

rijkswaterstaat  
dienst getijdewateren  
bibliotheek  
grenadiersweg 31 -  
4338 PG middelburg

---

procesbeschrijvende modellering van de  
waterkwaliteit van de zuidnederlandse  
noordzeekust

verslag onderzoek

---

R 2176 / T 115

juni 1986

## Inhoud

### Lijst van figuren

	blz.
<u>Hoofdstuk 1. Inleiding</u> .....	1
<u>Hoofdstuk 2. Aspecten van de procesbeschrijvende modellering</u> .....	4
2.1. De invloeden op de waterkwaliteit .....	4
2.2. Keuze van de karakteristieke situaties .....	7
<u>Hoofdstuk 3. Modellering van de waterbeweging</u> .....	10
3.1. Randvoorwaarden en cyclisch inspeelgedrag .....	11
3.2. Wijzigingen aan het model .....	12
3.3. Inregelen van het transport door de beide zeearmen .....	15
3.4. De randvoorwaarden voor de windopzet .....	16
3.5. Correcties op de waterbeweging .....	18
<u>Hoofdstuk 4. Modellering van de waterkwaliteit</u> .....	20
4.1. Conversie van de waterbeweging voor DELWAQ .....	20
4.2. De modelvergelijking .....	22
4.3. Het begrip dispersie .....	25
4.4. Opzet van de berekeningen .....	28
<u>Hoofdstuk 5. De waterbeweging</u> .....	31
5.1. De getijbeweging .....	31
5.2. De reststroming voor de vijf karakteristieke situaties .....	34
5.3. De verplaatsing van deeltjes in de getijstroming .....	35
<u>Hoofdstuk 6. De waterkwaliteit</u> .....	39
6.1. De referentiesituatie: geen wind, geen debiet uit Haringvliet .	40
6.2. Noordoostenwind, matig debiet uit Haringvlietsluizen .....	43
6.3. Westenwind, laag debiet uit Haringvlietsluizen .....	46
6.4. Noordwestenwind, hoog debiet uit Haringvlietsluizen .....	47
6.5. Zuidwestenwind, hoog debiet uit Haringvlietsluizen .....	50
6.6. Inspeelverschijnselen .....	51
6.7. Evaluatie van het model .....	53
6.8. Kenmerken van de transportprocessen .....	54

	blz.
<u>Hoofdstuk 7. Conclusies en aanbevelingen</u> .....	56
7.1. Conclusies t.a.v. het model .....	56
7.2. Conclusies t.a.v. de transportprocessen .....	59
7.3. Aanbevelingen .....	60
Literatuur .....	62

Lijst van figuren

- Figuur 1. Overzicht van het model Randdelta II
- Figuur 2. Het afgeleide model RDZEE
- Figuur 3. Het model uitgebreid met de Ooster- en Westerschelde
- Figuur 4. Randvoorwaarden voor de waterstand in RDZEE
- Figuur 5. Diepteschematisering Oosterschelde
- Figuur 6. Transport door de monding Westerschelde
- Figuur 7. Oorspronkelijk transport door de monding Oosterschelde
- Figuur 8. Transport door de monding Oosterschelde, na vergroting komberging
- Figuur 9. Windsnelheden gemeten in 1981
- Figuur 10. Reststroomsnelheden voor de referentiesituatie
- Figuur 11. Verloop waterstand aan twee modelranden
- Figuur 12. Verloop snelheid langs de kust aan twee modelranden
- Figuren 13 t/m 25  
Getijstroming op achtereenvolgende uren
- Figuur 26. Ligging lijnen gelijke fase en amplitude voor het getij in de Noordzee
- Figuren 27 t/m 30  
Getijstroming voor de vier situaties met wind
- Figuren 31 t/m 35  
Reststroming voor de vijf gemodelleerde situaties
- Figuren 36 t/m 39  
Banen van deeltjes in de getijstroming
- Figuur 40. Verloop beide snelheidscomponenten in getij
- Figuur 41. Banen van een deeltje in het getij
- Figuur 42. Oorspronkelijke meetnet helicoptervluchten
- Figuur 43. Latere meetnet helicoptervluchten
- Figuur 44. Gemeten concentratiepatroon vlucht 9
- Figuur 45. Concentratiepatroon op basis van reststroming  
- referentiesituatie
- Figuur 46. Concentratiepatroon na een getij
- Figuur 47. Concentratiepatroon na drie getijden

Figuren 48 t/m 54

Concentratiepatronen voor elke twee uur van het modelresultaat -  
referentiesituatie

Figuur 55. Gemeten concentratiepatroon vlucht 8

Figuur 56. Gemeten concentratiepatroon vlucht 4

Figuur 57. Gemeten concentratiepatroon vlucht 2

Figuur 58. Beginsituatie dynamische berekeningen

Figuren 59 t/m 65

Concentratiepatronen voor elke twee uur van het modelresultaat -  
noordoostenwind

Figuren 66 t/m 70

Gemeten concentratiepatronen vlucht 7 en  
de vluchten 6, 18, 22 en 26

Figuren 71 t/m 77

Concentratiepatronen voor elke twee uur van het modelresultaat -  
westenwind

Figuur 78. Gemeten concentratiepatroon vlucht 12

Figuur 79. Gemeten concentratiepatroon vlucht 3

Figuren 80 t/m 86

Concentratiepatronen voor elke twee uur van het modelresultaat -  
noordwestenwind

Figuren 87 t/m 89

Gemeten concentratiepatroon vlucht 15 en  
de vluchten 13 en 14

Figuren 90 t/m 96

Concentratiepatronen voor elke twee uur van het modelresultaat -  
zuidwestenwind

Figuur 97. Ligging gekozen rekenelementen in rooster

Figuur 98. Verloop chloridegehalte twee elementen voor Nieuwe waterweg en  
Haringvliet

Figuur 99. Verloop chloridegehalte twee elementen voor  
Ooster- en Westerschelde

## Hoofdstuk 1. Inleiding

In de jaren 1981 en 1982 is door de hoofdafdeling Milieu en Inrichting van de Deltadienst een inventariserend onderzoek verricht naar de kwaliteit van het water voor de kust van het Deltagebied [1]. Bij het onderzoek ging het er ten eerste om m.b.v. stochastische en deterministische modellen en technieken de voor de kust waargenomen waterkwaliteit te verklaren. Op deze manier kunnen de relaties tussen de waterkwaliteit enerzijds en de afvoeren van Rijn, Maas en Schelde en de waterbeweging door het getij en de wind anderzijds duidelijk gemaakt worden. Bovendien kunnen de seizoensinvloeden op de waterkwaliteit gekwantificeerd worden. Ten tweede dienden de modellen en technieken te worden gepresenteerd die bij het onderzoek werden ontwikkeld en gebruikt, evenals de gevonden relaties.

De vraagstelling van het onderzoek is mede ingegeven door de ingrijpende veranderingen die zich in dit gebied zullen voltrekken. Hierbij kan op dit moment onder andere gedacht worden aan het tot stand komen van de Oosterscheldedam en de plannen voor kunstwerken langs de Noordzeekust voor o.m. energieopwekking, aanlanding van goederen en berging van baggerspecie.

Voor dit onderzoek werden met een heliocopter vierwekelijkse bemonsteringen uitgevoerd aanvankelijk in 68, later in 66 meetpunten. Er werden vervolgens een groot aantal waterkwaliteitsparameters gemeten, o.a. de temperatuur en het gehalte aan chloride en nutriënten.

Parallel hieraan hebben gedurende enkele jaren waarnemingen plaatsgevonden m.b.v. HISTOS-meetpalen. Met hoge frequentie werden onder andere waterstand, stroomsnelheid, saliniteit en temperatuur gemeten. De meetgegevens leveren dan ook informatie over de variatie van een aantal waterkwaliteitsparameters binnen het getij. De resultaten van het heliocopteronderzoek laten de veranderingen daarvan op langere termijn zien.

De gegevens die uit het onderzoek zijn verkregen kunnen op verschillende manieren verwerkt worden om de relaties tussen waterkwaliteit en externe factoren (wind en rivierafvoeren) te onderbouwen. Men kan enerzijds onderzoeken wat de (statistische) verbanden zijn tussen de meetreeksen, hetgeen leidt tot

(stochastische) black-boxmodellen. Anderzijds is het mogelijk een verklarend model te ontwikkelen, waarin de invloed van fysische en chemische processen expliciet wordt gemaakt. Beide onderzoeksvormen zijn opgenomen in het werkplan voor dit projekt [13].

De hoofdafdeling Milieu en Inrichting van de Delta Dienst heeft het Waterloopkundig Laboratorium, middels een brief van 26 oktober 1984 onder nummer 22292 opdracht gegeven om beide lijnen te volgen. Het stochastische deel van het onderzoek is gerapporteerd in [15]. In dit rapport wordt verslag gedaan van van het procesbeschrijvend deel.

Het onderzoek is begeleid door een begeleidingsgroep bestaande uit ir P.B.M. Stortelder (voorzitter), ing J.S.L. Vink (secretaris), ing H.J.M. van der Meulen en ir J.P.G. van de Kamer, allen van de toenmalige hoofdafdeling Milieu en Inrichting van de Delta Dienst van Rijkswaterstaat, en dr W.P.M. de Ruijter van de Dienst Getijdewateren.

In het model is als enige kwaliteitsparameter de chlorideconcentratie opgenomen. Aangezien chloride een conservatieve stof is, zijn bij de verspreiding ervan alleen fysische transportprocessen van belang. In een vervolg op deze studie kunnen de andere waterkwaliteitsparameters en -processen in het model worden opgenomen.

Op grond van de bijzonderheden van de 25 vluchten zijn vijf karakteristieke situaties onderscheiden. Het onderscheid is gemaakt o.a. op grond van windgegevens en de afvoer van de Haringvlietsluizen. dat wel enigszins aangepast moest worden. Daarna zijn voor deze vijf situaties waterkwaliteitsberekeningen gedaan m.b.v. het waterkwaliteitsmodel DELWAQ. De verwachting was dat de waterbeweging voor een andere situatie geschat zou kunnen worden m.b.v. interpolatie van situaties met en zonder wind, met en zonder afvoer uit het Haringvliet. Op die manier zou het niet nodig zijn steeds opnieuw de stroming te berekenen en vervolgens de waterkwaliteit.

Voor het modelleren van de waterbeweging kon gebruik gemaakt worden van een bestaand WAQUA-model van Rijkswaterstaat, het zogenaamde model RDZEE, dat wel enigszins aangepast moest worden. Hoewel aanvankelijk werd aangenomen dat

zonder meer aangesloten zou kunnen worden op het model RDZEE, bleek het later noodzakelijk te zijn enkele wijzigingen in de opzet van dit model aan te brengen. Het betrof dan met name het opnemen van de Ooster- en Westerschelde in het model.

In het beschikbare waterbewegingsmodel waren de Ooster- en Westerschelde gemodelleerd als open randen waar de stroomsnelheden opgegeven werden. Voor het modelleren van de waterkwaliteit moest de concentratie op deze randen geschat worden. Tijdens het onderzoek is duidelijk geworden dat de zeegaten een grote rol spelen bij een zuidelijke beweging van materiaal, ondanks een noordelijk gericht reststroomveld [8]. De nauwkeurigheid van de modelresultaten wordt dan sterk bepaald door de nauwkeurigheid van de schatting van de concentraties op de rand van de zeegaten. Daarom werd besloten de Ooster- en Westerschelde expliciet in het waterbewegingsmodel op te nemen. De concentratie in de mond van de Ooster- en Westerschelde hoefde dan niet meer geschat te worden, maar werd onderdeel van de modelresultaten. Met name het inregelen van de waterbeweging voor de sterk vereenvoudigd weergegeven Scheldes heeft de nodige inspanning gevergd, terwijl deze activiteit in het oorspronkelijke werkplan niet was voorzien. De consequentie hiervan is dat er relatief veel aandacht besteed moest worden aan de modellering van de waterbeweging en dat de modellering van de waterkwaliteit beperkt is gebleven tot de verspreiding van een conservatieve stof.

In dit rapport zal allereerst ingegaan worden op een beschrijving van de processen die een rol spelen en de opzet van de modelberekeningen. Vervolgens zal afzonderlijk ingegaan worden op de opzet van het hydrodynamische model en het stoftransportmodel. Er wordt besloten met conclusies en aanbevelingen voor de voortgang van het onderzoek.

Dank gaat uit naar ing J.S.L. Vink voor het vergaren en het evalueren van de vele benodigde gegevens en naar R.P. van Dijk van Rijkswaterstaat Delta Dienst en dr A.K. Wiersma van het Waterloopkundig Laboratorium voor het opstarten van het waterbewegingsmodel en het opzetten van de randvoorwaarden. De laatste heeft ook geadviseerd bij het bepalen van de windopzet. Het onderzoek is uitgevoerd door ir A. Markus, ir L. Postma en F. van Stralen.



## Hoofdstuk 2. Aspecten van de procesbeschrijvende modellering

Deze studie betreft het deel van de Noordzee ten westen van de Zuidnederlandse kust (figuren 42 en 43). Het meetnet van het waterkwaliteitsonderzoek dat door de Deltadienst in de jaren 1981 en 1982 is uitgevoerd, sluit aan bij het meetnet dat door de directie Noordzee wordt gehanteerd. Met name het meetnet van de eerste vijf vluchten was hierop gebaseerd. Bij de latere vluchten werd een andere route gevolgd, waarbij er aan de kust meer monsterpunten liggen. In het zuiden wordt het meetnet begrensd door de raai van de Appelzak en in het noorden door de raai van Ter Heijde. Het bestrijkt binnen deze grenzen een gebied van circa 30 km breed. Voor de waterkwaliteit in dit gebied werd in dit deel van de studie een procesbeschrijvend model ontwikkeld. In het eerste deel is een stochastisch model ontwikkeld [15].

Met stochastische modellering wordt beoogd de statistische samenhang te vinden tussen de fysische omstandigheden (bijvoorbeeld wind en getij alsmede rivierafvoeren) en de waargenomen waterkwaliteit. De procesbeschrijvende modellering, waaraan in dit onderdeel aandacht wordt besteed, gaat daarentegen uit van een expliciete beschrijving van de fysische transportprocessen en de biologische en chemische processen. Voor deze studie bestaat een dergelijk model uit twee delen. Het eerste deel betreft de waterbeweging onder invloed van de grootschalige stromingssituatie in de Noordzee, de wind en de afvoer van de rivieren. Het tweede deel betreft de verspreiding en de onderlinge interacties van stoffen. Doordat de modellering van de waterbeweging veel meer werkzaamheden vergde dan was voorzien in het werkplan, kon alleen de verspreiding van een conservatieve stof in de studie worden opgenomen.

### 2.1. De invloeden op de waterkwaliteit

De waterkwaliteit in het te modelleren zeegebied wordt mede bepaald door de waterbeweging. De waterbeweging in het gebied is opgebouwd uit een aantal componenten met verschillende ruimte- en tijdschalen. Op de korte termijn (bijvoorbeeld enkele uren) speelt de getijbeweging een grote rol. Het water dat uit de Nieuwe Waterweg of de Haringvlietsluizen stroomt, beweegt met het getij

mees. De maximale verplaatsing hierdoor, de getijweg, bedraagt voor de Nederlandse kust ongeveer 10 km. Een massa zoet water beweegt dan gedurende het getij heen en weer over enkele kilometers.

Op langere termijn (bijvoorbeeld enkele dagen) wordt het resttransport van belang. Het water keert namelijk niet op precies dezelfde plaats terug aan het eind van het getij en de watermassa wordt gemengd door turbulentie in de getijstroming. De netto verplaatsing is sterk afhankelijk van de lokale eigenschappen van het getij en van de wind. De wind oefent namelijk een schuifkracht uit op het oppervlak. De richting van deze kracht is dezelfde als die van de wind en de grootte is bij benadering evenredig met het kwadraat van de windsnelheid. Wind met een kracht 4 of 5 heeft geen dramatische verhoging van de zeespiegel tot gevolg. Wel kan de gemiddelde hoogte van het wateroppervlak veranderd worden met enkele centimeters of de stromingsbeeld met enkele centimeters per seconde.

De invloed van de wind of van de weersomstandigheden in het algemeen op de waterbeweging wordt veelal afzonderlijk beschouwd. In het windopzet-model van het KNMI bijvoorbeeld wordt het astronomisch getij helemaal weggelaten [16]. Het astronomische getij is een gevolg van kleine volumekrachten die werken op de gehele aarde (de oceanen zowel als het vaste deel). De meteorologische omstandigheden hebben een lokaal karakter, maar op het wateroppervlak worden vrij grote krachten uitgeoefend door luchtdrukverschillen en door de wind.

Voor een estuarium als de Ooster- of Westerschelde heeft dat merkbaar gevolgen. Bij wind naar het land toe wordt het volume aan zeewater groter, zodat het aandeel aan zoet water daalt. Bij wind van het land af is het effect omgekeerd.

Als de wind min of meer evenwijdig is aan de kust, dan wordt de stroming in langsrichting beïnvloed. Voor de Zuidnederlandse kust betekent dit, dat bij noordoostenwind met kracht 5 de over het getij en de waterkolom gemiddelde stroomsnelheid, die bij windstilte noordelijk is gericht, volledig wordt gecompenseerd. Het zeewater staat dan gemiddeld over het getij en de waterkolom vrijwel stil. Bij wind uit het zuiden wordt de reststroming die door het getij is geïnduceerd juist versterkt.

De waterkwaliteit wordt vooral ook bepaald door de lozingen in het gebied. De waterbeweging t.g.v. getij en wind verspreidt vervolgens de g eloosde stof. Voor de Zuidnederlandse kust zijn een viertal lozingspunten van belang. De Nieuwe Waterweg en de Haringvlietsluizen hebben de grootste afvoeren. Daarnaast spelen de Ooster- en Westerschelde een rol.

Het debiet van de Schelde is tienmaal zo klein als dat van de Nieuwe Waterweg. De Westerschelde is echter bijzonder verontreinigd, zodat het relatieve belang van de Schelde als lozingspunt die van haar debiet te boven gaat. Door de lange verblijftijd in de Westerschelde hoopt zich hier een grote hoeveelheid verontreinigende stoffen op. De waterkwaliteit wordt vooral bepaald door biologische en chemische processen en in veel mindere mate door de stroming.

De belasting van de Oosterschelde is voornamelijk afkomstig uit het Haringvliet en in mindere mate van de polders. Ook in de Oosterschelde is de verblijftijd lang. De Oosterschelde is echter relatief schoon. Dit heeft geleid tot een gevarieerd ecologisch systeem en maakt teelt van schelpdieren op commerciële basis mogelijk.

De lozingen variëren in grootte met een tijdschaal van een week of meer, doordat de debieten van de Schelde en de Rijn fluctueren. Voor de afvoer van de Haringvlietsluizen zijn de variaties, zowel in tijd als in grootte, het belangrijkste. De sluizen worden alleen geopend bij laagwater, zodat er een halfdaagse variatie is, wanneer de afvoer van de Rijn de waarde van  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$  overschrijdt. Het debiet dat daadwerkelijk door de Haringvlietsluizen gaat, wordt afgestemd op de grootte van het debiet van de Rijn door het openen van meer of minder schuiven.

Een laatste factor die de waterkwaliteit beïnvloedt, is het voorkomen van chemische of biologische processen. Voorbeelden van dergelijke processen zijn: omzetting van ammonium in nitraat, produktie of verbruik van zuurstof door organismen etc. Sedimentatie, erosie en reaeratie kunnen genoemd worden als fysische processen die, los van transport door advectie en dispersie, van belang kunnen zijn voor de verspreiding van stoffen.

## 2.2. Keuze van de karakteristieke situaties

Het modelleren van de waterkwaliteit in het gebied van de Zuidnederlandse Noordzeekust roept een aantal problemen op met betrekking tot de variatie in omstandigheden op de meetdagen. De toestroming door het Haringvliet en de meteorologische omstandigheden kunnen het stromingspatroon sterk wijzigen. Wanneer men uiteindelijk de hele jaarcyclus die in de waterkwaliteitsvariabelen is te constateren, wil reproduceren voor de dagen waarop de 25 helicoptervluchten plaats hadden, dient men deze verschillen in stromingspatronen in rekening te brengen. Een vergelijking van de situaties bij diverse toestromingen en meteorologische omstandigheden kan een licht werpen op de relatieve invloed van deze factoren.

De 25 situaties van de helicoptervluchten zijn op grond van de windrichting en -snelheid, het debiet uit de Haringvlietsluizen en de patronen in de chlorideconcentratie voor de kust gegroepeerd tot vijf overeenkomstige karakteristieke situaties. Het idee was dat de modelresultaten voor deze redelijk goed gedefinieerde situaties gebruikt zouden kunnen worden voor het beschrijven van de overige situaties. Door interpolatie tussen simulaties met en zonder wind, met en zonder debiet uit de Haringvlietsluizen zou dan een afschatting gemaakt kunnen worden van de stroming. Op die manier hoeft niet voor alle gevallen afzonderlijk een ingespeeld getij te worden berekend.

Er is een eerste onderscheid gemaakt op grond van het debiet uit de Haringvlietsluizen:

- o een hoog debiet (het debiet bij Lobith bedraagt 5000 tot 7000 m<sup>3</sup>/s). Er vallen vier of vijf meetdagen in deze categorie. Voor de Haringvlietdam is steeds een vlek zoet water te zien die zich tot circa 11 km van de dam uitstrekt waarbinnen de chlorideconcentratie lager is dan 14 g/l.
- o een matig debiet (het debiet bij Lobith bedraagt 2500 tot 5000 m<sup>3</sup>/s). Binnen deze categorie vallen tien meetdagen. Voor de Haringvlietdam bevindt zich nog wel een zoete vlek, maar de concentraties daarbinnen zijn aanmerkelijk hoger. Soms ligt de laagste concentratie boven 14 g/l.

- o een laag debiet (bij Lobith is het debiet minder dan 2500 m<sup>3</sup>/s). Ook hier vallen tien meetdagen onder. Voor de dam bevindt zich vaak nog een gebied met relatief zoet water. In andere gevallen is er nauwelijks zo'n gebied herkenbaar.

Een tweede indeling werd gemaakt d.m.v. de windrichting op de dag van de meting en de twee dagen daarvoor:

- o Binnen de groep met een hoog debiet uit het Haringvliet vallen twee windrichtingen op:

- wind uit het noordwesten voor twee meetdagen, kracht 3 of 5
- wind uit het zuidwesten voor twee meetdagen, kracht 3

Bij een vlucht in deze categorie kwam de wind uit het zuidwesten met kracht 4 tot 5.

- o Binnen de groep met een matig debiet zijn te onderscheiden:

- wind uit het noordoosten voor twee meetdagen
- wind uit richtingen tussen zuidoost en noordwest voor zeven meetdagen.

Een uitzondering wordt gevormd door een vlucht met noordwestenwind van kracht 6 tot 7.

- o Binnen de groep met een gering debiet uit het Haringvliet is een vijftal waarnemingen te onderscheiden met wind uit richtingen tussen zuidwest en noordwest. De wind varieerde in kracht tussen 4 en 6. Dan vonden er drie vluchten plaats met noordoostenwind, veelal draaiend vanuit het westen. Tenslotte zijn er twee vluchten met zuidwestenwind, draaiend vanuit het zuiden.

Uiteindelijk is gekozen voor de situaties die in tabel 1 zijn vermeld. Voor deze situaties zijn de de waterbeweging en de waterkwaliteit gemodelleerd. Daarnaast is in een situatie voorzien waarin er geen debiet is uit het Haringvliet en ook geen wind, de referentiesituatie. De omstandigheden bij vlucht 9 sluiten daar het best bij aan. Er waren toen lage windsnelheden en geen debiet door de Haringvlietsluizen.

tabel 1. De karakteristieke situaties met wind- en debiet-gegevens. De vluchten die links zijn genoemd zijn representatief voor de situatie. De vluchten die rechts zijn genoemd geven meer een indicatie van de situatie.

wind		debiet	vlucht	
richting	kracht		representatief	indicatief
NW	5	hoog	3,12	10
ZW	3-4	hoog	13,14,15	1,11,16,17,
W	4	laag	6, 7,18,22,26	9,25
NO	5	matig	2, 4	8,21,23

### Hoofdstuk 3. Modelling van de waterbeweging

In een samenwerkingsverband tussen de Rand Corporation, Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium is een WAQUA-model ontwikkeld voor de Ooster- en Westerschelde ([3]; zie figuur 1). Dit model, Randdelta II of RD-II genoemd, omvat tevens een deel van de Noordzee. Het model heeft een roosterafstand van 800 m en op de gehele open zee rand wordt de waterstand opgelegd als randvoorwaarde. Het wordt ondermeer gebruikt voor de bestudering van veranderingen in de waterbeweging in het zeegebied ten westen van de Ooster- en Westerschelde en voor de toelevering van randvoorwaarden voor de diverse fijnmaziger modellen van de Ooster- en Westerschelde. Het is afgeregeld voor een gemiddeld getij (situatie van 2 september 1975).

Voor het genereren van randvoorwaarden voor andere stromingsomstandigheden is een apart onderzoek gedaan [11]. Het ging daarbij om een verzameling randvoorwaarden waarmee de gehele doortij-springtijcyclus gesimuleerd kan worden en om randvoorwaarden voor stormopzet in het gebied.

Voor dit onderzoek naar andere randvoorwaarden is een grover model geconstrueerd, het model RDZEE. De roosterafstand van dit model bedraagt 1600 m en de tijdstap bedraagt 300 s (5 minuten). De diepteschematisering werd verkregen uit de diepteschematisering van het uitgebreide model RD-II door om en om dieptepunten weg te laten. Op enkele plaatsen is gecorrigeerd voor het bergend vermogen. De Ooster- en Westerschelde werden echter vervangen door open randen met voorgeschreven stroomsnelheid.

In het kader van deze studie is het model RDZEE gebruikt voor het berekenen van de waterbeweging (zie figuur 2). Dit heeft als voordeel dat gebruik gemaakt wordt van de ervaringen en de kennis die in het model RD-II zijn verwerkt zonder de fijnmazigheid ervan. Het model RD-II heeft immers een veel hogere ruimtelijke resolutie dan het meetnet van de helicoptervluchten. De afstand tussen de punten van het meetnet bedraagt verschillende kilometers.

In de eerste fase van de studie bleek dat de modellering van de zeegaten als open randen bezwaren met zich meebracht die aanvankelijk waren onderschat (zie paragraaf 3.2). Daarom werd besloten de Ooster- en Westerschelde ook in het model op te nemen (figuur 3).

### 3.1. Randvoorwaarden en cyclisch inspeelgedrag

Aangezien het merendeel van de helicoptervluchten plaatsvond midden tussen doottijd en springtijd in, is voor alle te modelleren situaties zo'n gemiddeld getij gekozen. Op de open zeeranden van het model werden vier getijcomponenten van de waterstand opgelegd, te weten de componenten M2, M4, M6 en M8 (zie figuur 4). Voor de snelheidsranden van de Ooster- en Westerschelde werden ook deze vier componenten gebruikt. Er is een vergelijking gemaakt met het resultaat dat ontstaat door het getij met meer componenten te beschrijven, zoals de component S2, waarvan de periode zeer dicht bij die van de component M2 ligt. De verschillen bleken dermate klein dat het gerechtvaardigd is alleen de vier genoemde getijcomponenten te gebruiken. Door de keuze van harmonische getijcomponenten zijn de randvoorwaarden cyclisch met een periode van 12,5 h. Daar bovendien de rivierafvoeren als constant werden beschouwd, wordt de gehele waterbeweging na een zekere inspeelperiode cyclisch.

Voor het inspelen van de waterbeweging is circa 60 uur benodigd. Pas nadat die 60 uur zijn doorgerekend, wordt de waterbeweging weggeschreven voor de berekening van het stoftransport. De sluitfout die ontstaat door het niet helemaal ingespeeld zijn van het getij, bleek slechts een gering waterstandsverschil op te leveren. Het verschil in de waterstand tussen het begin en het eind van het laatste getij is van de orde van 1 mm of minder, terwijl de waterstand gedurende het getij een tot enkele meters varieert. De sluitfout kan een rol spelen bij de berekening van de waterkwaliteit, omdat de vooraf berekende waterbeweging steeds herhaald wordt. Bij de overgang van het eind naar het begin van het berekende getij ontstaat dan een fout in de massabalans (zie paragraaf 3.5). Bij de berekening van de waterbeweging betekent de sluitfout alleen maar dat de waterbeweging nog niet helemaal cyclisch is. Er ontstaat geen fout in de massabalans, omdat de berekening gewoon doorgaat. De gehele



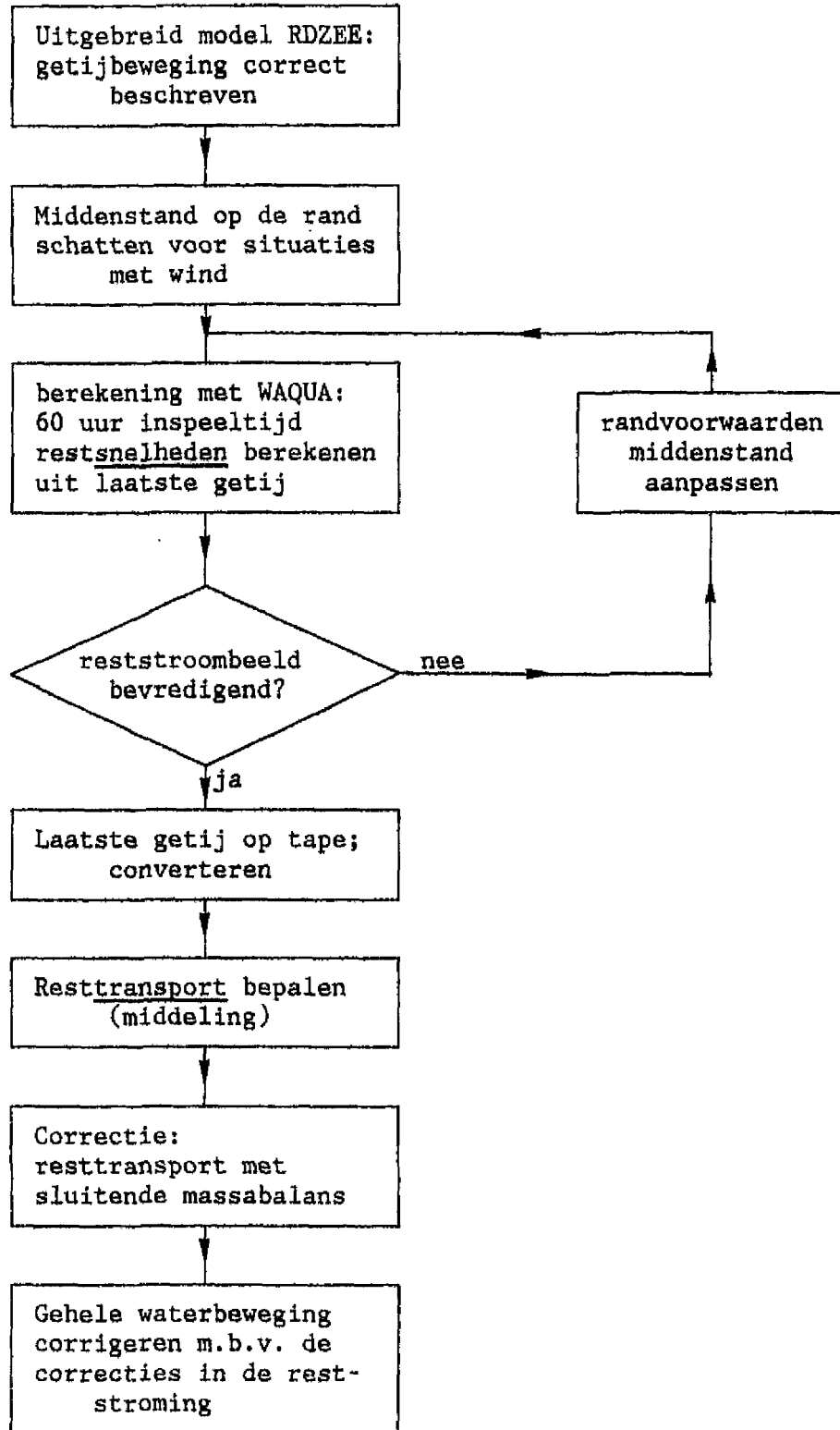
procedure voor het bepalen van de waterbeweging met het uitgebreide model RDZEE is in een schema weergegeven (figuur a).

De reststroming wordt bepaald door middeling van de waterbeweging over het getij. De reststroomsnelheden zijn enkele centimeters per seconde tegenover stroomsnelheden in het getij van een meter per seconde. Daardoor zijn met name voor het reststromingsbeeld de sluitfouten in de waterbeweging wel degelijk van belang (paragraaf 3.5).

De (bijna) cyclische waterbeweging kan gebruikt worden voor het berekenen van de waterkwaliteit. Hier is ook weer een zekere inspeeltijd nodig. De getijbeweging kan net zolang herhaald worden totdat ook het stoftransport vrijwel cyclisch is geworden. Dit zogenaamde 'inspelen' van de berekening waarborgt, dat het berekeningsresultaat niet merkbaar meer afhangt van de gebruikte beginvoorwaarden en de eventuele fouten daarin. Het berekeningsresultaat is volledig afhankelijk van de interne dynamiek van het systeem met de randvoorwaarden.

### 3.2. Wijzigingen aan het model

In het waterbewegingsmodel RDZEE werden de Ooster- en Westerschelde voorgesteld als open randen waar stroomsnelheden zijn voorgeschreven. De aanvoer van zoet water is veel kleiner dan het debiet dat door de getijbeweging in en uit de zeegaten stroomt. Daardoor is het netto debiet door de zeegaten dat door het model wordt berekend niet precies gelijk aan de zoetwateraanvoer. Relatief kleine afwijkingen in de berekende stroomsnelheden kunnen het netto debiet sterk beïnvloeden.



Figuur a. Stroomschema van de modellering van de waterbeweging

In de eerste berekeningen, die met het oorspronkelijke model RDZEE werden gedaan, werden de snelheidsranden voor de Ooster- en Westerschelde afgeregeld door verschuiving van de nulde fouriercomponent van de snelheid (de over het getij gemiddelde waarde). Het gemiddelde debiet over deze randen moest in overeenstemming zijn met de bekende orden van grootte van uitstroming uit de Ooster- en Westerschelde. Beoogd was een debiet van circa  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  door beide zeegeten. Na een eerste schatting van de benodigde wijziging in de randvoorwaarden resulteerde een debiet van  $313 \text{ m}^3/\text{s}$  uit de Oosterschelde en  $68 \text{ m}^3/\text{s}$  uit de Westerschelde.

Bij de berekeningen van het stoftransport ontstonden er bij deze randen ook moeilijkheden. Het is immers noodzakelijk een dusdanige randvoorwaarde te specificeren, dat het netto zoetwaterdebiet gelijk is aan het gewenste debiet. Het zouttransport naar binnen en naar buiten moet dus gelijk zijn.

Er staan enkele wegen open om dit te bereiken. Zo kan men een gehalte op de rand aannemen en berekenen wat op die basis het netto zouttransport is. Is dit naar binnen gericht dan was het opgelegde gehalte te laag en moet een hoger gehalte gekozen worden. Een nadeel van deze methode is dat men altijd iteratief te werk moet gaan.

Er is de voorkeur gegeven aan een tweede mogelijkheid. Het model werd uitgebreid met een gestileerde Ooster- en Westerschelde, zodat de lozing van zoet water (of van andere stoffen) plaats kan vinden op grote afstand van de monding. De concentraties aan chloride in de monding van de Ooster- en Westerschelde is dan een onderdeel van het modelresultaat.

De gekozen oplossing heeft boven de eerste het voordeel dat bij de modellering van een groot aantal waterkwaliteitsparameters, de resultaten direkt bruikbaar zijn. De eerste methode vereist een schatting van alle stofconcentraties op de betreffende open rand. Verder kan een eerder gevonden schatting inadequaat blijken wanneer de berekening enkele getijden wordt voortgezet en de gehalten verschuiven. Het nadeel van de gekozen methode zit in het extra werk voor de schematisering van de zeegeten.

### 3.3. Inregelen van het transport door de beide zeearmen

Het schematiseren van de bodem van de Ooster- en Westerschelde gaf enige problemen. In eerste instantie is gebruik gemaakt van dezelfde procedure als bij de opbouw van het oorspronkelijke model RDZEE. De waarden van de diepte in de diverse punten werden uit het model RD-II gehaald door ook nu weer om en om dieptepunten weg te laten (figuur 5).

De resultaten met deze schematisering waren zeer teleurstellend. Het grove rooster van het model RDZEE is niet geschikt voor de geulen in de twee Scheldes. Met de gevolgde procedure werd een bodem gecreeerd met vele putten en ondiepten waar weinig of geen samenhang in zat. Hierdoor kon er nauwelijks stroming plaatsvinden.

De oplossing was een correctie van de bodemligging. De vele smalle geulen moesten samengenomen worden om voldoende doorstroming te garanderen [7]. Anderzijds moest het relief van de bodem zoveel mogelijk behouden blijven. In een estuarium namelijk zorgen vooral de diepe geulen voor de voortplanting van de getijgolf. Voor deze correctie van de bodemschematisering is naast de beschikbare richtlijnen gebruik gemaakt van dieptekaarten van het gebied (Rijkswaterstaat, opneming 1982). Hier en daar is van deze gegevens nogal afgeweken. Het bleek soms nodig de smalle geulen niet alleen samen te nemen maar ook te verleggen.

Voor de Westerschelde werd zo een bevredigende oplossing gevonden. Door de bodem weer te geven volgens dergelijke richtlijnen kon een behoorlijk transport door de monding worden gerealiseerd (zie figuur 6). In vergelijking met de ijkcurve uit het oorspronkelijke model is het transport iets te groot. Verder is de golf iets in fase achter. Men zou hier nog wat aan kunnen verbeteren, maar omdat een correcte representatie van de Scheldes zelf buiten het bestek van deze studie valt is het hierbij gelaten.

Ook de Oosterschelde is op de bovenbeschreven wijze in model gebracht. Het transport bleef echter 10% te laag in amplitude (figuur 7). Verlegging van de diverse geulen en zelfs van de Oosterschelde-dam in het model heeft hierop

nauwelijks invloed. De wijze van modelleren van de dam, als twee droge cellen of d.m.v. de bodemruwheid, heeft evenmin invloed.

Door echter de steilte van de wanden van het estuarium te veranderen kan de komberging worden vergroot en hiermee wordt wel het beoogde effect bereikt (zie figuur 8). Oorspronkelijk gaf het model de wanden namelijk loodrecht weer. Door wanden schuin te maken wordt de oppervlakte van het estuarium vergroot, terwijl de breedte niet noemenswaardig verandert. In het resulterende transport door de Oosterschelde treden na aanpassing ongeveer dezelfde geringe afwijkingen t.o.v. de ijkcurve op als bij de Westerschelde, zodat ook hier met de geschetste aanpassing is volstaan.

#### 3.4. De randvoorwaarden voor de windopzet

Bij de berekening van de waterbeweging is steeds verondersteld dat de wind constant is in grootte en richting. Dat is uiteraard een benadering. Uit de registratie van de windsnelheden blijkt dat de wind in ieder geval in de tijd sterk kan variëren (figuur 9). Verder is verondersteld dat de wind ruimtelijk uniform is, wat eveneens een benadering is.

De wind heeft invloed op de stroomsnelheden en op de waterstand. Daar in de berekeningen steeds werd verondersteld dat de wind constant is, kan deze geen directe invloed hebben op de amplitude of fase van de diverse fouriercomponenten. Maar zelfs als de wind veranderlijk is, wordt doorgaans verondersteld dat de stroming t.g.v. het getij bij benadering onafhankelijk is van de stroming die door de wind wordt geïnduceerd.

Door deze benadering hoeft van de randvoorwaarden maar een component te worden aangepast, namelijk het verloop van de middenstand. In navolging van Wiersma [11] werd de zeespiegel benaderd als een plat vlak met daarop gesuperponeerd een getijgolf. De ligging van dit platte vlak wordt volledig bepaald door een referentieniveau en het verhang in twee richtingen.

De randvoorwaarden waarmee de vier getijcomponenten worden beschreven zijn afkomstig van een analyse van gemeten waterstanden. Het betreft de

meetcampagne van 29 augustus t/m 13 september 1975 uitgevoerd door Rijkswaterstaat [11]. Daar het niet goed mogelijk is uit metingen ook de middenstand te bepalen, moest deze niet alleen voor de vier windsituaties worden geschat, maar ook voor de referentiesituatie.

Voor de constructie van de randvoorwaarden werden uiteindelijk de volgende veronderstellingen gemaakt:

- o De zeespiegel gedraagt zich als een plat vlak met daarop gesuperponeerd een getijgolf.
- o De wind heeft geen invloed op de getijgolf, alleen op de reststroming en op de stand van dit platte vlak.
- o Bij windstilte is er een reststroom van enkele centimeters per seconde evenwijdig aan de kust naar het noordoosten.
- o Het verhang langs de kust wordt niet beïnvloed door de wind, alleen het verhang dwars op de kust wordt erdoor veranderd.

Met de volgende vergelijkingen en de veronderstelling dat alle grootheden die erin voorkomen constant zijn werd de waterstand op de rand geschat:

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - f v - K u - \frac{\tau_x}{H} = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + f u - K v - \frac{\tau_y}{H} = 0 \quad (2)$$

Hierin zijn:

$g$  - de valversnelling;

$f$  - de Coriolis-parameter;

$H$  - de diepte;

$K$  - een parameter die de wrijving door bodemruwheid en getij weergeeft;

$\tau_x$  en  $\tau_y$  de componenten van de windschuifspanning in respectievelijk de richting langs de kust en loodrecht erop;

$\partial \zeta / \partial x$  en  $\partial \zeta / \partial y$  het verhang van de middenstand in respectievelijk de richting langs de kust en loodrecht erop;

$u$  en  $v$  de snelheidscomponenten van de reststroom in respectievelijk de richting langs de kust en loodrecht erop.

Voor de situatie met windstilte werd een reststroom van:  $u = 5$  cm/s,  $v = 0$  gespecificeerd. De middenstand die nodig was voor die reststroom volgde dan uit het berekende verhang en een referentieniveau. De reststroom die met deze randvoorwaarden werd berekend voldoet goed aan de verwachtingen, behalve bij de noordelijke rand (zie figuur 10). Daar wijkt de reststroom teveel in oostelijke richting af en bij het rechterrangepunt treedt een forse verhoging van het transport op. De grootte van de reststroomsnelheid (circa 7 cm/s) komt vrij goed overeen met de opgegeven waarde van 5 cm/s.

Voor de vier situaties met wind werd het verhang in de richting langs de kust en de snelheid loodrecht op de kust opgelegd. Het verhang langs de kust kreeg dezelfde waarde als bij de situatie zonder wind en de snelheid loodrecht op de kust werd op nul gesteld. Uit de vergelijkingen volgt dan de tweede component van het verhang. Met de beide componenten werd vervolgens de middenstand op de rand berekend.

Deze methode bleek goed te voldoen. De reststroming die uit de complete waterbeweging volgt, lijkt sterk op de reststroom die op grond van de windrichting verwacht mag worden (zie paragraaf 5.2). Alleen aan de noordrand van het model treedt steeds een duidelijke afwijking op. Wiersma [11] maakt ook al melding van een verstoring in deze hoek. Hij wijt dit aan de ligging van het meetpunt bij Scheveningen, dit is namelijk midden in de haven gesitueerd. Daardoor ontstaat een afwijking in de randvoorwaarde. De samenhang met de overige randvoorwaarden gaat gedeeltelijk verloren.

### 3.5. Correcties op de waterbeweging

De waterbeweging die m.b.v. WAQUA [4] wordt berekend is niet zondermeer geschikt voor een berekening van de waterkwaliteit. Er treden sluitfouten op tussen het begin en het eind van een die erop wijzen dat na een geheel getij de watermassa niet helemaal op dezelfde manier is verdeeld als aan het begin ervan. Dergelijke fouten hebben voor de waterbeweging op zich weinig effect, omdat met de nieuwe verdeling van de watermassa wordt verder gerekend. De waterkwaliteit is wel gevoelig voor deze sluitfouten, omdat de vooraf berekende waterbeweging steeds herhaald wordt en omdat de zoetwaterdebieten bij de

Ooster- en Westerschelde van dezelfde orde van grootte zijn als de debieten die door deze fouten worden geïntroduceerd. De zoetwaterdebieten liggen dan ook in de orde van  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , terwijl de getijdebieten maximaal  $120000 \text{ m}^3/\text{s}$  bedragen.

In de ruwe waterbeweging uit zich dit bijvoorbeeld in het verschijnsel dat er netto water de zeearmen in stroomt en niet eruit. Het betreft hier een van de inspeelverschijnselen. Blijkbaar wijkt de waterstand in het estuarium die aan het begin van de berekening werd opgelegd te ver af van wat het model als waterstand op dat tijdstip zou berekenen. Het waterstandsverloop stelt zich nog in in opwaartse zin, vandaar dat er nog netto instroming optreedt. Dit instelproces verloopt heel langzaam en het is niet uitgesloten dat er een soort cyclische drift ontstaat die slechts langzaam uitdempt. Ervaringen van Langerak [2] zouden hier ook op wijzen. In het zeegebied is dit verschijnsel veel minder van belang, omdat de reststroomdebieten daar veel groter zijn (zie figuren 31 t/m 34). Wat betreft het zeegebied is de inspeeltijd lang genoeg.

Als men gaat rekenen met de ongewijzigde waterbeweging, waarin er een netto instroming plaatsvindt in de Scheldes, dan gaat zich zout water in de zeearmen ophopen, terwijl de zeearmen juist zoeter moeten zijn dan het zeegebied. Om dit te voorkomen is een correctie op de waterbeweging toegepast. Deze correctie garandeert dat er geen sluitfouten in de waterstand over het gehele estuarium optreden. De transporten zijn met een klein bedrag bijgesteld. Op deze wijze ontstaat ook het beoogde zoetwaterdebiet door de zeegaten, terwijl de karakteristieken van het getij niet merkbaar worden beïnvloed.

Aangezien de kleine debietcorrectie die hiervoor toegepast wordt over het gehele getij werkt, kunnen problemen ontstaan bij platen die tijdelijk droog staan. Hiervoor is een aparte voorziening getroffen.



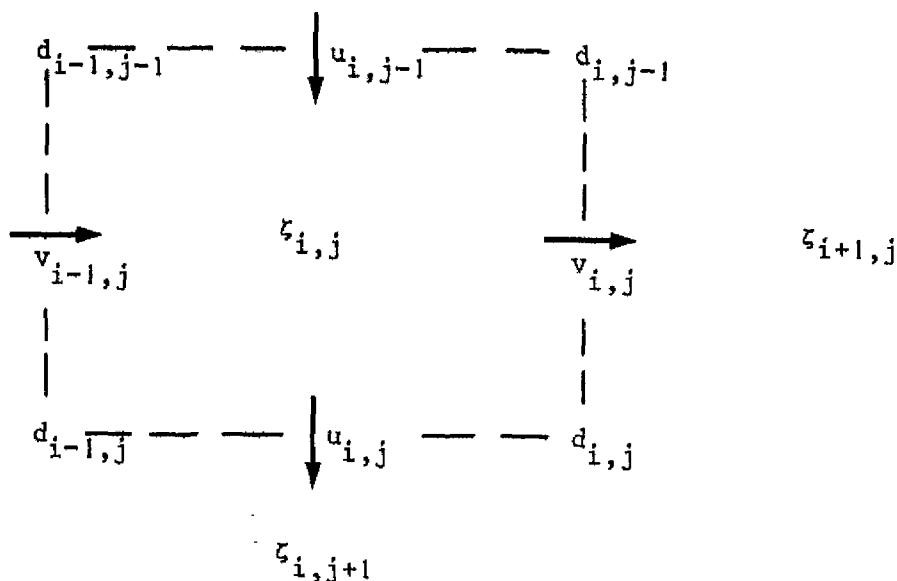
## Hoofdstuk 4. Modelling van de waterkwaliteit

### 4.1. Conversie van de waterbeweging voor DELWAQ

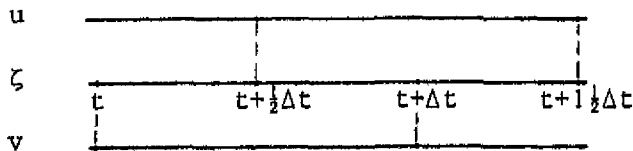
Het waterbewegingsmodel WAQUA geeft informatie over de waterstanden en snelheden in het modelgebied. Meer in het bijzonder wordt de waterbeweging gekenmerkt door:

- o de bodemligging in het modelgebied
- o de waterstand in het midden van een rekenelement op elke halve tijdstap
- o de twee snelheidscomponenten op de grenzen van een rekenelement op elke hele tijdstap.

Elk van de vier grootheden is gedefinieerd voor verschillende punten in het rekenrooster (zie figuur b). De drie grootheden waarvan het verloop in de tijd wordt berekend zijn gedefinieerd voor verschillende tijdstippen (zie figuur c).



figuur b. Opbouw van het rekenrooster in WAQUA



figuur c. Definitie van de tijdstappen in WAQUA

Daar het waterkwaliteitsmodel DELWAQ [5] werkt met volumes, debieten en oppervlakten, moeten de gegevens over de waterbeweging geconverteerd worden. In het programma dat deze conversie verzorgt, is het volume van een rekenelementje (i,j) als volgt gedefinieerd:

$$V_{i,j} = [ \frac{1}{2} (d_{i-1,j-1} + d_{i,j-1} + d_{i-1,j} + d_{i,j}) + \zeta_{i,j} ] \Delta x \Delta y \quad (3)$$

(d is de diepte in het bodempunt;  $\zeta$  is de waterhoogte.  $\Delta x$  en  $\Delta y$  zijn de roosterafmetingen in x- en y-richting.)

De oppervlakte A van het grensvlak tussen de rekenelementen (i,j) en (i+1,j) wordt berekend als:

$$A_{i,j} = [ \frac{1}{2} (d_{i,j-1} + d_{i,j}) + \frac{1}{2} (\zeta_{i,j} + \zeta_{i+1,j}) ] \Delta x \quad (4)$$

In het waterbewegingsmodel wordt voor iedere halve tijdstap afwisselend de snelheidscomponent in de x-richting (u) en de component in de y-richting (v) berekend. Het waterkwaliteitsmodel rekent alleen met hele tijdstappen, zodat de debieten voor een hele tijdstap bepaald moeten worden.

De debieten voor het grensvlak tussen rekenelementen (i,j) en (i+1,j) - er wordt dan gebruik gemaakt van de snelheidscomponent in de x-richting - zijn gedefinieerd voor tijdstippen  $t - \Delta t/2$  en  $t + \Delta t/2$  (met  $\Delta t$  de tijdstap). Het debiet op tijdstip t, dat nodig is voor DELWAQ, wordt bepaald als het gemiddelde:

$$Q_x^t = \frac{1}{2} (Q_x^{t-\Delta t/2} + Q_x^{t+\Delta t/2}) \quad (5)$$

Deze benadering is consistent met de procedure in WAQUA voor het oplossen van de continuïteitsvergelijking. De geconverteerde waterbeweging voldoet derhalve eveneens aan de continuïteitsvergelijking:

$$V^{t+\Delta t} - V^t = \Delta t \sum Q \quad (6)$$

(De sommatie vindt plaats over de vier grensvlakken van een rekenelementje.)

