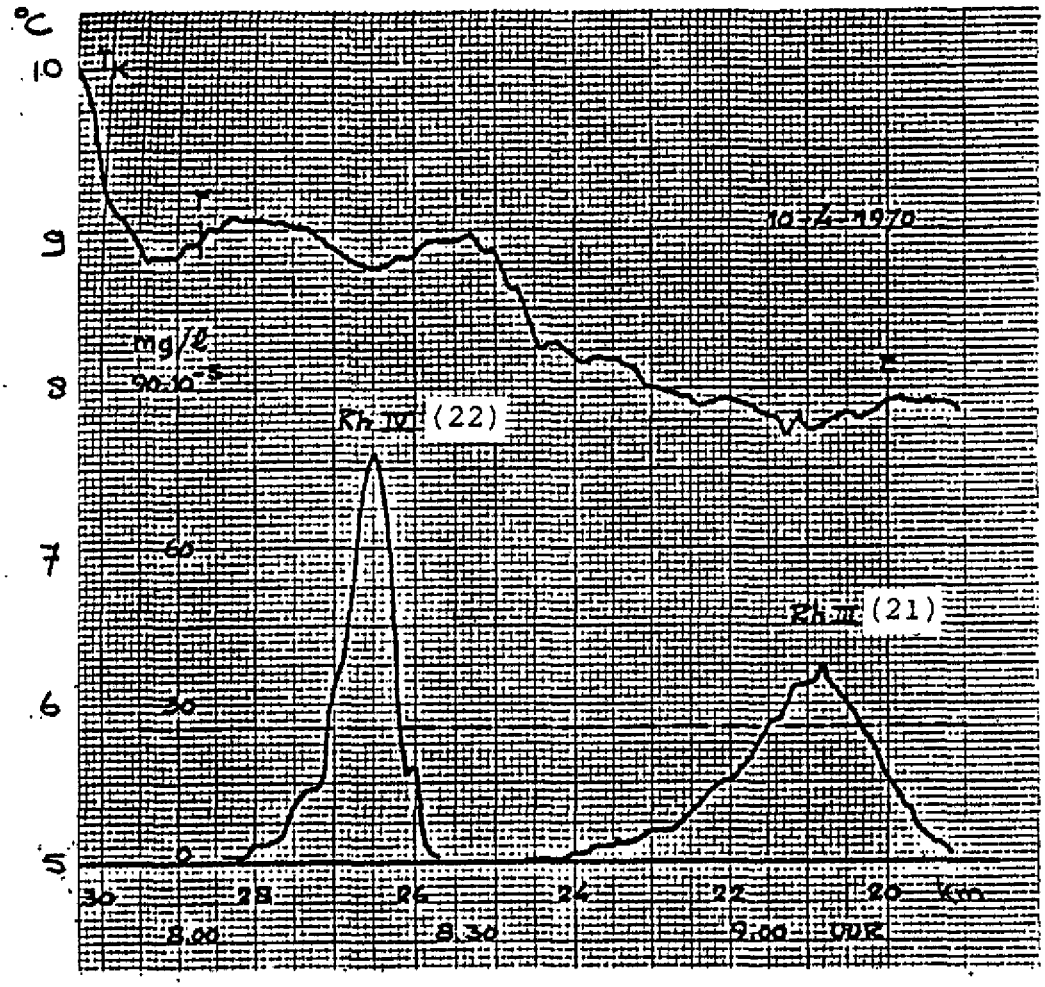
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 8 april 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 12