Uit de complete waterbeweging kan de reststroming berekend worden. Deze wordt in verband met de modellering van de waterkwaliteit gedefinieerd d.m.v. restdebeten. Het restdebet door een grensvlak is het per getijperiode gemiddelde debiet door dit grensvlak. Deelt men deze debieten door de gemiddelde oppervlakte ervan, dan ontstaan resttransportsnelheden. Er zijn dus drie grootheden waarmee de reststroming (op een ruimtelijk vast rooster) gedefinieerd kan worden:

- o restsnelheden, de over een getij gemiddelde snelheden in een bepaaldpunt
- o restdebeten, de over een getij gemiddelde debieten door een bepaald grensvlak
- o resttransportsnelheden, de restdebeten gedeeld door de gemiddelde oppervlakte van de grensvlakken.

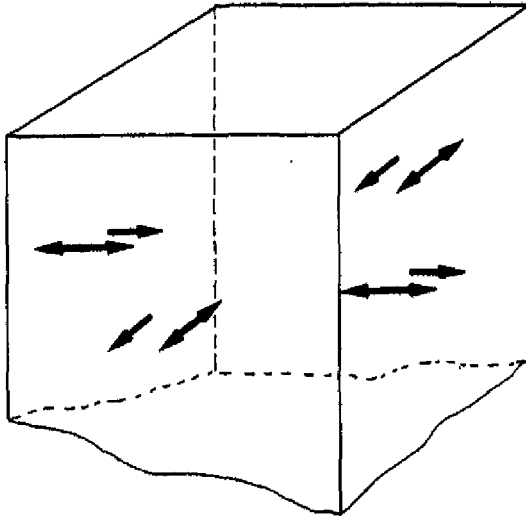
#### 4.2. De modelvergelijking

De verspreiding van een conservatieve stof kan bepaald worden uit de advectie-dispersievergelijking zonder procestermen. Het waterkwaliteitsmodel DELWAQ bevat een groot aantal numerieke methoden om deze vergelijking voor een opgegeven rekengebied op te lossen [12]. Deze methoden verschillen vooral in de manier waarop de termen voor het advectief transport worden benaderd.

Voor elk rekenelement geldt:

$$(VC)^{t+\Delta t} = (VC)^t + \Delta t \sum \text{transporttermen} \quad (7)$$

( $\Delta t$  is de tijdstap)



figuur d. Transport door de grensvlakken van een rekenelement

Op een tijdstip  $t+\Delta t$  is de massa van een bepaalde stof binnen het rekenelement te berekenen uit de massa die aanwezig was op een vorig tijdstip  $t$  en wat er in de tussentijd in- of uitgestroomd is. Aangezien het volume van het rekenelement op dat tijdstip ook bekend is, kan de concentratie berekend worden uit de massa.

Het resultaat van een berekening waarbij als waterbeweging de reststroming wordt gebruikt, kan worden beschouwd als een benadering van de situatie met constante randvoorwaarden. Hierbij moet dan worden voorondersteld dat het gemiddelde transport door de getijbeweging correct kan worden voorgesteld d.m.v. de reststroming en een additionele transportterm. De concentratie is dan constant:

$$(VC)^{t+\Delta t} = (VC)^t \quad (8)$$

En dus wordt vergelijking (7):

$$\Sigma (\text{rest})\text{transporttermen} = 0 \quad (9)$$

De transporttermen vallen uiteen in twee soorten, het dispersief transport en het advectief transport (zie figuur d). Het dispersief transport door een grensvlak wordt bepaald door de concentratiegradient loodrecht erop:

$$\text{dispersief transport} = D A \frac{C_i - C_j}{\Delta x} \quad (10)$$

Hierin zijn:

A - de oppervlakte van het grensvlak tussen de elementen i en j;

D - de dispersiecoëfficiënt;

$\Delta x$  - de roosterafstand;

$C_i$  en  $C_j$  de concentraties in de elementen i en j aan weerszijden van het grensvlak.

Het advectief transport over dit grensvlak kan als volgt bepaald worden:

$$\text{advectief transport} = Q \frac{1}{2}(C_i + C_j) \quad (11)$$

(Q is het debiet door het grensvlak.) Het gehalte op het grensvlak van de beide elementen wordt benaderd met het gemiddelde van dat van de elementen zelf.

In de limiet dat de roosterafstand  $\Delta x$  naar nul nadert, kan het totale transport over het grensvlak beschreven worden met:

$$\text{transport} = - A \left( D \frac{\partial C}{\partial n} - w C \right) \quad (12)$$

(n stelt de richting loodrecht op het grensvlak voor en w is de component van de stroomsnelheid in deze richting.)

Het volume V van het rekenelement en de oppervlakte A van een grensvlak kunnen dan geschreven worden als:

$$V = h (\Delta x)^2 \quad (13)$$

en:

$$A = h \Delta x \quad (14)$$

waarin h de waterdiepte is in het midden van het rekenelement of het grensvlak.

Na deling door de oppervlakte van het rekenelement krijgt vergelijking (7) de gedaante van de over de diepte gemiddelde advectie-dispersievergelijking:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D h \frac{\partial C}{\partial x} - u hC) + \frac{\partial}{\partial y} (D h \frac{\partial C}{\partial y} - v hC) \quad (15)$$

(u en v zijn de componenten van de stroomsnelheid in de x- respectievelijk y-richting.)

#### 4.3. Het begrip dispersie

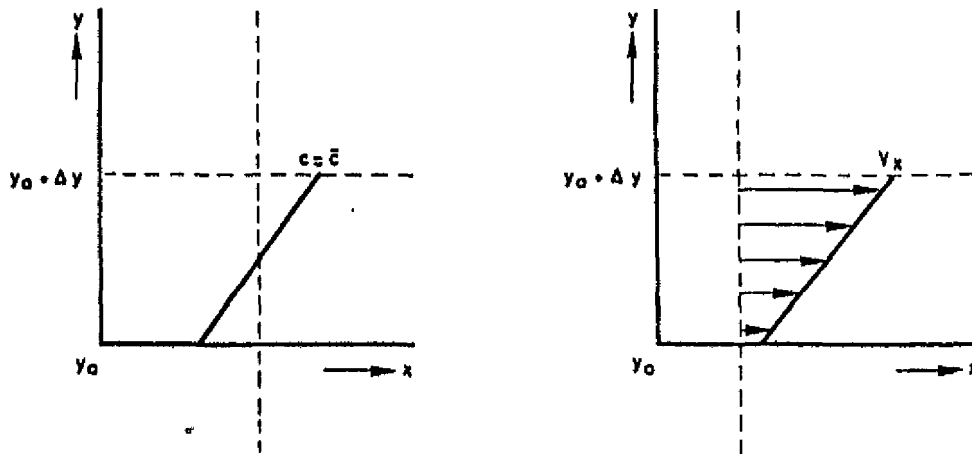
Het begrip dispersie omvat drie onderdelen, de moleculaire diffusie, de turbulente diffusie en de aggregatiedispersie. Moleculaire diffusie is een fysisch transportproces waarvan de grootte een functie is van de concentratiegradienten. De coëfficiënt die bij de moleculaire diffusie hoort, heeft een waarde in de orde van  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Turbulente menging is een tweede fysisch transportproces dat in dit kader genoemd moet worden. Hoewel het verschijnsel in de transportvergelijking doorgaans wordt ondergebracht bij de diffusieterm, gaat het om advectief transport.

De tijdschaal en de lengteschalen van de turbulentie zijn zeer klein t.o.v. de schalen van die voor de waterkwaliteit van belang zijn. Het netto resultaat van de turbulente menging op langere termijn en grotere afstanden blijkt (vaak) beschreven te kunnen worden als een diffusief transport. Alleen hangt de diffusiecoëfficiënt die men voor een dergelijke aanpak nodig heeft, af van de precieze eigenschappen van de stroming. De orde van grootte van de coëfficiënt is 0,1 tot  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , zodat turbulente menging veel belangrijker is dan moleculaire diffusie.

De laatste bijdrage aan het dispersief transport is het belangrijkste. In oorsprong gaat het ook weer om advectie. Door de meer of minder grove schematisering van het model kunnen gradienten in het advectief transport over het grensvlak tussen twee rekenelementen niet meegenomen worden in de advectietermen.

Beschouw als voorbeeld het advectief transport door een grensvlak loodrecht op de x-as (zie figuur e; variatie in de z-richting wordt voor het gemak verwaarloosd):

$$\text{advectief transport} = \int_{y_0}^{y_0 + \Delta y} u C \, dy \quad (16)$$



figuur e. Ligging van de lijn van constante concentratie en het verloop van de stroomsnelheid

De integraal wordt benaderd door de concentratie  $C$  op te delen in een gemiddelde waarde  $C_0$  en een afwijking  $C'$  over het grensvlak. Ditzelfde gebeurt met de snelheid  $u$  loodrecht op het grensvlak:  $u_0$  is de gemiddelde waarde ervan en  $u'$  de afwijking op een bepaald punt. Dan:

$$\text{advectief transport} = \Delta y \, u_0 C_0 + \int_{y_0}^{y_0 + \Delta y} u' C' \, dy \quad (17)$$

Het advectief transport bestaat dus uit twee bijdragen: transport bepaald door de gemiddelde stroomsnelheid en de gemiddelde concentratie en transport vanwege de correlatie tussen de variatie van de stroomsnelheid en de concentratie over het grensvlak. In dit gestileerde voorbeeld geldt:

$$C = C_0 - (y - y_0 - \frac{1}{2}\Delta y) \frac{\partial C_0}{\partial x}$$

en:

$$u = u_0 + (y - y_0 - \frac{1}{2}\Delta y) \frac{\partial u_0}{\partial y}, \quad (18)$$

zodat de tweede bijdrage uitgerekend kan worden:

$$\int_{y_0}^{y_0+\Delta y} u'C' dy = \frac{1}{12} (\Delta y)^2 \frac{\partial u_0}{\partial y} \frac{\partial C_0}{\partial x} \quad (19)$$

De tweede bijdrage aan het transport heeft in dit geval dus het karakter van diffusief transport.

In het algemeen geldt niet het lineaire profiel van de concentratie en de stroomsnelheid, dat hier is aangenomen. Het verloop is in het algemeen helemaal niet bekend, zodat de term niet te berekenen is. Er wordt echter wel verondersteld, dat het karakter van de bijdrage hetzelfde is.

Niet alleen door integratie over de afstand van een rooster cel, zoals hierboven, maar ook door integratie over de diepte en over een getij kan een additionele dispersieterm ontstaan. In zijn algemeenheid geldt dat hoe minder dimensies meegenomen worden in de berekening, hoe hoger de toegevoegde dispersieterm moet worden gekozen. De waarde van de bijbehorende coefficient hangt dan af van het specifieke probleem en moet bijvoorbeeld door ijking vastgesteld worden. Bij de dynamische berekeningen, die voor deze studie werden uitgevoerd, werd een dispersiecoefficient van  $50 \text{ m}^2/\text{s}$  gebruikt, goeddeels op grond van ervaring met vergelijkbare situaties.

Voor de situatie zonder wind werd een berekening gedaan met de reststroming als waterbeweging. Het resultaat van deze berekening kon o.a. worden gebruikt als beginvoorwaarde voor een dynamische berekening. De dispersiecoefficient voor deze berekening met de reststroming werd gekijkt m.b.v. de gegevens over de chloridegehalten die in de Ooster- en Westerschelde worden gemeten. De beste waarde bleek  $100 \text{ m}^2/\text{s}$  te zijn. Dit ligt aanmerkelijk boven de waarde die voor de dynamische berekeningen is, omdat de middeling over het getij extra dispersie oplevert. De voornaamste bijdrage aan de totale additionele



dispersie is echter afkomstig van de middeling over de waterkolom, zodat voor beide typen berekeningen de dispersiecoëfficiënt van dezelfde orde van grootte is.

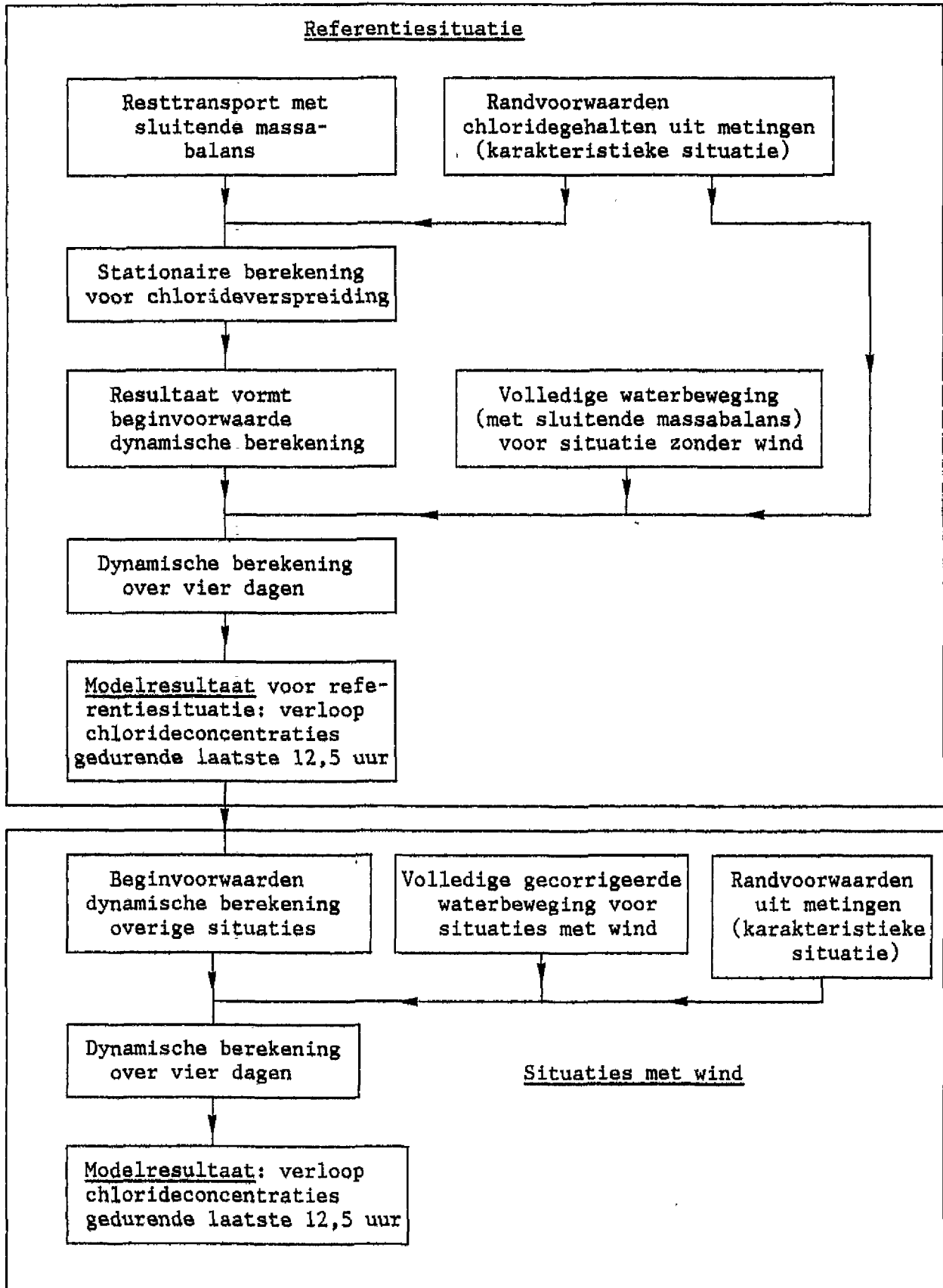
In het kader van dit projekt is echter tevens duidelijk naar voren gekomen, dat er een klasse van problemen is waarvoor het eigenlijk niet mogelijk is om d.m.v. een berekening met de gemiddelde stroming en additonele dispersie het gemiddelde concentratiepatroon te benaderen. De verschillen tussen de over het getij gemiddelde vergelijking en de middeling van het resultaat van een berekening binnen het getij laten zich niet in een aanvullende dispersieterm vatten. Hierop wordt in paragraaf 5.3 meer uitvoerig ingegaan.

#### 4.4. Opzet van de berekeningen

Voor het berekenen van de waterkwaliteit voor een bepaalde situatie zijn naast de waterbeweging ook randvoorwaarden nodig. Als in het modelgebied instroming optreedt, moet een gehalte als randwaarde worden opgelegd. Bij uitstroming kan het gehalte dat uitstroomt worden afgeleid uit het modelresultaat. De randwaarde die bij instroming voor de open zeerand opgegeven moet worden werd steeds constant verondersteld. De waarden werden d.m.v. extrapolatie naar de modelrand afgeleid uit de metingen van de geselecteerde vluchten (tabel 1; zie figuur f).

Het tijdsafhankelijke probleem vereist ook nog een beginvoorwaarde. Deze bestaat uit de concentratieverdeling op het begintijdstip. Wanneer met een volledig cyclisch stromingsbeeld de berekening van de waterkwaliteit maar lang genoeg wordt doorgezet, ontstaat ook voor de waterkwaliteit een cyclisch patroon. Dit patroon is dan niet meer afhankelijk van de gekozen beginvoorwaarde.

Voor de waterkwaliteit langs de Zuidnederlandse Noordzeekust geldt echter een zeer lange insteltijd voor een volledig cyclisch waterkwaliteitsbeeld. In die tijd heeft de waterbeweging zich al gewijzigd ten gevolge van wind en de doodtij-springtijcyclus. Zo bevindt het concentratiepatroon zich in het kustgebied dus altijd in een overgangssituatie.



Figuur f. Stroomschema van de modellering van de waterkwaliteit

Voor de situatie zonder wind is eerst een berekening gedaan met de reststroming als waterbeweging. Het concentratiepatroon dat hiervan het resultaat was, is gebruikt als beginvoorwaarde voor de dynamische berekening. Dit patroon ligt vrij dicht in de buurt van het resultaat van de dynamische berekening. De dynamische berekening besloeg uitgaande van deze begintoestand vier dagen. De chloridegehalten die gedurende de laatste 12,5 h werden berekend, vormden het uiteindelijke modelresultaat. Voor de overige situaties zijn alleen dynamische berekeningen gedaan, eveneens over een periode van vier dagen. Het modelresultaat volgde ook hier uit de laatste 12,5 h van de berekeningsperiode. Als beginschatting werd voor deze berekeningen steeds het modelresultaat voor de situatie zonder wind genomen.

Bij het berekenen van de waterbeweging moet men een tweetal punten in overweging nemen, namelijk de keuze van de droogvalprocedure en de fase van het getij waarop de berekening van de waterkwaliteit begint. In de Ooster- en Westerschelde komen droogvallende platen voor. WAQUA kent drie procedures voor het behandelen van de bijbehorende droogvallende elementen. Daarvan wordt de procedure 'gemiddeld' aanbevolen [8,14]. Deze keuze garandeert dat de waterbeweging vloeiend verloopt en dat elk rekenelement altijd een positief volume heeft.

De fase van het getij is van belang, omdat de waterbeweging nooit precies cyclisch is [8]. Het volume van een rekenelement aan het eind van de periode is dan niet precies gelijk aan het beginvolume. Er kan ook een sprong optreden in de debieten over de grensvlakken. Dit veroorzaakt een sprong in de berekende concentraties. Als de berekeningen van hoogwater tot hoogwater lopen, dan is het effect van de sluitfout het kleinst. De waterbeweging die voor waterkwaliteitsdoeleinden wordt weggeschreven, moet dan beginnen op hoogwater en eindigen op hoogwater.

water vrijwel stil. Een uur later is het stroombeeld enigszins gewijzigd (figuur 14). De waterstand daalt, het water begint de Ooster- en Westerschelde uit te stromen. Bij de zuidrand van het model begint de omslag van de stromingsrichting, de stroomsnelheden worden kleiner.

Twee uur na hoog water in Scheveningen (om twaalf uur, figuur 15), stroomt het water in het noordelijk deel nog met snelheden in de orde van 0,5 m/s naar het noorden. In het zuiden staat het vrijwel stil. Er vindt dan juist een omslag plaats van hoog naar laag water. Het water stroomt de Ooster- en Westerschelde uit (snelheden 1 tot 2 m/s). Voor de Haringvlietdam en Schouwen zijn de stroomsnelheden zeer klein.

Een uur later is de stroming in het zeegebied gestagneerd. In de beide Schel-des zijn de stroomsnelheden nog steeds groot, omdat de neerwaartse beweging van het wateroppervlak nu maximaal is.

In de volgende uren ontwikkelt zich een zuidelijke stroming in het zeegebied. Voor de kust van de Haringvlietdam en Schouwen blijven de snelheden klein. Bij de mondingen van de Ooster- en Westerschelde nemen de naar buiten gerichte stroomsnelheden af. Bij maximale stroming zuidwaarts is de waterstand het laagst (om vier uur; figuur 19) en een uur later begint reeds water de Schel-des in te stromen. Een omgekeerde cyclus begint nu.

Tussen zes en zeven uur treedt de kentering op van een zuidelijke naar een noordelijke stroming (figuren 21 en 22). De opwaartse beweging van de waterstand is nu maximaal en dit geldt ook voor de instroming in de zeearmen.

Een uur later is de noordwaarts gerichte stroming verder tot ontwikkeling gekomen. In het zeegebied boven Schouwen staat het water stil. Aan de bovenrand is nog enige stroming waar te nemen, waarschijnlijk is dit een gevolg van afwijkingen in de randvoorwaarden. In de volgende uren nemen de stroomsnelheden in de Ooster- en Westerschelde af. De waterstand gaat naar zijn hoogste stand, maar ook de stroomsnelheden in het zeegebied naderen hun maximum in noordelijke richting.

voor de het Haringvliet bij noordoostenwind wat groter dan in de referentiesituatie. De invloed van de wind op de stroming voor de kust is weliswaar klein, maar systematisch gericht.

### 5.2. De reststroming voor de vijf karakteristieke situaties

Het tweede aspect van de waterbeweging betreft het over de getijcyclus gemiddelde gedrag van de watermassa. Er moet onderscheid gemaakt worden tussen restsnelheden en restdebieten. Het zijn respectievelijk de over het getij gemiddelde snelheden in een bepaald vast punt en de over het getij gemiddelde debieten door een bepaald oppervlak. Uit de restdebieten en de gemiddelde doorsnede van zo'n oppervlak zijn weer resttransportnelheden te berekenen.

De relatie tussen beide grootheden hangt af van het verloop van de stroomsnelheid en de waterstand. Voor de Zuidnederlandse Noordzeekust is de waterstand bij noordwaartse stroming hoger dan bij zuidwaartse stroming. De resttransportnelheid zal daarom meer noordwaarts gericht zijn dan de restsnelheid zelf.

In de vijf karakteristieke situaties vertoont de reststroming de volgende kenmerken (zie figuren 31 t/m 35):

- o in alle gevallen is er vlak voor de kust niet of nauwelijks een restdebiet te onderkennen
- o ook in de Ooster- en Westerschelde doet zich geen duidelijk restdebiet voor. De restsnelheid kan echter elke richting uitstaan (figuur 10)
- o in het zeegebied is de reststroming, zoals die zich uit in de restdebieten, vrijwel parallel aan de kustlijn (d.w.z. de richting is noordoostelijk)
- o aan de bovenrand (bij Scheveningen) zijn steeds afwijkingen in het patroon te zien.

De verschillende windsituaties onderscheiden zich wat betreft de reststroming vooral in de grootte van het restdebiet. Voor de referentiesituatie en bij noordwestenwind is het restdebiet per roostercel circa  $3 \text{ m}^2/\text{s}$  (dit getal moet eigenlijk nog vermenigvuldigd worden met de roosterafmeting van 1600 m). Bij

westen- en zuidwestenwind is het restdebiet per rooster cel iets groter: 4 tot 5 m<sup>2</sup>/s.

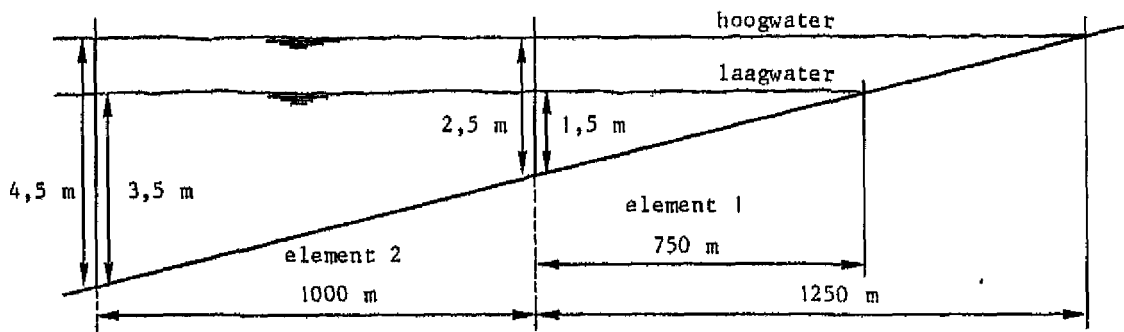
Bij noordoostenwind is het restdebiet vrijwel nihil. Hier en daar is nog iets van een reststroming zichtbaar maar dat lijkt meer een numeriek verschijnsel dan een natuurgetrouwe weergave. Met name bij de hoekpunten langs de zeerand en bij Scheveningen is het resttransport nog te onderkennen.

### 5.3. De verplaatsing van deeltjes in de getijstroming

Op grond van de reststroming - ook de restsnelheden zijn noordwaarts gericht - zou men verwachten, dat een deeltje dat in de getijstroming wordt losgelaten naar het noorden beweegt. Uit berekeningen van de banen van dergelijke deeltjes komt juist een tegengesteld gedrag naar voren (figuren 36 t/m 39). De waterbeweging die hierbij werd gebruikt is bepaald met het oorspronkelijke model RDZEE (zonder Ooster- en Westerschelde).

In een van de roosterpunten is steeds een deeltje losgelaten. Dit punt is aangegeven met een pijl. De deeltjes werden gedurende bijna vier getijden gevolgd en blijken zich in veel gevallen zuidwaarts te bewegen. De snelheid van het deeltje werd gelijk gesteld aan de stroomsnelheid op de plaats van het deeltje. Binnen een rooster cel werd daarvoor lineaire interpolatie toegepast. Het verschijnsel kan met een tweetal eenvoudige rekenvoorbeelden inzichtelijk gemaakt worden.

Beschouw een stuk kuststrook waarin het getij zich gedraagt als voor de Zuidnederlandse kust: bij hoogwater is de getijstroming noordwaarts, bij laagwater is de stroming zuidwaarts (zie figuur). De (gestileerde) situatie voor de getijstroming en de reststroming is samengevat in tabel 2.



figuur g. Stromingssituatie in het rekenvoorbeeld

tabel 2. Stromingssituatie in het rekenvoorbeeld. Voor de getijstroming en de reststroming.

		element 2	element 1
hoogwater	snelheid	+0,8 m/s	+0,5 m/s
	doorsnede	3500 m <sup>2</sup>	1562,5 m <sup>2</sup>
laagwater	snelheid	-0,7 m/s	-0,4 m/s
	doorsnede	2500 m <sup>2</sup>	562,5 m <sup>2</sup>
gemiddeld	snelheid	+0,1 m/s	+0,1 m/s
	debiet	+1050 m <sup>3</sup> /s	+556,25 m <sup>3</sup> /s

De reststroming is noordwaarts gericht (de restsnelheid is positief). Maar de watermassa met een 'volume' van 1562,5 m<sup>2</sup> die zich bij hoogwater in element 1 bevindt, blijkt zich niet overeenkomstig de verwachtingen te gedragen. Bij hoogwater beweegt de massa zich naar het noorden. Dan zakt het waterpeil (het rekenvoorbeeld is wat gestilserd om de gedachten te bepalen). Vervolgens beweegt 562,5 m<sup>2</sup> daarvan zich met een snelheid van 0,4 m/s zuidwaarts. De overige 1000 m<sup>2</sup> echter bevindt zich in element 2 en beweegt zich met een snelheid van 0,7 m/s zuidwaarts. De gemiddelde snelheid van de totale watermassa is dus bijna 0,6 m/s zuidwaarts en dat is meer dan de noordwaartse snelheid van 0,5 m/s bij hoogwater. Gemiddeld beweegt het pakket water zich dus

zuidwaarts, terwijl op het vaste rooster de gemiddelde snelheid en de resttransportsnelheid noordwaarts zijn gericht.

Op grond van dit gedachtenexperiment kan wellicht geconcludeerd worden dat men de ter plaatse over het getij gemiddelde stroomsnelheden moet nemen als maat i.p.v. het debiet. Het volgende voorbeeld laat echter zien dat ook dan de gemiddelde waterbeweging niet zondermeer gebruikt kan worden. Veronderstel de volgende getijstroming:

$$u = 25 \cdot 10^{-6} (y - 18200) \cos (\omega t - 1,7) \quad [+ 0,02] \quad (18)$$

$$v = 0,6 \cos (\omega t + 3,1) \quad (19)$$

Hierbij is

- u - de snelheidscomponent in de x-richting voorstelt (evenwijdig aan de kust en positief in noordelijke richting)
- v - de component in y-richting (positief in kustwaartse richting)
- $\omega$  - de hoekfrequentie van het getij ( $= 2\pi/T$ ).

De snelheidscomponent v loodrecht op de kust heeft een sinusvormig verloop met een gemiddelde waarde nul. De component u langs de kust beschrijft een sinus-oiden waarvan de uitwijking toeneemt met de afstand tot de kust. Dit heeft uiteraard zijn grenzen, maar verondersteld wordt dat in het beschouwde gebied het verloop lineair is. De gemiddelde snelheid van de term met de sinus is nul, maar er kan eventueel een noordwaartse constante component bij gevoegd worden (de term +0,02 in vergelijking (18)).

De fasen zijn zo gekozen dat bij de eerste nuldoorgang van v, bij laagwater en dus bij de maximale afstand tot de kust, de component u maximaal zuidwaarts gericht is (zie figuur 40). Bij de tweede nuldoorgang van v, bij hoogwater, is de afstand tot de kust het kleinst en is de component u maximaal noordwaarts gericht. Dit snelheidsveld heeft ruwweg dezelfde kenmerken als de getijstroming voor bijvoorbeeld de monding van de Westerschelde en ook de gekozen waarden stemmen ongeveer overeen.



De baan die een deeltje in dit snelheidsveld volgt, kan eenvoudig analytisch berekend worden. Laat het deeltje zich op tijdstip  $t=0$  in het punt  $(x,y) = (0,0)$  bevinden. Dan kan vergelijking (19) geïntegreerd worden om de plaats van het deeltje in de y-richting te vinden:

$$y(t) = 0,6 (T/2) \sin (\omega t + 3,1) - 0,6 (T/2) \sin (3,1) \quad (20)$$

Deze functie voor y kan in vergelijking (18) voor u worden gesubstitueerd. Na integratie ontstaat dan voor de plaats in de x-richting vergelijking (21):

$$\begin{aligned} x(t) = & \quad ([0,02] - 0,0535) t + \\ & -192 [\cos (2\omega t + 1,4) - \cos (1,4)] + \\ & -3290 [\sin (\omega t - 1,7) + \sin (1,7)] \end{aligned} \quad (21)$$

De getijstroming introduceert dus een over het getij gemiddelde snelheid die zuidwaarts is gericht. In dit rekenvoorbeeld bedraagt deze snelheid 5,35 cm/s. Een eventuele constante noordwaartse snelheid van 2 cm/s wordt daardoor meer dan volledig gecompenseerd (figuur 41). De baan van het deeltje heeft een soortgelijke vorm als het deeltje dat in de modelberekening voor de Westerschelde werd losgelaten (figuur 39).

Hieruit blijkt dat de netto verplaatsing van deeltjes en het netto transport van massa over het getij niet beschreven kunnen worden met de reststroming. Met een alternatief concept van het resttransport, zoals dat in het kader van het project WST-4 wordt ontwikkeld [8], kan dit probleem worden ondervangen. Daarmee is het wel mogelijk een periode van een jaar of nog langer door te rekenen. Zo'n benadering is evenwel veel gecompliceerder dan de huidige methode van het middelen van de stroming. In het volgende hoofdstuk zal het verschil tussen een berekening van de chlorideconcentratie m.b.v. de reststroming en een berekening met de volledige getijbeweging ook een belangrijke rol spelen.

## Hoofdstuk 6. De waterkwaliteit

De meetgegevens van de helicoptervluchten kunnen nu gebruikt worden om het model te verifiëren. Per vlucht zijn er op 66 of 68 locaties monsters genomen, zodat op een en dezelfde dag voor een reeks van punten de chloridegehalten bekend zijn. Het tijdstip van meten is echter voor elke lokatie anders.

Op de eerste vijf vluchten na is de route voor alle vluchten hetzelfde geweest (figuren 42 en 43). De route voor de eerste vijf omvatte 68 meetpunten en was gekoppeld aan het net van raaien dat is opgenomen in het onderzoeksprogramma van de Directie Noordzee. De tweede route omvatte 66 lokaties. Ze hebben nog een gedeeltelijke koppeling met het raaiennet maar vertonen in de nabijheid van de kust een grotere dichtheid.

De vluchten begonnen steeds ongeveer drie uur voor hoogwater te Hoek van Holland. De noordwaartse stroming komt bij Hoek van Holland juist op gang, terwijl de heli-copter zuidwaarts gaat. De eerste en de laatste meting liggen vijf tot zes uur uit elkaar, bijna de helft van de getijperiode. Bij het vergelijken van de modelresultaten met de metingen moet men dus de getijfase op het moment van meten in acht nemen.

In tabel 3 zijn voor de vijf vluchten die werden uitgekozen voor de randvoorwaarden, de fasen van het getij vermeld waarop voor een groep monsterpunten de meting plaatsvond. De fase is uitgedrukt in het aantal uren voor of na hoogwater in Scheveningen. De gegevens over afvoerdebieten en windsnelheid die in de berekeningen voor de vijf situaties werden gebruikt zijn vermeld in tabel 4.

tabel 3. Het verloop van de getijfase bij het bemonsteren van het zeegebied voor de diverse vluchten. De waarden zijn gegeven in uren voor of na hoogwater te Scheveningen.

gebied	vlucht en windsituatie				
	4(NO)	7(W)	9(ref)	12(NW)	15(ZW)
Haringvliet	-1	-3	-2,5	-3	-3
Goeree	0	-2	-1	-2	-2
Schouwen	2	-1	-1	-2	-2
Oosterschelde	3	0	0,5	0	0
Walcheren	4	0,5	1,5	1	1
Zeeuws-Vlaanderen	5	1,5	2,5	1,5	1,5

tabel 4. De over een week gemiddelde afvoerdebieten (in m<sup>3</sup>/s) en de windsnelheden die voor de berekeningen werden gebruikt.

afvoer	vlucht en windsituatie				
	4(NO)	7(W)	9(ref)	12(NW)	15(ZW)
Nieuwe Waterweg	1565	1640	1200	2670	2495
Haringvliet	720	105	0	3800	4165
Oosterschelde	69	69	69	69	69
Schelde	125	112	64	364	245
wind- snelheid (m/s)	9	7	0	9	7

6.1. De referentiesituatie: geen wind, geen debiet uit Haringvliet

De omstandigheden van vlucht 9 (8 september 1981) komen het beste overeen met de referentiesituatie. Er waren lage windsnelheden (kracht 3) op de meetdag en de twee dagen ervoor. De afvoer van de Rijn was in de periode rond deze vlucht zeer laag, zodat uit de Haringvlietsluizen niets geloosd werd. De debieten van de Ooster- en Westerschelde waren respectievelijk 69 m<sup>3</sup>/s en 64 m<sup>3</sup>/s, dat van de Nieuwe Waterweg 1200 m<sup>3</sup>/s.

Bij Hoek van Holland werden concentraties gemeten van 7,5 g/l vlak aan de kust, 14 g/l op een afstand van 4 km en 17 g/l op een afstand van 9 km tot de

kust (zie figuur 44). Voor het Haringvliet bevond zich water met een concentratie van 14 tot 15 g/l. Bij de monding van de Oosterschelde bedroegen de gehalten ruim 17 g/l, in de monding van de Westerschelde iets minder dan 17 g/l.

De reststroming die voor deze situatie werd berekend, toont een resttransport dat vrijwel overal noordwaarts is gericht (figuur 31). In een groot deel van het modelgebied is dit transport echter zeer klein. Het concentratiepatroon dat ontstaat volgens de reststroming vertoont een aantal opvallende afwijkingen t.o.v. de metingen (figuur 45):

- o voor het Haringvliet komen volgens de berekening geen concentraties voor die lager zijn dan 17 g/l, evenals bij Schouwen.
- o de contourlijn van 17,5 g/l ligt volgens de berekening veel verder van de kust dan uit de metingen blijkt.
- o langs de Belgische kust is volgens de berekening de concentratie steeds hoger dan 17 g/l. De metingen laten echter zien dat de contourlijn van 17 g/l parallel loopt aan de kust.

De verschillen tussen de metingen en de berekening met de gemiddelde waterbeweging zijn niet te verklaren met de constatering dat de metingen een aantal momentopnamen zijn binnen het getij. Dan zou het modelresultaat namelijk de gemiddelde chloridegehalten voor de kust moeten geven. Het concentratiepatroon dat met de reststroming werd berekend verandert echter sterk tijdens de dynamische berekening, waarin de volledige waterbeweging is gebruikt.

Na een volledig getij heeft het concentratiepatroon al enige veranderingen ondergaan (figuur 46). De zoetwaterpluim bij de Nieuwe Waterweg is naar het zuiden verschoven en aan de zeerand is een aangesloten stuk ontstaan waar het gehalte 18 g/l of meer bedraagt. Deze wijzigingen zijn na nog twee getijden duidelijker (figuur 47). Bovendien verschuift de contourlijn van 17,5 g/l naar de kust van Schouwen.

Door de fase van het getij is de verandering in de chloridegehalten in de mondingen van de Ooster- en Westerschelde niet zo duidelijk. Het moment in het getij is namelijk circa twee uur voor hoogwater bij Scheveningen en dan zijn de zeegaten net volgestroomd (zie hoofdstuk 5). De verschillen met de

stationaire berekening blijken vooral, wanneer men het verloop van de chlorideconcentratie gedurende het achtste getij bekijkt. Er zijn dan vier dagen doorgerakend. De waterkwaliteit is nog niet volledig cyclisch, maar er treden waarschijnlijk geen grote verschuivingen meer op in de concentratiepatronen (zie paragraaf 6.6).

In de uren voor hoogwater stromen de zeegaten vol en is de stroming in het zeegebied noordwaarts gericht. De zoetwaterpluim bij de Nieuwe Waterweg wordt naar het noorden gevoerd en de contourlijnen van 16,5 en 17 g/l bij de Oosters- en Westerschelde liggen in de monding (figuur 48 en 49). Tijdens hoogwater bij Scheveningen begint de uitstroming uit de Westerschelde en even later begint ook de uitstroming uit de Oosterschelde. Daardoor komen de contourlijnen van 16,5 en 17 g/l steeds verder naar buiten te liggen (figuren 50 en 51). De contourlijnen bij de Westerschelde strekken zich langs de Belgische kust uit. Wanneer het water weer de Scheldes instroomt, verplaatsen de contourlijnen zich naar binnen (figuren 52, 53 en 54). De contourlijn van 17,5 g/l ligt gedurende de gehele getijcyclus tegen de kust van Schouwen aan.

Hoewel de gemiddelde stroming in vrijwel het hele gebied naar het noorden is gericht, blijkt er door de getijbeweging dus massa naar het zuiden getransporteerd te worden. Met name gebeurt dat bij de Westerschelde, maar ook het water dat afkomstig is uit de Nieuwe waterweg wordt zuidwaarts verplaatst. Men ziet hier een soortgelijke verschijnsel als in het vorige hoofdstuk met de banen van deeltjes. Eens te meer blijkt dat de netto verplaatsing van deeltjes en het netto transport van opgeloste stof door de getijstroming niet zonder meer bepaald kunnen worden m.b.v. de gemiddelde stroming.

Het resultaat van de dynamische berekening kan ook vergeleken worden met de gemeten concentraties. Alleen moet dan rekening gehouden worden met het tijdstip waarop de metingen plaatsvonden (zie tabel 2). De meetpunten voor de Hollandse kust werden bijna drie uur voor hoogwater bij Scheveningen bemonsterd. Tijdens die fase van het getij laat het modelresultaat chloridegehalten zien die uiteenlopen van 13 g/l pal bij de uitstroming tot 17 g/l enkele kilometers uit de kust (figuur 51). De gemeten waarden zijn wat lager en bovendien verloopt de concentratie blijkens de metingen wat geleidelijker. Er speelt hier natuurlijk ook een rol dat het model een over de waterdiepte gemiddeld

chloridegehalte berekent, terwijl met name in de monding van de Nieuwe Waterweg zich een zoetwaterbel zoekt over een zoutere onderlaag [6]. De metingen zijn betrekkelijk dicht bij het oppervlak genomen.

De gehalten die bij Goeree en Schouwen werden gemeten zijn lager dan de waarde van 17,5 g/l die uit het model volgt (figuur 52). Voor het Haringvliet geldt hetzelfde. In de periode voor en tijdens de meting vond er waarschijnlijk geen afvoer uit het Haringvliet plaats. Maar het gaat mogelijk om achtergebleven water met een laag chloridegehalte. De metingen van vlucht 8, die vier weken eerder plaatsvond, laten voor het Haringvliet lage chloridegehalten zien (figuur 55). Het is ook mogelijk dat de uniforme dispersiecoëfficiënt van  $50 \text{ m}^2/\text{s}$  te hoog is gekozen met betrekking tot stoftransport loodrecht op de getijrichting.

De gehalten in de mondingen van de Ooster- en Westerschelde die door het model berekend worden zijn redelijk tot goed in overeenstemming met de gemeten waarden (figuren 50 en 51). De laagste waarde die in de Oosterschelde werd gemeten was 17,1 g/l, in de Westerschelde was dat 16,7 g/l. De contourlijn van 17,5 g/l ligt echter wat verder uit de kust dan volgens de metingen.

Aan de bovenrand werden op grond van de extrapolatie vrij lage chloridegehalten opgelegd. De zoetwaterpluim uit de Nieuwe Waterweg blijkt veel korter dan in de extrapolatie werd verondersteld. Aan de bovenrand zijn de berekende chloridegehalten dan ook onbetrouwbaar. De invloed van de rand blijft evenwel beperkt tot enkele rijen cellen. Dit is een verschijnsel dat ook bij de andere situaties voorkomt. Het verschijnsel wordt nog versterkt door het feit dat ook het stromingspatroon, zo dicht bij een open rand, de nodige afwijkingen vertoont (zie ook hoofdstuk 5).

## 6.2. Noordoostenwind, matig debiet uit Haringvlietsluizen

Voor de situatie met noordoostenwind werden vluchten 2 en 4 representatief bevonden (zie tabel 1; figuren 56 en 57). In beide gevallen werd de eerste route gevolgd. Vlucht 4 werd uitgekozen voor de modellering. Uit de gemeten gehalten

werden door extrapolatie de randvoorwaarden afgeleid. Voor de bepaling van de waterbeweging werden de volgende gegevens over de afvoerdebieten gebruikt:  
Nieuwe Waterweg:  $1565 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Haringvliet:  $720 \text{ m}^3/\text{s}$   
Schelde:  $125 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Aangezien van de Oosterschelde alleen het over het gehele jaar gemiddelde afvoerdebiet bekend was,  $69 \text{ m}^3/\text{s}$ , is voor elke situatie dit getal gehanteerd. De variatie in de afvoer is echter klein, omdat de afvoer door de Volkeraksluizen, die grotendeels de zoetwatertoevoer in de Oosterschelde bepaalt, op deze waarde wordt afgeregeld.

Voor alle vier berekeningen met wind en een debiet uit het Haringvliet werd dezelfde beginschatting genomen (figuur 58). Dit is het concentratiepatroon dat voor de referentiesituatie ongeveer twee uur voor hoogwater bij Scheveningen werd berekend, het tijdstip waarop de dynamische berekening begint. De berekeningen besloegen steeds vier dagen, dus ongeveer acht volledige getijden. Als modelresultaat geldt steeds het uitkomst van de berekeningen in de laatste periode van 12,5 uur. Zoals de metingen van vlucht 3, die een maand voor vlucht 4 plaatsvond, is de keuze van de beginschatting soms niet helemaal terecht (figuur 79). Het concentratiepatroon van vlucht 4 heeft zich ontwikkeld uit een patroon waarin in een groot gebied chloridegehalten van  $18 \text{ g/l}$  of hoger voorkomen (zie ook paragraaf 6.6).

Het afvoerdebiet uit het Haringvliet werd voor de vier situaties gemodelleerd als een constante afvoer. In werkelijkheid worden de sluizen alleen bij eb geopend. Daardoor kunnen afwijkingen ontstaan t.o.v. de metingen. Bij eb is de getijstrooming zuidwaarts, zodat de zoetwaterpluim naar het zuiden wordt afgebogen. Bovendien is het debiet in werkelijkheid tweemaal zo groot, omdat dezelfde hoeveelheid water in de helft van de tijd geloosd moet worden.

De metingen voor beide representatieve vluchten laten zeer lage gehalten zien bij de monding van de Nieuwe Waterweg:  $10$  tot  $11 \text{ g/l}$ . Bij de metingen van vlucht 2 loopt de concentratie geleidelijk op tot  $14 \text{ g/l}$  op een afstand van bijna tien kilometer van de kust. Bij de metingen van vlucht 4 is het gehalte op die afstand al  $17 \text{ g/l}$ . Ook voor het Haringvliet is het gebied met lage chloridegehalten bij vlucht 2 uitgestrekter dan bij vlucht 4 en zijn de

gehalten zelf lager. De debieten uit de sluizen waren daarentegen ongeveer gelijk:  $760 \text{ m}^3/\text{s}$  voor vlucht 2 en  $720 \text{ m}^3/\text{s}$  voor vlucht 4. Met name bij vlucht 2 werd op enige afstand van de kust een massa relatief zoet water aangetroffen die geheel omringd was door zouter water. Deze zoete vlekken zijn mogelijk te wijten aan het effect van dichtheidsverschillen op de uitstroming van het zoete water [6]. In dat geval zijn de lage chloridegehalten alleen aanwezig in de bovenste laag van de watermassa.

Voor de monding van de Oosterschelde waren in beide gevallen de gehalten vrij hoog: 17 tot 17,5 g/l. De contourlijn van 17,5 g/l liep vlak langs de kust. De monding van de Westerschelde toont duidelijk lagere chloridegehalten (16 tot 17 g/l) en de contourlijnen lopen evenwijdig aan de kust van Zeeuws-Vlaanderen.

De berekende concentratiepatronen geven langs de kust van Hoek van Holland vrij lage gehalten te zien: 13 tot 15 g/l. Bij het Haringvliet komen gehalten voor tot 8 g/l. Deze waarden zijn wat hoger dan de waarden die gemeten werden bij vlucht 4. De contourlijn van 17 g/l ligt ongeveer tien kilometer van de kust. Langs de kust van Goeree en Schouwen bevindt zich water uit het Haringvliet met chloridegehalten uiteenlopend van 13 tot 16,5 g/l (figuren 59 en 60). In de gemeten patronen is iets dergelijks te zien, maar minder uitgesproken.

De gehalten aan chloride die het model in de mondingen van de Ooster- en Westerschelde laat zien, zijn van de goede orde van grootte (figuren 61 en 62). De ligging van de contourlijnen van 16,5 en 17 g/l komt overeen met de metingen. Een opvallend verschil is echter dat de contourlijnen van 17,5 en 18 g/l ver van de kust liggen. De ligging van de contourlijn van 17,5 g/l is het gevolg van een verkeerde randvoorwaarde op de zuidelijke rand. De hele zuidrand zou door het binnengebied bepaald moeten worden, omdat het zoete water uit de Schelde over de rand heen stroomt. Een kleine afwijking ten aanzien van het punt waar zuidwaarts transport in noordwaarts transport omslaat en een kleine afwijking in de bijbehorende concentratie kan het verloop van de contourlijn verklaren.



De reststroming voor deze situatie toont zeer geringe restdebieten (figuur 32). Op grond van de reststroming zou het zoete water uit de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet zich gelijkelijk in noordelijke en zuidelijke richting verspreiden. Door de getijstroming wordt het zoete water echter zuidwaarts getransporteerd. Datzelfde verschijnsel treedt op bij de Westerschelde. Het water uit de Schelde wordt langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen gevoerd bij uitgaande stroming.

### 6.3. Westenwind, laag debiet uit Haringvlietsluizen

Vijf vluchten waren min of meer representatief voor de situatie met een laag debiet uit het Haringvliet en een westenwind (figuren 66 t/m 70). Vlucht 7 werd uitgekozen voor de randvoorwaarden en de afvoerdebieten. De vlucht vond plaats op 14 april 1981, met als windcondities: (gemiddeld) noordwestenwind met kracht 4 op de meetdag en zuidwestenwind ook met kracht 4 op de twee dagen daarvoor. In de gehele periode draaide de wind tussen deze twee richtingen.

De over een week gemiddelde afvoerdebieten waren:

Nieuwe Waterweg:  $1640 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Haringvlietsluizen:  $105 \text{ m}^3/\text{s}$   
Schelde:  $112 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Oosterschelde:  $69 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De monsterneming begon voor deze vlucht drie uur voor hoogwater bij Scheveningen (figuur 66). De gehalten die langs de kust van Hoek van Holland en bij het Haringvliet werden gemeten, liggen in de orde van 12 g/l. Datzelfde is te zien bij de overige vier vluchten. Aangezien het getij in dit gebied slechts heel lage stroomsnelheden induceert, wordt het water uit het Haringvliet nauwelijks vermengd met zout water. De chloridegehalten kunnen daardoor ondanks het lage debiet, heel laag worden.

Voor alle vluchten geldt dat, ter hoogte van Goeree en Schouwen de contourlijn van 18 g/l vijf tot tien kilometer van de kust ligt. Alleen voor vlucht 18 ligt op die afstand de contour van 17,5 g/l. In de monding van de Oosterschelde waren de gehalten niet lager dan 17,5 g/l. In de monding van de Westerschelde is bij vlucht 7 nog de contourlijn van 17 g/l zichtbaar.

In het waterbewegingsmodel werd voor deze situatie een westenwind met een snelheid van 5 m/s verondersteld. De reststroming doet vermoeden, dat het netto transport over het getij noordwaarts langs de kust zal zijn (figuur 33). De pluim van zoet water bij de Nieuwe Waterweg bevestigt dit vermoeden voor het noordelijk deel van het modelgebied. In tegenstelling tot de situatie met noordoosten is de schatting van de randwaarden vrijwel correct geweest.

Bij Hoek van Holland ligt de contourlijn van 17 g/l vijf kilometer uit de kust, net als bij vlucht 7 (figuur 71). De massa zoet water voor het Haringvlietsluizen blijft echter in de inham tussen de Maasvlakte en Goeree, terwijl in de metingen nog een uitwaaiering naar Schouwen is te zien. Dit verschil kan het gevolg zijn van de modellering van de afvoer van de sluizen.