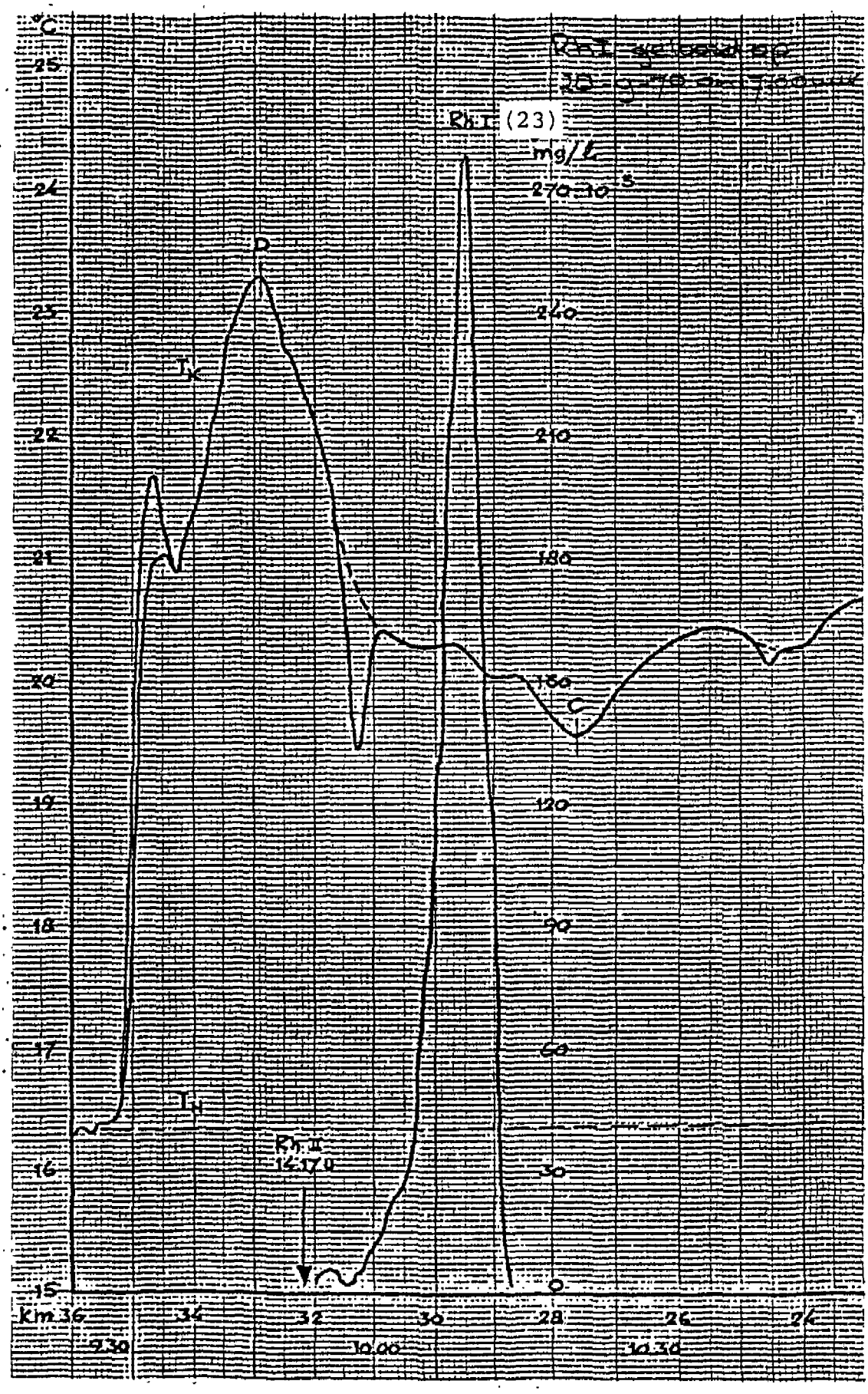
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 9 april 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 13



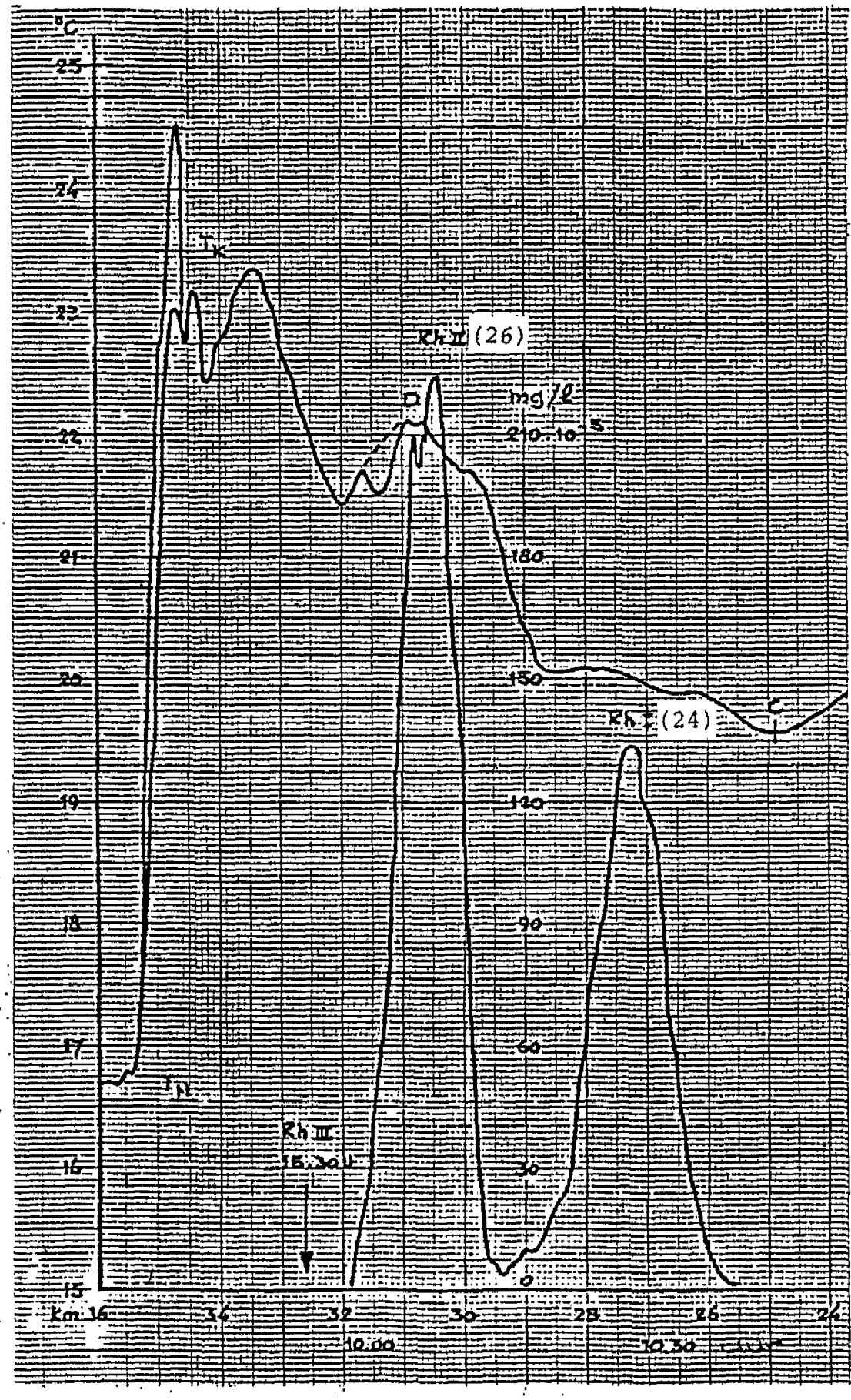
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 10 april 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 14