De contourlijnen van 17,5 en 18 g/l lopen bij Schouwen veel verder uit de kust dan in de gemeten patronen (figuur 72). Het concentratiepatroon laat in het zuidelijk deel van het modelgebied voornamelijk gehalten tussen 17 en 17,5 g/l zien. De monding van de Westerschelde bevat water met een iets te laag chlooridegehalte (figuren 73 en 74). Verder komen er in het hele zeegebied voor Schouwen en Walcheren zoete en zoute 'vlekken' voor. Waarschijnlijk zou een voortzetting van de berekening een beter resultaat geven. Het resttransport is voor deze situatie wat groter dan voor de referentiesituatie. Het effect van het resttransport en het transport over het getij was daar netto transport in zuidelijke richting. Voor de situatie met westenwind kan het effect een gering netto transport noordwaarts zijn.

#### 6.4. Noordwestenwind, hoog debiet uit Haringvlietsluizen

De derde situatie die voor modellering werd uitgekozen betreft vlucht 3 en met name vlucht 12. Deze laatste vlucht vond plaats op 8 december 1981 met als windcondities: noordwestenwind met kracht 5 gedurende de meetdag en de twee dagen ervoor. Vlucht 3 werd eveneens representatief bevonden, maar de wind was van kracht 3.

De afvoerdebieten waren (over een week gemiddeld):

Nieuwe Waterweg:  $2670 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Haringvlietsluizen:  $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Schelde:  $364 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voor de Oosterschelde werd een afvoerdebiet van  $69 \text{ m}^3/\text{s}$  verondersteld.

De metingen, die drie uur voor hoogwater begonnen, tonen zeer lage concentraties voor de Hollandse kust (figuur 78). Bij Hoek van Holland is de laagste waarde  $8 \text{ g/l}$ , bij het Haringvliet zelfs  $0,1 \text{ g/l}$ , vrijwel zoet water dus. Op twintig kilometer van de kust werden concentraties gemeten als  $14$  en  $15 \text{ g/l}$ , terwijl in een enkel meetpunt nog een waarde van  $10 \text{ g/l}$  werd aangetroffen. Vlucht 3 toont op die afstand hogere gehalten (figuur 79), een concentratie lager dan  $16 \text{ g/l}$  werd alleen aangetroffen op minder dan  $15 \text{ km}$  afstand van de kust.

Langs de kust van Schouwen werden bij vlucht 12 soortgelijke waarden gemeten:  $12 \text{ g/l}$  bij het noordelijk deel,  $14 \text{ g/l}$  bij de monding van de Oosterschelde. Verder uit de kust lopen de concentraties langzaam op tot  $17,5 \text{ g/l}$  op twintig kilometer en  $18,5 \text{ g/l}$  op dertig kilometer afstand. Hier toont het gemeten patroon van vlucht 3 wat hogere gehalten langs de kust. Verderop wordt het al snel zouter.

In de monding van de Oosterschelde komt bij vlucht 12 een heel laag chloridegehalte voor:  $14$  tot  $15 \text{ g/l}$ . Bij vlucht 3 is het chloridegehalte niet lager dan  $17 \text{ g/l}$ . De monding van de Westerschelde toont in beide gevallen een concentratie van  $16 \text{ g/l}$ .

De reststroming die uit de waterbeweging voor deze situatie volgt, heeft hetzelfde karakter als die voor de referentiesituatie (figuur 34): een gemiddelde reststroomsnelheid naar het noorden van circa  $7 \text{ cm/s}$ . De middenstand aan de kust en in de Ooster- en Westerschelde is enkele centimeters hoger dan in de referentiesituatie. Daarnaast zijn de afvoerdebieten veel groter.

Als gevolg van de hoge debieten zijn de berekende concentraties bij Hoek van Holland en het Haringvliet zeer laag (figuur 80). Net als bij de metingen is de laagste concentratie bij Hoek van Holland  $8 \text{ g/l}$ , bij het Haringvliet nog veel lager.

Op tien kilometer afstand van de kust loopt echter de contourlijn van 17 g/l, terwijl die in het patroon van vlucht 12 ontbreekt (alleen ten zuiden van Goeree zijn dergelijke gehalten gemeten). De modelresultaten zijn wat dat betreft beter in overeenstemming met de metingen van vlucht 3.

De concentraties voor de kust van Schouwen, zoals berekend, zijn aan de hoge kant (figuur 81): de contourlijnen van 12 tot 14 g/l bevinden zich circa 8 km te ver noordwaarts. Een noordwestenwind introduceert blijkbaar toch meer zuidelijke stroming dan in het model is opgenomen. Dat speelt dan voornamelijk aan het oppervlak, maar daar bevindt zich ook het zoete water en vindt de bemustering plaats.

De gehalten in de monding van de Oosterschelde zijn volgens de berekeningen ook veel hoger dan bij vlucht 12 werd gemeten (figuur 82). In plaats van waarden van 15 g/l toont het berekende concentratiepatroon gehalten van 17 tot 17,5 g/l. Voor dit zeer opvallende verschil is een bijzondere reden aan te geven. Het waterbewegingsmodel geeft alleen de over de waterkolom gemiddelde stroomsnelheden weer. In werkelijkheid variëren de door de wind geïnduceerde stroomsnelheden aanzienlijk over de diepte. Aan het oppervlak is de invloed van de wind het sterkst en daar zijn de stroomsnelheden dus het grootst. De snelheden nemen sterk af met toenemende diepte. De over de diepte gemiddelde stroomsnelheid is daarom veel kleiner dan de snelheid aan het oppervlak. Door dergelijke oppervlaktestromingen kan water met een laag chloridegehalte dat afkomstig is uit de Nieuwe Waterweg en de Haringvliet naar de monding van de Oosterschelde worden getransporteerd. Zulke effecten worden niet in het model weergegeven, zodat de berekende en de gemeten chloridegehalten voor dit gebied sterk verschillen.

Voor de monding van de Westerschelde zijn berekeningen en metingen wel vrij goed met elkaar in overeenstemming (figuur 83). Een extra debiet van  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  ten gevolge van regenval telt op het debiet van de Schelde van  $364 \text{ m}^3/\text{s}$  ook minder aan. De contourlijn voor 17 g/l ligt in beide gevallen op tien tot vijftien kilometer van de monding. Langs de Belgische kust is volgens de berekeningen de concentratie 16,5 g/l. Alleen op grote afstand zijn de berekende gehalten te laag.

Als laatste detail kan genoemd worden dat ook in dit geval de schatting van de waarden op de bovenrand beter had gekund. De zoetwaterpluim is korter dan was verondersteld in de extrapolatie.

#### 6.5. Zuidwestenwind, hoog debiet uit Haringvlietsluizen

Er werden drie vluchten representatief bevonden voor de situatie met zuidwestenwind en een hoog debiet uit het Haringvliet (figuren 87, 88 en 89). Vlucht 14 is daarbij een uitzondering, omdat de bemonstering vier uur na hoog water begon en drie uur voor hoogwater eindigde. Voor de randvoorwaarden en de debieten werd vlucht 15 gekozen. Deze vlucht vond plaats op 9 februari 1982. De windcondities bij waren: zuidwestenwind van kracht 4 gedurende de meetdag en de twee dagen daarvoor. De gegevens van de afvoerdebieten:  
Nieuwe Waterweg:  $2495 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Haringvlietsluizen:  $4165 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  
Schelde:  $245 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Oosterschelde:  $69 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Bij alle drie vluchten bevond zich voor het Haringvliet een grote watermassa met heel lage chloridegehalten. Tot meer dan vijf kilometer uit de kust was het gehalte aan chloride lager dan  $15 \text{ g/l}$ . Bij vlucht 13 strekken de contourlijnen van 15 en  $16 \text{ g/l}$  zich in zuidelijke richting uit tot aan de kust van Schouwen, terwijl bij vlucht 15 deze contourlijnen niet voorbij Goeree komen. Zowel bij vlucht 13 als bij vlucht 15 bedragen de gehalten in de monding van de Westerschelde 15 tot  $17 \text{ g/l}$ . Op wat grotere afstand van de kust werden gehalten van  $17,5$  tot  $18 \text{ g/l}$  aangetroffen.

De zuidwestenwind (snelheid  $5 \text{ m/s}$ ) bewerkstelligt een reststroming met een stroomsnelheid van iets meer dan  $10 \text{ cm/s}$  (zie figuur 35). De reststroming lijkt sterk op die in de situatie met westenwind. Het ligt dus voor de hand om in ieder geval voor de modelresultaten soortgelijke concentratiepatronen te verwachten. Er dient dan wel rekening te worden gehouden met de verschillen in debieten.

Vlak bij de monding van de Nieuwe Waterweg en voor het Haringvliet zijn de berekende chloridegehalten vrij goed in overeenstemming met de gemeten waarden (figuur 90). De hoeveelheid zoet water die uit het Haringvliet afkomstig is,

wordt in zuidelijke richting echter niet verder verspreid dan tot Goeree (figuur 91). De contourlijn van 16,5 g/l bereikt in tegenstelling tot de metingen de kust van Schouwen niet meer. De discrepantie die ook hier weer optreedt kan het gevolg zijn van de modellering van de afvoer uit het Haringvliet en van de insteltijd van het model. De verspreiding in de richting loodrecht op de kust komt daarentegen overeen met de metingen. De contourlijn van 17 g/l ligt ongeveer tien kilometer van de kust. In het gemeten patroon ligt de contourlijn iets verder.

In de monding van de Oosterschelde is de concentratie volgens de berekeningen iets hoger dan 17 g/l, wat overeenstemt met de metingen (figuur 92). De contourlijn van 17,5 g/l loopt evenwel ver uit de kust, terwijl volgens de metingen deze lijn vlak langs de kust van Schouwen loopt.

De monding van Westerschelde toont iets te hoge concentraties in vergelijking met de metingen (figuur 93). Het laagste gehalte is volgens de berekeningen 16,5 g/l. Volgens de metingen bedraagt het minimum 15,5 g/l. De contourlijn van 17 g/l loopt vrij ver uit de kust.

Wanneer men deze modelresultaten vergelijkt met die voor de situatie met westenwind (paragraaf 6.3), dan valt op dat ondanks het hogere debiet van de Schelde de monding van de Westerschelde niet zoeter is. De contourlijnen van 17 en 16,5 g/l liggen echter wel verder uit de kust. Daarenboven valt op dat de invloed van de Schelde zich zowel naar het noorden als naar het zuiden heeft uitgebreid. Gehalten van 16,5 g/l komen voor langs de Belgische kust, gehalten van 17 g/l komen voor tot bij de monding van de Oosterschelde.

#### 6.6. Inspeelverschijnselen

Voor de referentiesituatie bestond de beginschatting uit het concentratiepatroon bij reststroming. Hoewel deze schatting vrij dicht in de buurt ligt van het resultaat van de dynamische berekening treden er een aantal verschuivingen op in de concentratiepatronen (paragraaf 6.1). De contourlijnen van 17 en 17,5 g/l in de mondingen van de Ooster- en Westerschelde liggen na een

aantal getijden veel zuidelijker dan in de beginschatting. Ook de zoetwaterpluim bij de Nieuwe Waterweg blijkt in zuidelijke richting te verschuiven.

Uit het verloop van de concentratie in een aantal rekenelementen blijkt dat na de vier dagen die zijn doorgerekend het model nog niet helemaal ingespeeld is (zie figuren 97, 98 en 99; in de figuren is per 50 minuten een gehalte uitgezet). In het roosterpunt voor het Haringvliet verandert de per getijdencyclus gemiddelde concentratie nauwelijks (figuur 98). Voor het roosterpunt bij de Nieuwe Waterweg wordt het dal in de cyclus elk getij dieper, terwijl de top op hetzelfde niveau blijft.

De twee roosterpunten voor de mondingen van de Ooster- en Westerschelde vertonen eveneens een sterk verloop (figuur 99). Het roosterpunt voor de Oosterschelde krijgt gemiddeld een steeds hogere chloridegehalte. Na acht getijdencycli stijgt de concentratie nog steeds. Het roosterpunt voor de monding van de Westerschelde wordt daarentegen steeds zoeter.

Wanneer men de dynamische berekening nog verder zou voortzetten, dan zou de zoetwaterpluim voor de Nieuwe Waterweg zich waarschijnlijk nog verder naar het zuiden verspreiden. Daardoor wordt het water voor het Haringvliet ook zoeter. De gehalten in het zeegebied voor Schouwen en Walcheren zouden nog wat hoger worden en het zoete water uit de Westerschelde wordt steeds verder naar het zuiden vervoerd.

De dynamische berekening kan door het herhalen van de waterbeweging net zo lang worden voortgezet als gewenst. In de praktijk verandert de waterbeweging evenwel. De wind verandert van richting en grootte, de afvoerdebieten veranderen en het getij zelf verandert door de doottij-springtijdencyclus. Deze verschuivingen in de waterbeweging vinden plaats op een tijdschaal van enkele dagen tot een week. Indien het zeegebied voor de Zuidnederlandse kust wat betreft de waterkwaliteit in werkelijkheid ook een inspeeltijd van een week of meer heeft, dan vindt er een voortdurende aanpassing plaats van de waterkwaliteit aan de veranderde omstandigheden. De waterkwaliteit in het gebied wordt dan niet alleen bepaald door de waterbeweging, maar ook door de waterkwaliteit in de periode daarvoor. Er is steeds sprake van een overgangssituatie.

### 6.7. Evaluatie van het model

Het waterkwaliteitsmodel dat in dit onderzoek is ontwikkeld, beschrijft het zeegebied voor de Zuidnederlandse kust. De Ooster- en Westerschelde zijn er schematisch in ondergebracht om de concentraties vlak langs de kust van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen met een behoorlijke betrouwbaarheid te kunnen voorspellen. Het model werd gebruikt om in een vijftal karakteristieke situaties die uit de reeks helicoptervluchten zijn gekozen de chlorideconcentratie te berekenen.

Uit de vergelijking van de modelresultaten voor deze karakteristieke situaties en de gemeten concentratiepatronen komen steeds een tweetal verschillen naar voren. Bij vrijwel alle situaties komt het zoetere water uit het Haringvliet niet ver genoeg voor de kust van Schouwen. De reden hiervoor is enerzijds te vinden in het feit dat het model een over de diepte gemiddeld chloridegehalte berekent, terwijl het gehalte in werkelijkheid over de diepte varieert. Het zoete water beweegt zich over het zoute water en bestrijkt een groter oppervlak en de monsters werden even onder het oppervlak genomen. Anderzijds is het lozen van zoet water in het model het hele getij doorgegaan, terwijl in de praktijk alleen bij eb een tweemaal zo grote hoeveelheid uitstroomt.

Vanwege de geringe stroomsnelheden kan een aanvullende verklaring nog gevonden worden in het feit dat door de beginvoorwaarden ter plaatse mogelijk hogere zoutgehalten zijn opgelegd dan in werkelijkheid het geval was. Het zoete water moet de tijd krijgen om dit zoute water te verdringen. Wanneer men de berekening wat langer door zou zetten, zou het resultaat beter zijn.

Een tweede verschil tussen modelresultaten en metingen betreft de concentratie op enkele tientallen kilometers van de kust. De metingen tonen vrij frequent hoge chloridegehalten in dit deel van het gebied (18 tot 19 g/l). In het model zijn dergelijke waarden weliswaar op de rand opgegeven, maar in de berekende concentratiepatronen overheerst voortdurend de contourlijn van 17,5 g/l. Alleen voor de situaties met westen- en zuidwestenwind komt de ligging van de contourlijnen van 18 en 18,5 g/l behoorlijk overeen met de ligging ervan in de gemeten patronen.



Hiervoor kan de verblijftijd weer de oorzaak zijn. Als beginschatting voor de verschillende situaties met wind is het resultaat voor de situatie zonder wind gebruikt. Hierin bedraagt de maximale concentratie circa 18 g/l. Op basis van de reststroom mag een verblijftijd van 20 tot 30 dagen verwacht worden in het zeegebied. De inspeeltijd van het model ligt dan in dezelfde orde, zodat de invloed van de randvoorwaarden na de acht doorgerkende getijden nog niet overal merkbaar is. Het is echter ook goed mogelijk dat de gebruikte dispersiecoëfficiënt voor het dispersief transport loodrecht op de kust wat aan de hoge kant is. Omdat de getijsnelheden in deze richting nagenoeg nihil zijn, zal ook de bijdrage van de aggregatiedispersie, zoals besproken in paragraaf 4.4, niet groot zijn.

#### 6.8. Kenmerken van de transportprocessen

De vijf karakteristieke situaties zijn voornamelijk onderscheiden op grond van het debiet uit het Haringvliet en de windcondities op de meetdag en de twee dagen ervoor. Deze twee factoren bepalen samen met de getijbeweging de verspreiding van chloride. De concentratiepatronen die met het waterkwaliteitsmodel voor deze situaties werden bepaald tonen onderling een aantal verschillen, maar ook enige overeenkomsten.

Een opvallende overeenkomst tussen alle situaties is, dat het netto transport over het getij vrijwel steeds zuidwaarts is gericht, terwijl de over het getij gemiddelde stroming een noordwaarts transport doet vermoeden. Voor de situatie zonder wind en zonder debiet uit de Haringvlietsluizen bleek het concentratiepatroon dat m.b.v. de over het getij gemiddelde waterbeweging werd berekend op een aantal punten af te wijken van de concentratiepatronen die werden berekend met de volledige waterbeweging. De reststroming is overal in het zeegebied noordwaarts gericht, zodat het zoete water uit de Nieuwe Waterweg en zich in noordelijke richting zou moeten verspreiden. De resultaten die met de getijstroming werden bereikt laten evenwel een zekere verspreiding in zuidelijke richting zien. Dit verschijnsel treedt niet alleen op bij de referentiesituatie maar in meer of mindere mate bij alle situaties en langs de hele kust. De verspreiding van het water uit de Schelde is tot op zekere hoogte onafhankelijk van de windcondities. In alle gemodelleerde situaties lopen de

contourlijnen langs de Belgische kust naar het zuiden. De verspreiding op wat grotere afstand van de kust is wel afhankelijk van de windcondities.

Het algehele beeld van de verspreiding van een conservatieve stof als chloride in de kuststrook van Zuid-Nederland op langere termijn wordt slechts in bepaalde mate door de reststroming beheerst. De getijstroming zorgt voor een netto verspreiding die in bepaalde gebieden tegengesteld is aan de verspreiding door de reststroom alleen. In het gebied voor de monding van de Oostersen Westerschelde blijkt de verspreiding te worden gedomineerd door de getijbeweging. Op grotere afstand van de kust is het effect van de reststroming overheersend. In het gebied voor de Hollandse kust is zowel de reststroming als de getijstroming van invloed op de netto verspreiding.

Het afvoerdebiet en de windcondities hebben een duidelijke invloed op de verspreiding van chloride, zoals blijkt uit de ligging van de contourlijnen voor het Haringvliet in de verschillende situaties. Bij een laag afvoerdebiet uit de sluisen blijft de zoetwatermassa vlak voor de sluisen hangen (paragraaf 6.3). Bij een matig of hoog debiet echter hangt het van de windomstandigheden af, hoe de verspreiding verloopt. In de situatie met noordwestenwind is er een hoog debiet uit het Haringvliet en het zoete water verspreidt zich zuidwaarts tot voor de Grevelingen (paragraaf 6.4). In deze situatie is de reststroming vergelijkbaar met die van de referentiesituatie, aangezien de wind loodrecht op de kust staat. In de situatie met zuidwestenwind is het debiet eveneens hoog (paragraaf 6.5), maar doordat de wind de noordwaartse reststroming versterkt, wordt de zoetwatervlek naar het noorden afgebogen. Bij de situatie met noordoostenwind tenslotte was het debiet matig (paragraaf 6.2), maar door de wind wordt de resttstroming t.g.v. het getij gecompenseerd. Dit heeft tot gevolg dat het zoete water uit de Haringvliet zuidwaarts wordt getransporteerd tot bijna in de monding van de Oosterschelde.

## Hoofdstuk 7. Conclusies en aanbevelingen

### 7.1. Conclusies t.a.v. het model

Er is een procesbeschrijvend modelonderzoek uitgevoerd naar de waterkwaliteit voor de Zuidnederlandse Noordzeekust. Er is getracht de concentratiepatronen zoals deze zijn waargenomen in het kader van het zogenaamde 'Helicopter onderzoek' van de Delta Dienst - Milieu en Inrichting, te reproduceren. Hiertoe zijn een vijftal min of meer typerende situaties geselecteerd, voor wat betreft de wind en de zoetwater afvoer. Voor de berekening van de waterbeweging in het gebied is gebruik gemaakt van het model RDZEE, dat is afgeleid van het waterbewegingsmodel Randdelta II. Voor het stoftransport is gebruik gemaakt van het programma DELWAQ dat op hetzelfde modelrooster werd toegepast.

Het bleek noodzakelijk om het model RDZEE uit te breiden met de Ooster- en Westerschelde, om het stoftransport door de zeegaten goed te beschrijven. Calibratie van de waterbeweging vond voornamelijk plaats door de middenstand van de randvoorwaarden te variëren en aan te passen aan de windomstandigheden. Met name voor de noordrand werd geen acceptabel beeld van de waterbeweging verkregen. Dit wordt voornamelijk toegeschreven aan het feit dat het meetpunt Scheveningen in de haven, in plaats van aan de kust ligt. Met uitzondering van de eerste rijen cellen aan de noordrand van het model, werd met het model een stromingsbeeld verkregen dat in hoge mate als realistisch overkomt. Dit beeld is niet getoetst kunnen worden aan metingen op de respectievelijke modelperiodes, maar stemt goed overeen met metingen en ervaringen zoals deze uit talrijke studies van de waterbeweging in dit zeegebied overkomen.

De invloed van de verschillende windrichtingen en -snelheden is in het model opgenomen op grond van windopzet aan de modelranden. Hierdoor is de invloed van de Zuidelijke Noordzee als geheel op het betreffende gebied niet in de berekening betrokken. Er wordt geschat dat deze invloed een orde kleiner is dan die van de directe windopzet ter plaatse. Deze indruk zou geverifieerd kunnen worden door berekeningen met modellen die de gehele Zuidelijke Noordzee beslaan.

Het stoftransport en de concentratiepatronen zijn berekend met behulp van het programma DELWAQ. Er moesten bijzonder voorzieningen getroffen worden om in gebieden met een lange verblijftijd, zoals de Scheldes, te corrigeren naar de invloed van een nog niet volledig ingespeelde waterbeweging.

Als beginschatting van het concentratiepatroon voor de referentiesituatie, is een schatting van het getijgemiddeld gehalte genomen, zoals dat m.b.v. de over het getij gemiddelde getijbeweging kan worden berekend. Dit gehalte stemde al redelijk overeen met het gemeten gehalte. Een getijafhankelijke berekening toonde de invloed van het getij.

Door de specifieke fasering van waterstand en stroomsnelheid voor de Zuid-nederlandse kust, bleek zich een interessant fenomeen voor te doen. Hoewel de lokaal over het getij gemiddelde snelheden en debieten in het gebied noordwaarts wijzen, beweegt een deeltje zich met de getijstroom mee zuidwaarts in het gebied. Deze zuidwaartse beweging is in tracer-experimenten en internationale literatuur al meermalen gememoreerd. Er heeft echter altijd de indruk bestaan dat dit strijdig zou zijn met een noordwaarts gericht reststromingsveld, zoals dat uit vele modelberekeningen bleek. In het kader van dit projekt is aangetoond dat dit niet het geval is. Dit beperkt de bruikbaarheid van berekeningen met behulp van de over het getij gemiddelde waterbeweging voor dit soort zeegebieden. De zuidwaartse beweging binnen het getij werd wel korrekt beschreven door de tijdsafhankelijke modelberekeningen binnen het getij.

Het resultaat van de referentie-berekeningen binnen het getij is steeds gebruikt als beginvoorwaarde voor de tijdafhankelijke berekening van de concentratiepatronen voor de vijf typerende situaties. Voor ieder van de vijf situaties was het steeds mogelijk het algemene beeld van het concentratiepatroon goed te beschrijven.

Vanwege het gebrekkige stromingsbeeld direkt aan de noordrand, kan het model slechts tot Hoek van Holland in alle redelijkheid worden gebruikt. Dit is ook de lokatie van de meest noordelijke raai van het helicopter-maatnet. Verder wreekt zich het feit dat het model dieptegemiddelde saliniteiten berekent. Geïsoleerde zoetwatervlekken, zoals soms voor de monding van Haringvliet en

Nieuwe Waterweg optreden, kunnen niet op deze wijze met het model beschreven worden.

Hoewel de tijdsafhankelijke berekeningen aantonen dat de concentraties aan de zuidrand van binnen het model afkomstig zijn door een zuidelijk transport uit de Westerschelde, zou het aanbeveling verdienen om deze zuidrand zo ver weg te leggen, dat de omtrekkende beweging die het water daar maakt, ook volledig binnen de model grenzen valt.

Voor sommige situaties wijkt het globale gehalte, op enkele tientallen kilometers voor de kust, systematisch af van de metingen. Dit kan mede veroorzaakt worden door kleine afwijkingen aan de zuidrand van het model, zoals boven omschreven, maar zal ook veroorzaakt zijn door de lange verblijftijd ter plaatse in combinatie met een afwijkende beginschatting.

De lange verblijftijd zorgt er ook voor, dat na vele getijden het concentratiebeeld nog in beweging is. Men mag daarom aannemen, dat er in het zeegebied voor de Zuidnederlandse kust, nooit een gesloten concentratiecyclus over het getij zal ontstaan. Het concentratiepatroon zal steeds in een overgangsstadium tussen de verschillende stromings- en windcondities verkeren.

Aanvankelijk bestond de gedachte, dat het mogelijk zou zijn om voor de waterbeweging over het jaar te interpoleren tussen een aantal typerende situaties. Dit hoeft niet onjuist te zijn. Voor de waterkwaliteit is echter aangetoond, dat het niet mogelijk is om vervolgens met het hieruit voortvloeiende resttransport te volstaan om een jaarbeeld te verkrijgen. Simulatie binnen de getijcyclus lijkt noodzakelijk. Voor een berekening van een jaarcyclus is dit echter geen aanlokkelijk perspectief. In het kader van het WST-4 project wordt momenteel gewerkt aan een alternatief resttransportconcept voor de waterkwaliteit. Wanneer deze activiteit met succes afgerond kan worden, is het ook mogelijk om voor de Zuidnederlandse Noordzeekust tot seizoensmodellering te komen.

## 7.2. Conclusies t.a.v. de transportprocessen

De modelresultaten hebben duidelijk gemaakt dat voor de verspreiding van stoffen in het zeegebied voor de Zuidnederlandse kust niet alleen de over het getij gemiddelde stroming van belang is, maar ook de getijstroming zelf. De getijstroming induceert voor het gebied direkt langs de kust een zuidwaarts transport, terwijl de door getij en wind geïnduceerde reststroming over het algemeen noordwaarts is. Doordat de wind de reststroming beïnvloedt, kan het gezamenlijke effect zowel een zuidwaarts als een noordwaarts transport zijn. Als gevolg daarvan treden er in de vijf karakteristieke situaties de volgende verschijnselen op:

- o in de referentiesituatie (geen wind, geen afvoer uit de Haringvlietsluizen) is het netto transport zuidwaarts. Het zoete water uit de Nieuwe Waterweg en vooral uit de Schelde wordt naar het zuiden gevoerd. Daar er geen debiet uit de Haringvlietsluizen is, zijn de chloridegehalten langs een groot deel van de kust hoog, in de orde van 17 g/l.
- o in de situatie met westenwind en een laag debiet uit de sluizen wordt het water uit de Schelde in eerste instantie zuidwaarts gevoerd, maar op wat grotere afstand van de kust wordt het water naar het noorden getransporteerd. Het zoete water uit het Haringvliet komt in geen enkele fase van het getij ten zuiden van Goeree.
- o in de situatie met noordoostenwind en een matig debiet uit de Haringvlietsluizen is de over het getij gemiddelde stroomsnelheid zeer gering, omdat door de wind de door het getij geïnduceerde reststroming wordt gecompenseerd. Het zoete water uit de Haringvlietsluizen en de Nieuwe Waterweg wordt tot aan de monding van de Oosterschelde getransporteerd. Langs de hele kust is het chloridegehalte dan ook laag.
- o in de situatie met noordwestenwind is de afvoer uit de Haringvlietsluizen hoog, maar in dit geval wordt de door het getij geïnduceerde reststroming niet gecompenseerd door de wind. De zoetwatervlek voor het Haringvliet breidt zich weliswaar in zuidelijke richting uit, maar vanwege de reststroming ligt de grens veel noordelijker dan in het vorige geval, namelijk bij Goeree. De chloridegehalten voor de Hollandse kust zijn zeer laag, terwijl die voor de kust van Schouwen vrij hoog zijn.

- o in de situatie met zuidwestenwind en een hoge afvoer uit de sluizen versterkt de wind juist de door het getij geïnduceerde reststroming, waardoor het netto transport noordwaarts is. Het water uit het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg langs de kust naar het noorden getransporteerd, zodat langs de kust van Schouwen de chloridegehalten hoog zijn. Het water uit de Schelde wordt langs de Belgische kust geleid, wat verder uit de kust echter gaat het ook naar het noorden.

### 7.3. Aanbevelingen

Uit het onderzoek is gebleken dat het redelijk mogelijk is om concentratie patronen voor saliniteit te reproduceren. Er kan vervolgens overwogen worden om voor enkele andere waterkwaliteitsparameters een zelfde exercitie te doen. Gedacht kan worden aan nutriënten en eventueel silicium. Een berekening met silicium zou eventueel ook aan kunnen sluiten bij balansstudies zoals die door Delta-Dienst Milieu en Inrichting in dit kader zijn verricht.

De verticale inhomogeniteit van de saliniteit bij uitstroomopeningen is een belangrijk effect dat nog niet in het model is opgenomen. Met betrekking tot de waterbeweging is deze inhomogeniteit alleen op te nemen bij de  $2\frac{1}{2}$ -D of 3-D modellering die in ander kader plaats heeft. Voor het stoftransport is het echter mogelijk een twee- of drie-lagenmodel toe te passen. De waterbeweging kan dan worden beschouwd met een parabolisch profiel en een daarop gesuperponeerd wind-effect. Verwacht mag worden dat vlekken zout water zich dan, in de bovenste laag, makkelijker onder invloed van de wind laten verplaatsen dan nu in het model het geval is.

Voor alle vervolgtoeepassingen wordt aanbevolen de zuidrand van het model nog verder zuidwaarts te leggen.

Met betrekking tot een modellering van het seizoenverloop zou in vervolg op de ontwikkelingen in WST-4 verband een toepassing op het gebied voor de Zuid-nederlandse Noordzeekust overwogen kunnen worden.

Met de huidige studie is een basis gelegd voor een meer permanent beheersmodel, wat bij constructieve werken zou kunnen worden gebruikt om de gevolgen voor de waterkwaliteit te bestuderen. De voorgestelde uitbreidingen kunnen de mate van detail en betrouwbaarheid sterk vergroten.



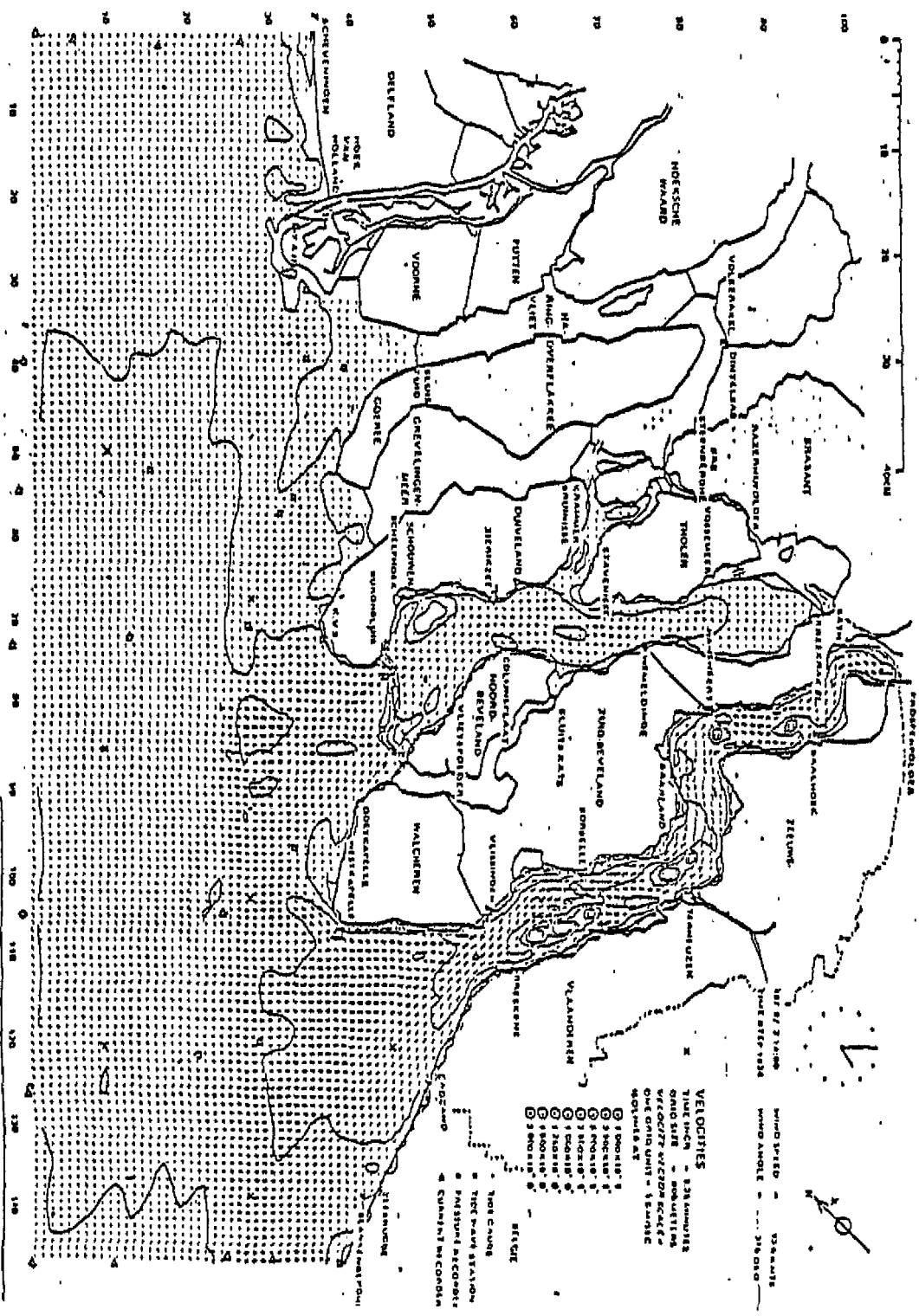
Literatuur

1. DELTA-DIENST MILIEU EN INRICHTING  
Bemonstering kustwater 1981 - 1982 Tussentijdse presentatie van de gegevens over januari t/m mei 1981,  
notitie, maart 1983
2. LANGERAK A.  
persoonlijke communicatie, 1985
3. LANGERAK A., J. LEENDERTSE EN M. ROS  
Adjustment and verification of the Randdelta II model,  
16th International Conference on Coastal Engineering, 1978
4. LEENDERTSE J.J.  
A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas: Vol I, principles of computation,  
RM-6210-RC, Rand Corporation, Santa Monica Californie, 1970
5. POSTMA L.  
A two dimensional water quality model application for Hong Kong coastal waters,  
Water Science and Technology, 16, 1984
6. RIJKSWATERSTAAT  
De driedimensionale verspreiding van Rijnwater voor de kust van Holland;  
een eerste analyse van saliniteitsmetingen uitgevoerd in 1985,  
te verschijnen in 1986
7. RIJKSWATERSTAAT EN WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Gebruik en toepassing van WAQUA,  
syllabus bij de cursus, (eerste deel), april 1985
8. RIJKSWATERSTAAT EN WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Waterkwaliteitsmodellering in relatie tot WAQUA-gebruik,  
syllabus bij de cursus (tweede deel), september 1985

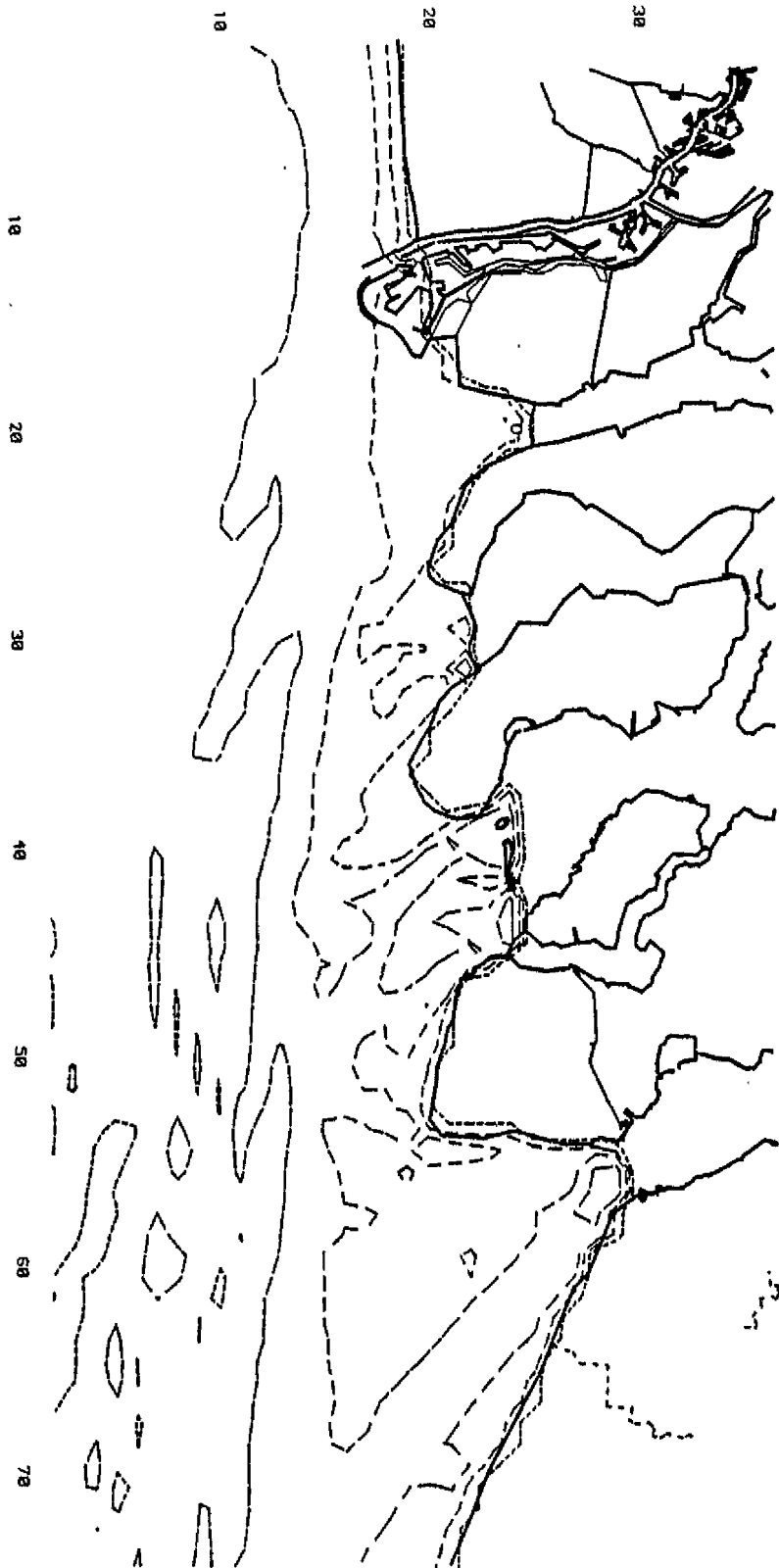
9. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Waterkwaliteitsmodellering Zuidnederlandse Noordzeekust,  
werkplan K 2734, oktober 1984
10. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Selektie karakteristieke situaties procesbeschrijvende modellering,  
memo K 2734-01, oktober 1984
11. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
De constructie van getij- en stormopzet-randvoorwaarden voor het WAQUA-  
model RDII,  
rapport R 1103, november 1984
12. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
WAQUA/DELWAQ berekeningen Eems-Dollard estuarium,  
verslag speurwerk S 296.02, november 1984
13. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Eerste berekeningsresultaten procesbeschrijvende modellering,  
memo R 2176-06, maart 1985
14. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Oriënterend onderzoek naar modellering van waterkwaliteit in estuariene  
gebieden met behulp van 2DH modellen,  
verslag speurwerk S 577, juli 1985
15. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
Stochastische modellering van de waterkwaliteit van de Zuidnederlandse  
Noordzeekust,  
rapport R 2176 deel 1, januari 1986
16. TIMMERMANS H.  
Meteorological effects on tidal heights in the North Sea,  
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, 1977

**RANDELTA II 39**  
 RD II 39, BOVEN GNO, 15 SEPT 1972, BARRIER AND SECONDARY DAMS  
 RPT. PROJECTS 11 14 00  
 3144, EINDHOVEN 20-12-83

RANDELTA II - MODEL	
RUWEN EN VERBODEN	WIL
WETZEL EN VERBODEN	
WILDE EN VERBODEN	



Overzicht van het model Rand-Delta II  
 Roosterafmeting : 800 m.



RDZEE T04

RDZEET04 , 1600 M. GRID

IDP= 86/01/20 12:52:33

MAP= 86\01\20 12:56:53

CONDITIONS

TIME INCR = 5.00 MINUTES

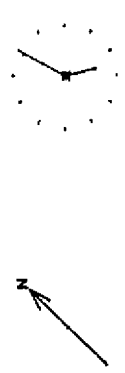
GRID SIZE = 1600METERS

0 OUTFALLS (SOURCES) ( 2

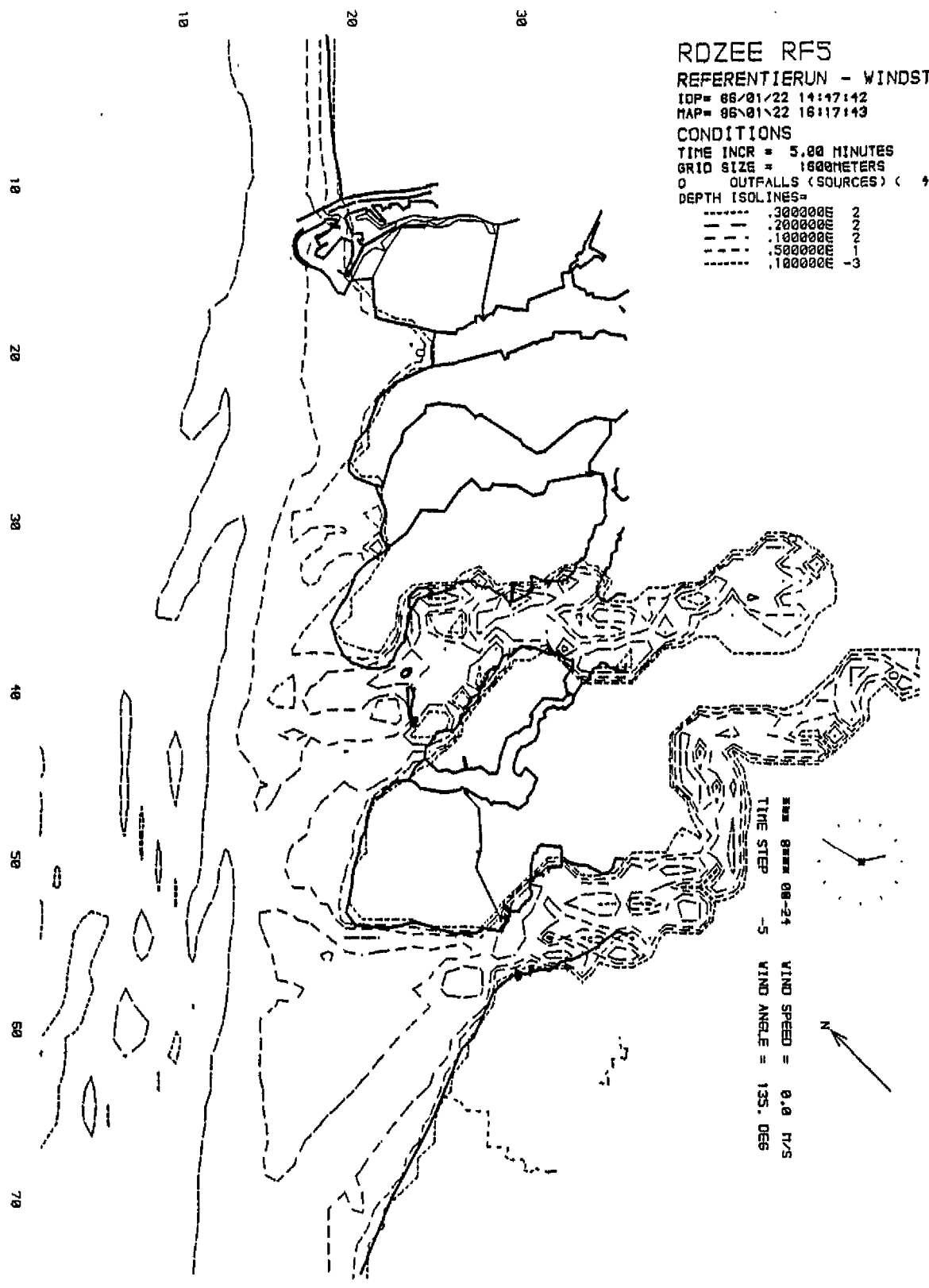
DEPTH ISOLINES=

- ..... .300000E 2
- .200000E 2
- .100000E 2
- .500000E 1
- ..... .100000E -3

DATE 86-01-24  
 TIME STEP -5  
 WIND SPEED = 0.0 KNOT  
 WIND ANGLE = 135. DEG



Het oorspronkelijke model RDZEE.  
 De zeeranden zijn gemodelleerd als snelheidsranden



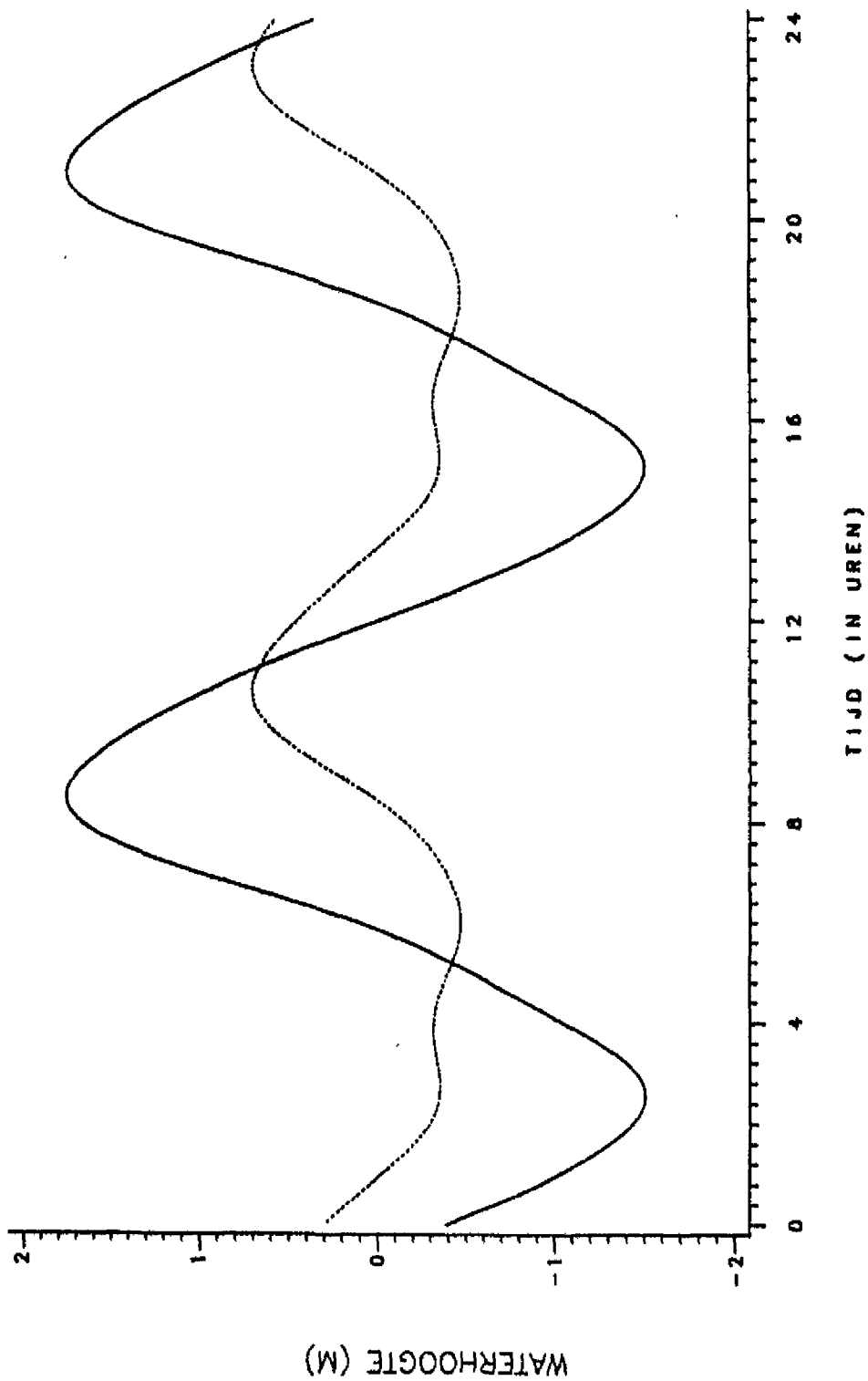
RDZEE RF5  
 REFERENTIERUN - WINDSTILTE

IDP= 86\01\22 14:17:42  
 MAP= 86\01\22 16:17:43

CONDITIONS  
 TIME INCR = 5.00 MINUTES  
 GRID SIZE = 1000METERS  
 0 OUTFALLS (SOURCES) ( 4  
 DEPTH ISOLINES=  
 - - - - - .3000000 2  
 - - - - - .2000000 2  
 - - - - - .1000000 2  
 - - - - - .500000 1  
 - - - - - .100000 -3

WIND SPEED = 0.0 m/s  
 WIND ANGLE = 135.056  
 TIME STEP = 5  
 08-24

Uitbreiding van het model RDZEE met de Ooster- en de Westerschelde



- - - - - HOEKPUNT TER HOOGTE VAN HOEK VAN HOLLAND  
 ————— HOEKPUNT TER HOOGTE VAN DE APPELZAK

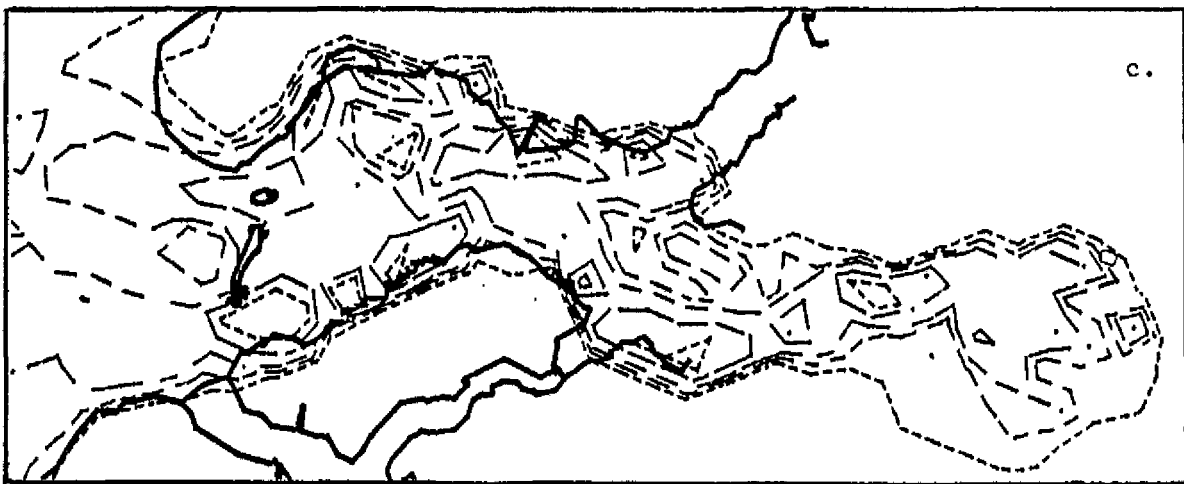
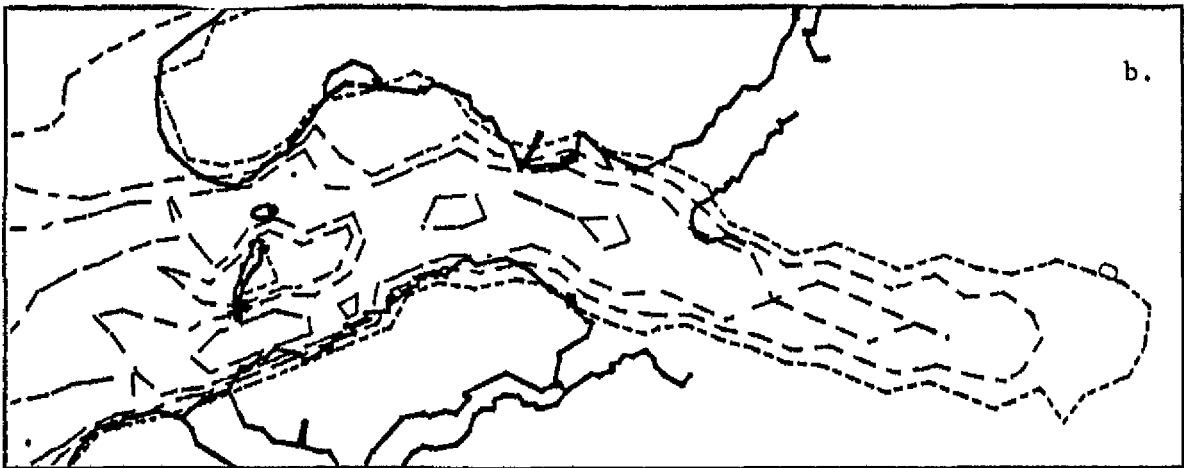
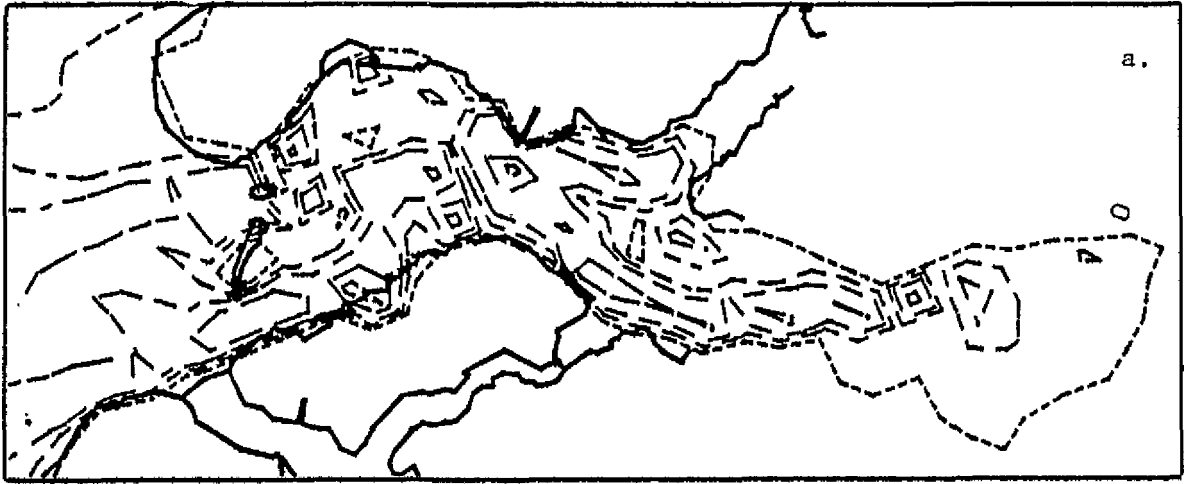
Randvoorwaarden voor de waterstand in de hoekpunten.  
 Getijcomponenten : M2, M4, M6, M8

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

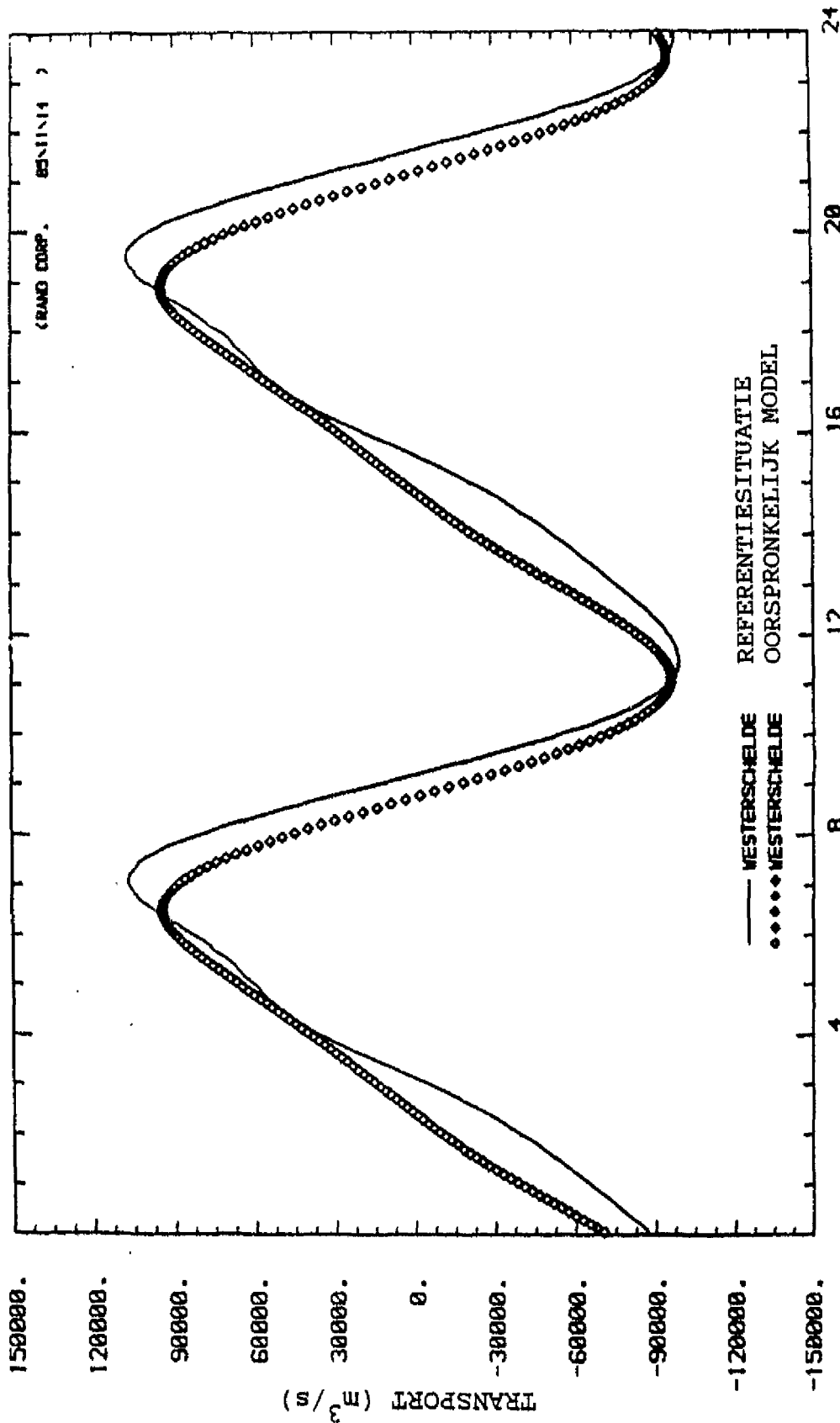
R 2176

fig. 4



Schematisering Oosterschelde :  
 a: volgens methode RDZEE; b: gladgetrokken bodem;  
 c: uiteindelijke bodem na correctie

A4



30 AUG ' 75

Transport in de monding van de Westerschelde  
 vergeleken met het verloop in het oorspronkelijke  
 model

A4

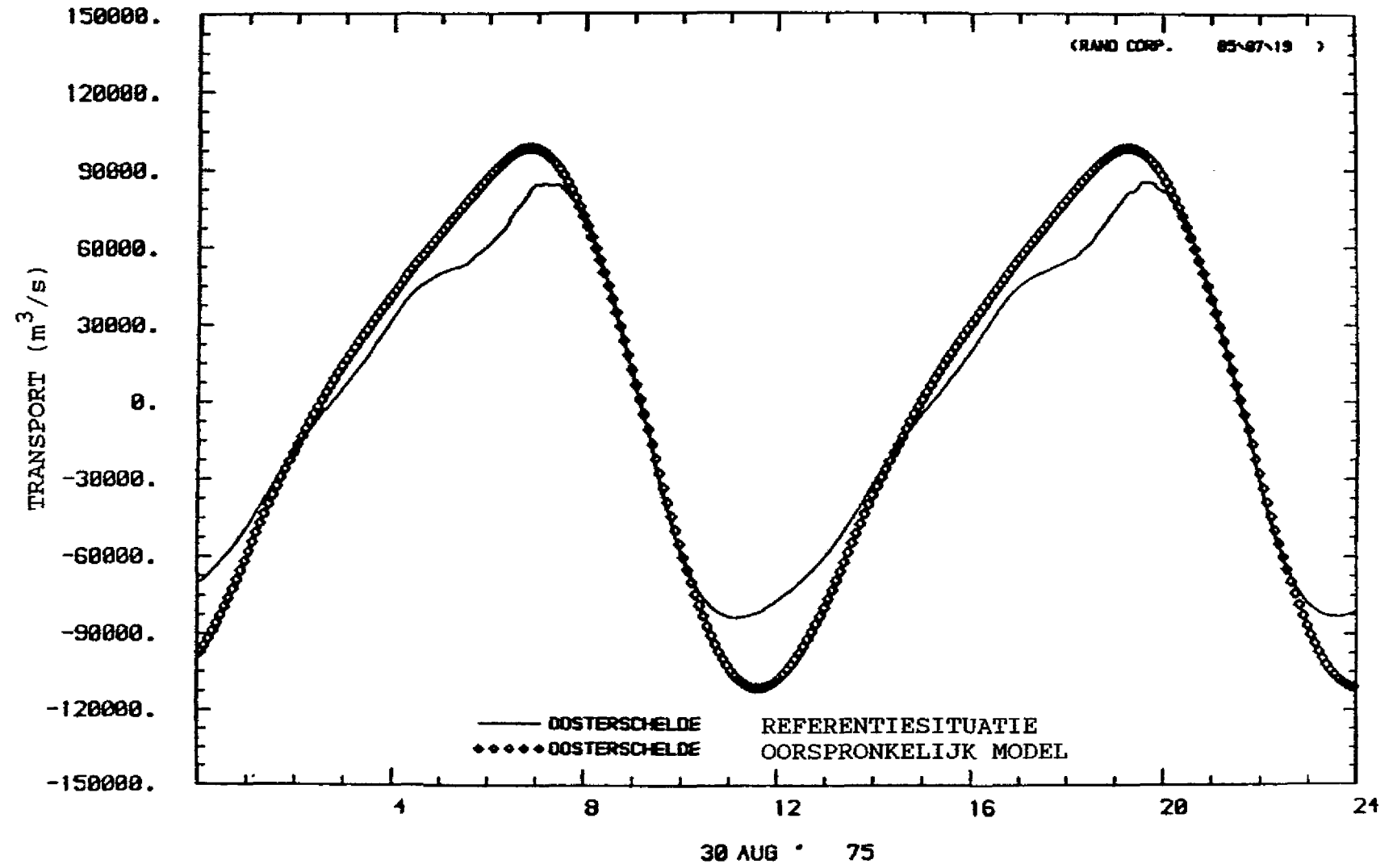
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 6



(RAND CORP. 85-87-19 )



Transport in de monding van de Oosterschelde -  
begrenzing in het model loodrecht

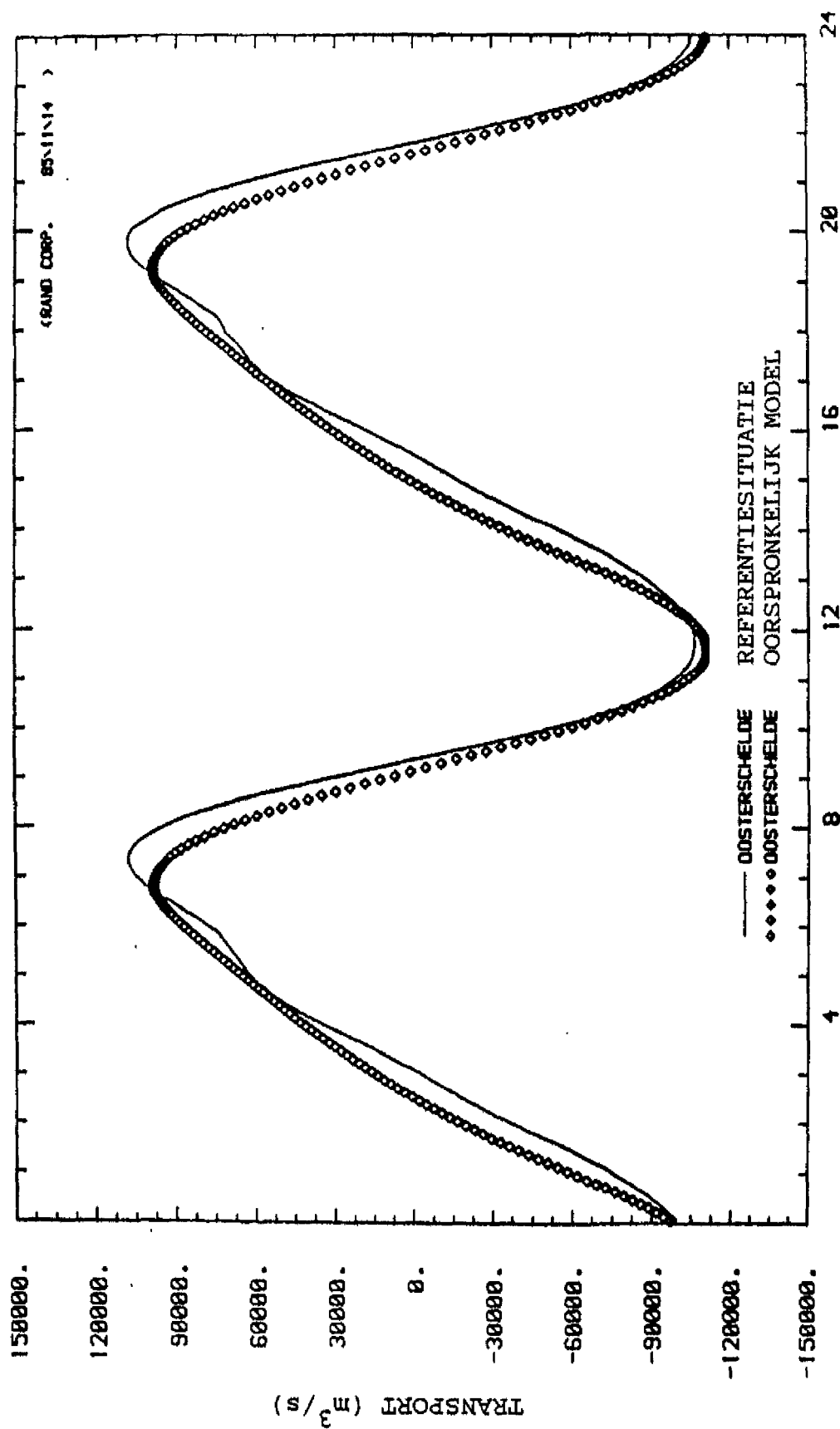
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 7

A4

30 AUG ' 75



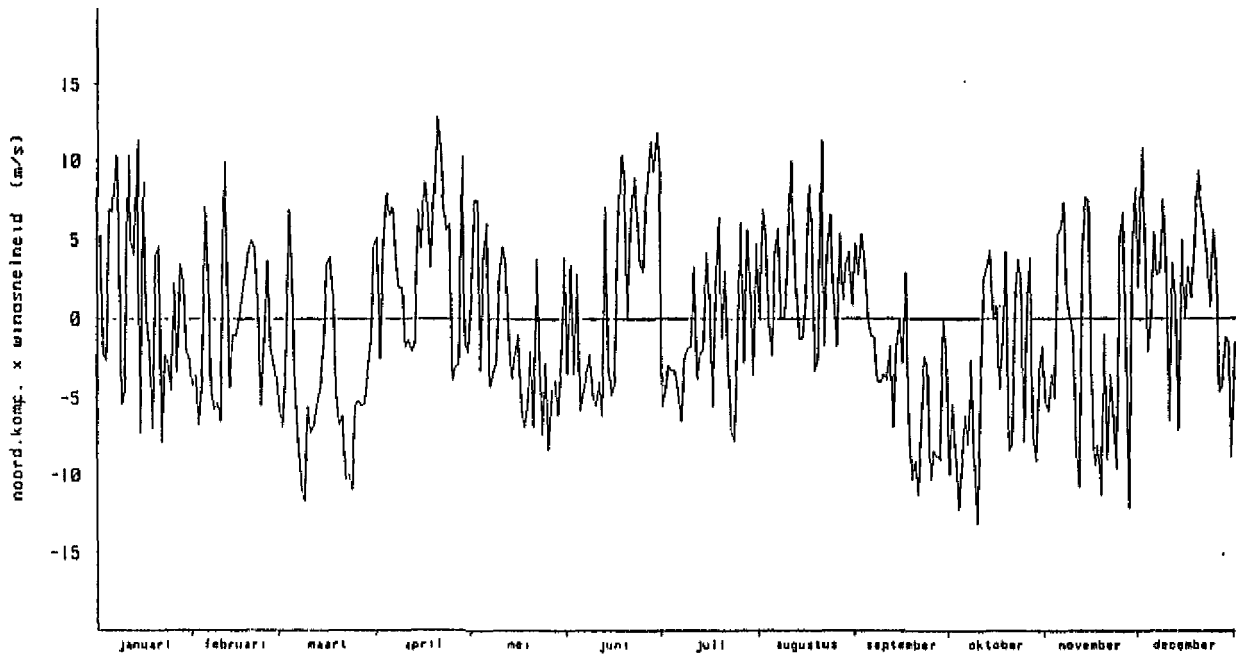
30 AUG ' 75

Transport in de monding van de Oosterschelde - na vergroting van de komberging

A4

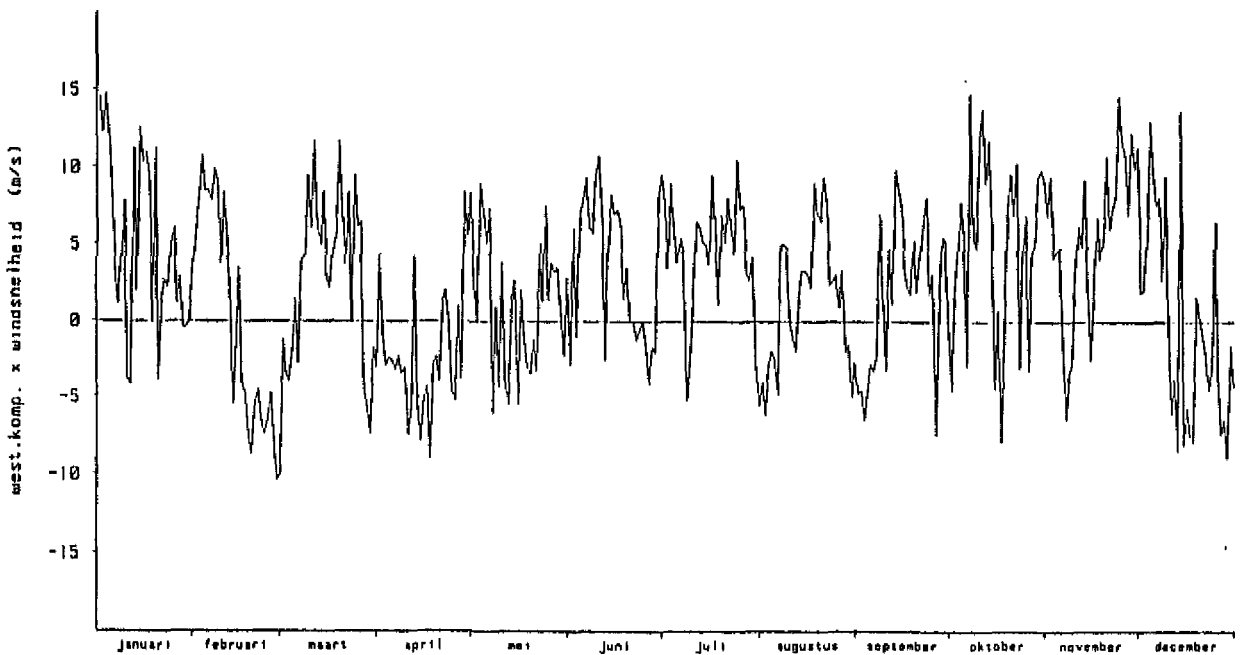
WINDMETINGEN 1981  
 Meetpaal O.S.12

a.



WINDMETINGEN 1981  
 Meetpaal O.S.12

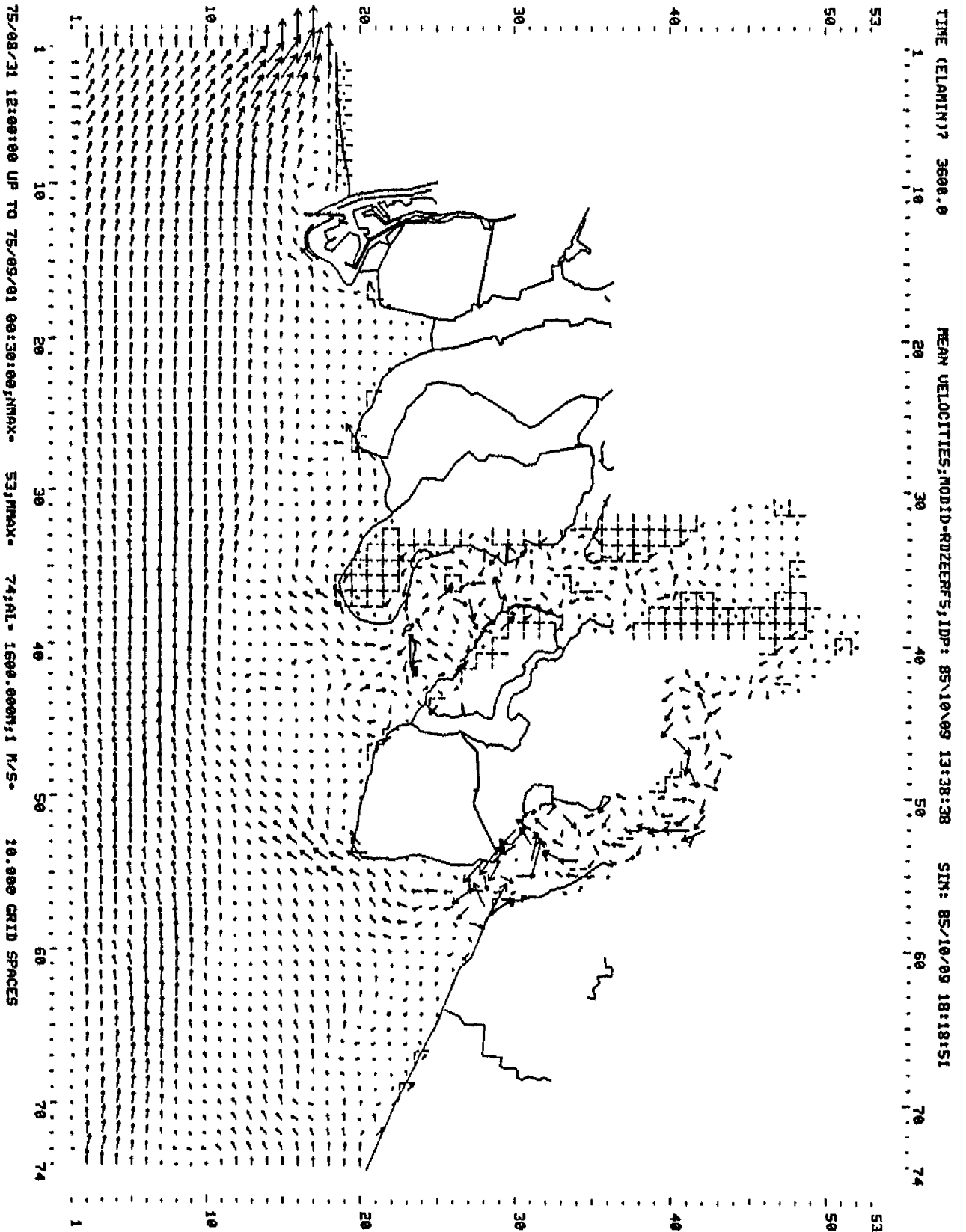
b.



Rijkswaterstaat - Delftsevent  
 Instituut Hittau en Ierlichting

Windsnelheden gemeten in 1981: a. noordelijke  
 component b. westelijke component

A4



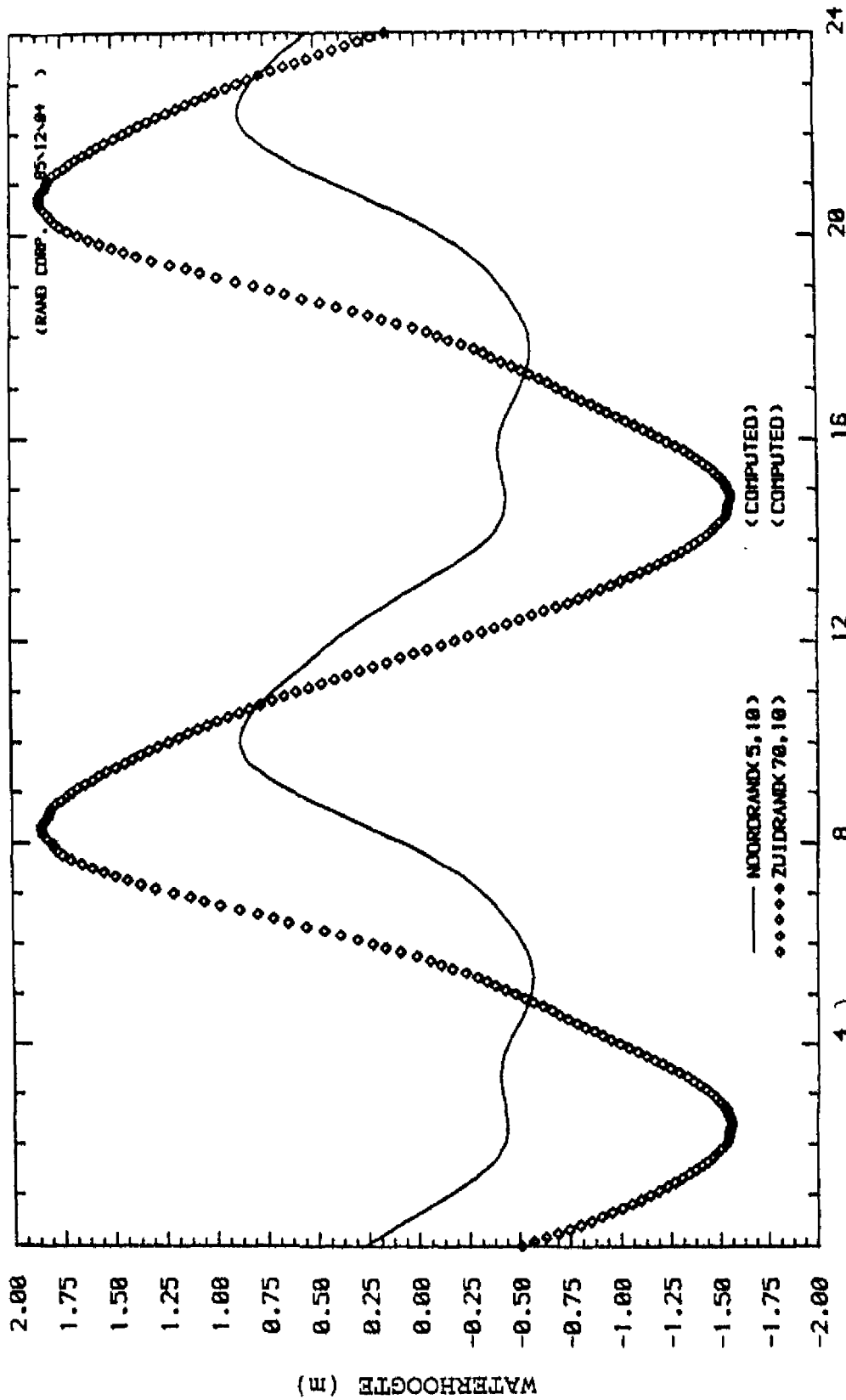
Restsnelheden voor de referentiesituatie

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

A4

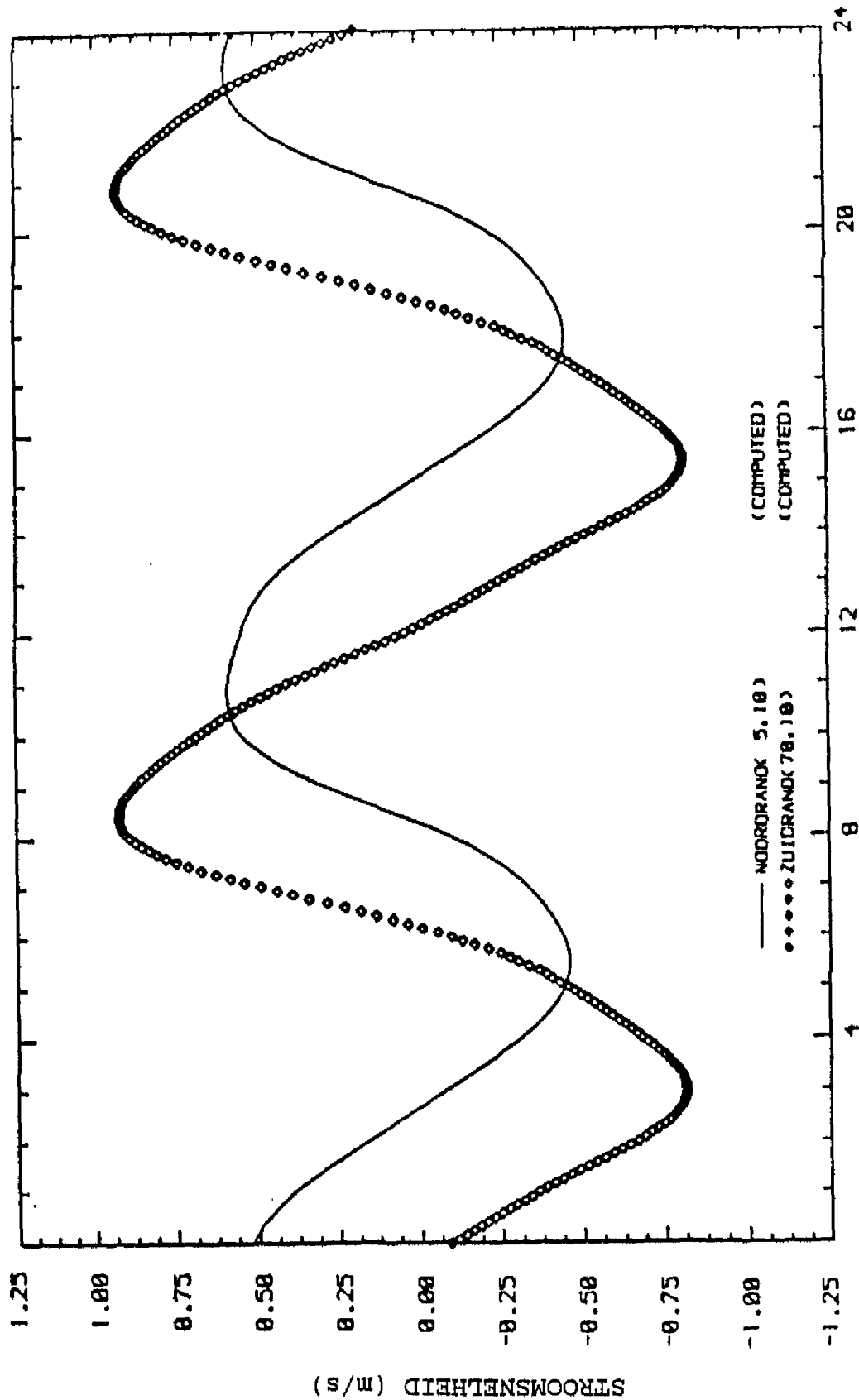
fig. 10



31 AUG ' 75

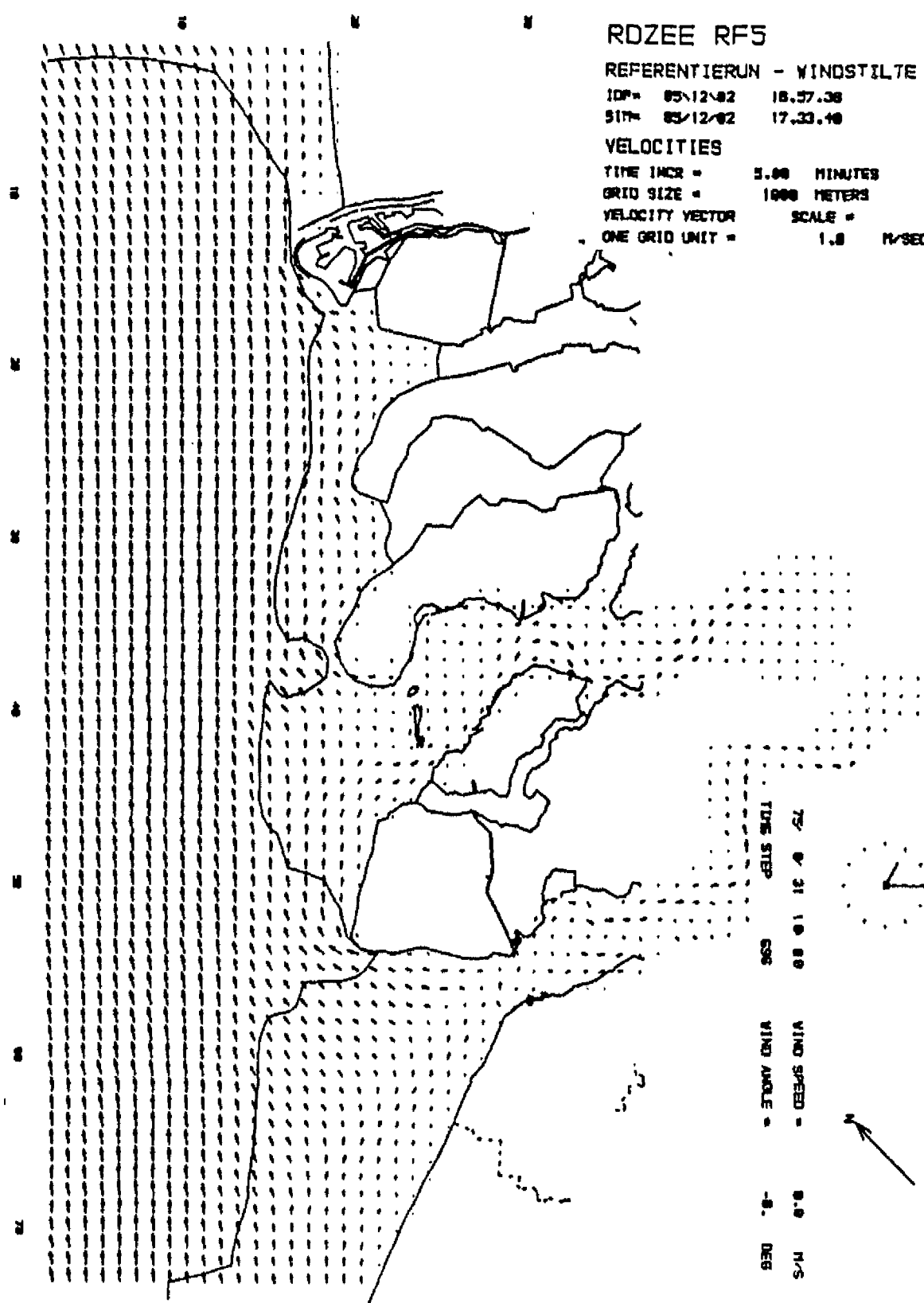
Berekend verloop van de waterstand aan de boven- en onderrand

A4

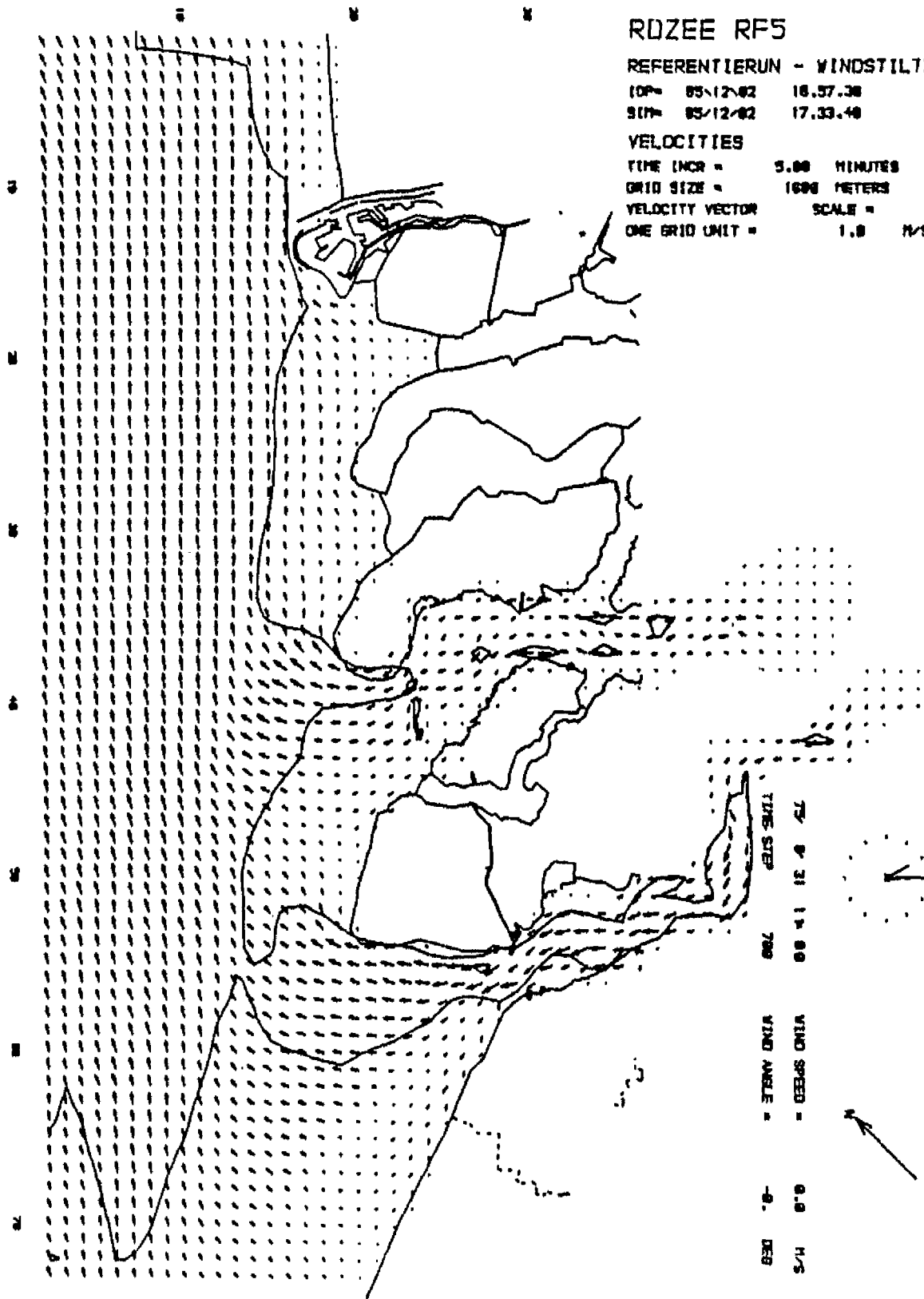


31 AUG ' 75

Berekende snelheid aan de boven- en onderrand  
 Component evenwijdig aan de kust



Stromingsveld rond hoogwater bij Scheveningen-referentie situatie



RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

10P= 85/12/82 16.57.38

91P= 85/12/82 17.33.48

VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1000 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

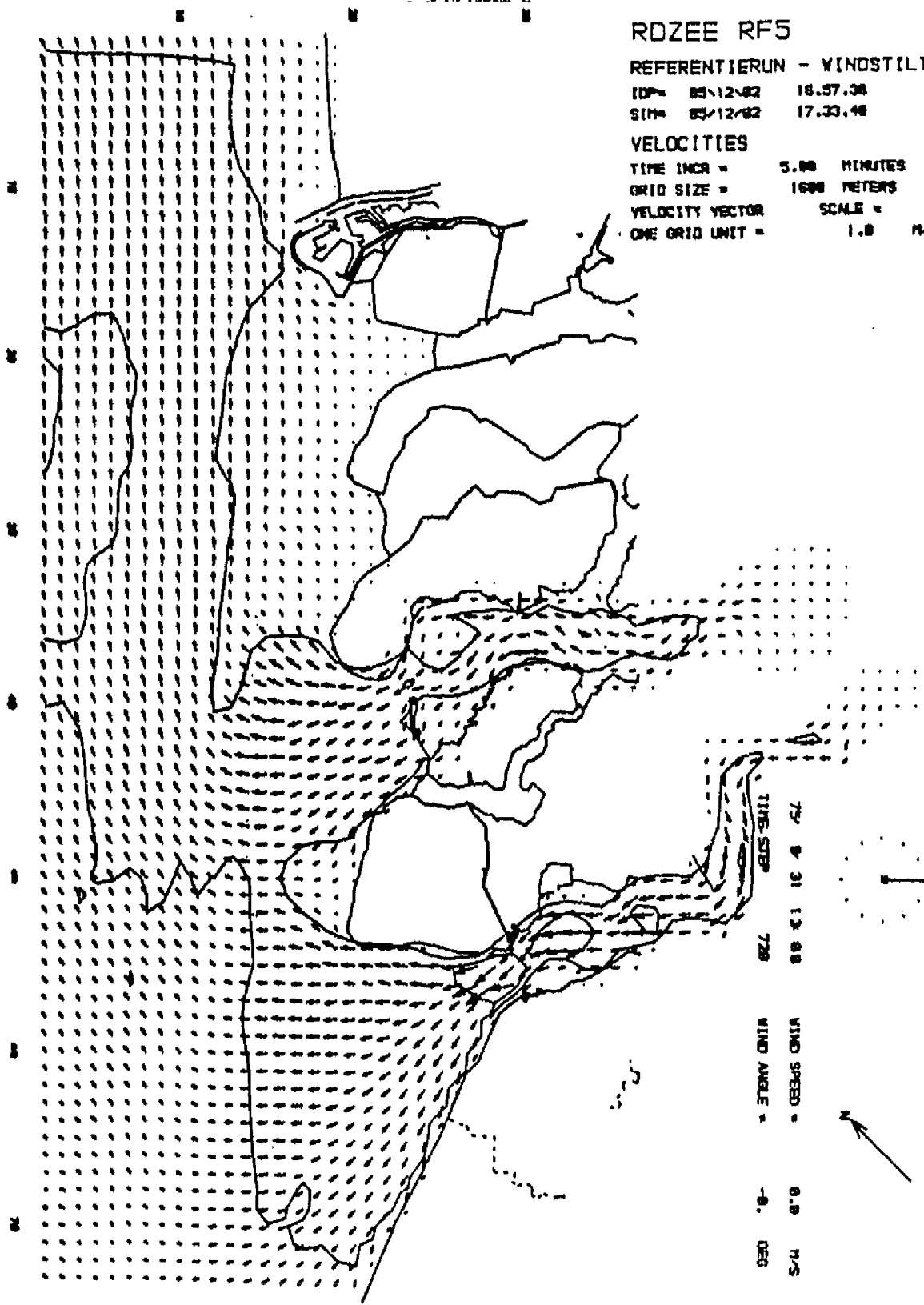
ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC

TIME STEP 75 0 31 14 00  
 WIND SPEED = 0.8 M/S  
 WIND ANGLE = -91 DEG



Stromingsveld - 1 uur na hoogwater





RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

IDP= 83/12/82 18.57.38

SIN= 83/12/82 17.33.48

VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC

TIME STEP 75 0 31 13 08  
729  
WIND ANGLE = 0.0 DEG  
WIND SPEED = 0.0 M/S



Stromingsveld - 2 uur na hoogwater

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 15

A4

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINSTUITE

LOP= 85/12/92 16.57.36

SIP= 85/12/92 17.33.48

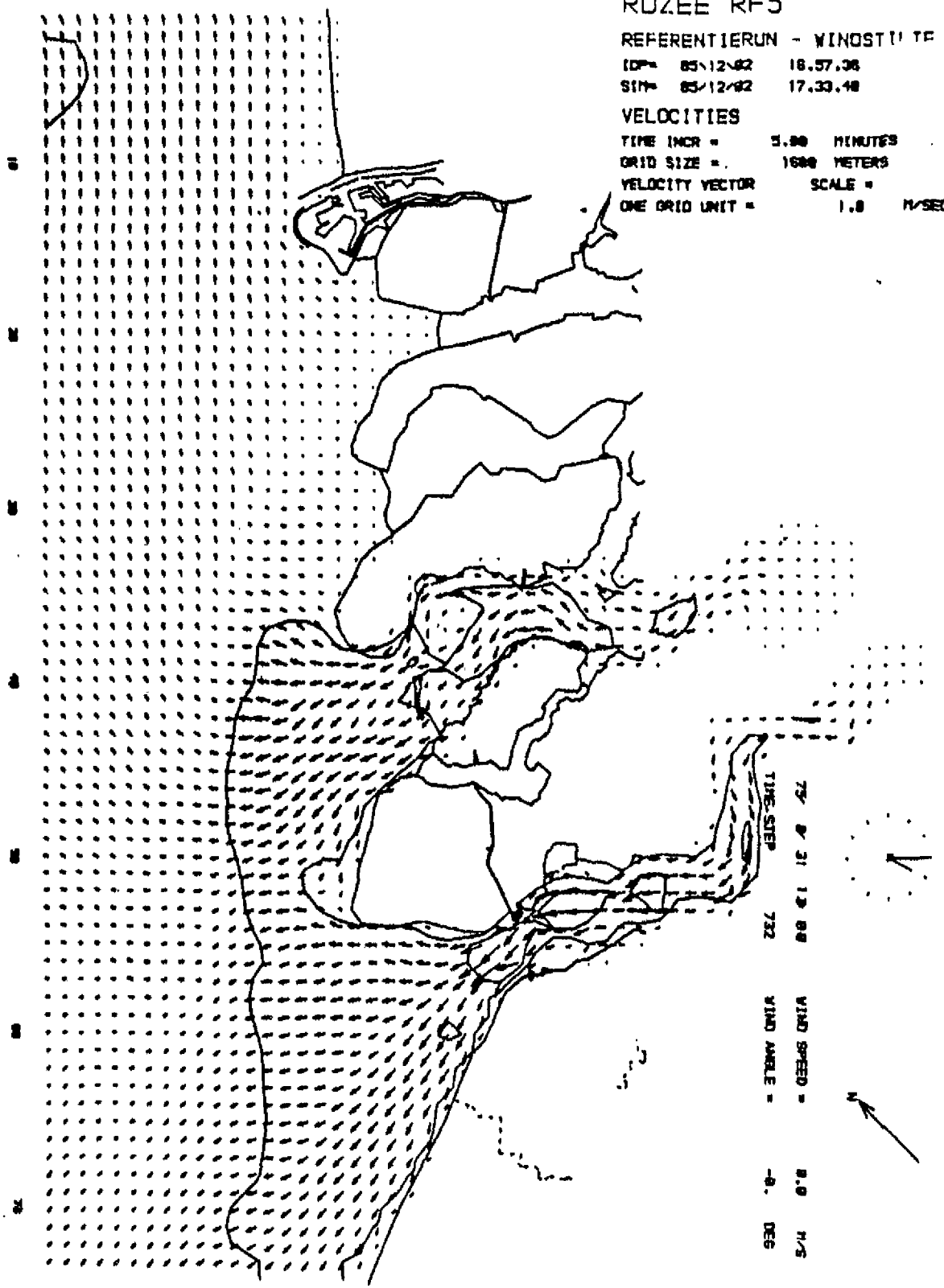
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