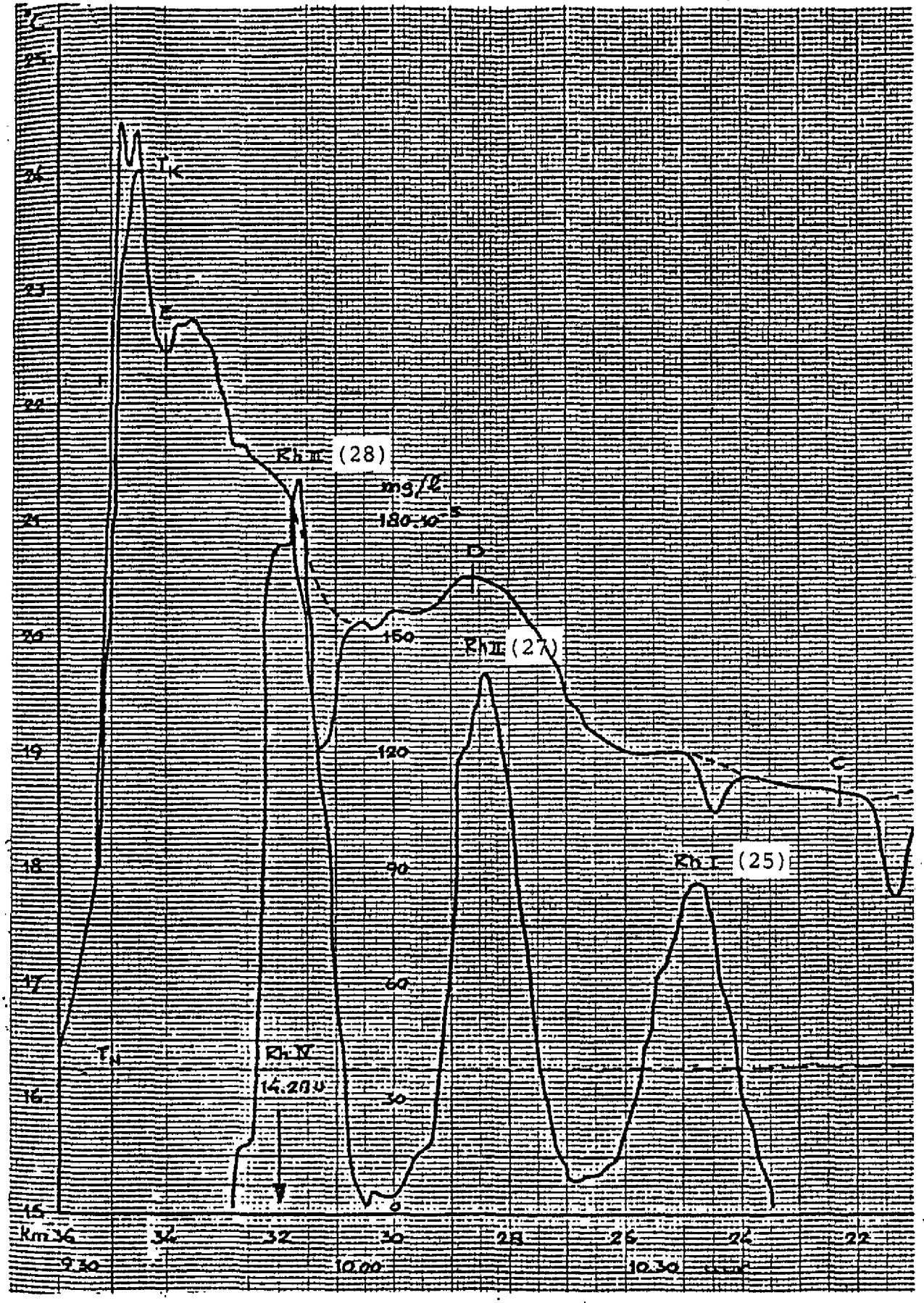
Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 29 september 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 15



Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 30 september 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 16



Temperatuur- en Rhodamineprofielen Amsterdam-Rijnkanaal op 1 oktober 1970 (ontleend aan lit. 1).

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest	app. B	**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 17

metingen november 1968

volg-nr	M [kg/m²*10⁻⁴]	t_1 [s]	$\phi_{max}(t_1)$ [kg/m³*10⁻⁸]	E [m²/s]	$\bar{u}$ [m/s]	u_* [m/s*10⁻³]
1	3,6	65700	46	0,74	0,048	3,8
2	3,6	153600	39	0,44	0,049	3,8
3	2,1	241500	10	1,45	0,058	4,5
4	7,8	67740	106	0,64	0,050	3,9
5	5,6	155640	38	1,11	0,062	4,9
6	7,8	64020	90	0,93	0,066	5,2
7	6,3	146520	37	1,57	0,061	4,8
8	8,7	59040	109	0,86	0,062	4,9

metingen september 1969

volg-nr	M [kg/m²*10⁻⁴]	t_1 [s]	$\phi_{max}(t_1)$ [kg/m³*10⁻⁸]	E [m²/s]	$\bar{u}$ [m/s]	u_* [m/s*10⁻³]
9	11,3 *)	65400	85	2,15	0,032	2,5
10	n.t.b.		37			
11	17,4 *)	65220	155	1,54	0,023	1,8
12	7,6 *)	152520	45	1,49	0,036	2,8
13	7,8 *)	63600	65	1,80	0,052	4,1
14	4,6 *)	14700	18	3,50	0,061	4,8
15	8,3 *)	58920	80	1,45	0,044	3,4

n.t.b. = niet te bepalen

*) = mogelijke beïnvloeding door baggerwerkzaamheden tussen kmr 28.6 en 29.9

Berekeningsgegevens dispersiekoëfficiënten Amsterdam-Rijnkanaal uit maximale koncentratie in november 1968 en september 1969.