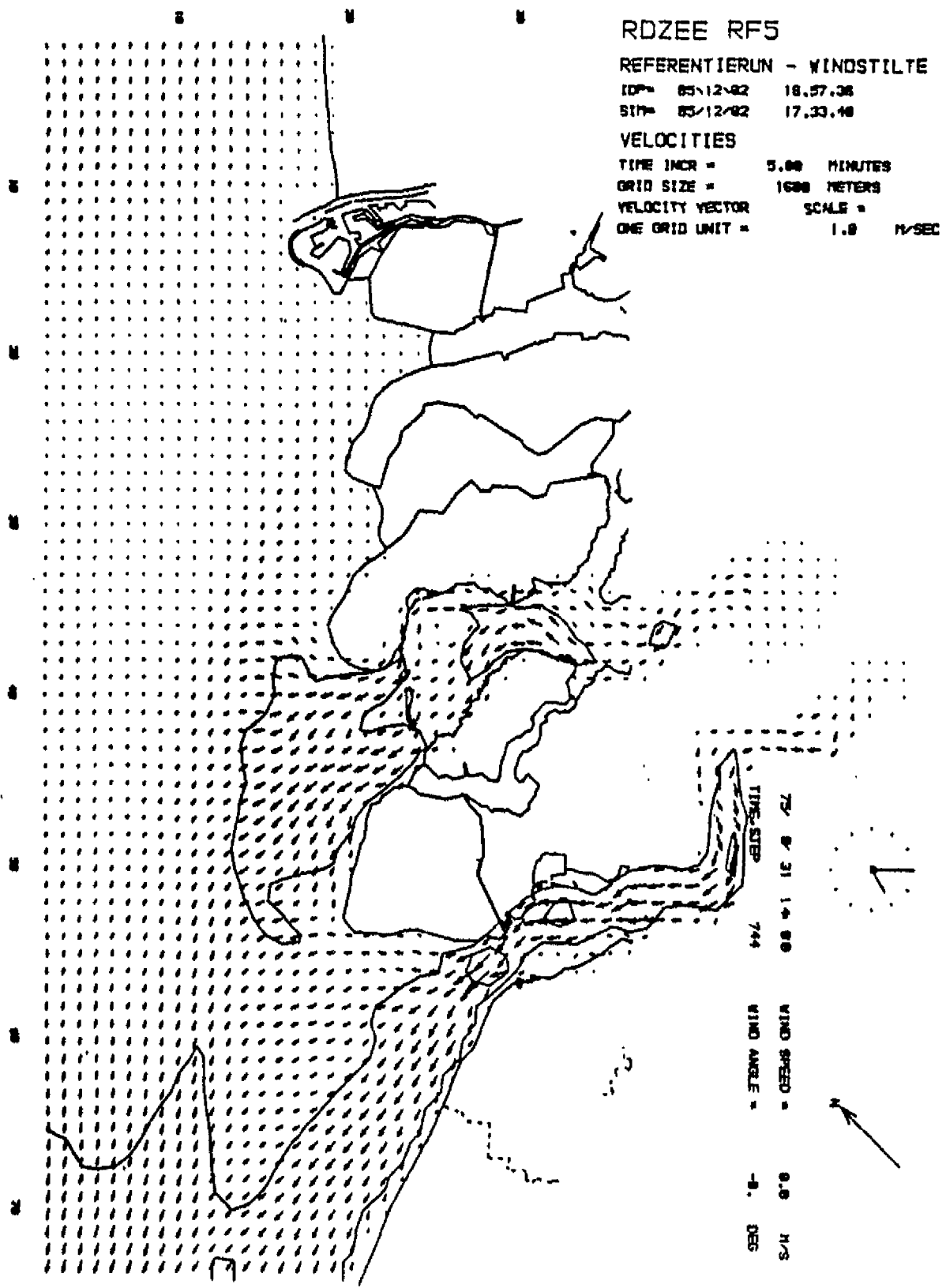
Stromingsveld - 3 uur na hoogwater

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 16



Stromingsveld - 4 uur na hoogwater

A4

ROZEE RF5

REFERENTIERUN - WINOSTILTE

LOP= 05/12/82 18.57.38

SOP= 05/12/82 17.33.48

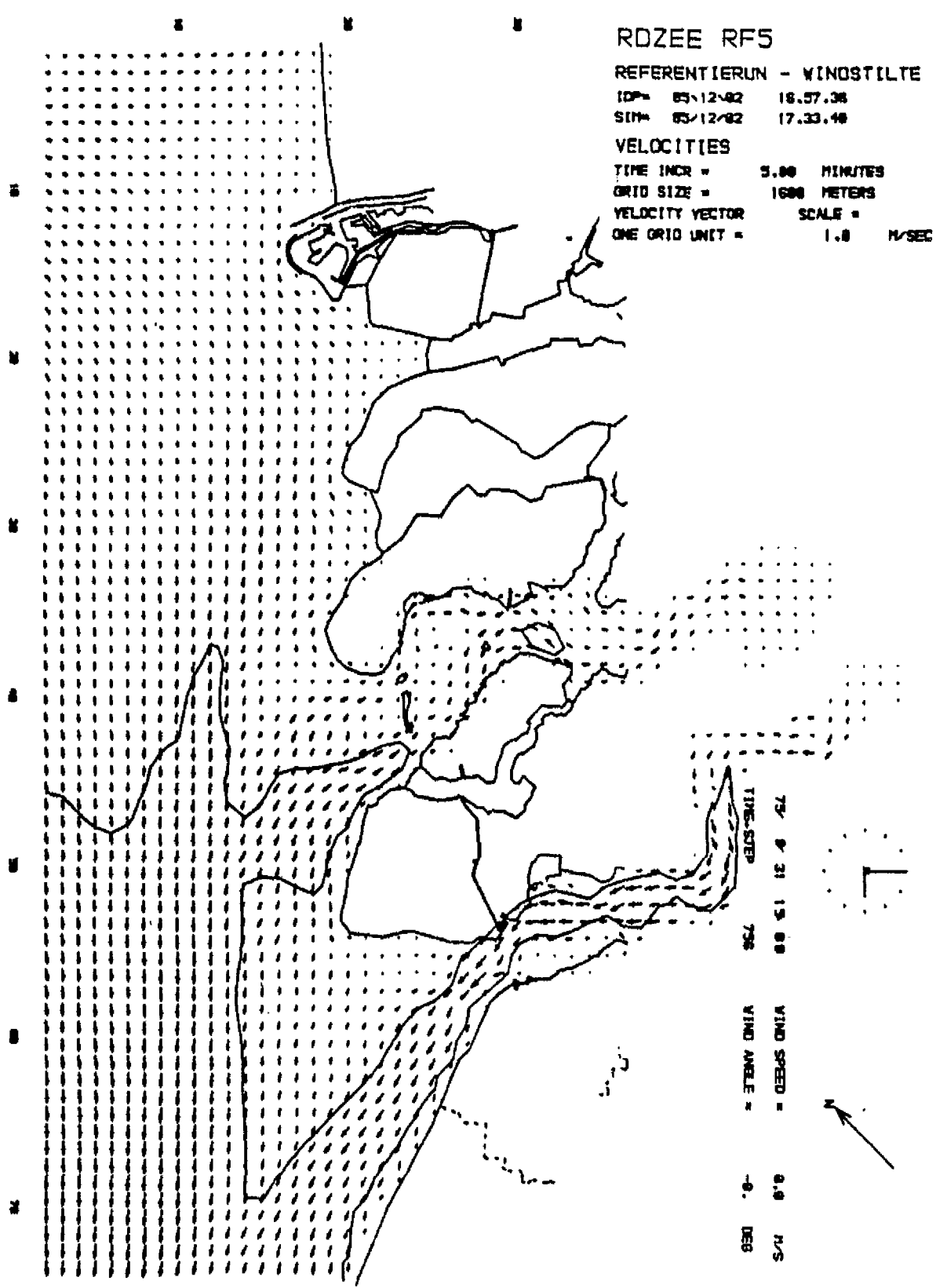
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME-STEP 756  
 757 4 31 15 00  
 WIND SPEED = 0.0 M/S  
 WIND ANGLE = -0. DEG

Stromingsveld - 5 uur na hoogwater

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

A4

fig. 18

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

OPN 85/12/82 16.57.38

SOPN 85/12/82 17.33.48

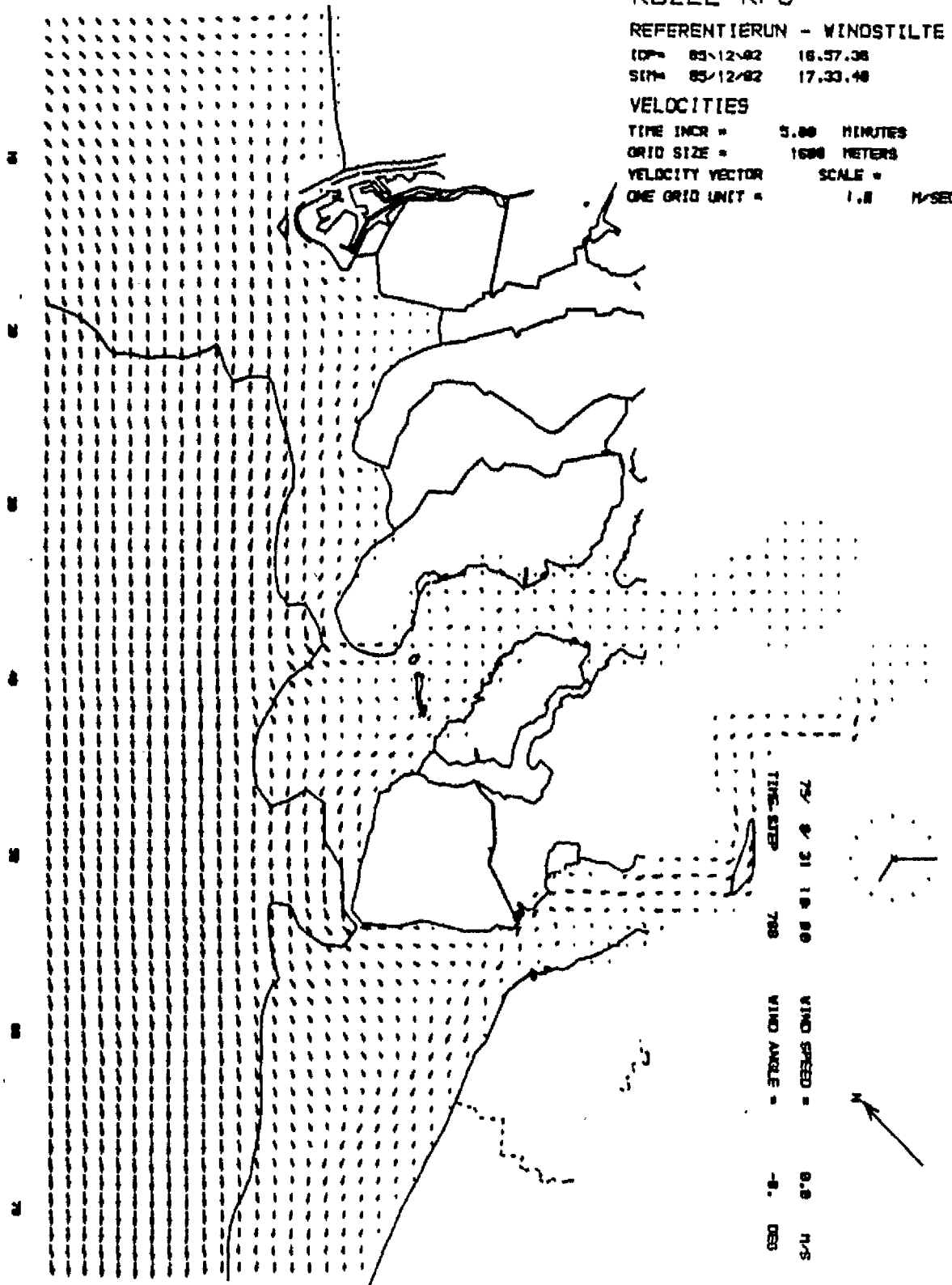
VELOCITIES

TIME INCR = 3.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP = 75  
 31 18 00  
 700

VELOCITY VECTOR SCALE = 0.5  
 M/SEC

Stromingsveld - 6 uur na hoogwater

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 19

A4

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

10P= 05/12/82 16.57.30

517P= 05/12/82 17.33.40

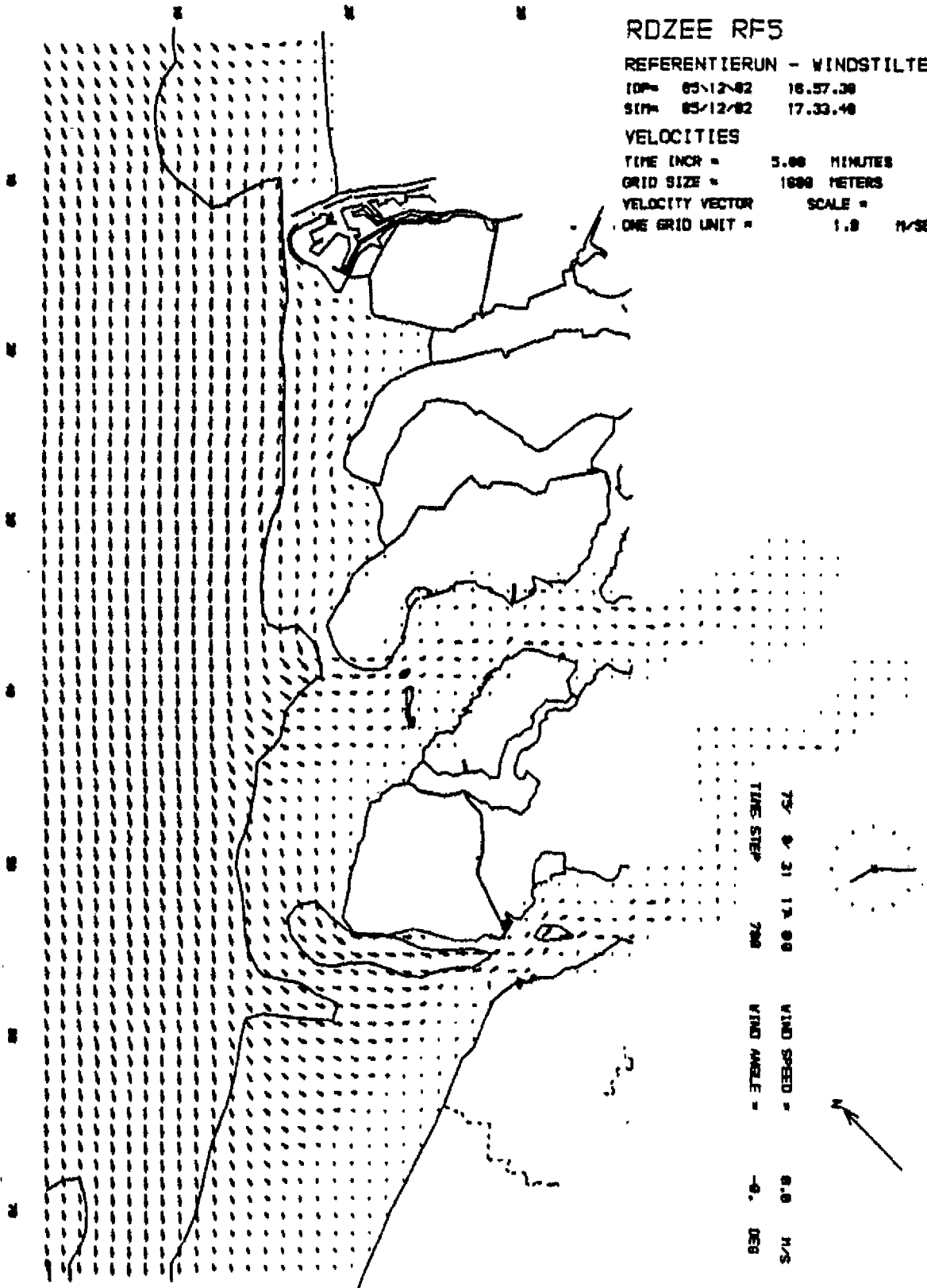
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1000 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP = 700

WIND SPEED = 0.0 M/S  
WIND ANGLE = -9. DEG



Stromingsveld - 7 uur na hoogwater

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 20

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

10<sup>h</sup> 05/12/02 16.57.36

11<sup>h</sup> 05/12/02 17.33.46

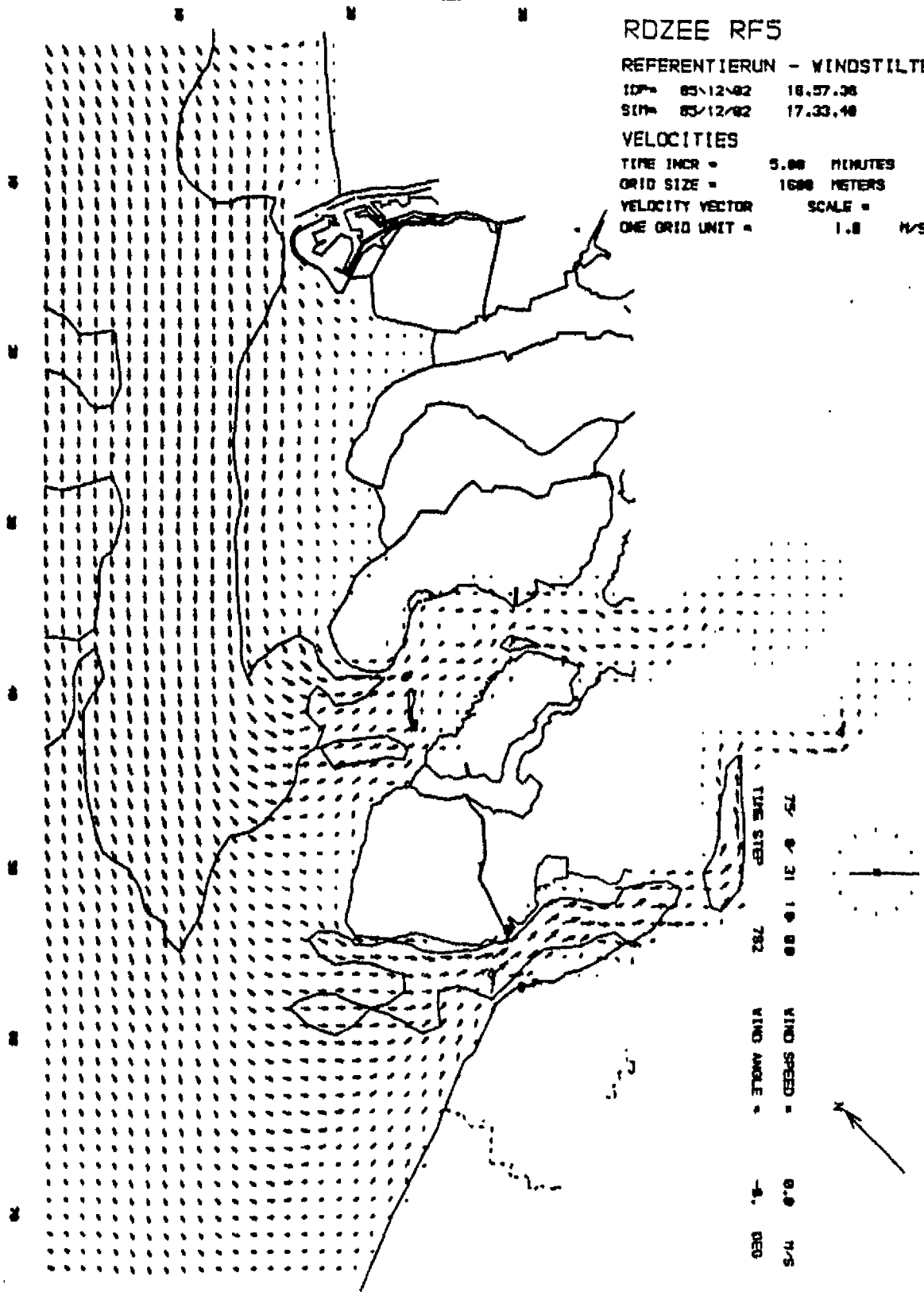
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



Stromingsveld - 8 uur na hoogwater

A4

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

IDP= 85/12/82 16.57.38

SIP= 85/12/82 17.33.48

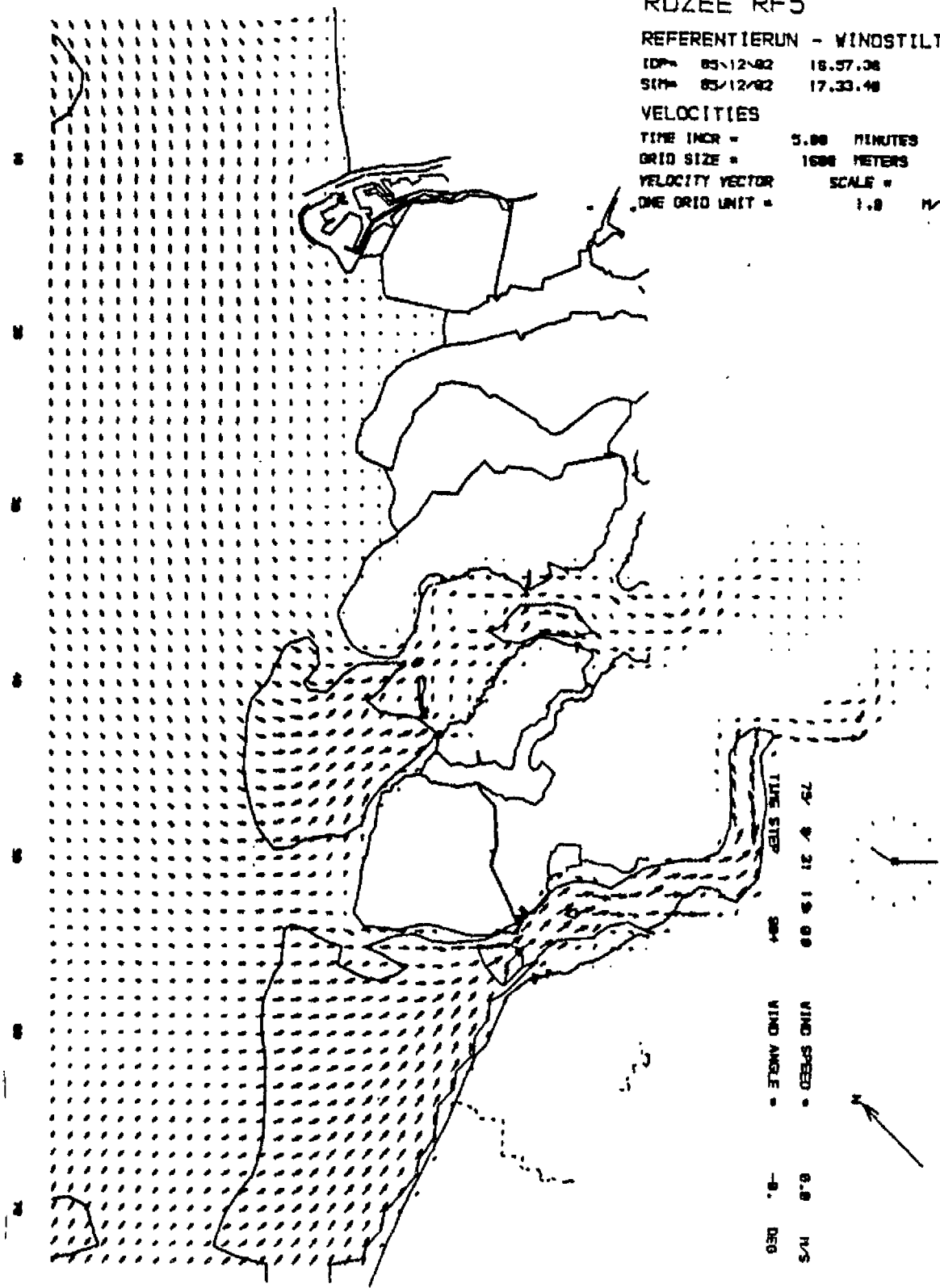
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP 79 9 21 19 00  
 904  
 WIND SPEED = 0.8 M/S  
 WIND ANGLE = -8. DEG

Stromingsveld - 9 uur na hoogwater

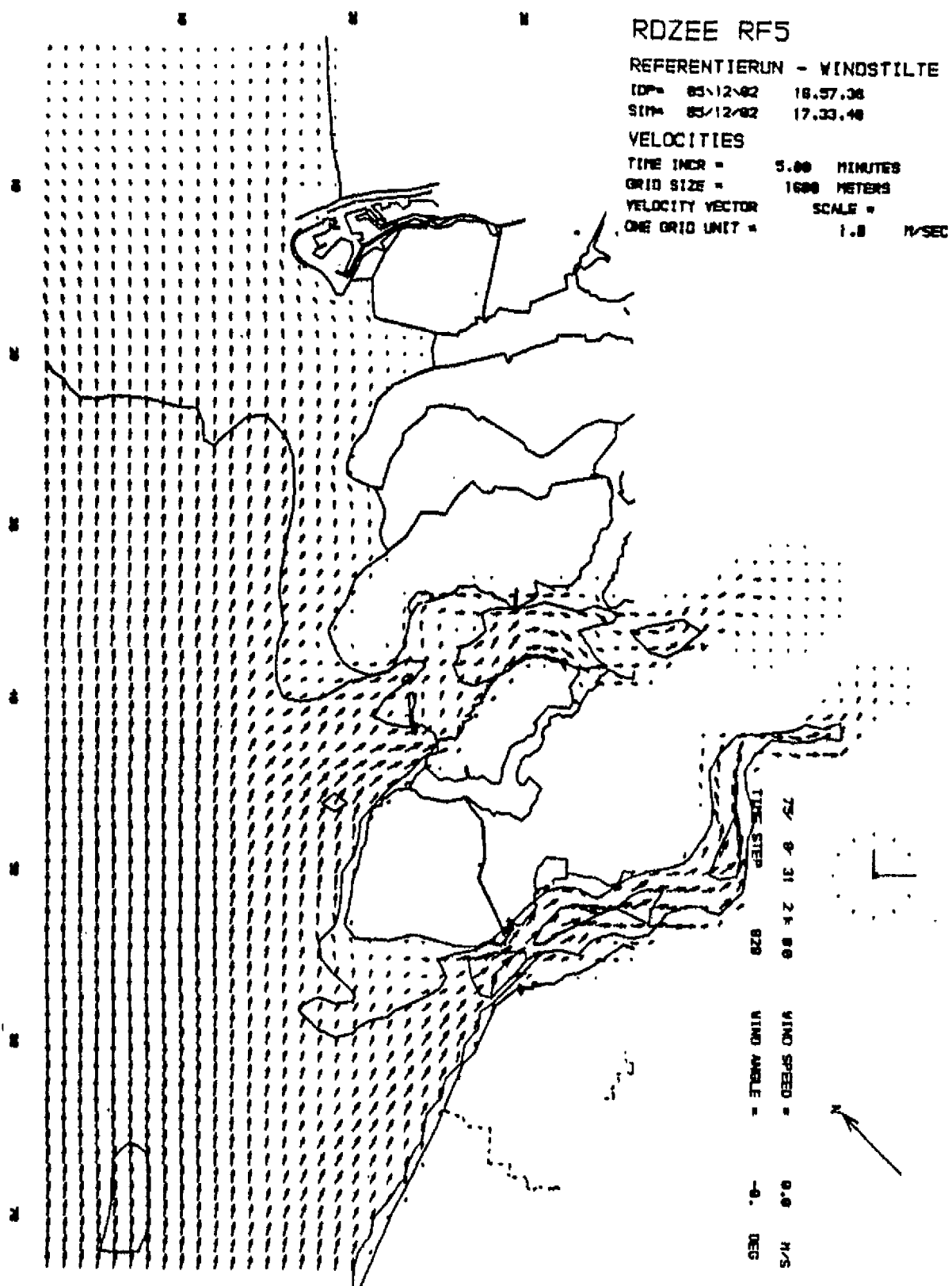
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 22

A4





RDZEE RF5  
 REFERENTIERUN - WINOSTILTE  
 IDP= 85/12/82 16.57.38  
 SIP= 85/12/82 17.33.48  
 VELOCITIES  
 TIME INCR = 5.00 MINUTES  
 GRID SIZE = 1600 METERS  
 VELOCITY VECTOR SCALE =  
 ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC

TIME STEP 0 31 24 00  
 020  
 WIND SPEED = 0.0 M/S  
 WIND ANGLE = -9. DEG

Stromingsveld - 11 uur na hoogwater

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig. 24

RDZEE RF5

REFERENTIERUN - WINDSTILTE

IDP= 85/12/92 18.37.36

SIM= 85/12/92 17.33.48

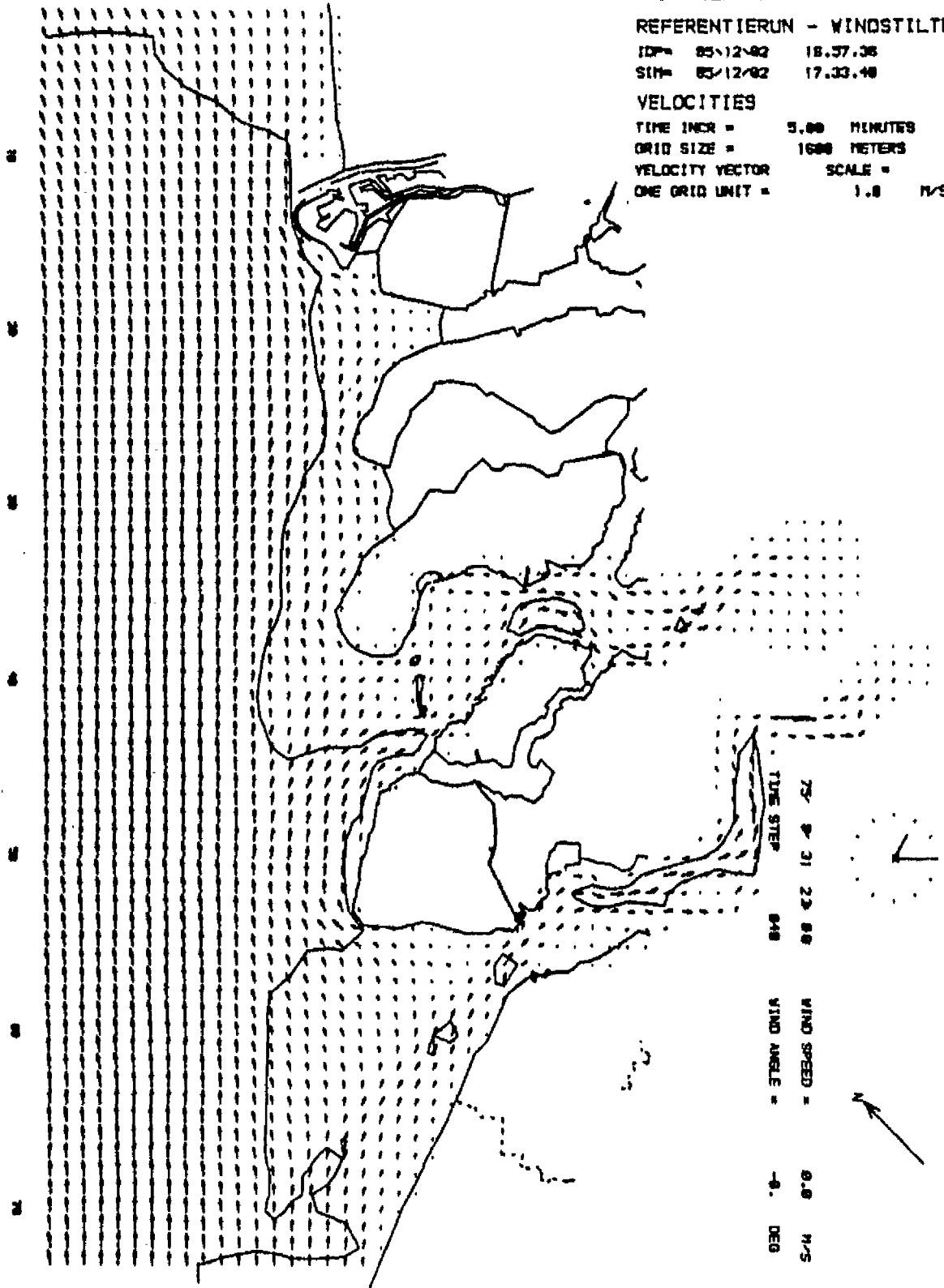
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

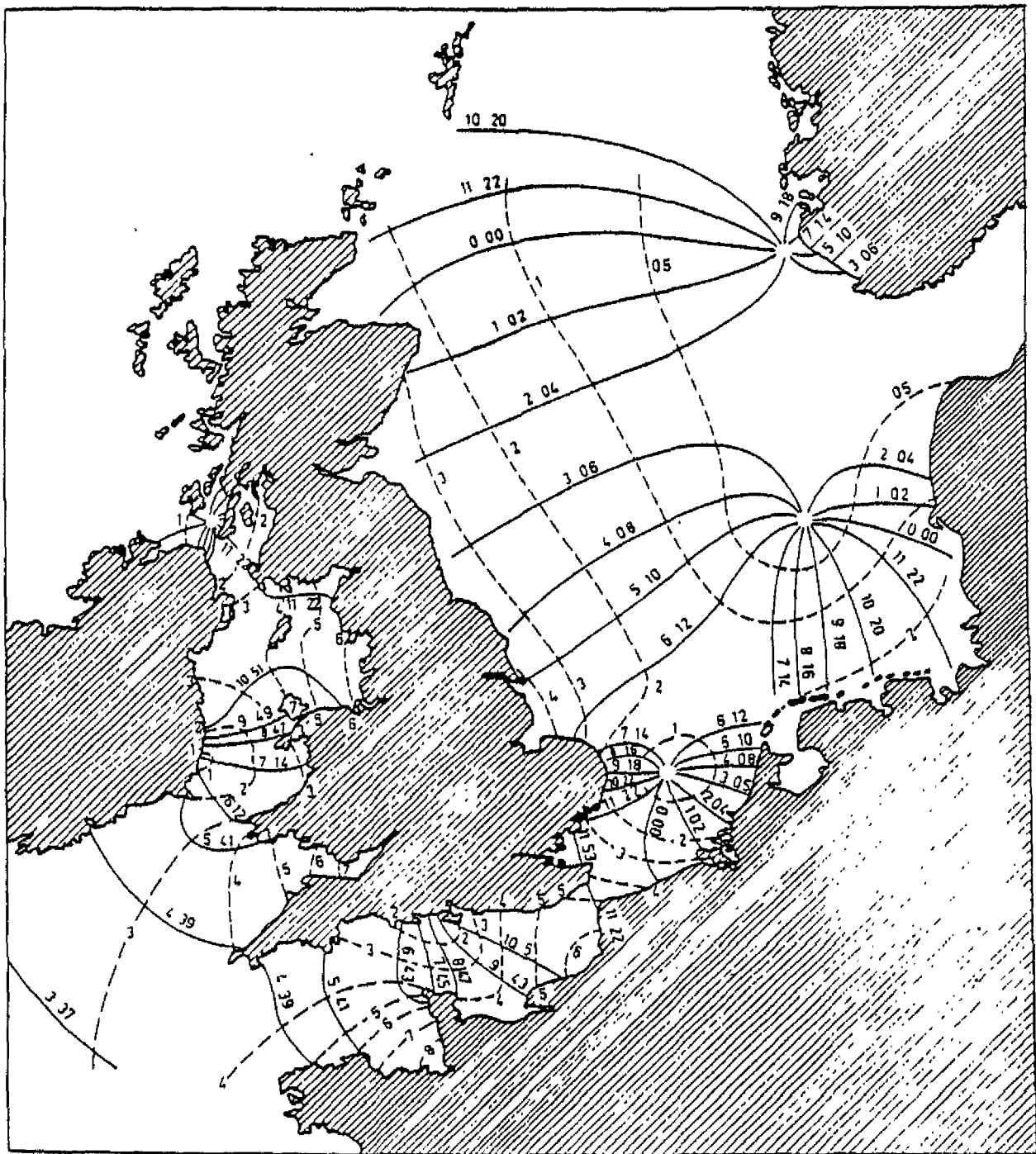
VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



Stromingsveld - 12 uur na hoogwater

A4



Lijnen van gelijk faseverschil en gelijke (dubbele) amplitude van de getijcomponent M2 voor de Noordzee

A4

RDZEE N05

ROZEBN05 , NOORD-OOSTENWIND, WINDKRACHT 5 (ALS RFS)

IDP= 05/10/09 13.48.36

SIT= 05/10/09 18.37.18

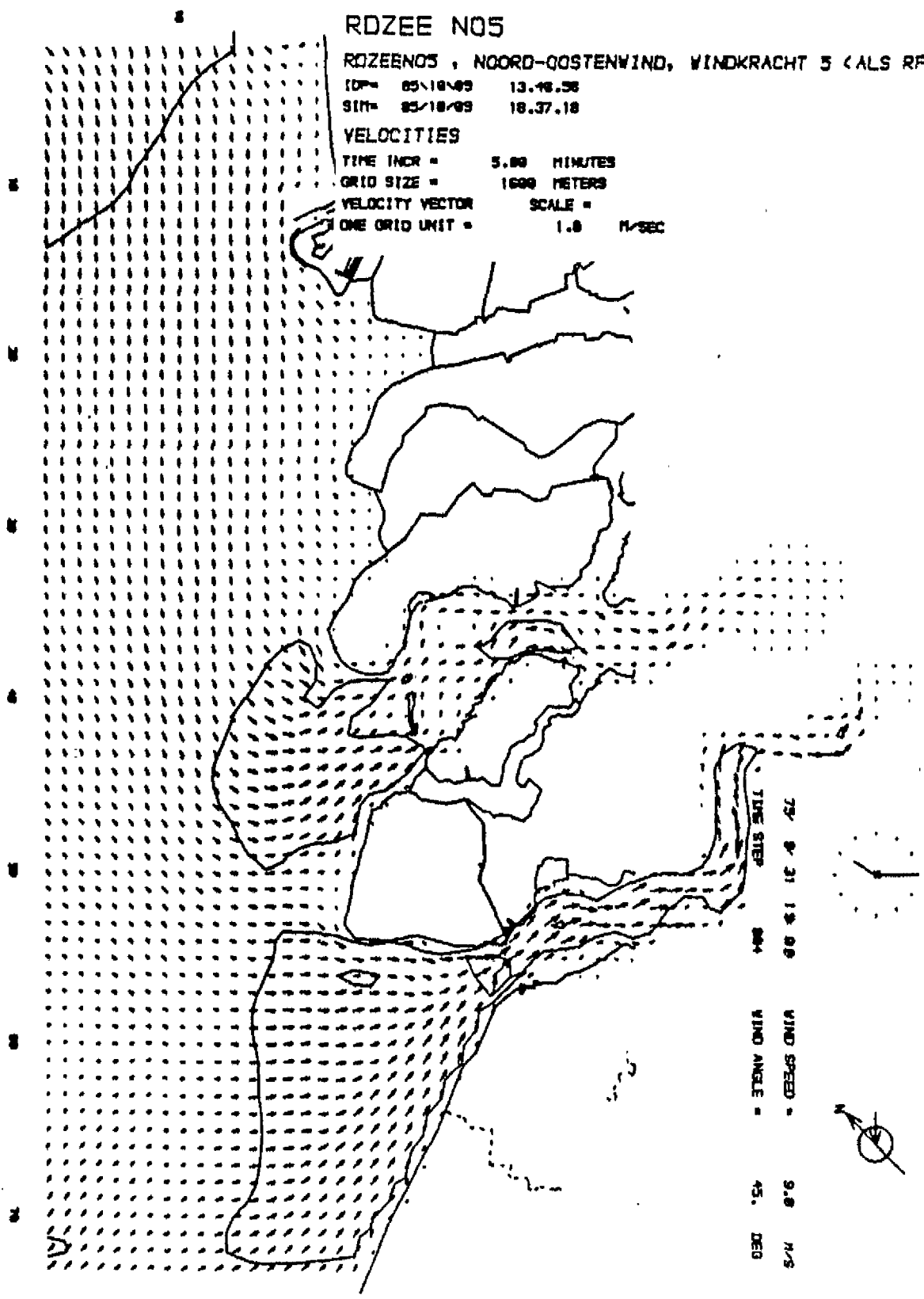
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP 79 0 31 18 00  
WIND SPEED = 9.0 M/S  
WIND ANGLE = 45 DEG



Stromingsveld 9 uur na hoogwater - situatie met noordoostenwind

RDZEE WE4

RDZEEWE4, WESTENWIND KRACHT 4 (ALS RF4)

IDP= 05/10/67 10.51.25

SIT= 05/10/67 10.47.35

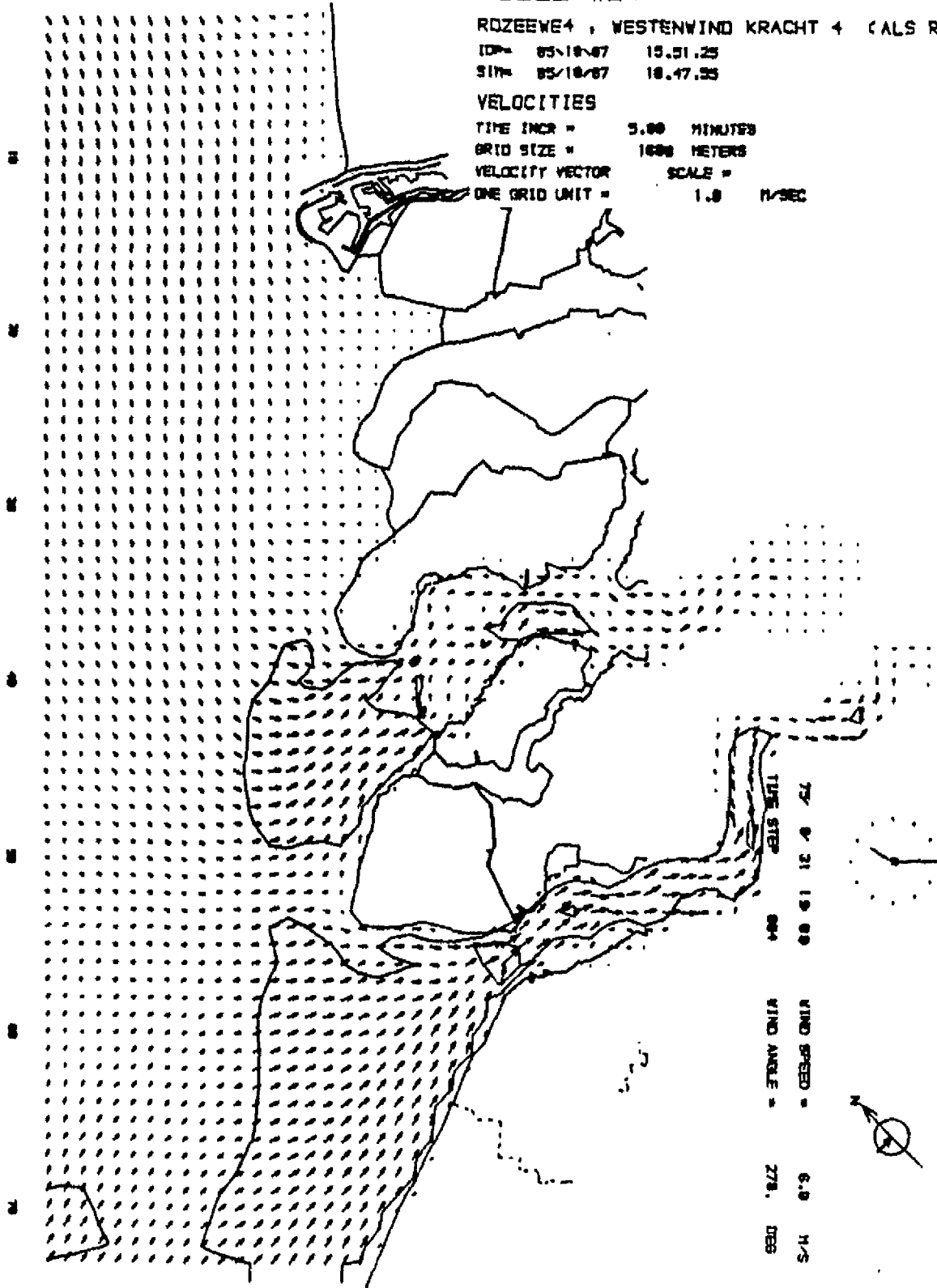
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1000 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP = 5.00 MIN  
 TIME = 09:31:15.00  
 WIND SPEED = 6.0 M/S  
 WIND ANGLE = 270 DEG



Stromingsveld 9 uur na hoogwater - situatie met westenwind

A4

RDZEE NW4

RDZEENW4 ,NOORD-WESTEN WINDKRACHT 5 (ALS RF4)

IDP= 03/18/87 13.51.42

SIP= 03/18/87 13.27.30

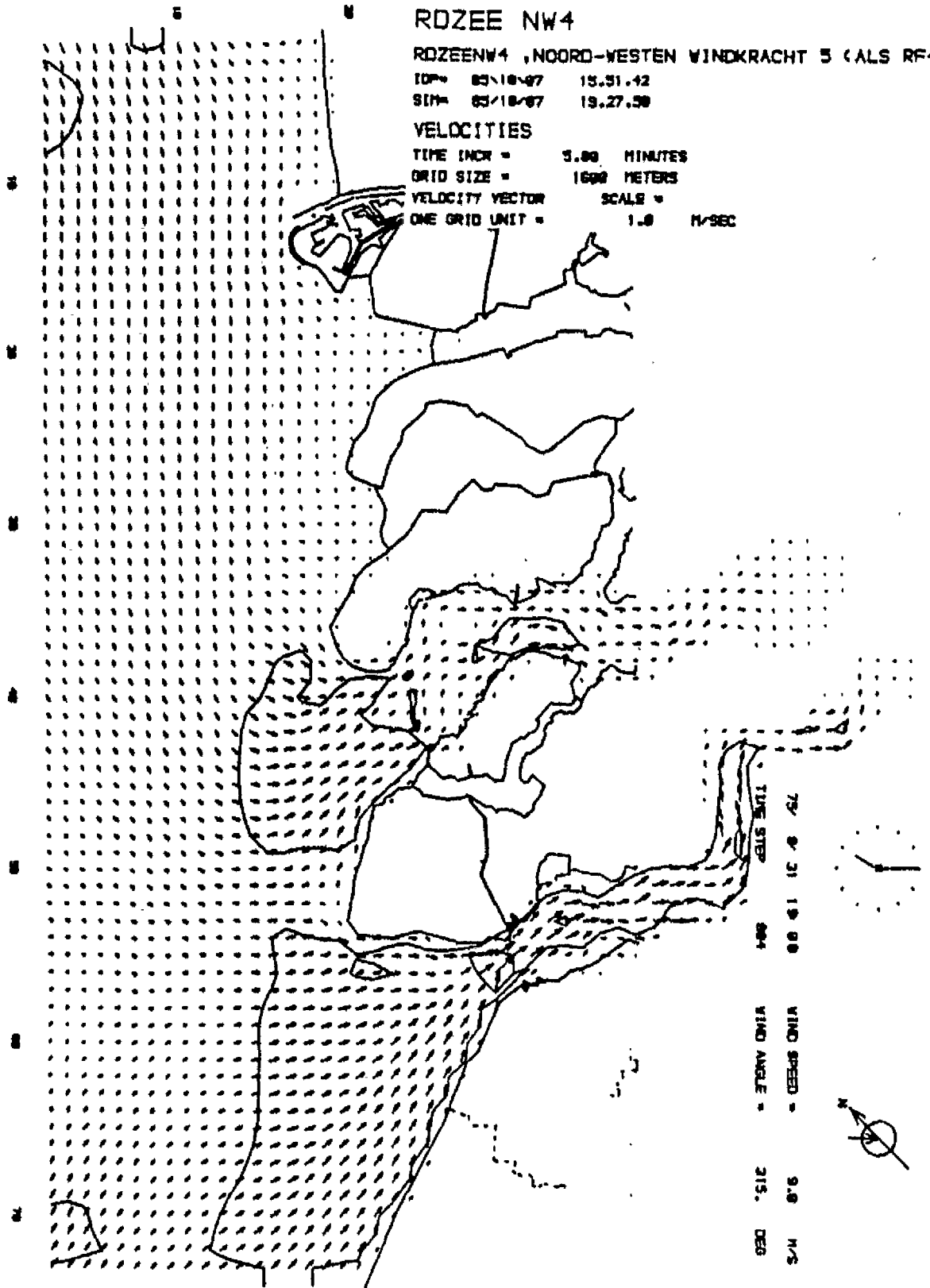
VELOCITIES

TIME INCR = 3.00 MINUTES

GRID SIZE = 1600 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC



TIME STEP 79 0 31 19 00  
 004  
 WIND SPEED = 3.0 M/S  
 WIND ANGLE = 315 DEG



Stromingsveld 9 uur na hoogwater - situatie met noordwestenwind

A4

ROZEE ZW4

ROZEEZV4 , ZUID-WESTEN WIND KRACHT 4 (ALS RF4)