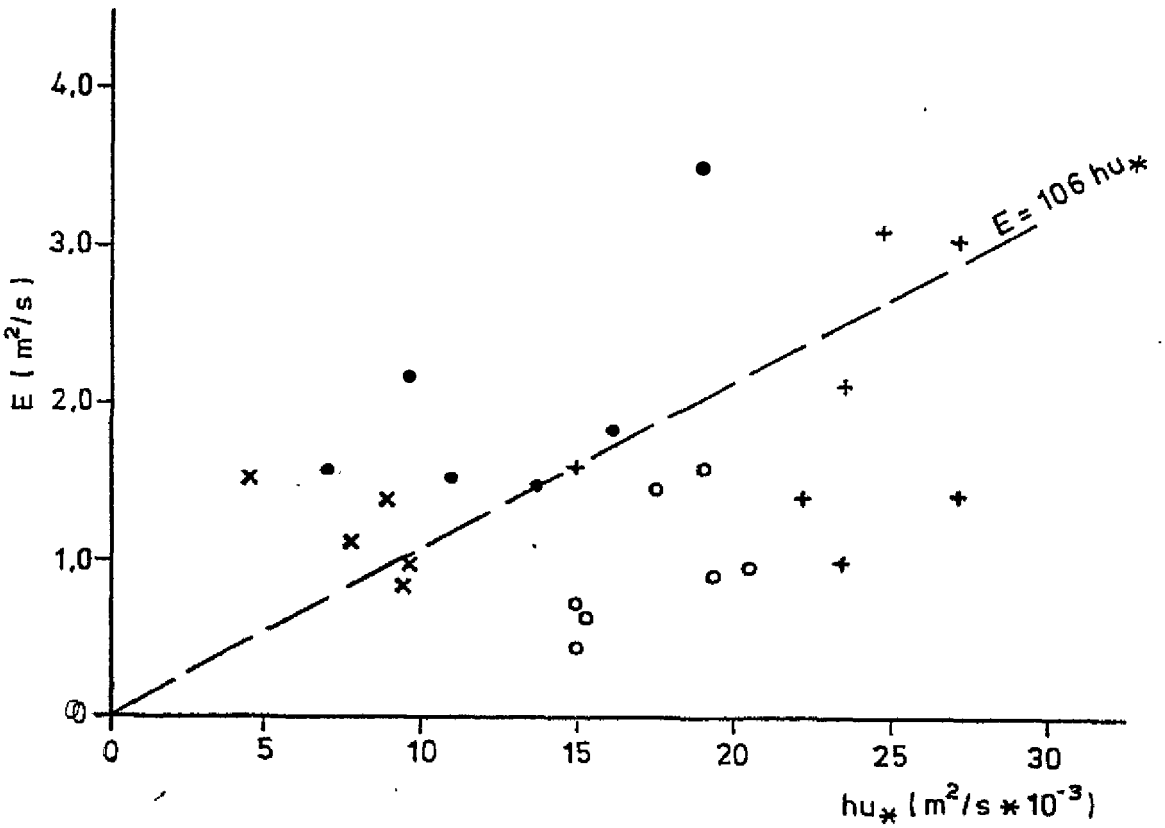
metingen april 1970

volg-nr	M [kg/m^2*10^{-4}]	t_1 [s]	$\phi_{max}(t_1)$ [kg/m^3*10^{-8}]	E [m^2/s]	$\bar{u}$ [m/s]	u_* [m/s*10^{-3}]
16	19,7	64200	174	1,59	0,048	3,8
17	13,5	154200	55	3,11	0,081	6,3
18	15,8	72000	142	1,37	0,087	6,8
19	11,5	162600	46	3,06	0,087	6,8
20	11,2	65100	105	1,39	0,071	5,6
21	7,3	147600	37	2,10	0,076	5,9
22	6,5	61020	78	0,91	0,074	5,8

metingen oktober 1970

volg-nr	M [kg/m^2*10^{-4}]	t_1 [s]	$\phi_{max}(t_1)$ [kg/m^3*10^{-8}]	E [m^2/s]	$\bar{u}$ [m/s]	u_* [m/s*10^{-3}]
23	27,9	61800	278	0,70	0,041	3,2
24	18,1	149100	133	0,99	0,032	2,5
25	13,8	233100	86	0,88	0,031	2,4
26	23,9	64380	224	1,41	0,028	2,2
27	20,7	151080	141	1,14	0,025	2,0
28	21,8	68700	191	1,51	0,015	1,2

Berekeningsgegevens dispersiekoëfficiënten Amsterdam-Rijnkanaal uit maximale koncentratie in april en oktober 1970.