IDP= 05/10/87 13.31.33

SIN= 05/10/87 13.07.56

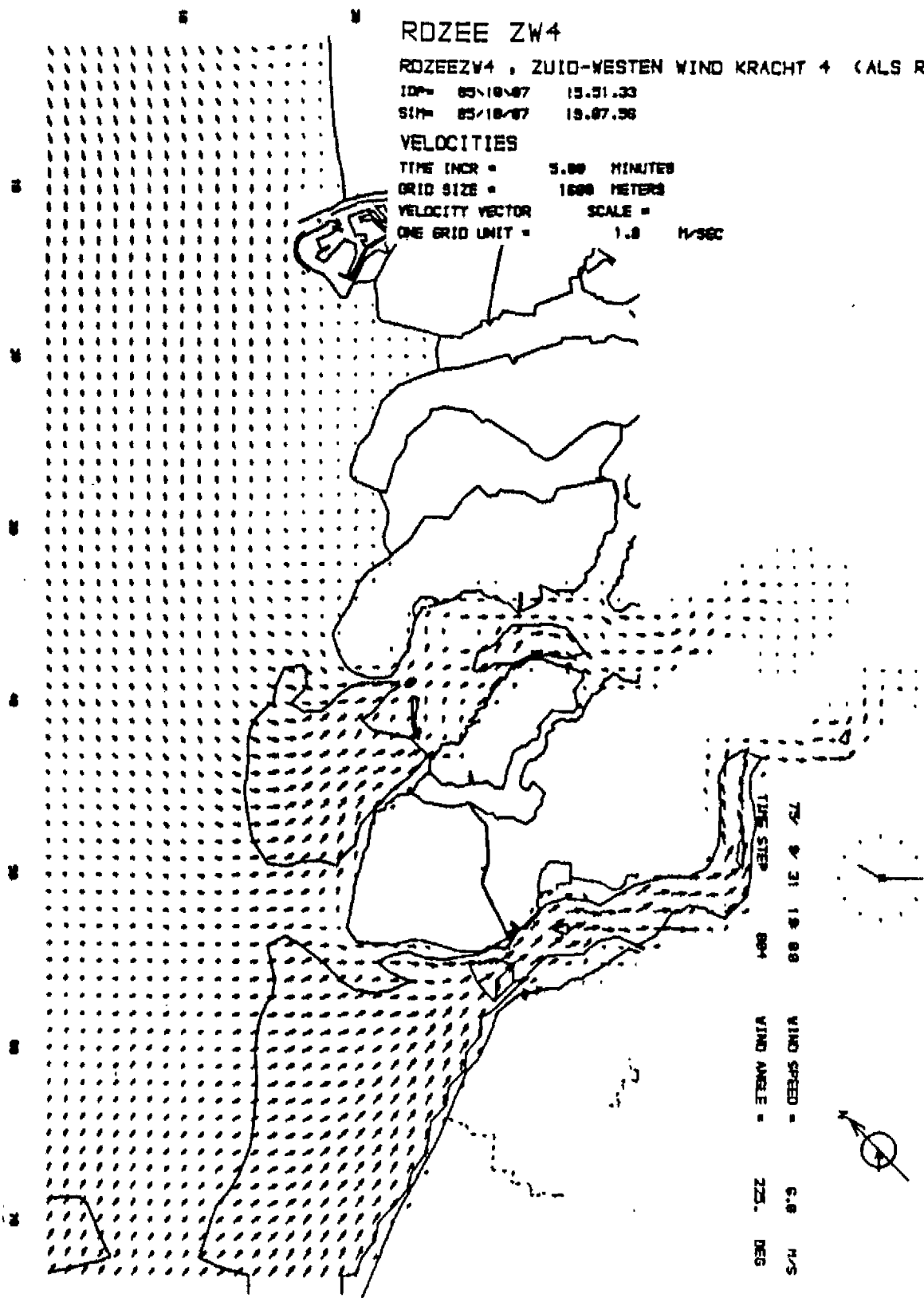
VELOCITIES

TIME INCR = 5.00 MINUTES

GRID SIZE = 1000 METERS

VELOCITY VECTOR SCALE =

ONE GRID UNIT = 1.0 M/SEC

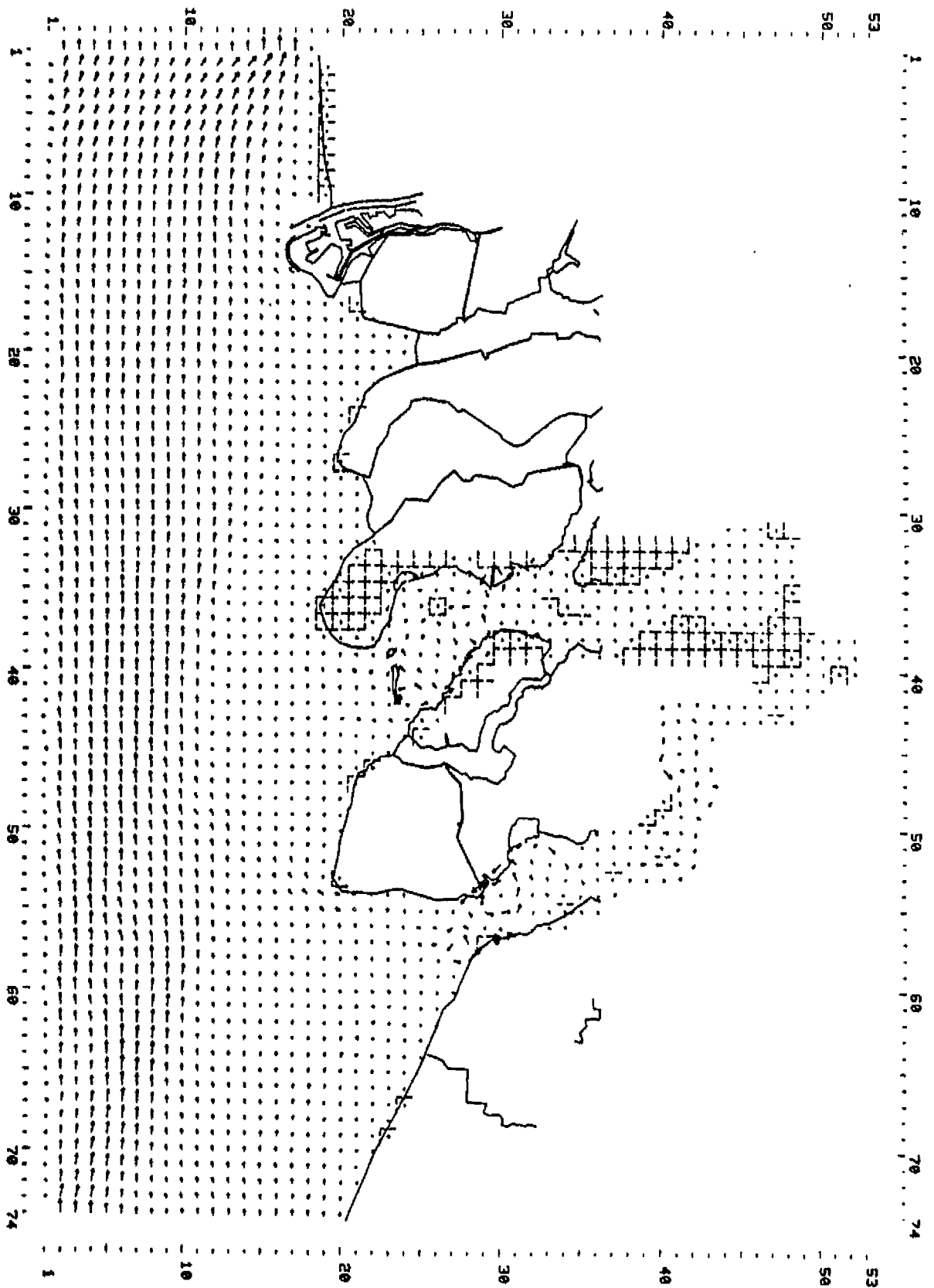


TIME STEP = 5.00 MIN  
 004  
 WIND SPEED = 6.8 M/S  
 WIND ANGLE = 225. DEG



Stromingsveld 9 uur na hoogwater - situatie met zuidwestenwind

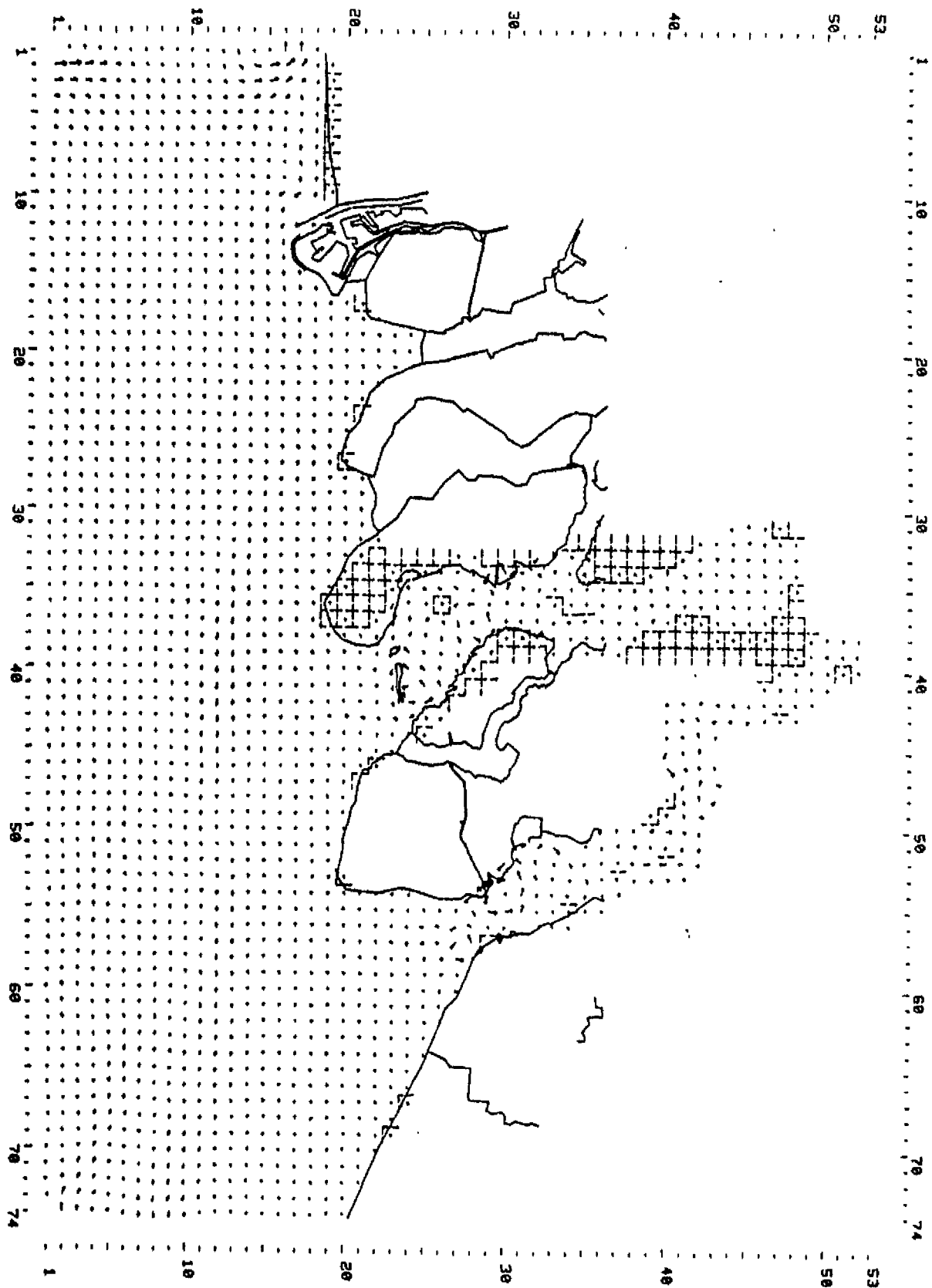
A4



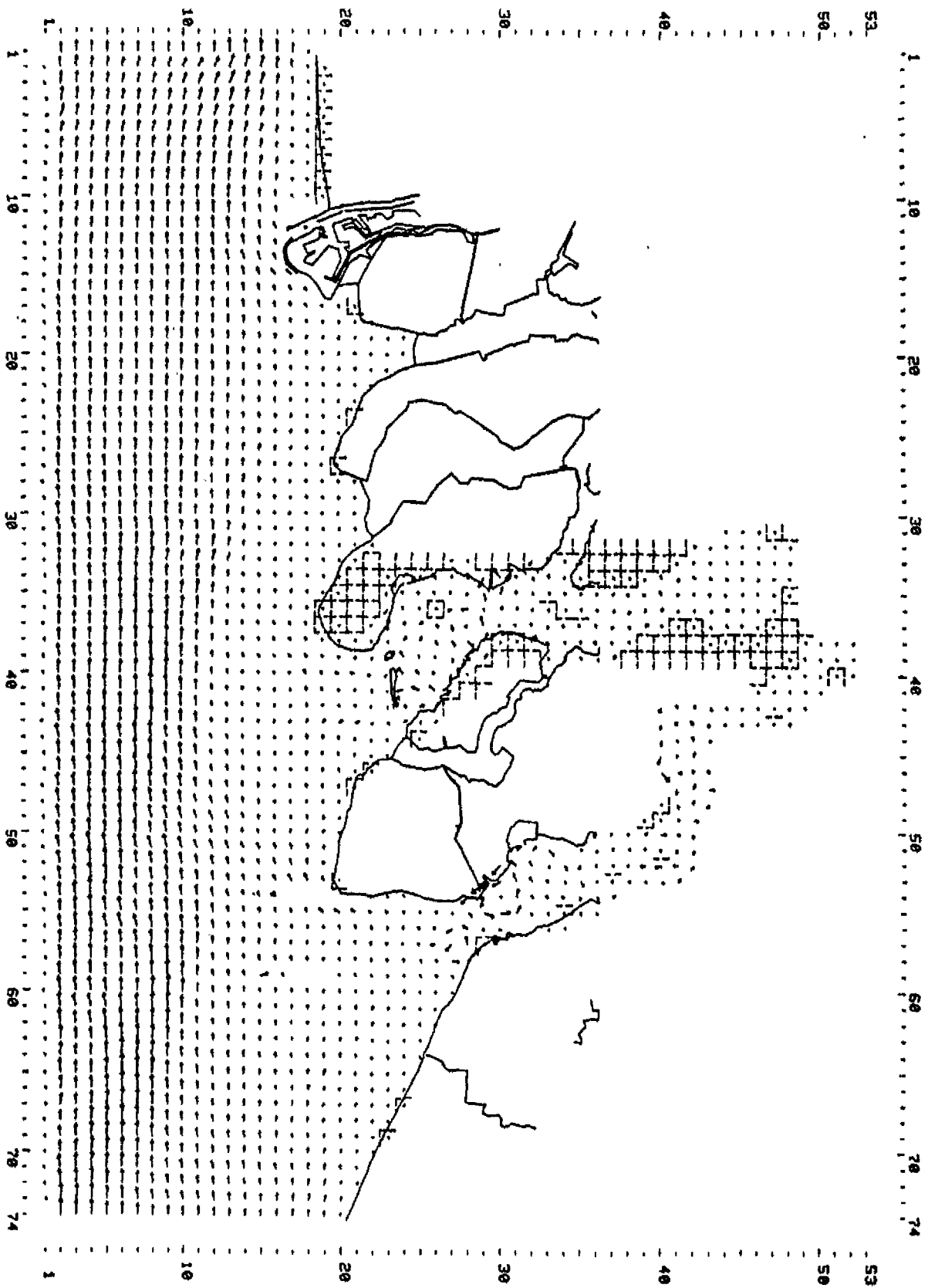
Reststroming voor de referentiesituatie -  
 restdebiëten  
 (1 m<sup>2</sup>/s = 0.25 roosterafstanden)

A4

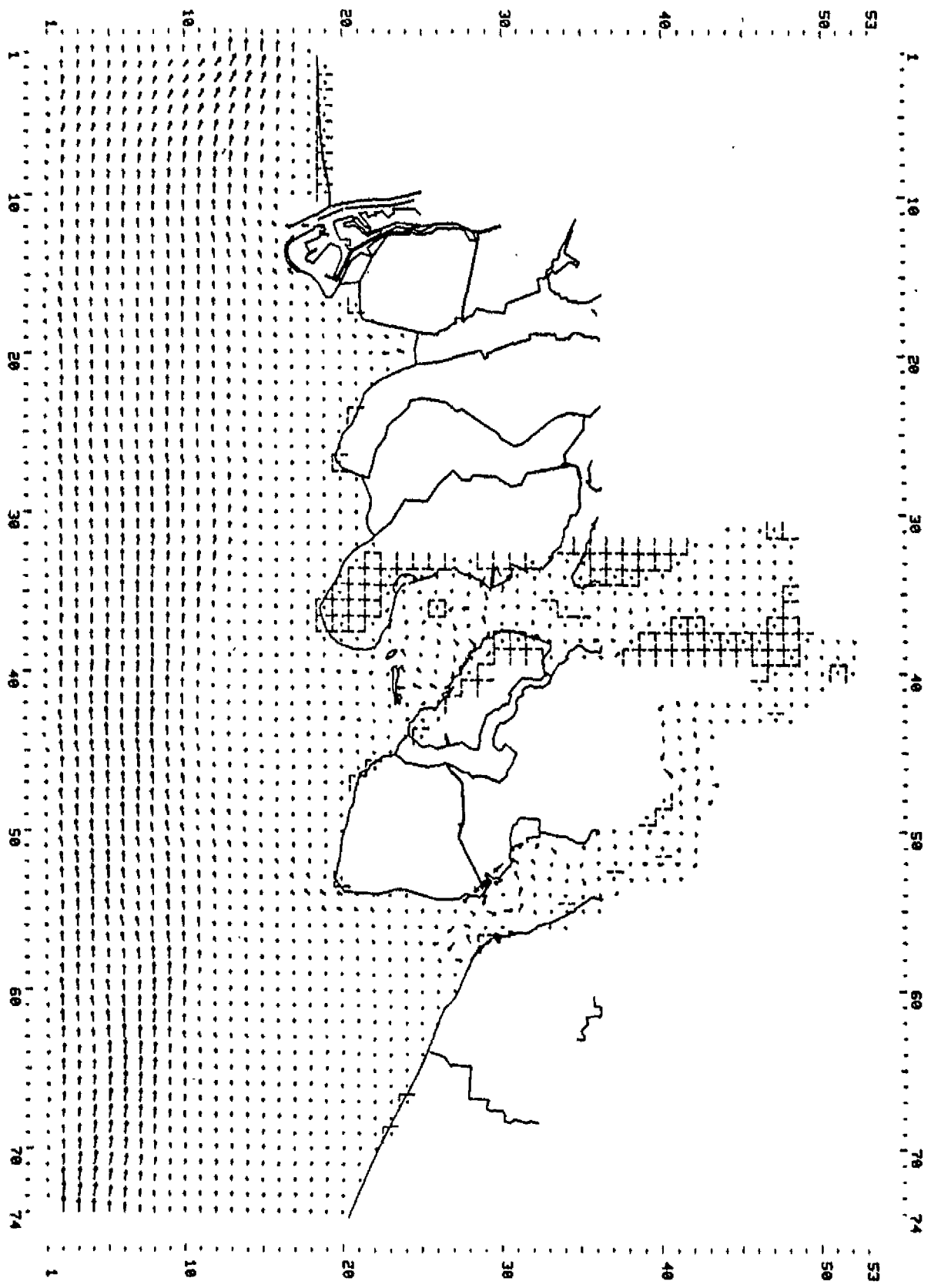




Reststroming voor de situatie met noordoostenwind -  
 restdebieten  
 (1 m<sup>2</sup>/s = 0.25 roosterafstanden)

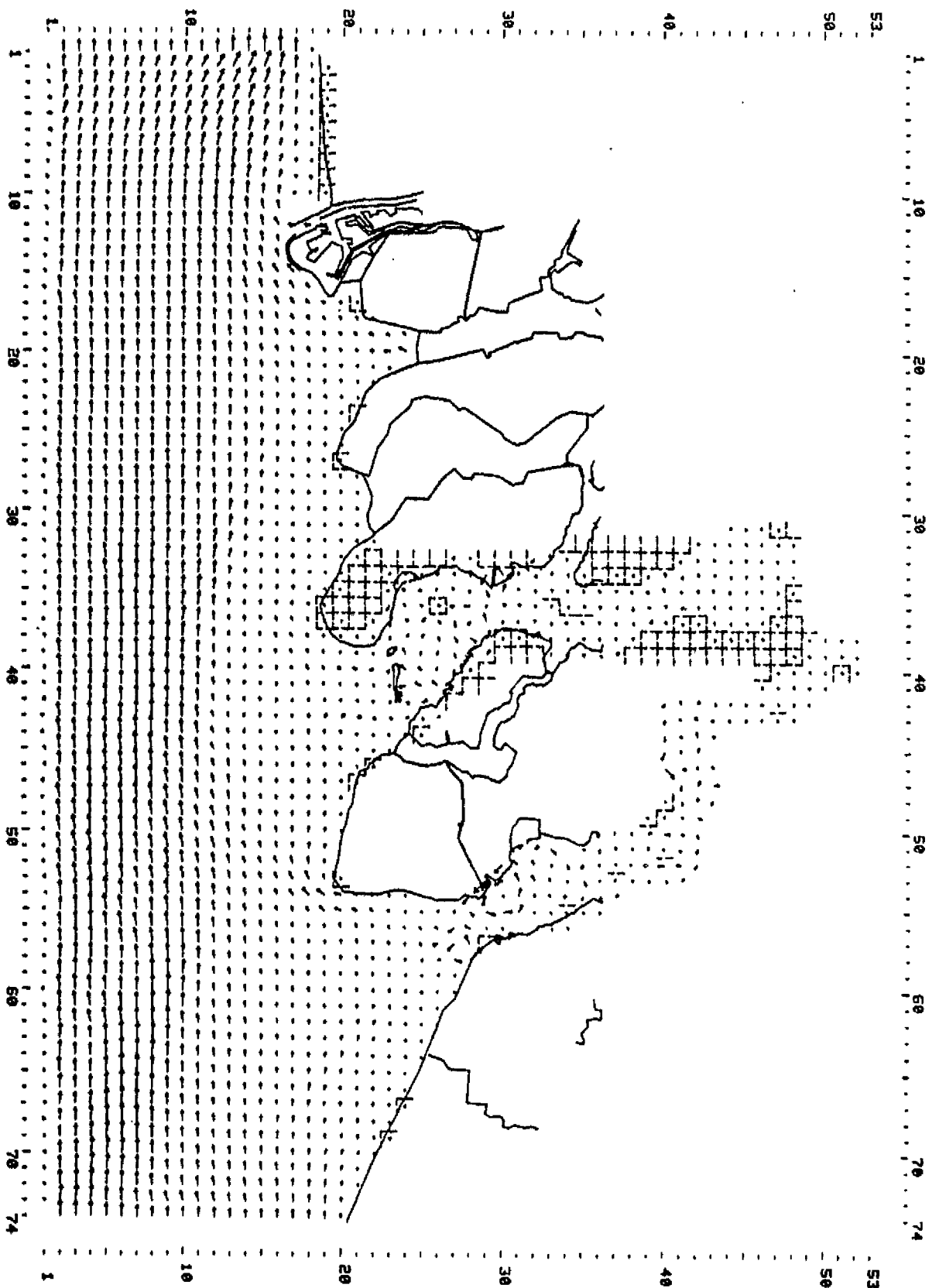


Reststroming voor de situatie met westenwind -  
 restdebieten  
 (1 m<sup>2</sup>/s = 0.25 roosterafstanden)



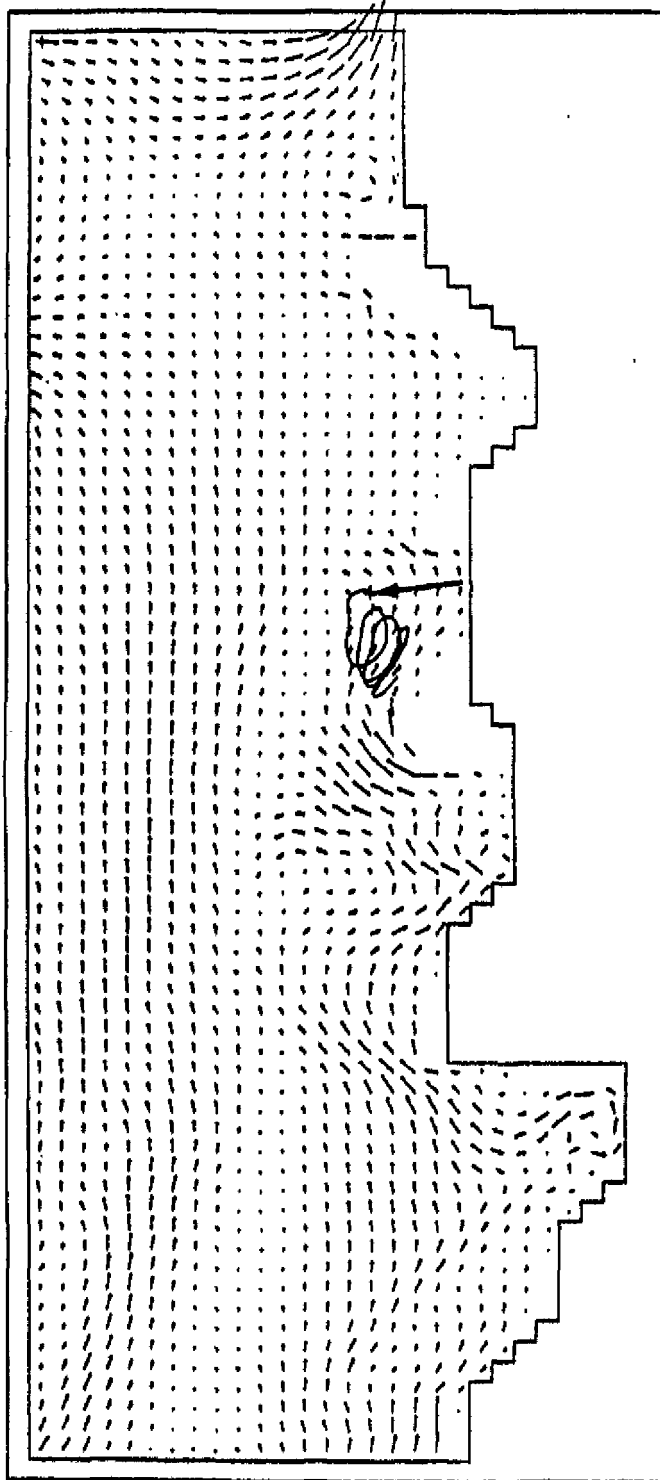
Reststroming voor de situatie met noordwestenwind -  
 restdebieten  
 (1 m2/s = 0.25 roosterafstanden)

A4



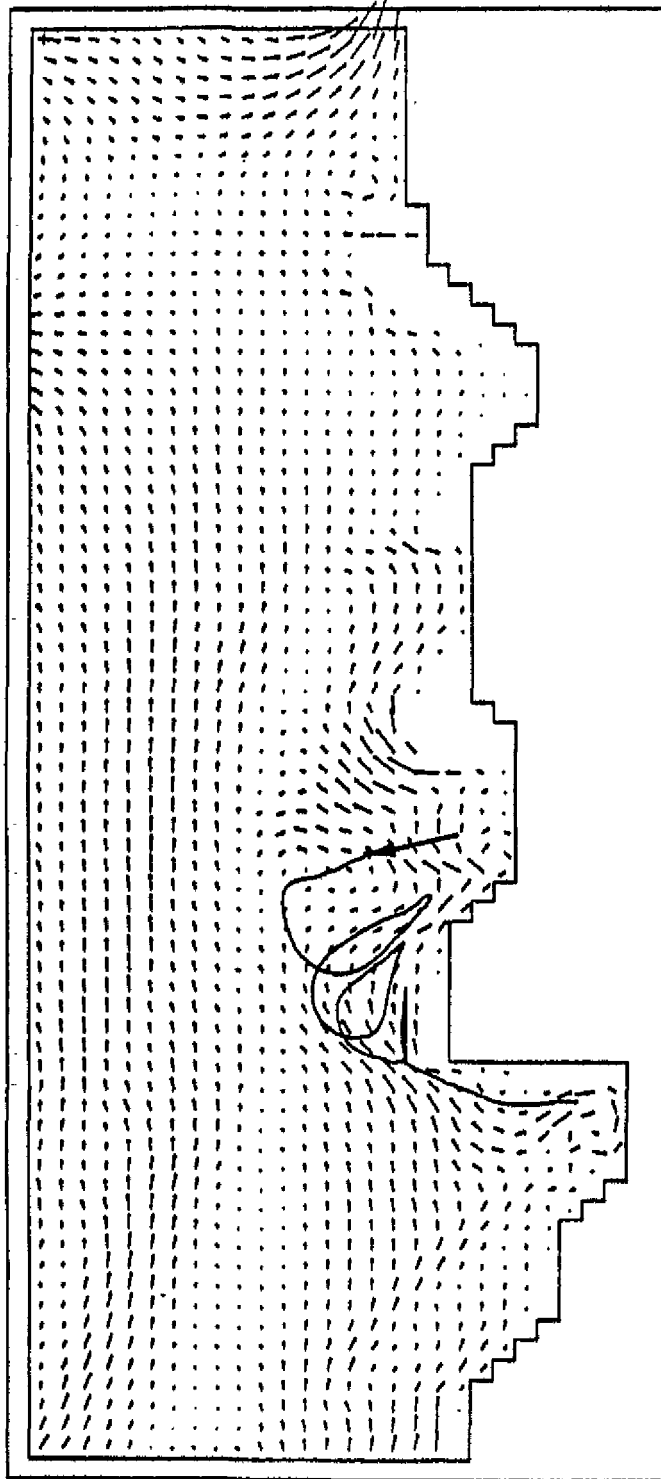
Reststroming voor de situatie met zuidwestenwind -  
 restdebieten  
 (1 m<sup>2</sup>/s = 0.25 roosterafstanden)

A4



SNELHEDEN EN DEELTJES BANEN. ROZEE T04, GEMIDDELD GETIJ.  
WINDSTIL. PIJLLENTE WORDT IN VIER UUR AFGELEGD.

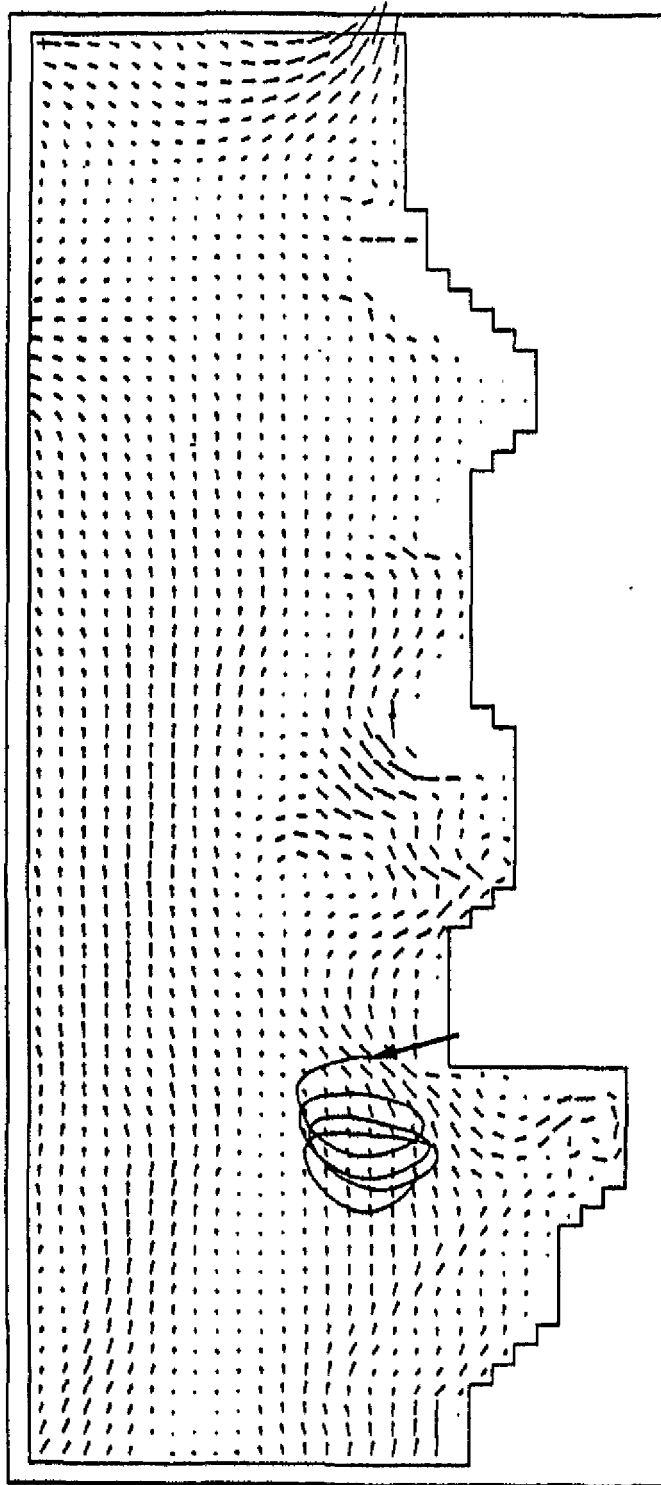
Baan van een deeltje in de getijstrooming  
Pijlen geven de restsnelheid weer



SNELHEDEN EN DEELTJES BANEN. ROZEE TO4. GEMIDDELD GETIJ.  
 WINDSTIL. PIJLLENTE WORDT IN VIER UUR AFGELEGD.

Baan van een deeltje in de getijstroming  
 Pijlen geven de restsnelheid weer

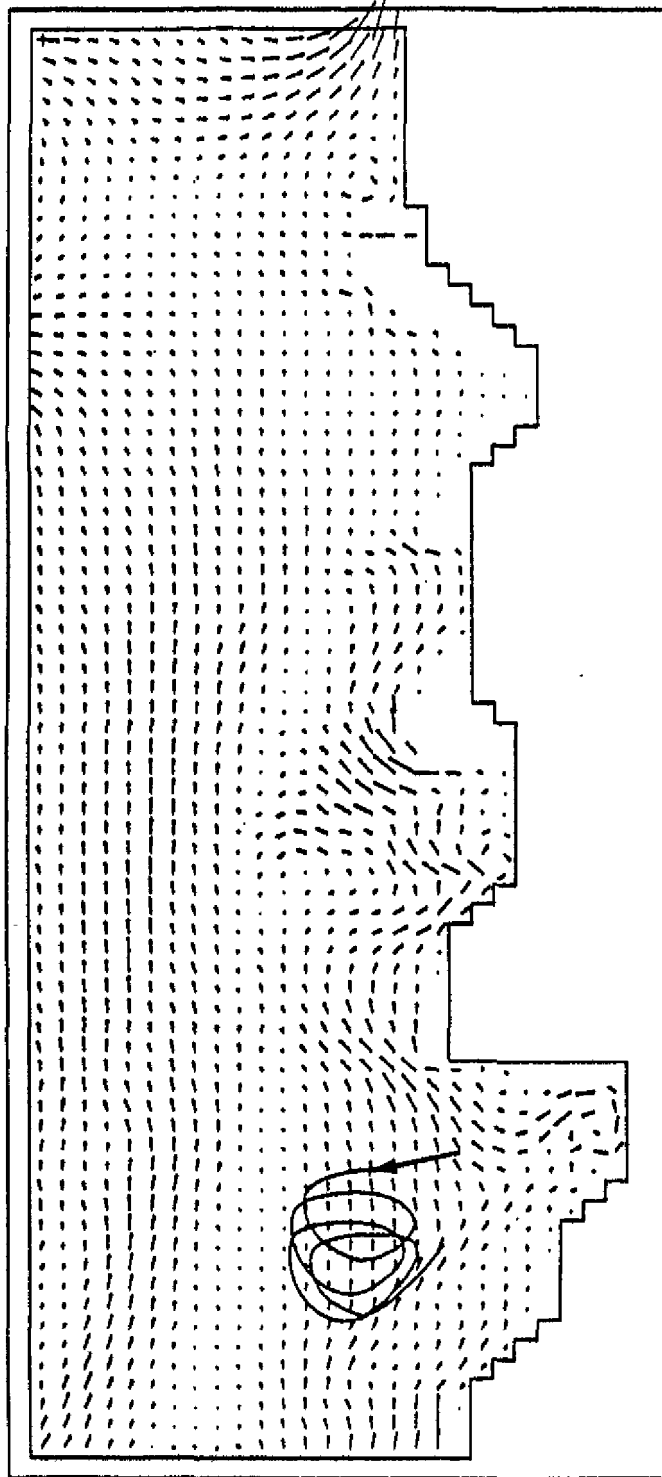
A4



SNELHEDEN EN DEELTJES BANEN. ROZEE T04. GEMIDDELD GETIJ.  
 WINDSTIL. PIJLLENGTE WORDT IN VIER UUR AFGELEGD.

Baan van een deeltje in de getijstrooming  
 Pijlen geven de restsnelheid weer

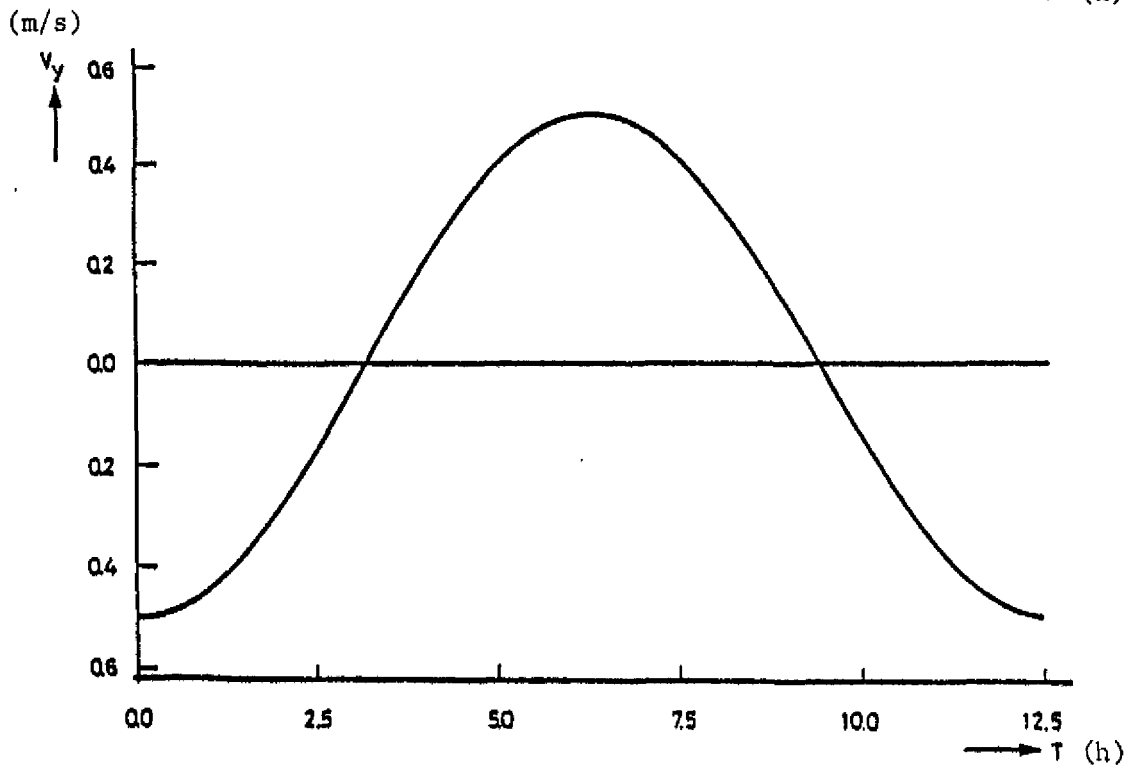
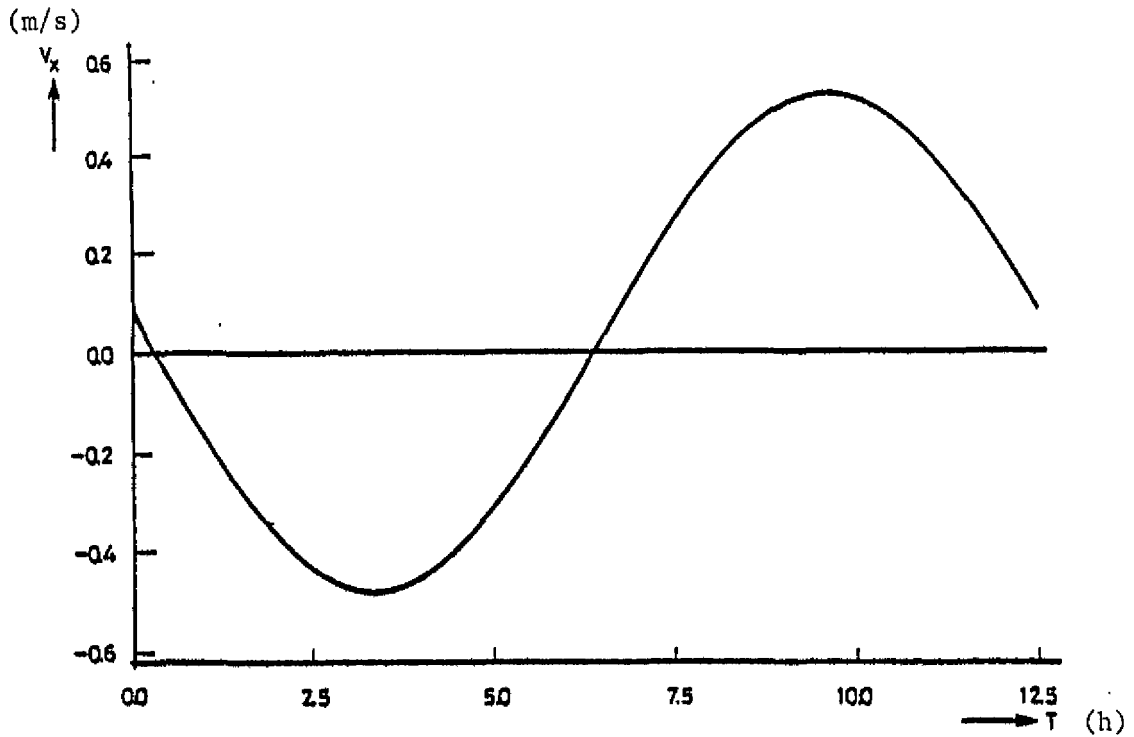
A4



SNELHEDEN EN DEELTJES BANEN. ROZEE T04. GEMIDDELD GETIJD.  
 WINDSTIL. PIJLLENTE WORDT IN VIER UUR AFGELEGD.

Baan van een deeltje in de getijstrooming  
 Pijlen geven de restsnelheid weer



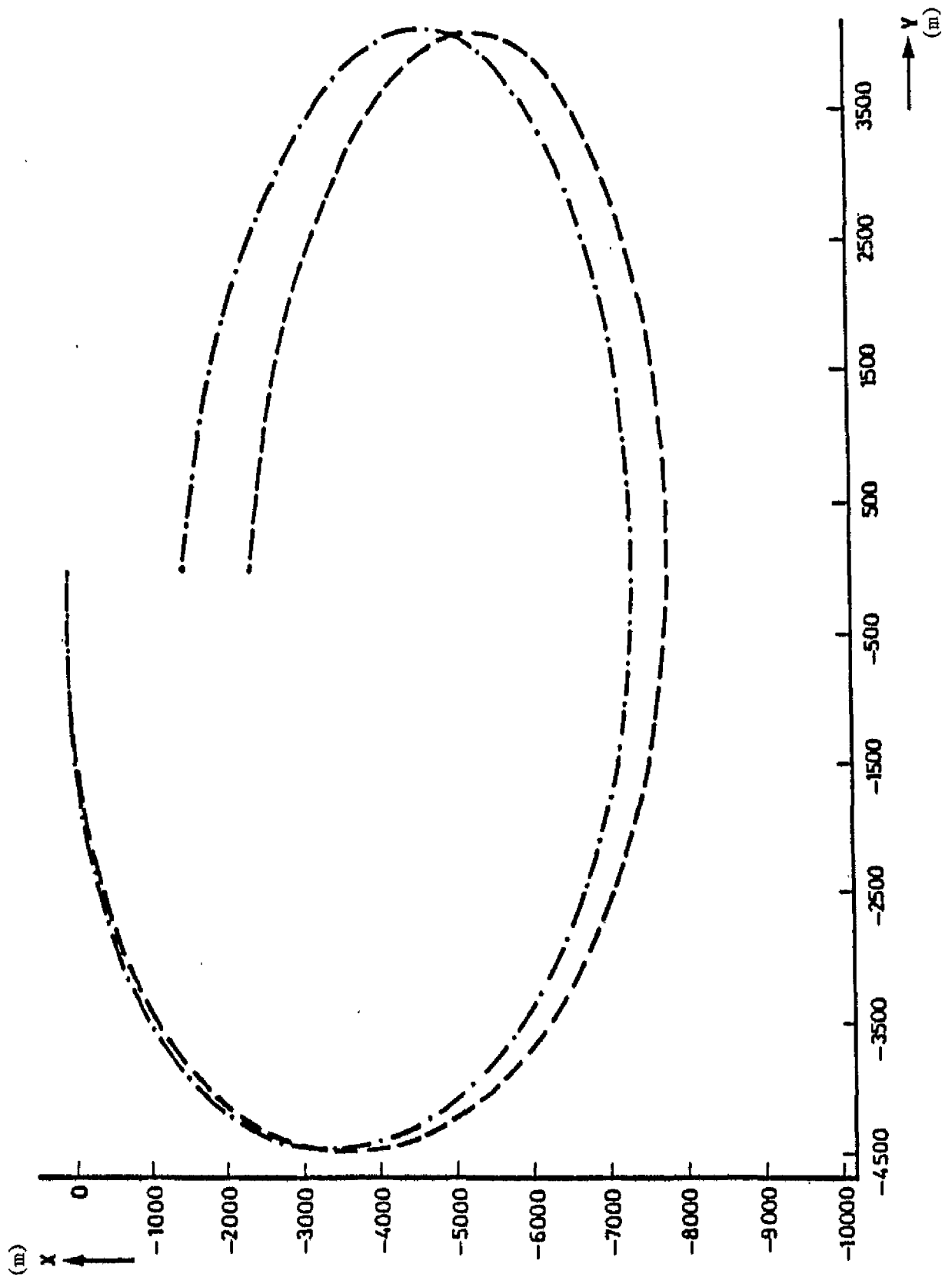


$$v_x = 25 \cdot 10^{-6} \cdot (y - 18200) \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - 1.7\right) + 0.02$$

$$v_y = 0.6 \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + 3.1\right)$$

De variatie van de snelheidscomponenten over het getij in het punt  $(x,y)=(0,0)$

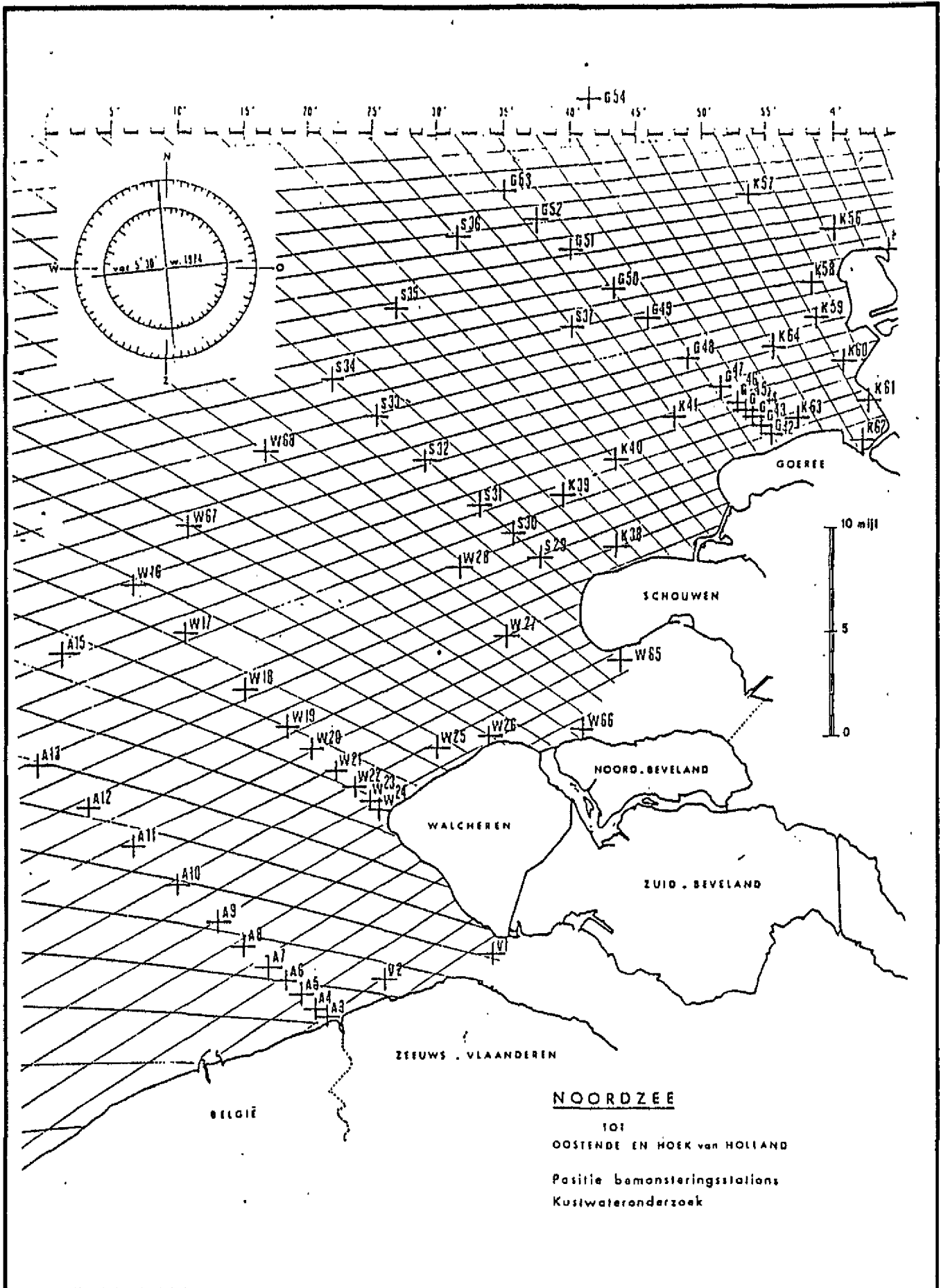
A4



- - - - - zonder noordwaartse toegevoegde komponent  
 - . - . - met noordwaartse toegevoegde komponent

Baan van een deeltje in de getijstrooming

A4



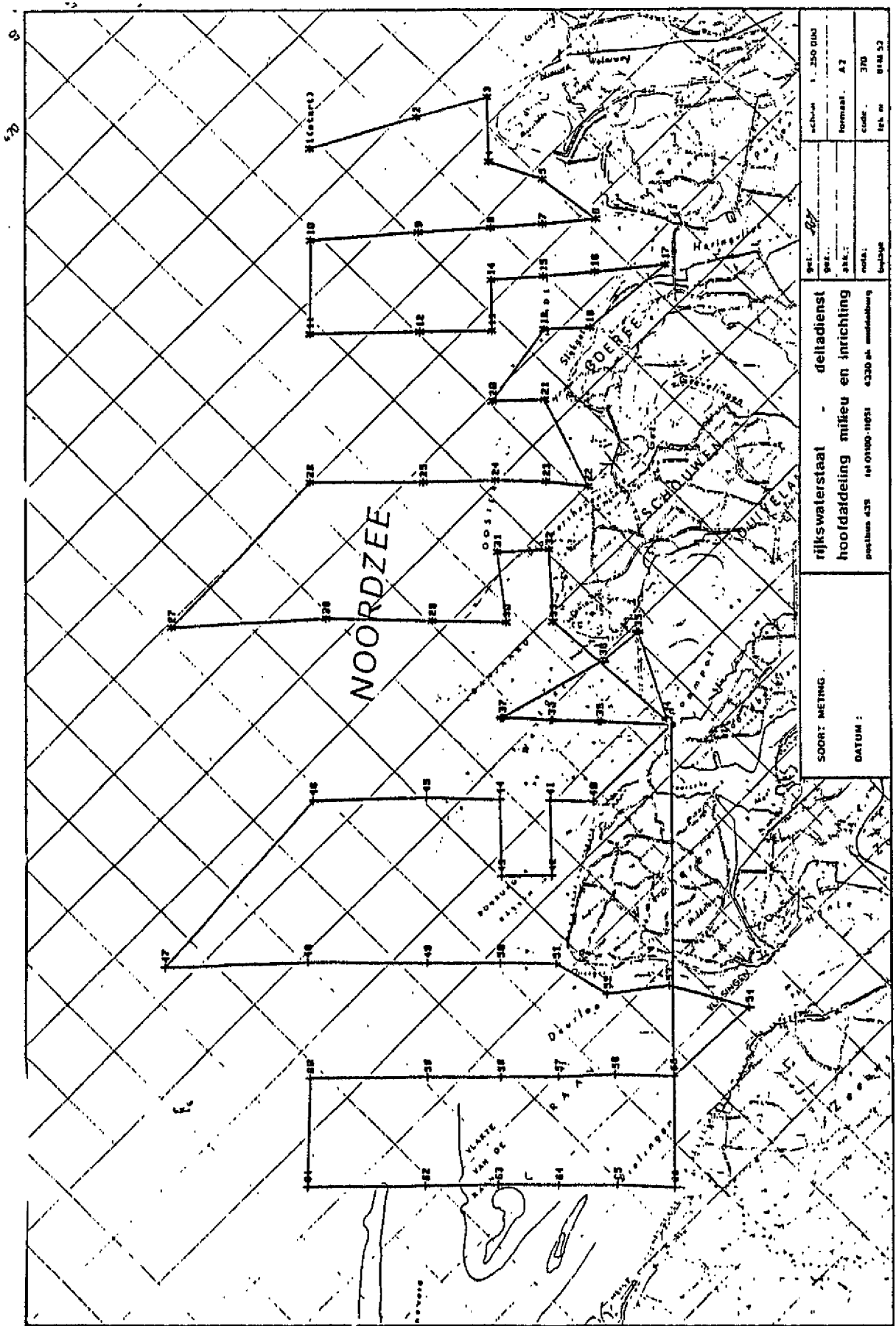
Oorspronkelijk meetnet helicoptervluchten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig.42

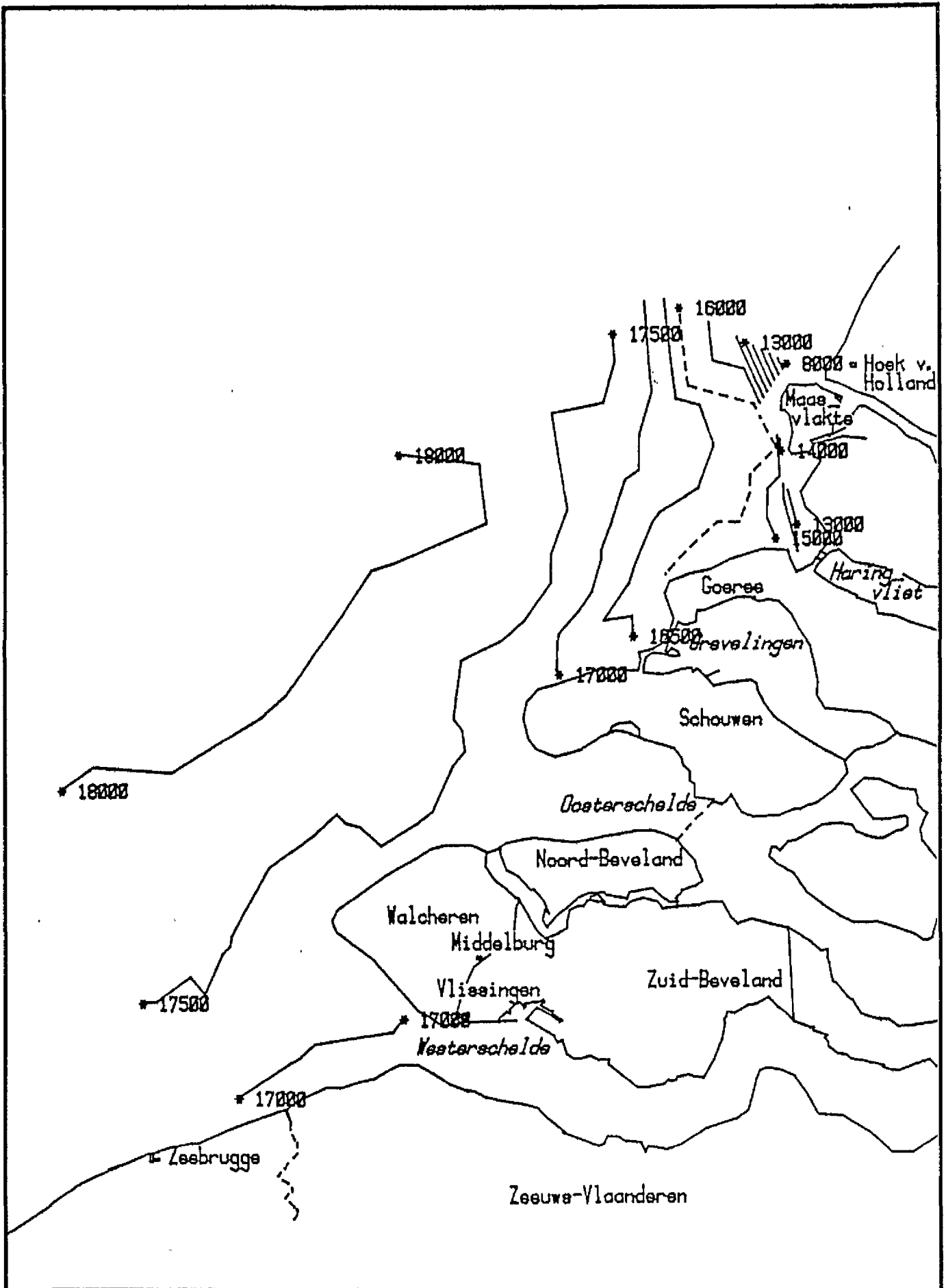
A4



sch. nr. 1. 250 000	del. nr. 250 000
normaal. A 7	del. nr. 250 000
code. 310	del. nr. 250 000
tek. nr. 014 52	del. nr. 250 000

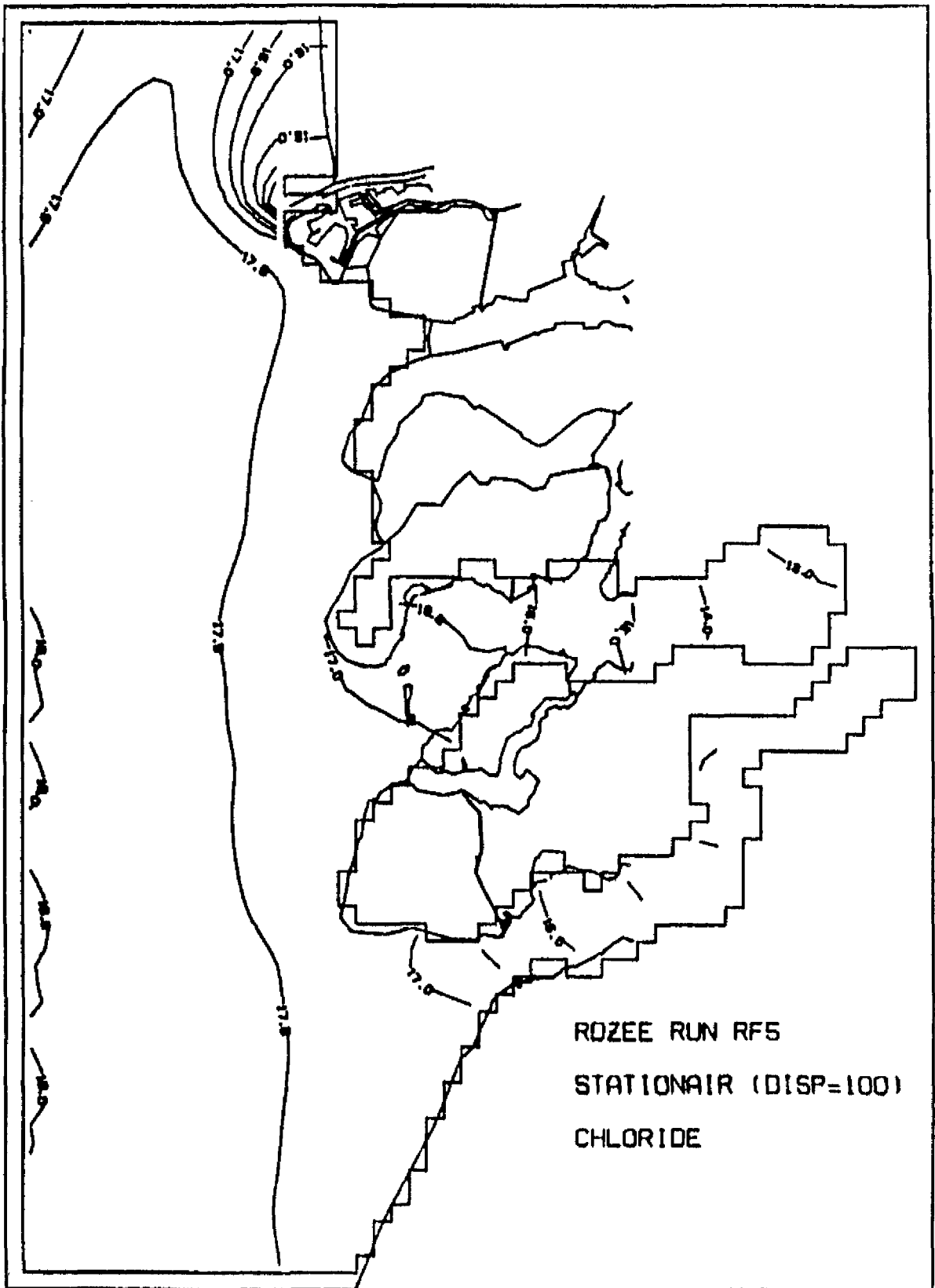
SOORT METING :	rijkswaterstaat	del. nr. 250 000
DATEUM :	hoofdafdeling	milieu en inrichting
	postbus 438	tel. 01400-1051
		4320 ab. mededeling

Uiteindelijk meetnet helicoptervluchten



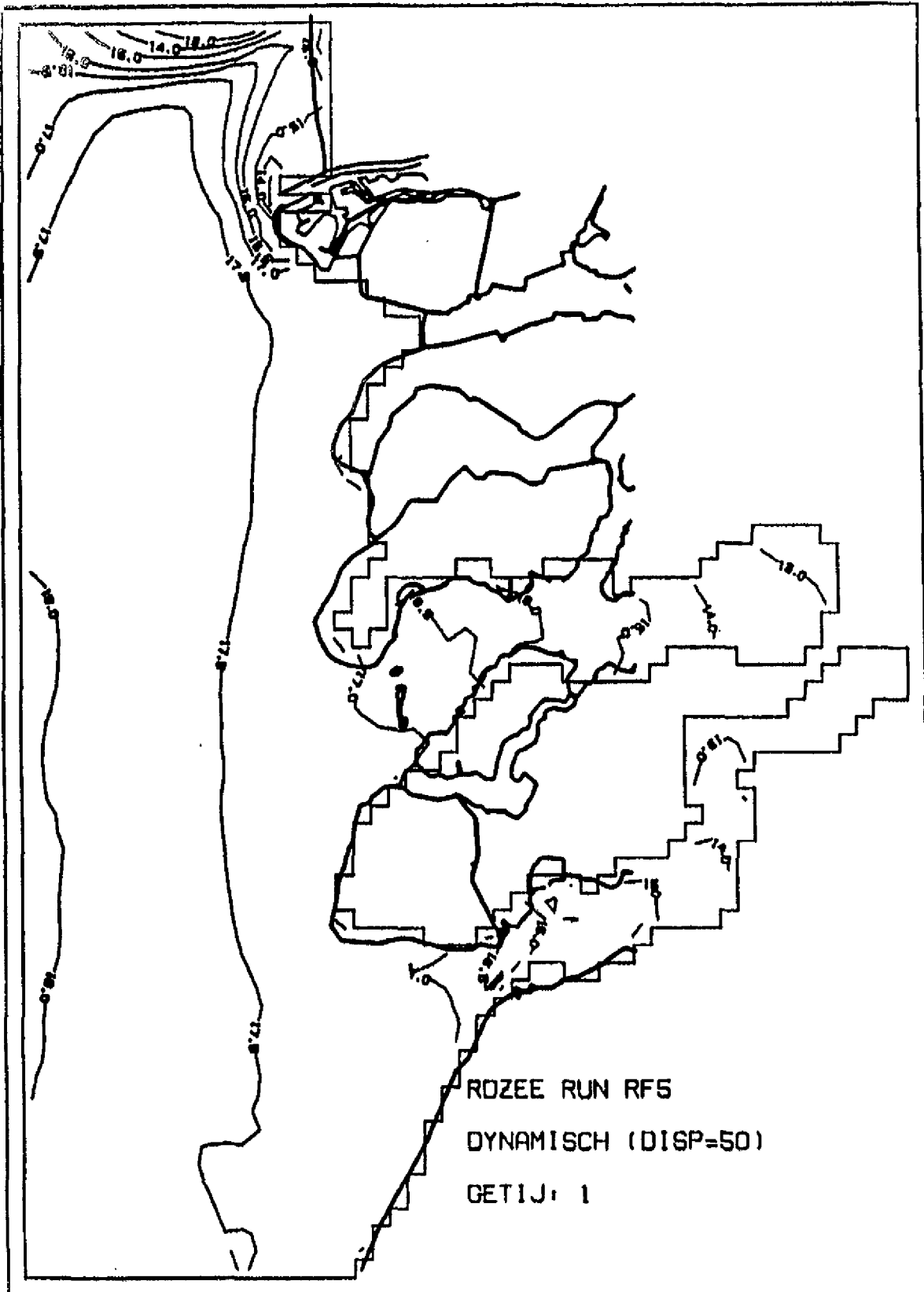
Chloridegehalten. gemeten bij vlucht 9 (8-9-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZO 2-3, ZO 3, ZW 5

A4



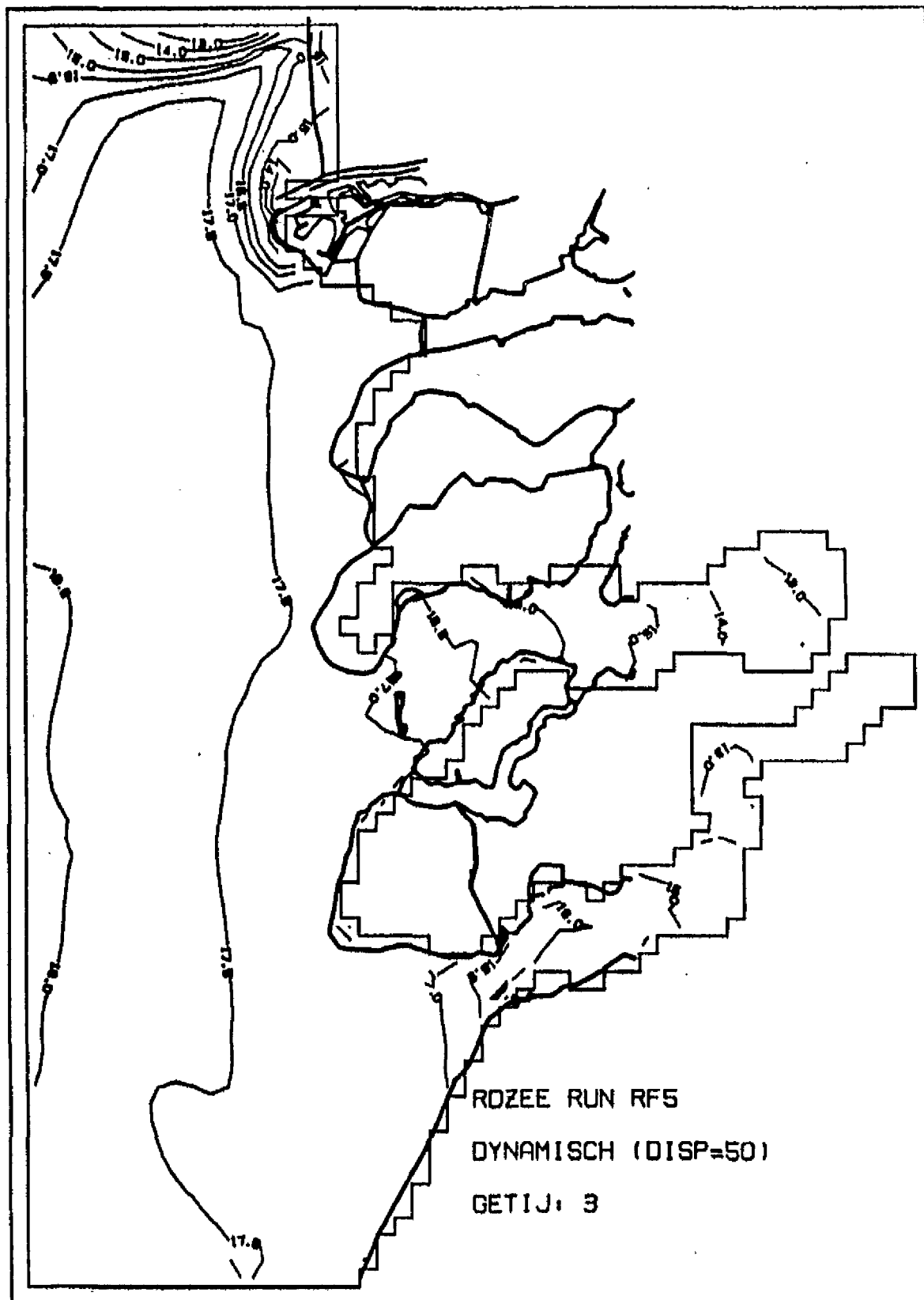
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
Resultaat met gemiddelde waterbeweging

A4



Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
Resultaat na een volledige getijdencyclus

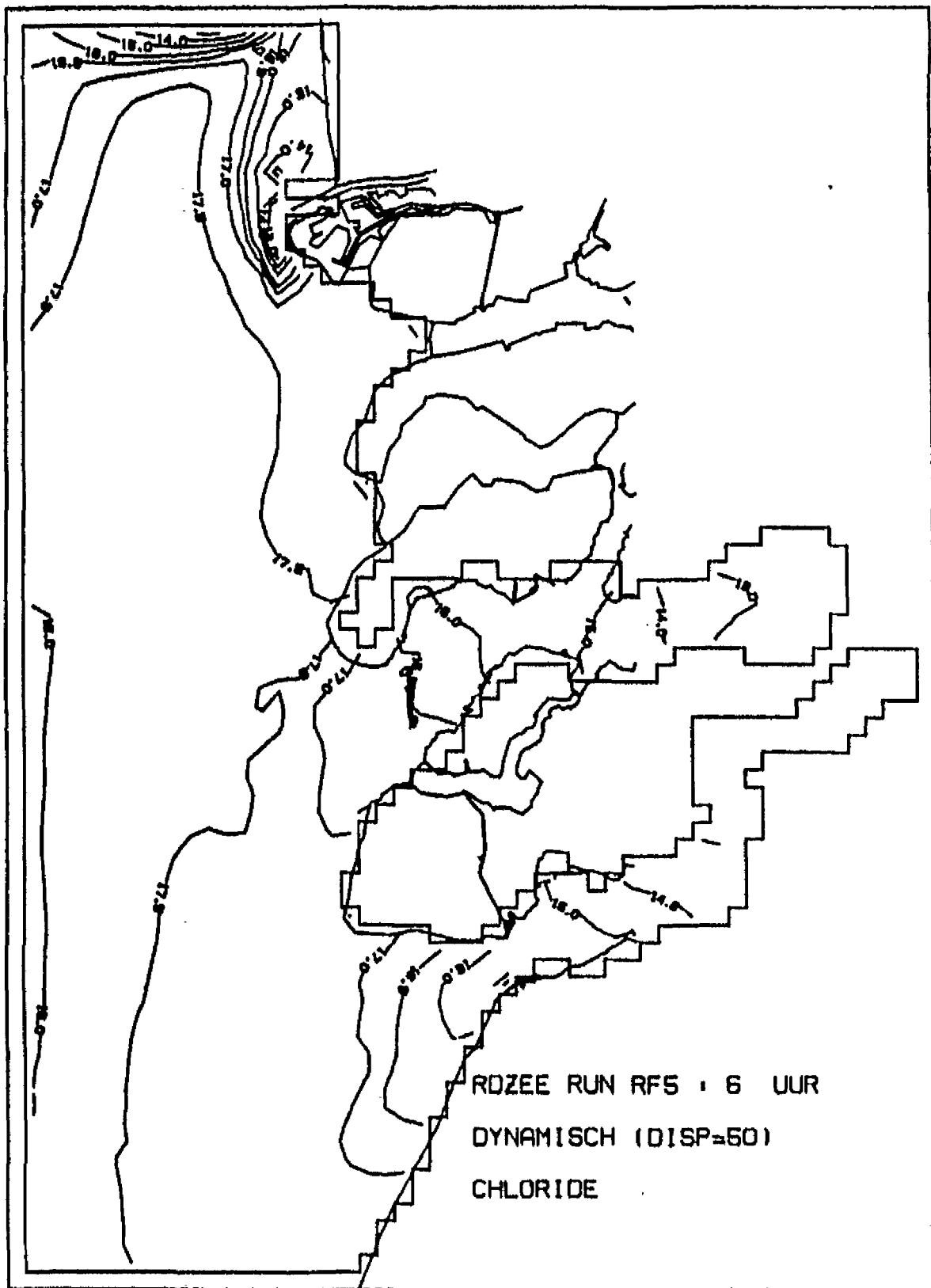
A4



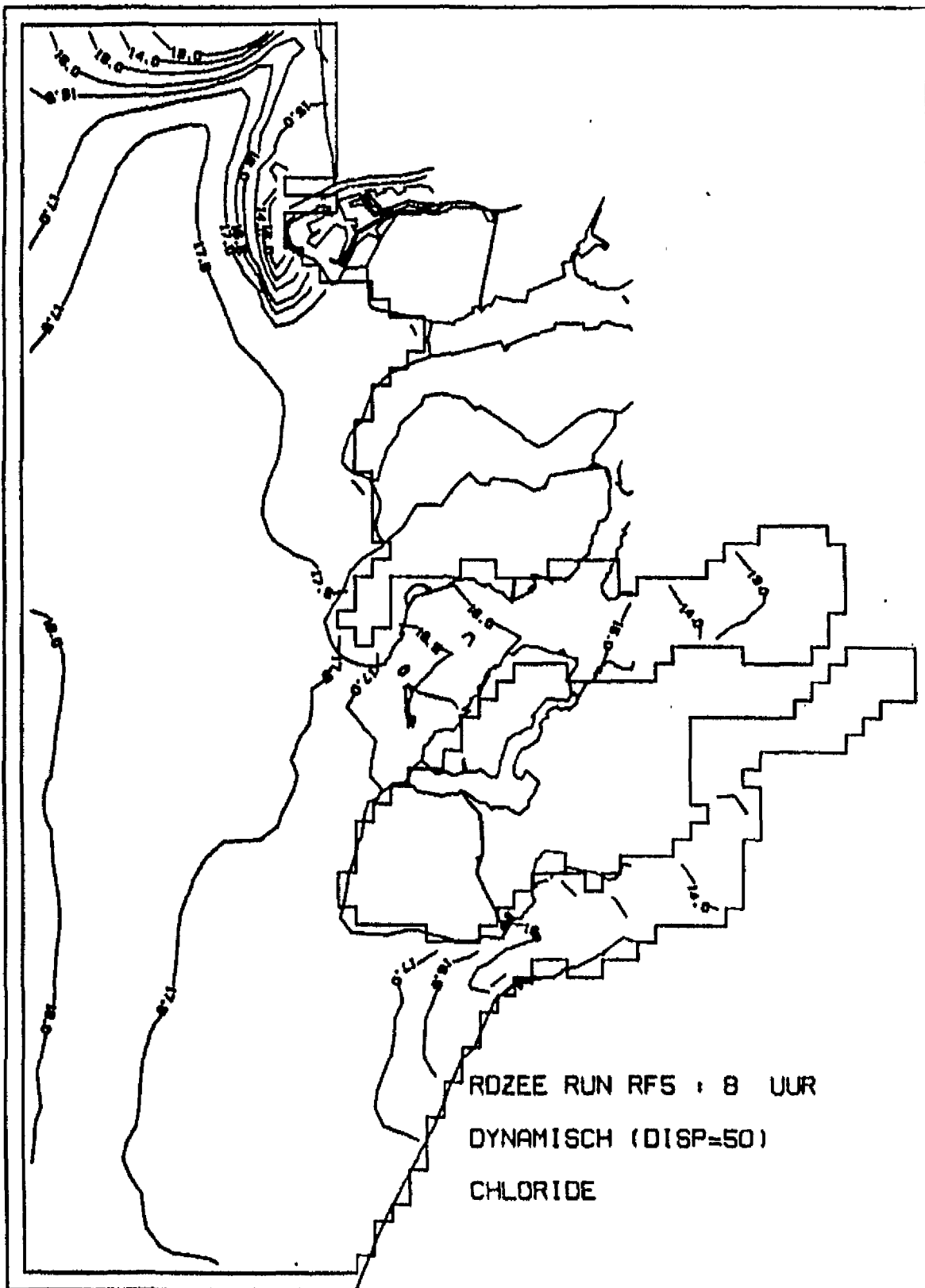
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
Resultaat na drie volledige getijcycli

A4



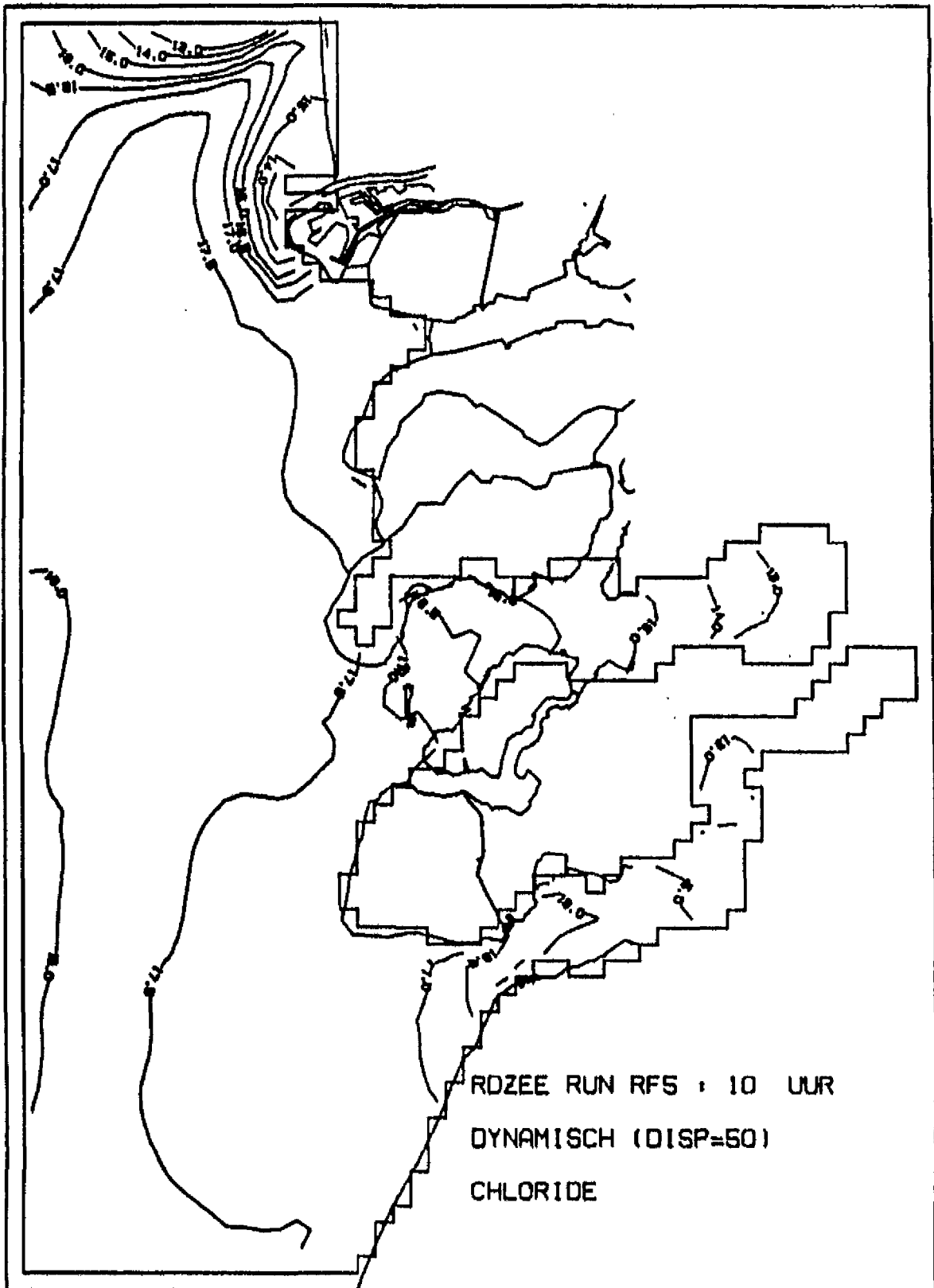


Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip 4 uur voor hoogwater bij Scheveningen



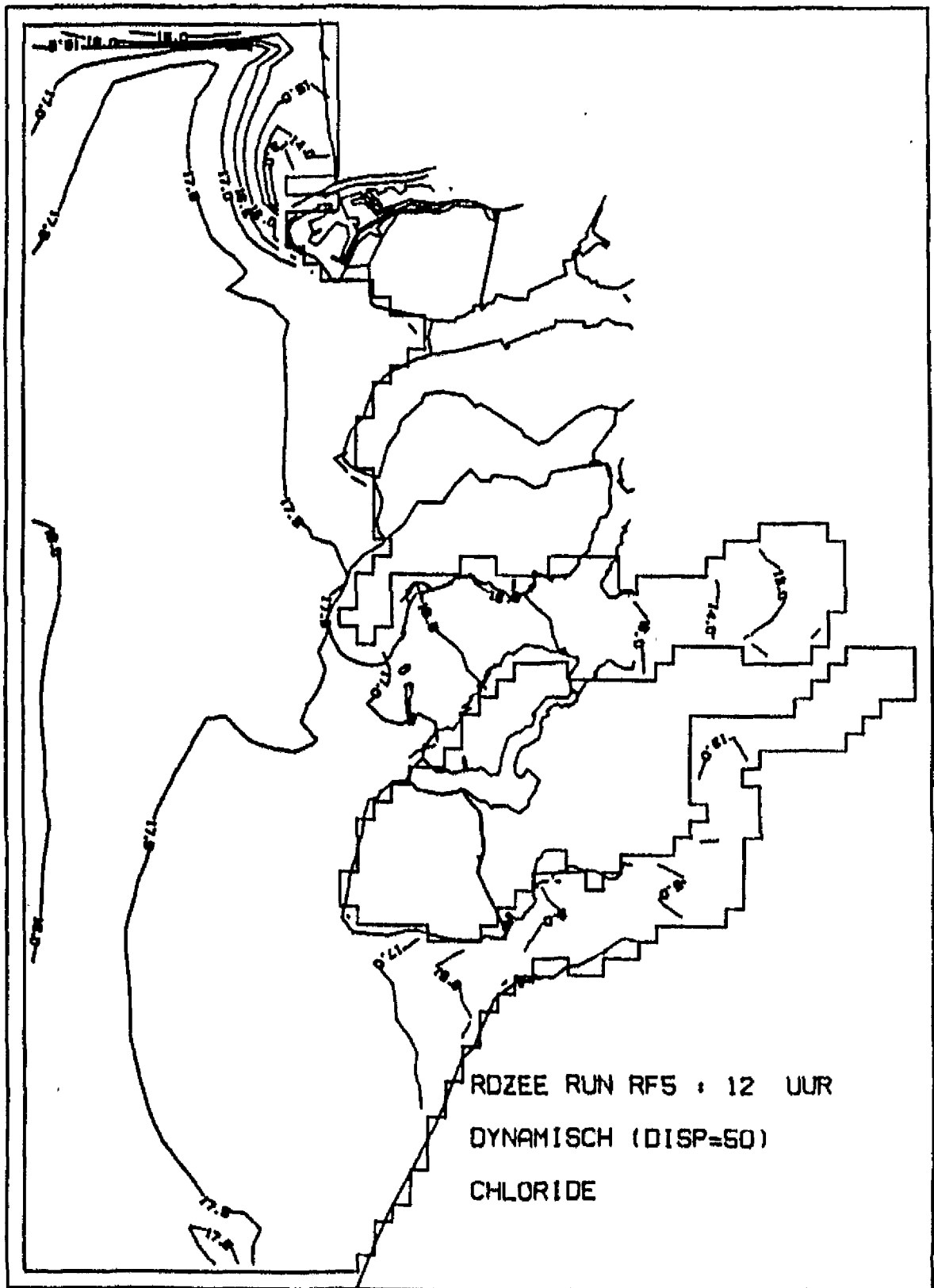
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
Tijdstip 2 uur voor hoogwater bij Scheveningen

A4



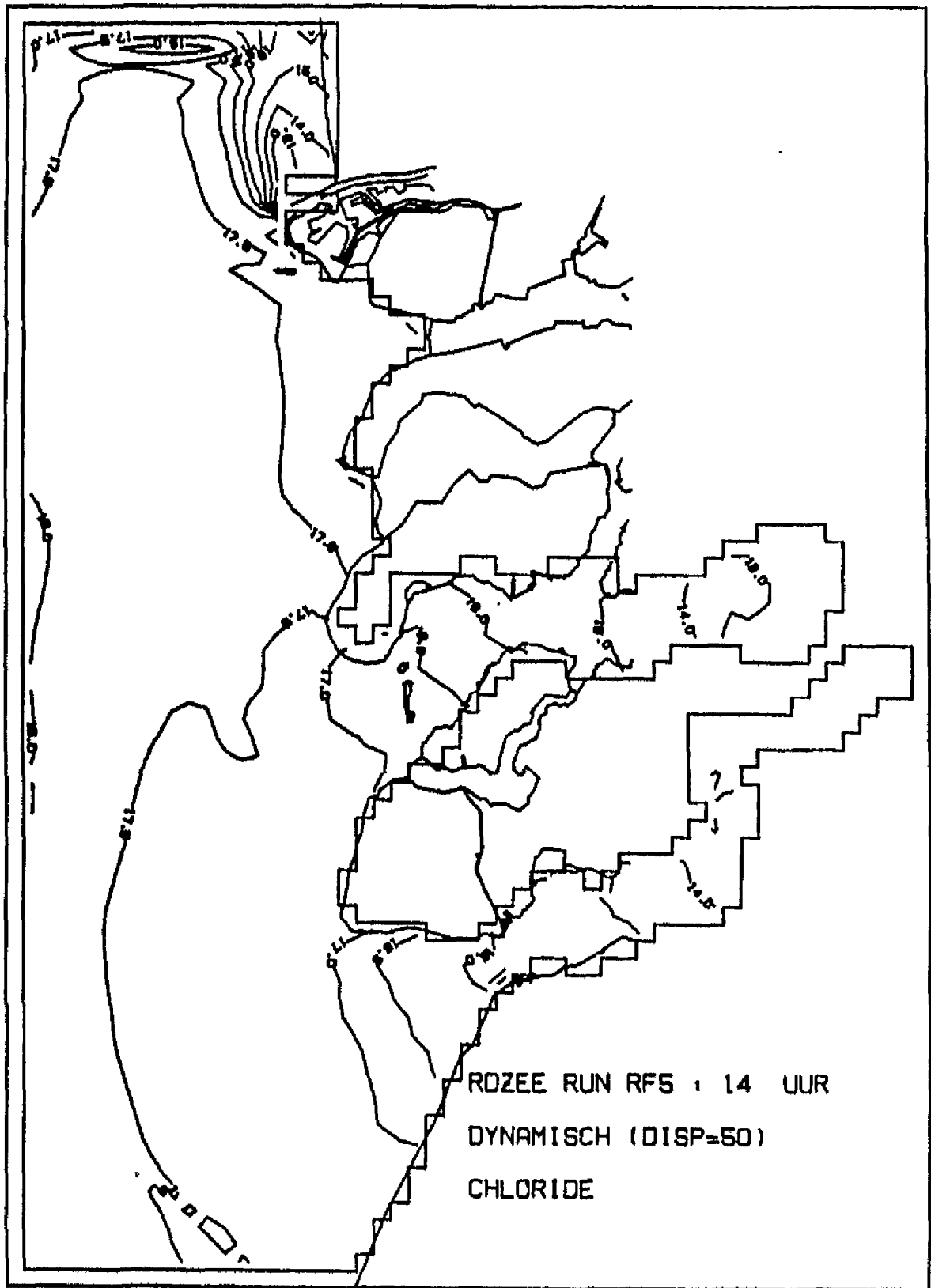
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip : hoogwater bij Scheveningen

A4



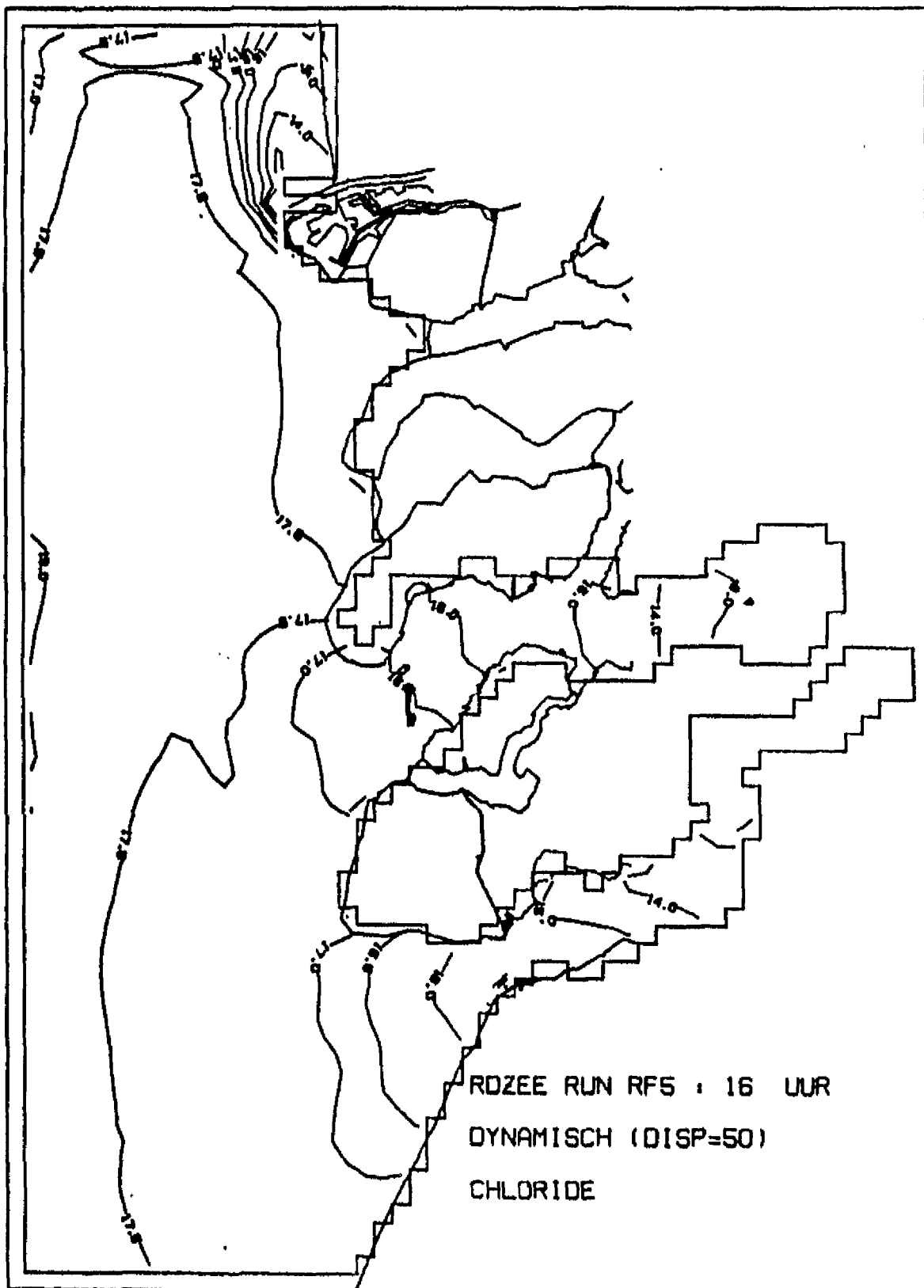
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip : 2 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



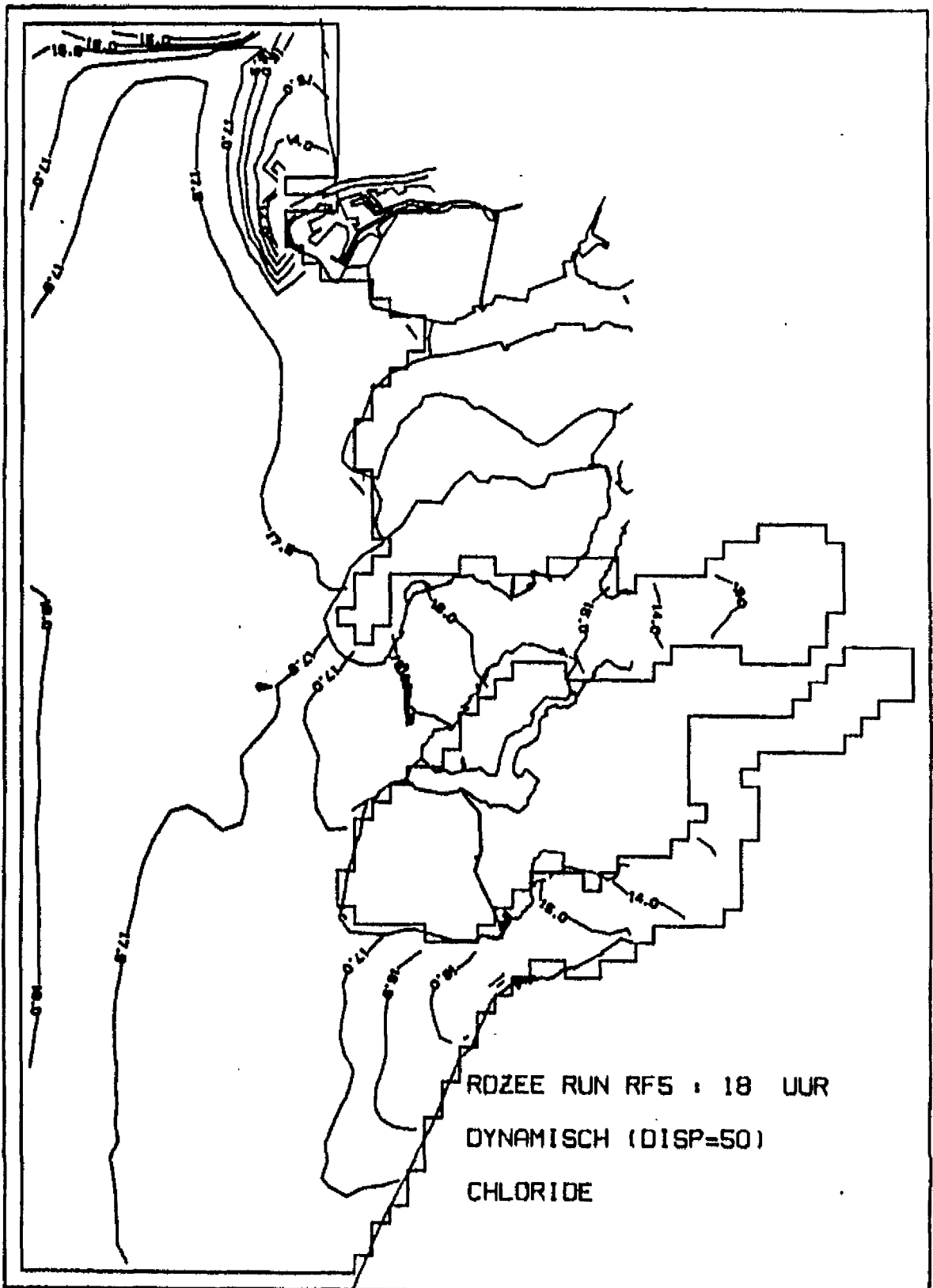
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip : 4 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



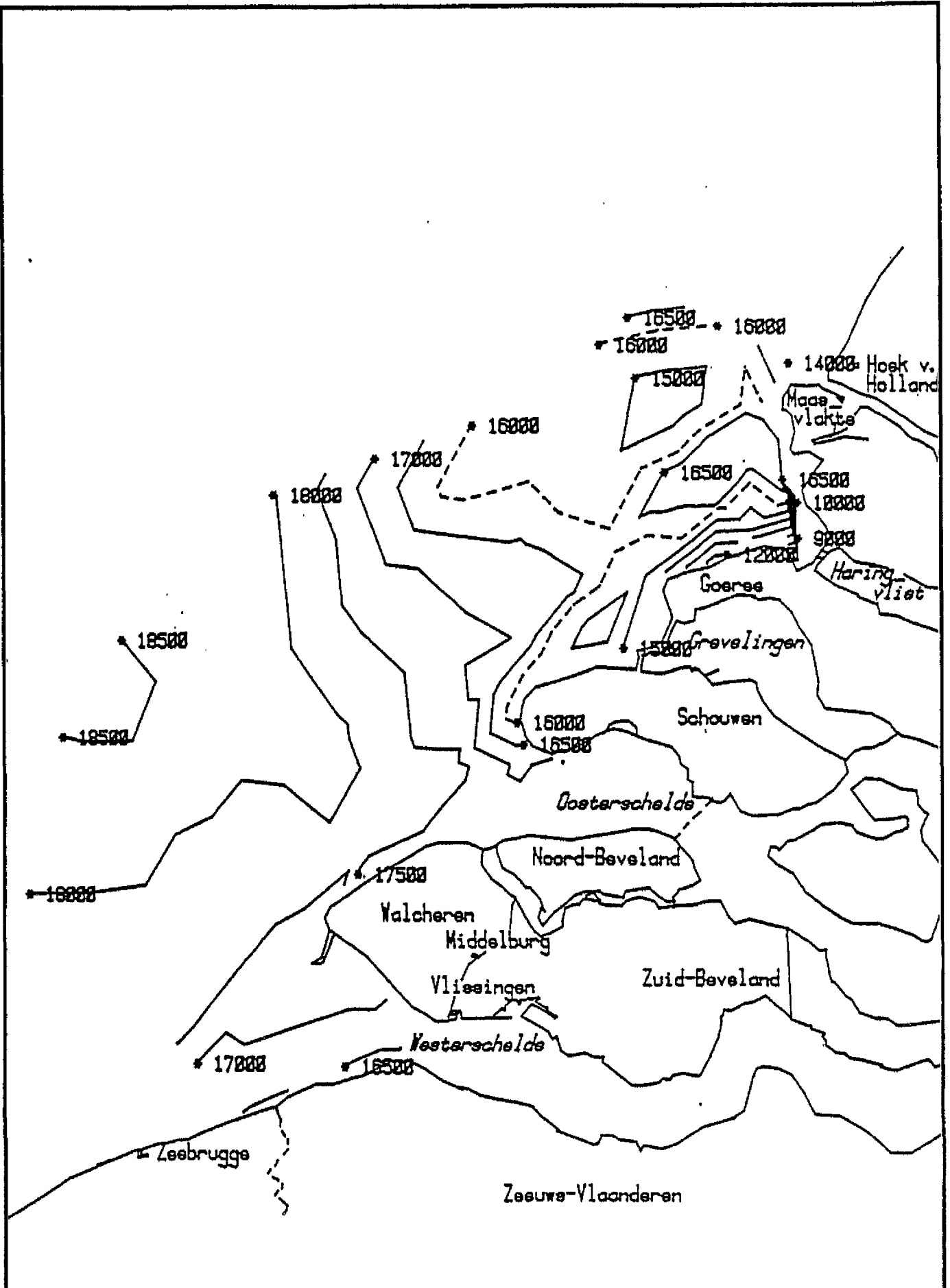
Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip : 6 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



Berekend concentratiepatroon - referentiesituatie  
 Tijdstip : 8 uur na hoogwater bij Scheveningen

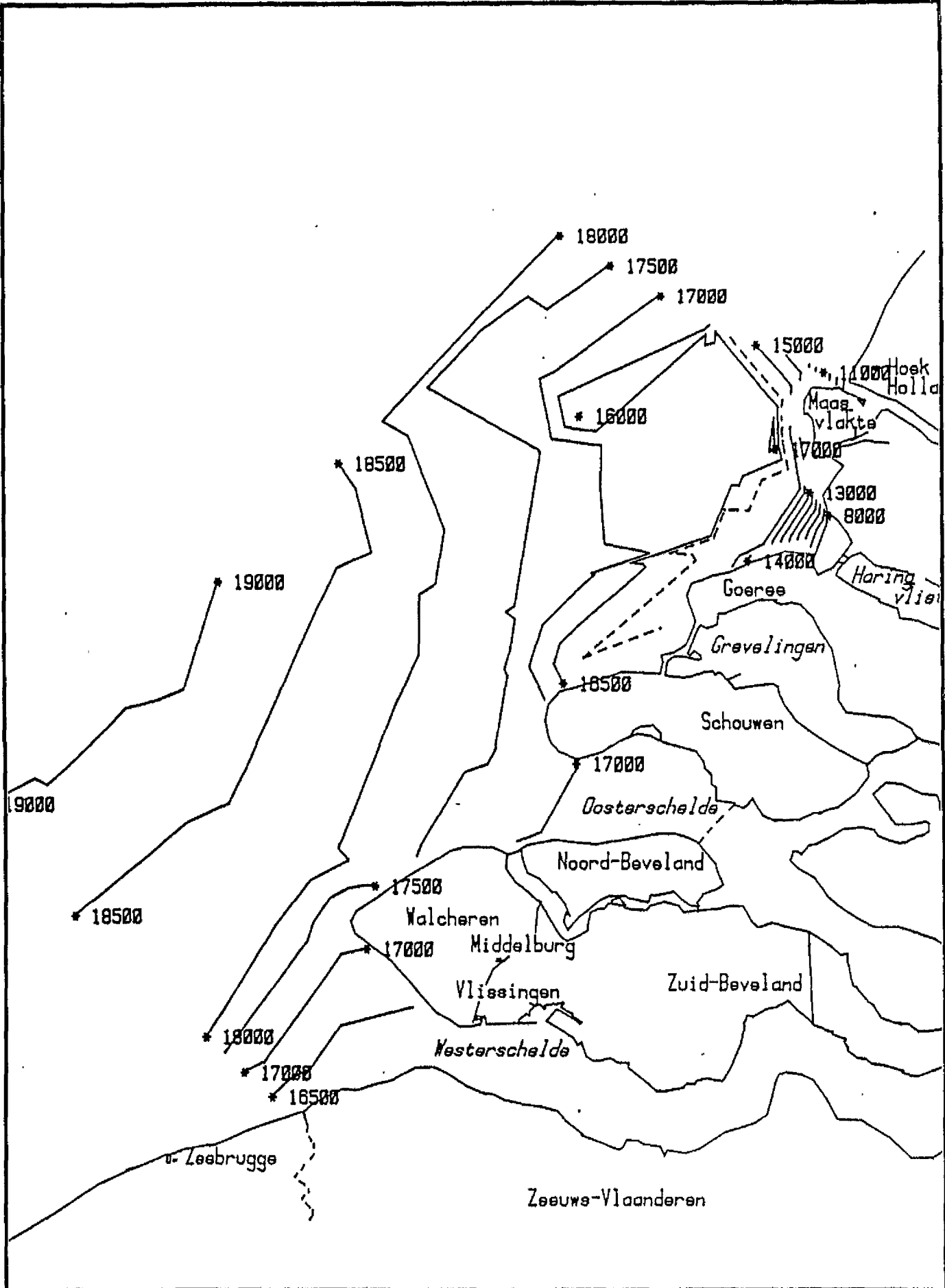
A4



Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 8 (11-8-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 NW 4, N 6, NO 4