- o november 1968
- • september 1969
- + april 1970
- × oktober 1970

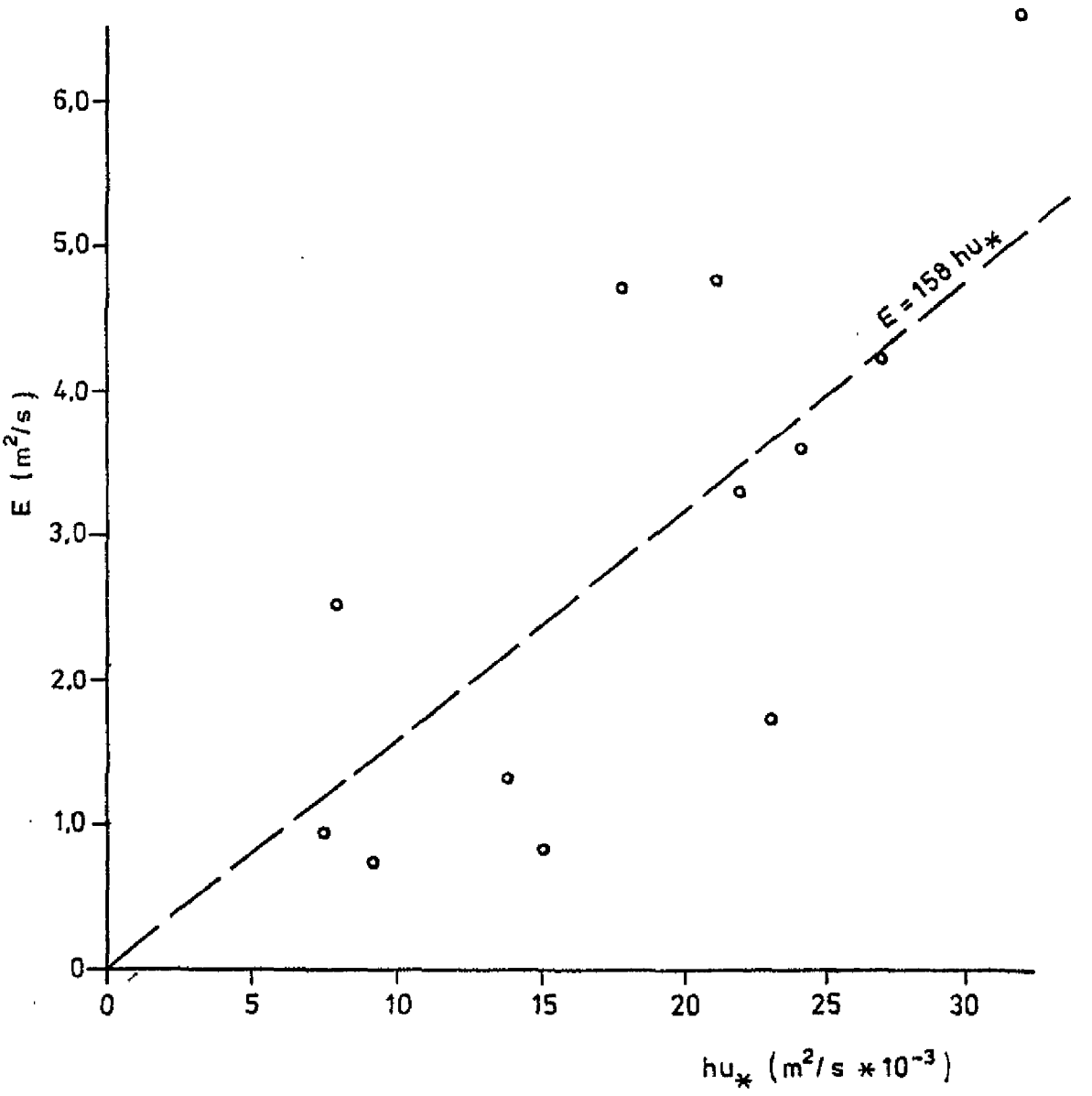
verband E en hu_* voor het amsterdam-rijnkanaal bij berekening uit de maximale koncentratie

rijkswaterstaat *directie waterhuishouding en waterbeweging* *district zuidwest*		**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 20

volg-nr	σ_2 [mg/l*10^{-5}]	σ_1 [mg/l*10^{-5}]	t_2 [s]	t_1 [s]	E [m^2/s]	u_* [m/s*10^{-3}]
1 - 2	537	360	153600	65700	0,90	3,8
2 - 3	769	537	241500	153600	1,72	5,8
4 - 5	854	422	155640	67740	3,14	5,6
6 - 7	1011	492	146520	64020	4,73	4,5
11 - 12	670	467	152520	65220	1,32	3,5
13 - 14	1028	514	147000	63600	4,75	5,3
16 - 17	1151	436	154200	64200	6,30	8,1
18 - 19	1100	682	162600	72000	4,11	6,8
20 - 21	969	584	147600	65100	3,62	6,1
23 - 24	646	480	149100	61800	2,56	2,0
24 - 25	734	646	233100	149100	0,72	2,3
26 - 27	596	437	151080	68700	0,95	1,9

σ_2 = standaardafwijking op t_2
σ_1 = standaardafwijking op t_1

Gegevens voor berekening dispersiekoëfficiënten Amsterdam-Rijnkanaal uit de standaardafwijking van de koncentratieverdeling.



verband E en hu_* voor het amsterdam-rijnkanaal bij berekening uit de standaardafwijking

rijkswaterstaat directie waterhuishouding en waterbeweging district zuidwest		**nota nr.** 24.001.26
	nr.	**bijlage nr.** 22