A4

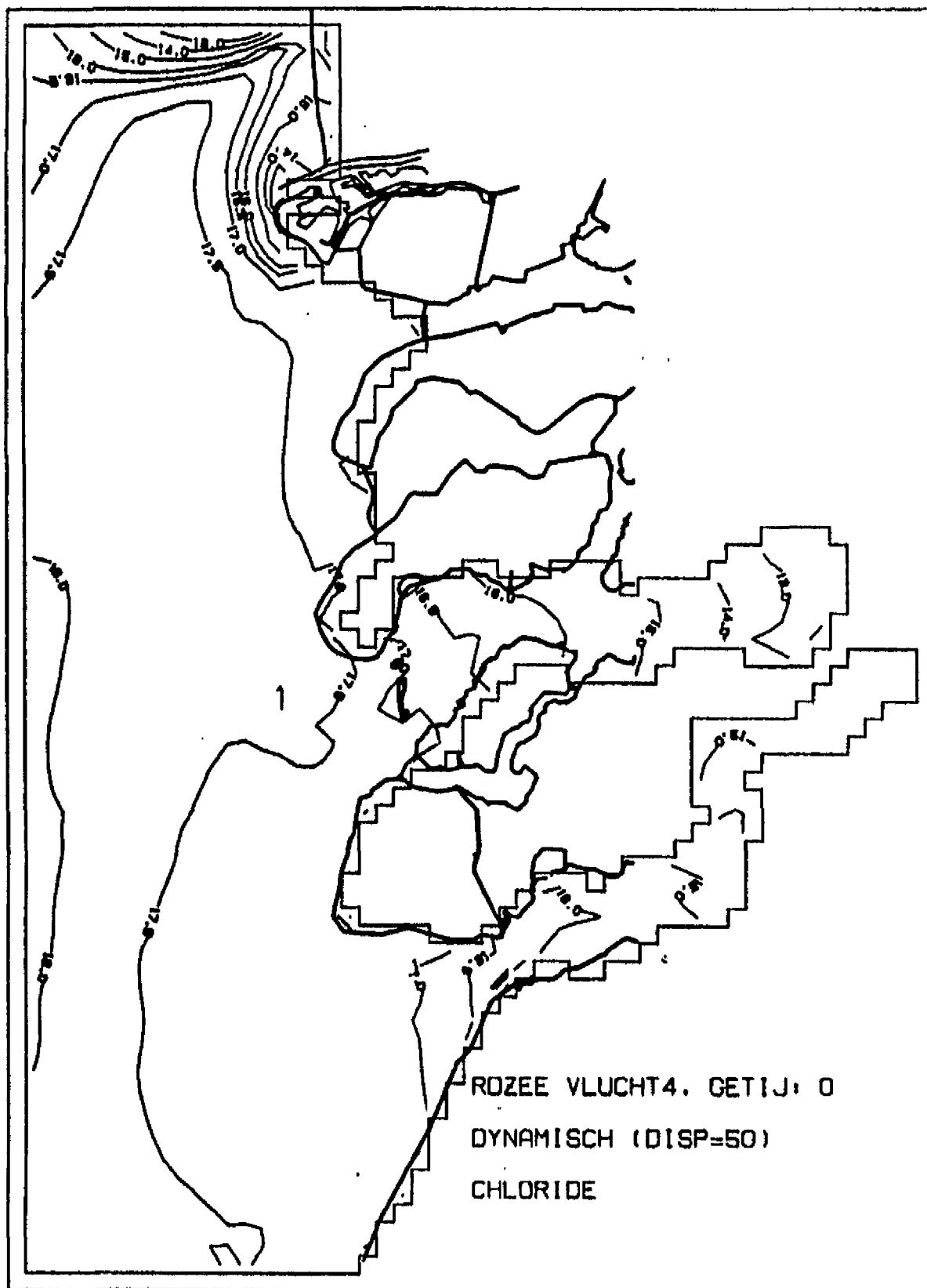




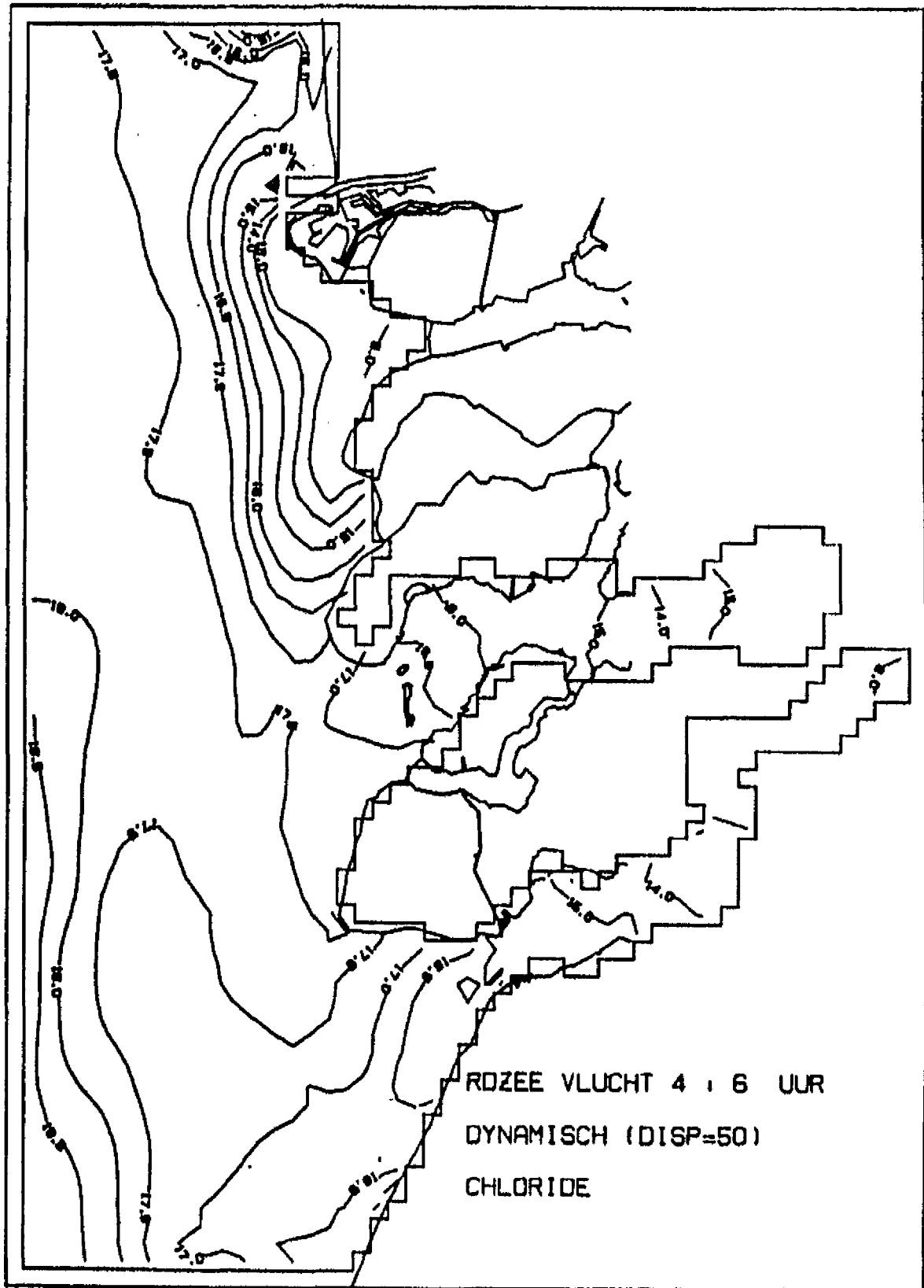
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 4 (14-4-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 3, NO 5, NO 5

		A4
<b>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</b>	R 2176	fig.56

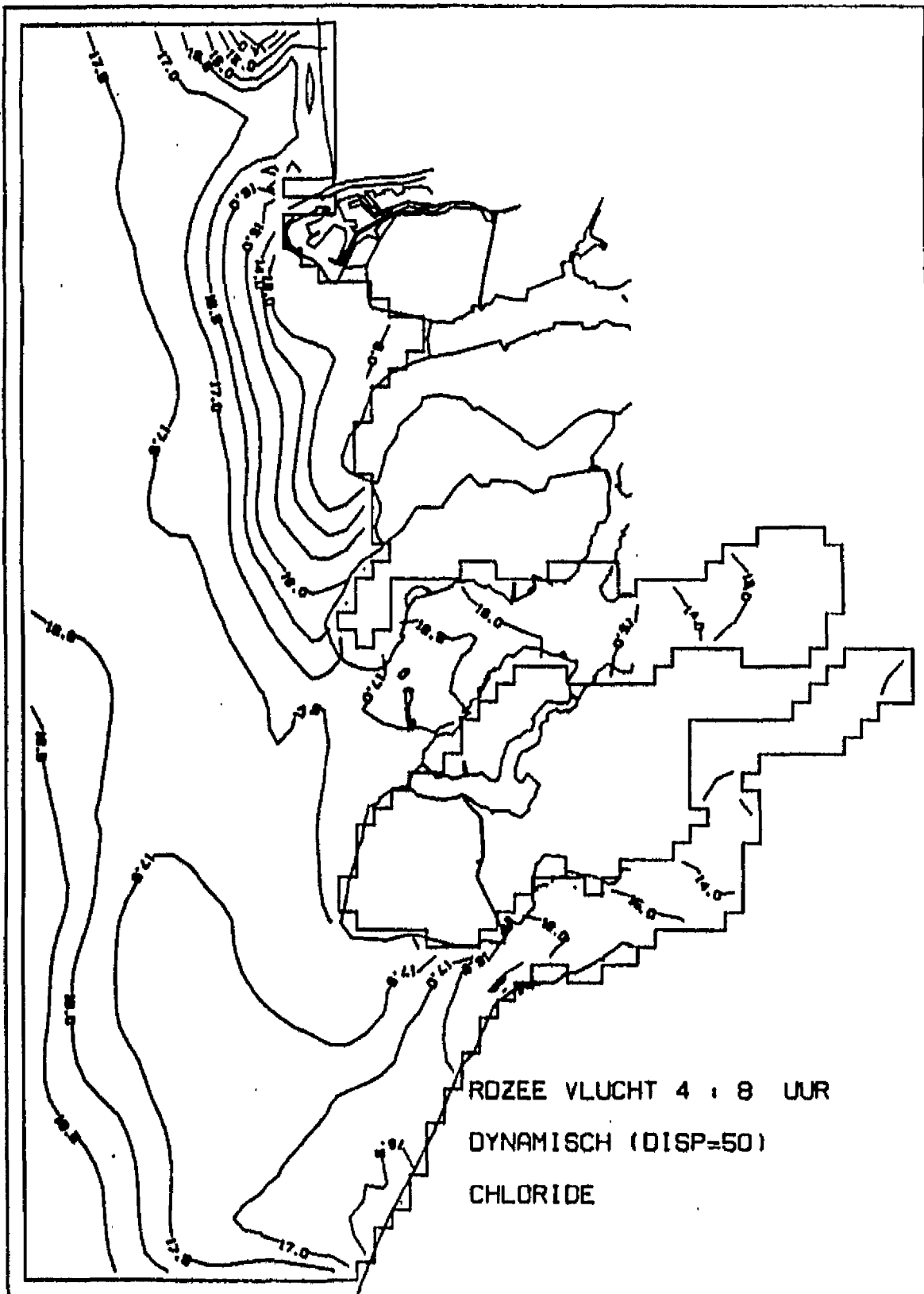




Beginvoorwaarde voor de dynamische berekeningen  
voor de situaties met wind

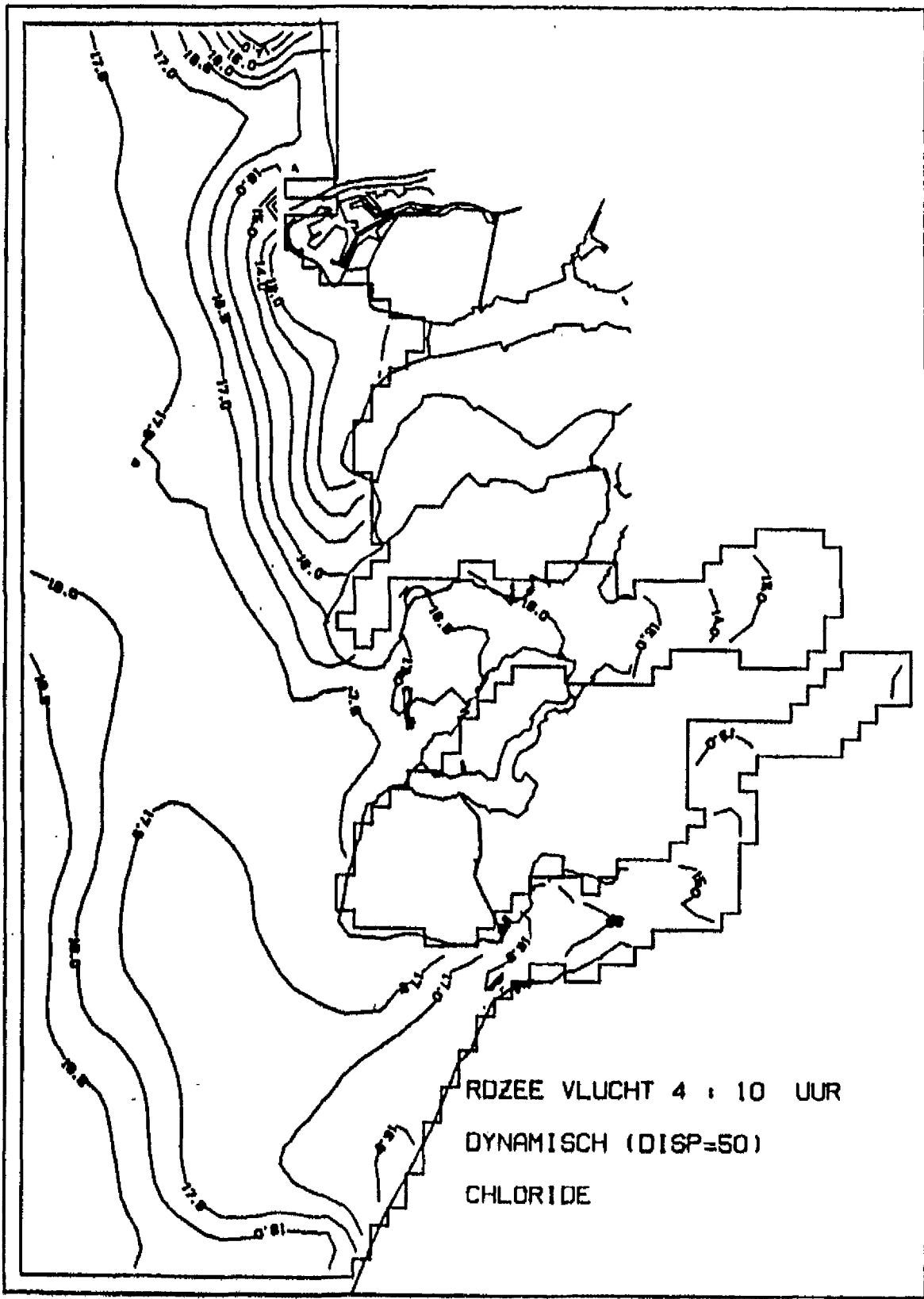


Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
Tijdstip : 4 uur voor hoogwater bij Scheveningen



Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
Tijdstip :2 uur voor hoogwater bij Scheveningen

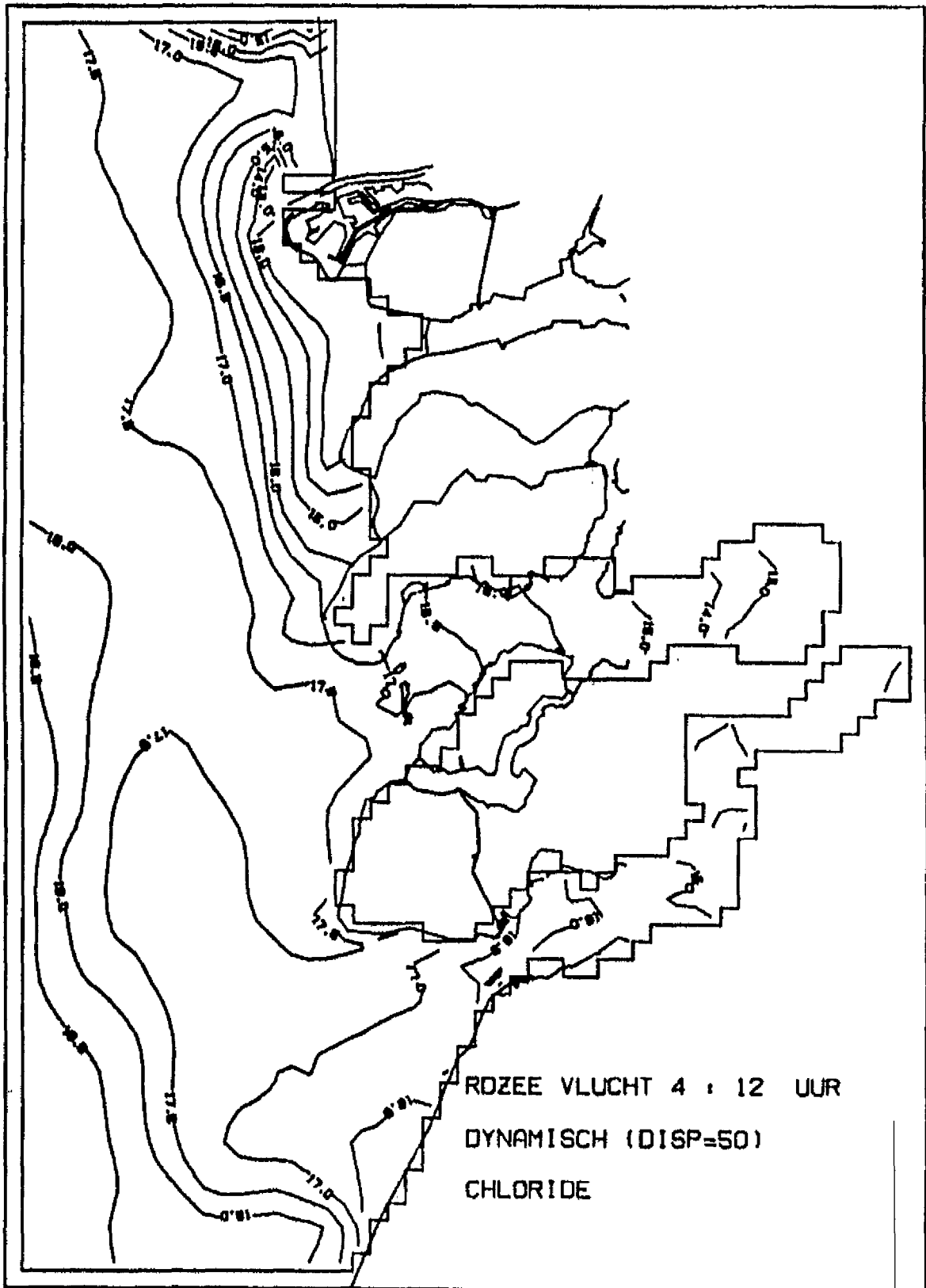
A4



RDZEE VLUCHT 4 : 10 UUR  
 DYNAMISCH (DISP=50)  
 CHLORIDE

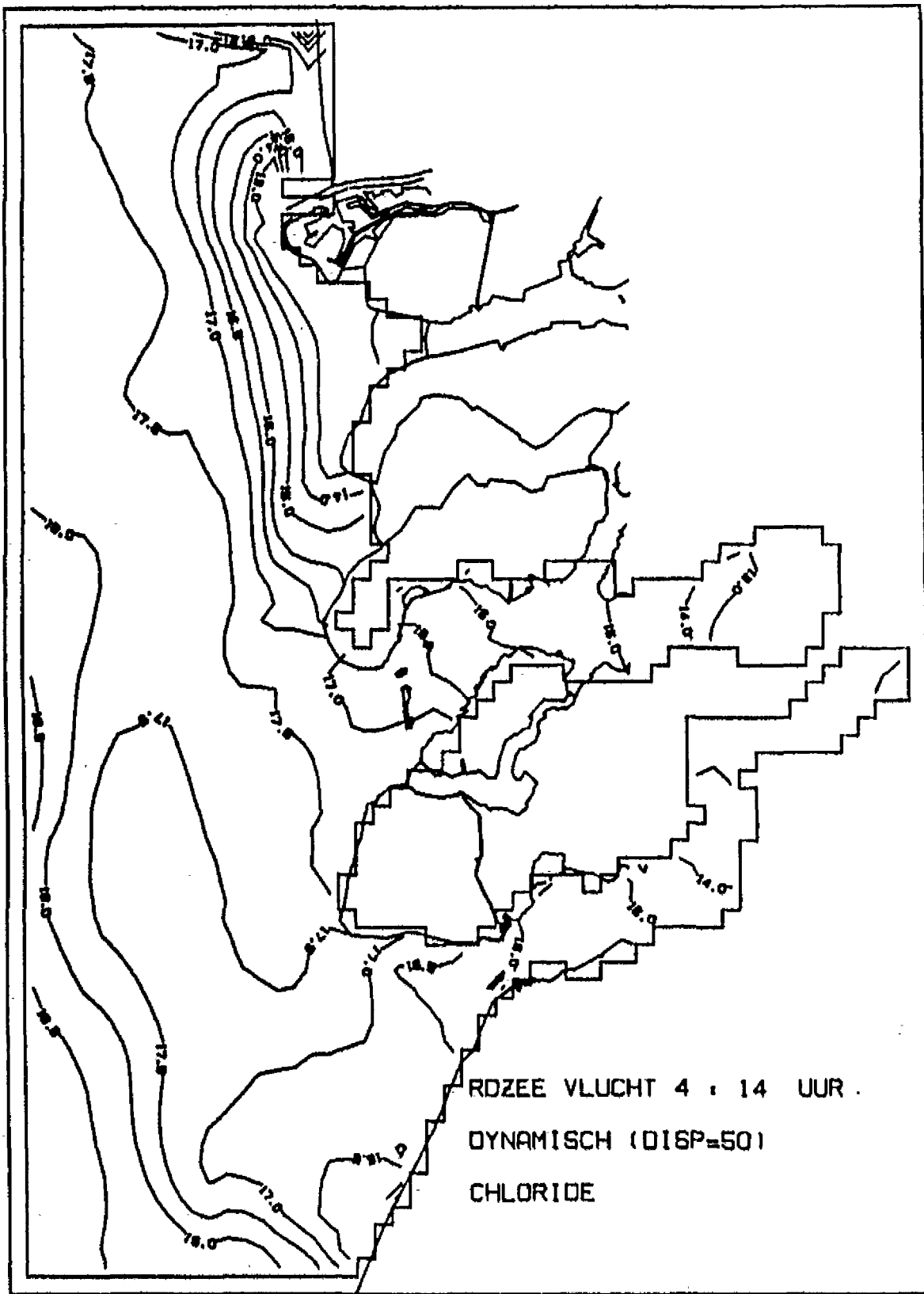
Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
 Tijdstip : hoogwater bij Scheveningen

A4



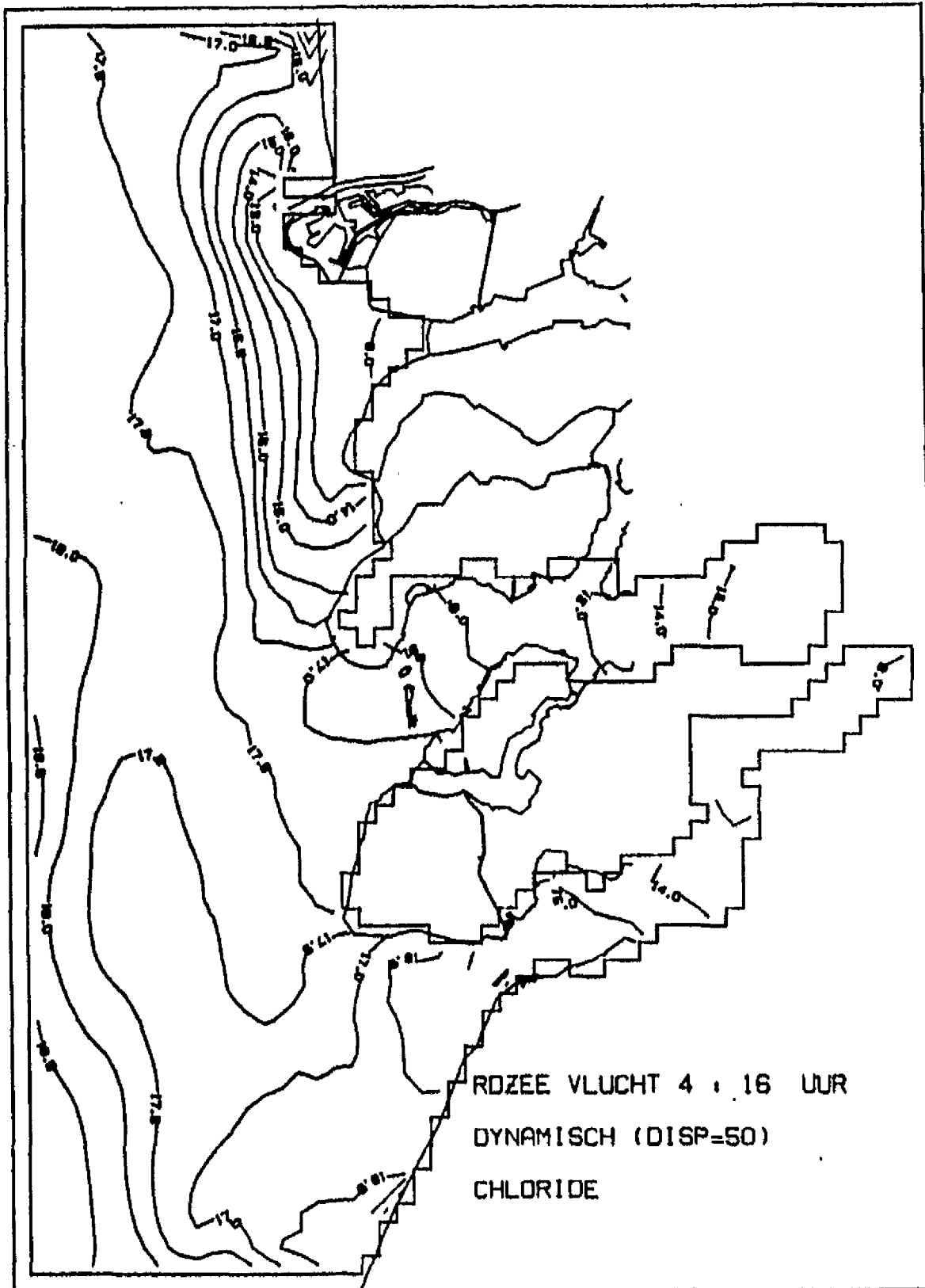
Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
 Tijdstip :2 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
 Tijdstip : 4 uur na hoogwater bij Scheveningen





RDZEE VLUCHT 4 : 16 UUR  
 DYNAMISCH (DISP=50)  
 CHLORIDE

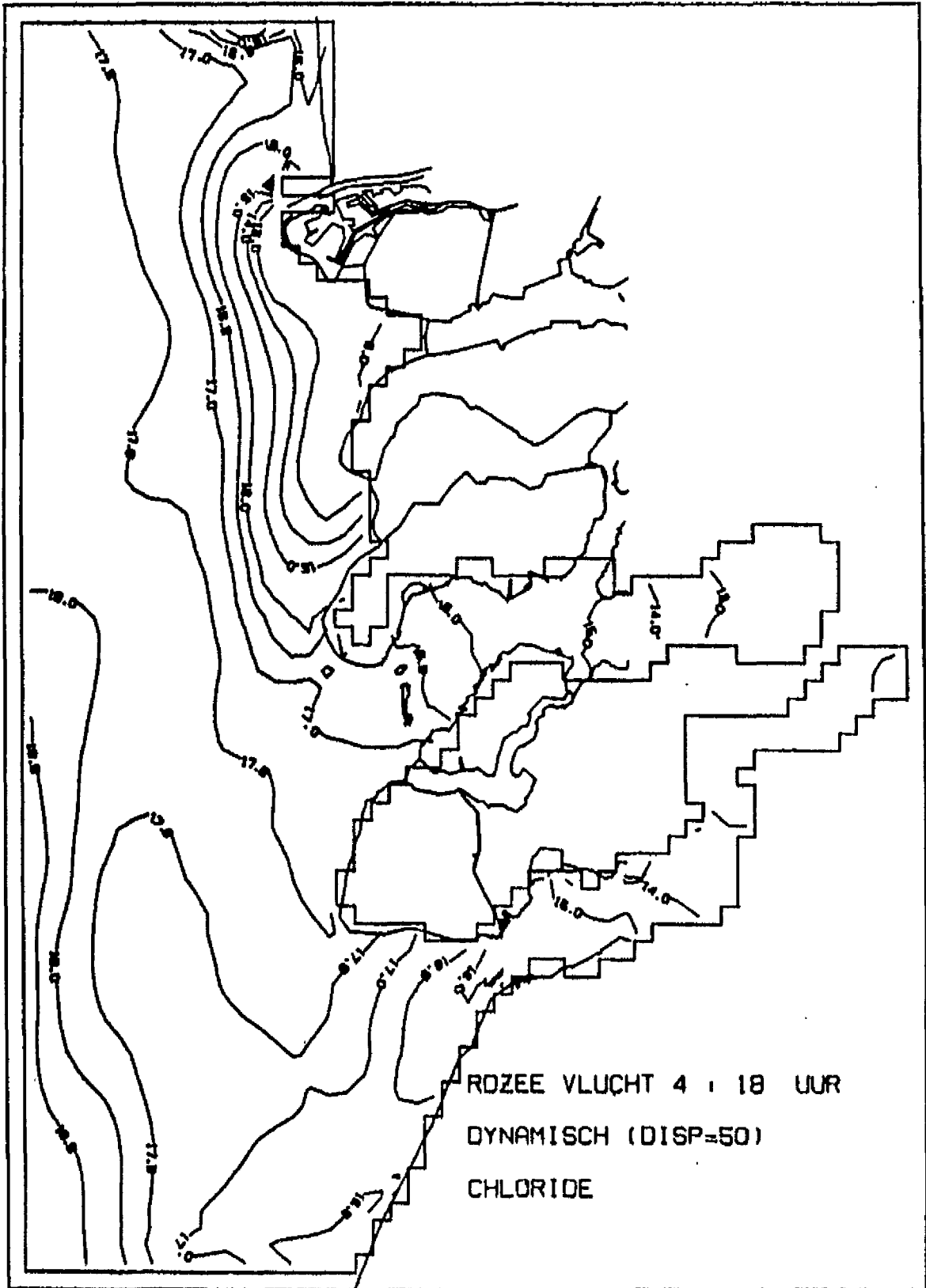
Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
 Tijdstip : 6 uur na hoogwater bij Scheveningen

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig.64

A4



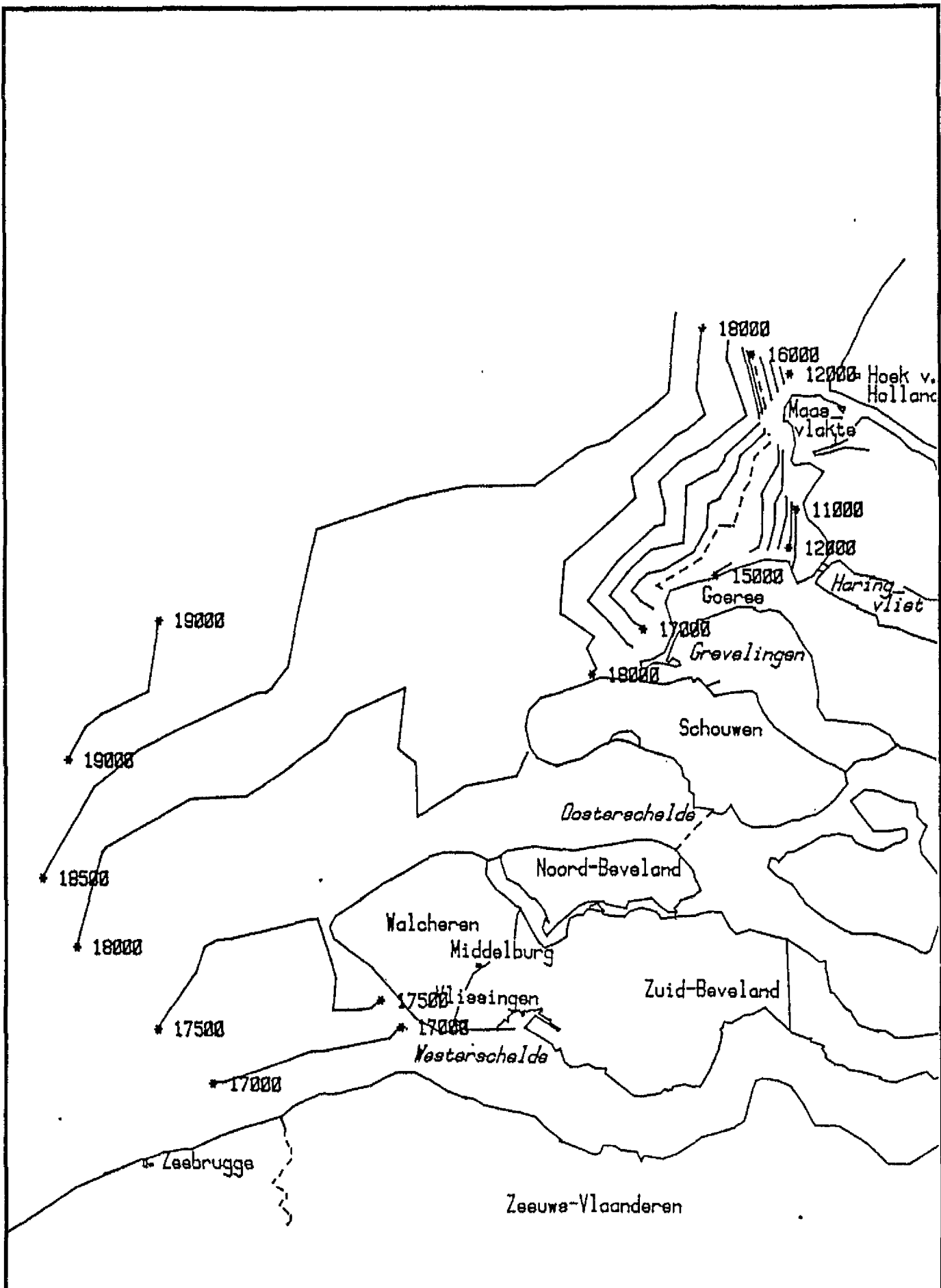
Berekend concentratiepatroon - noordoostenwind  
Tijdstip : 8 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

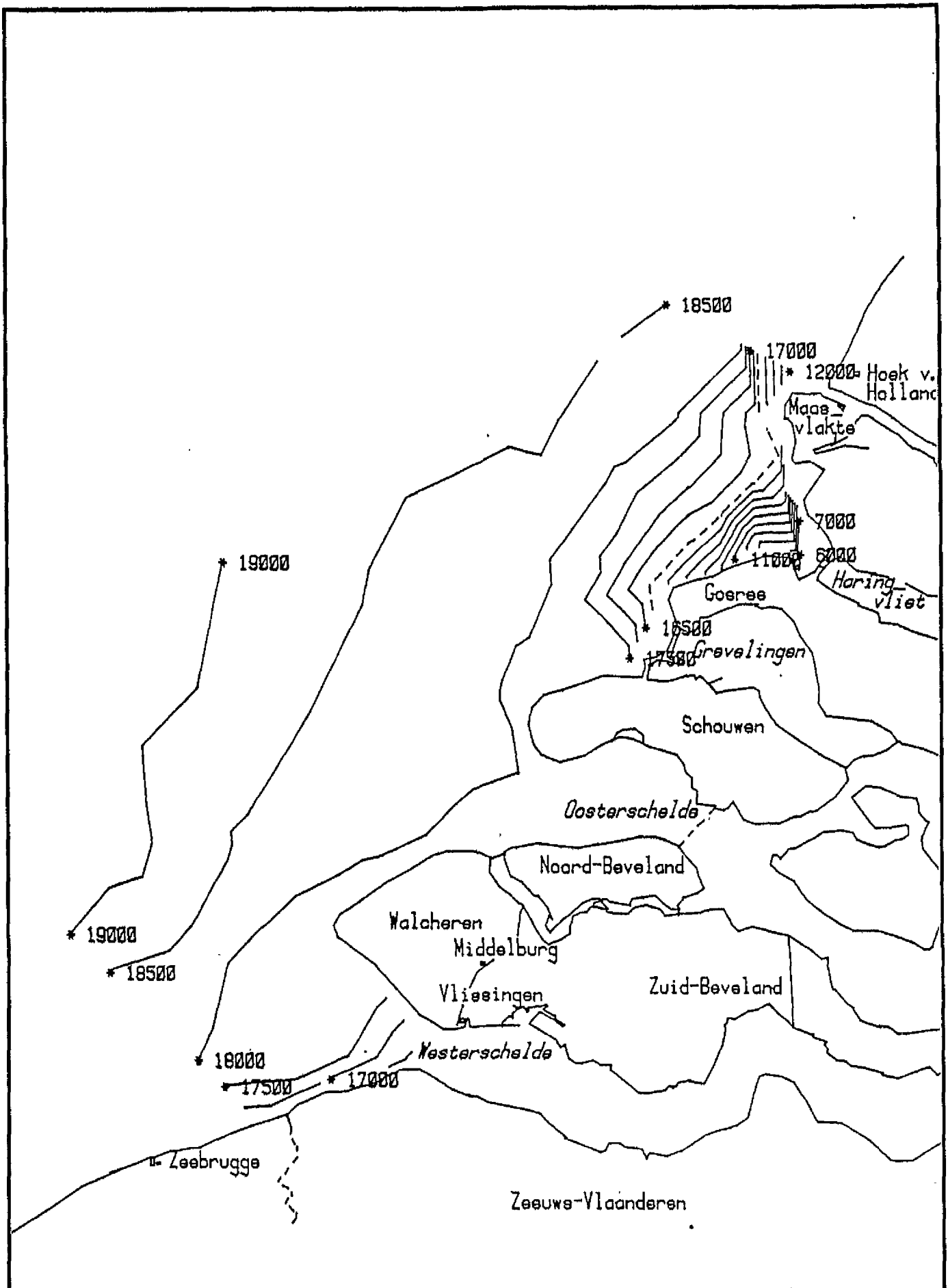
R 2176

fig.65



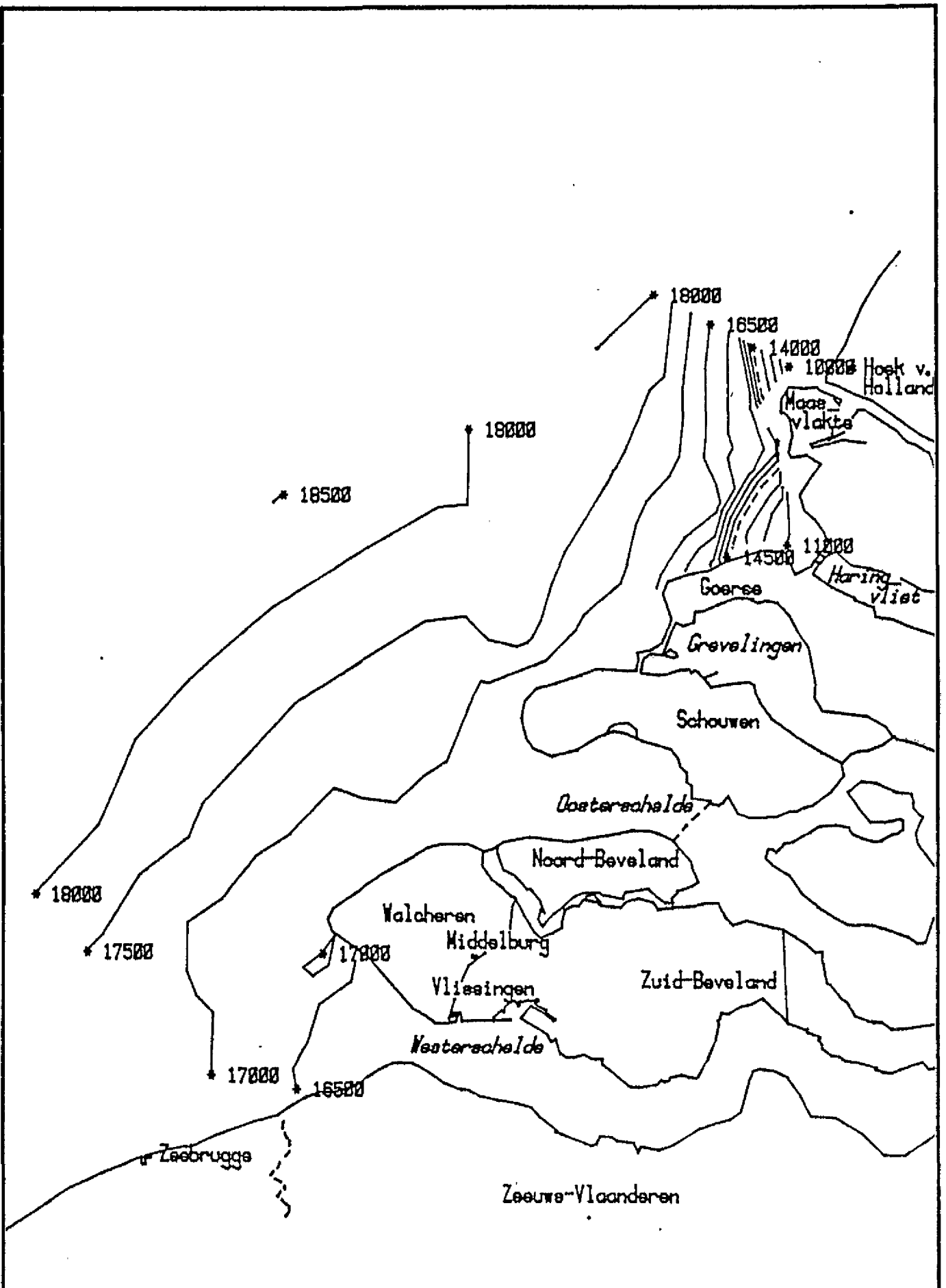
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 7 (14-7-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 4, ZW 4, NW 4

A4



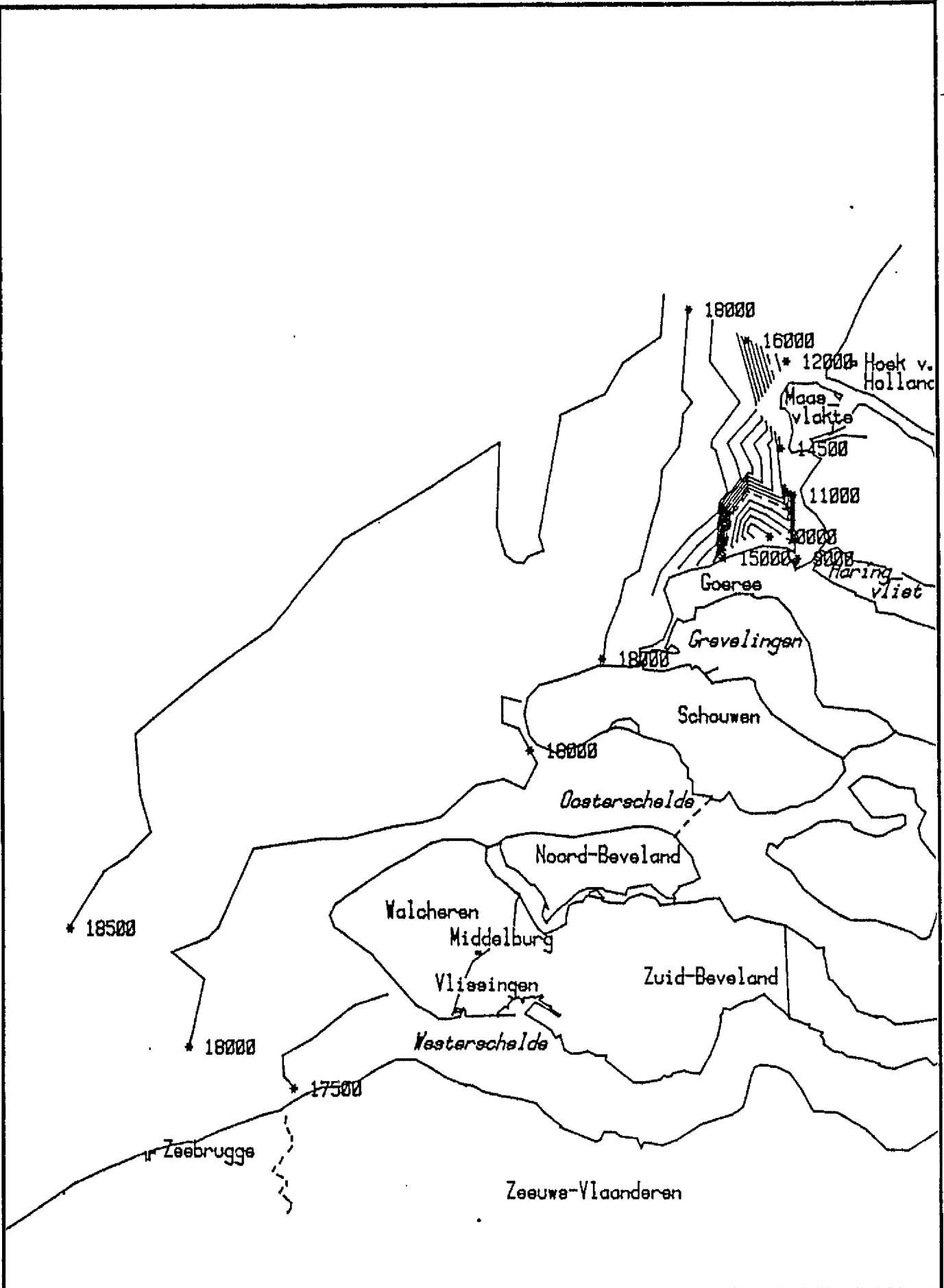
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 6 (16-6-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 5, ZW 5, NW 5

A4



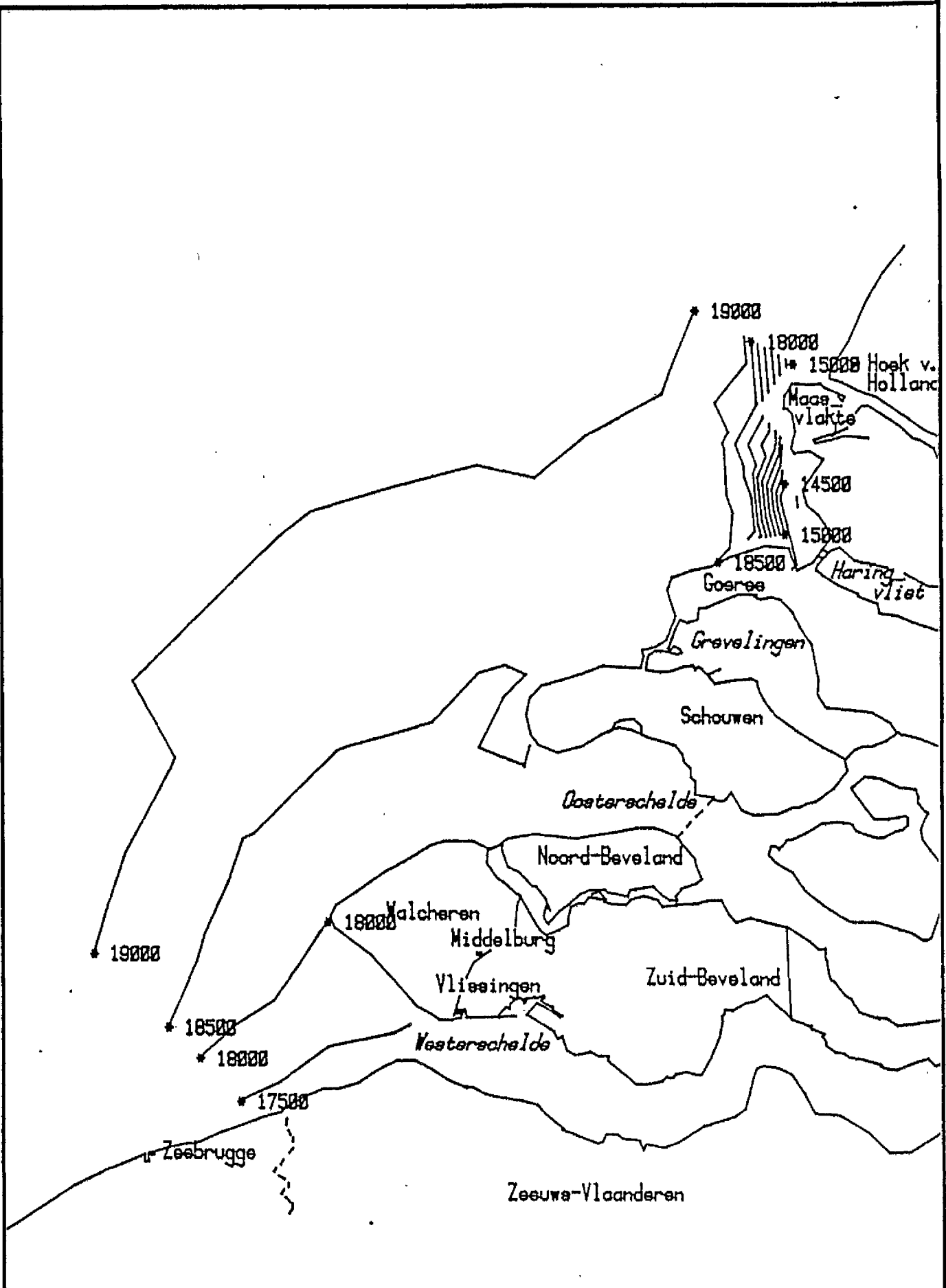
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 18 (4-5-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 6, ZW 7, ZW 5

A4



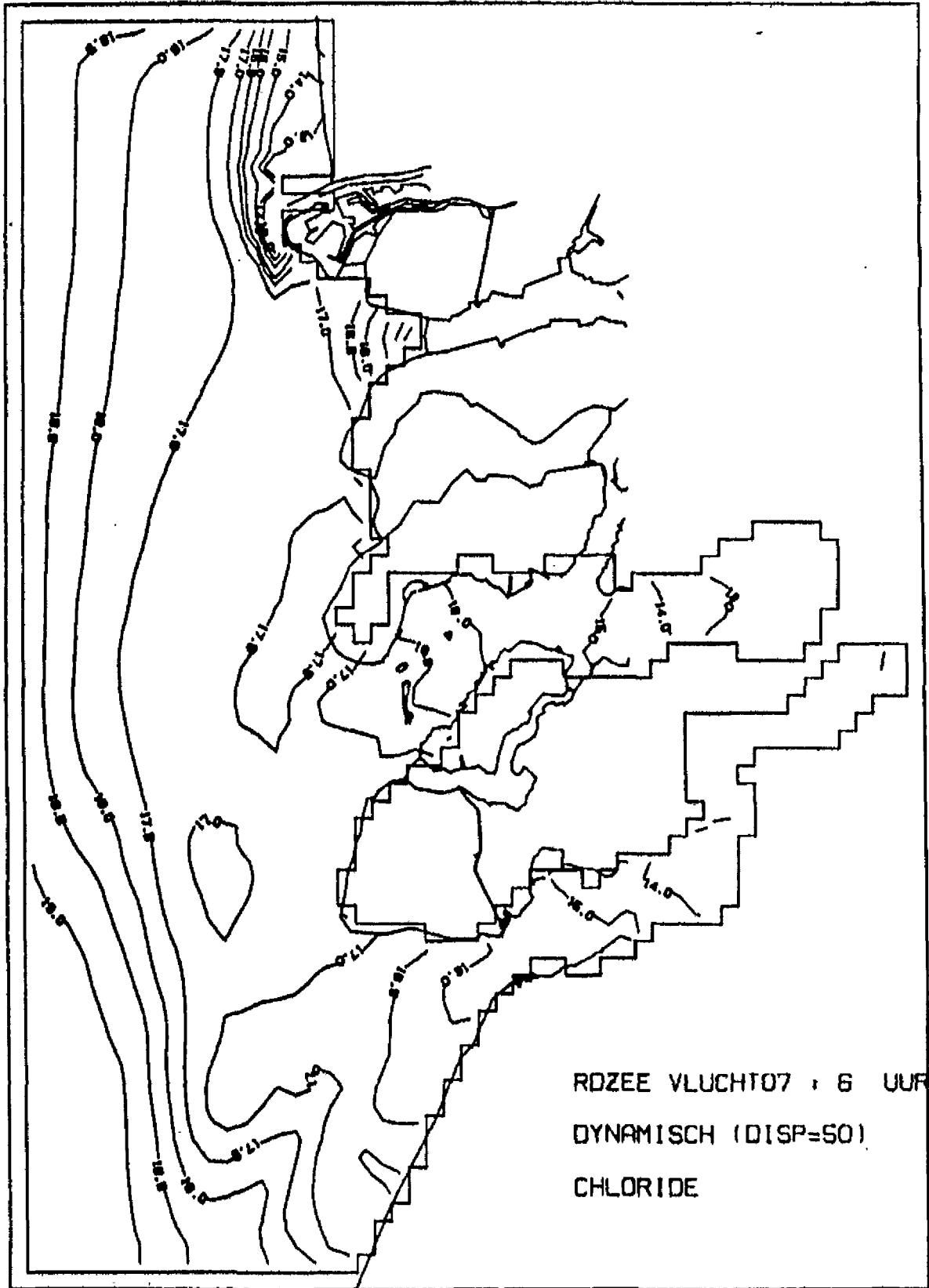
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 22 (17-8-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 6, ZW 6, ZW 6

A4



Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 26 (11-11-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 5, ZW 6, ZW 6

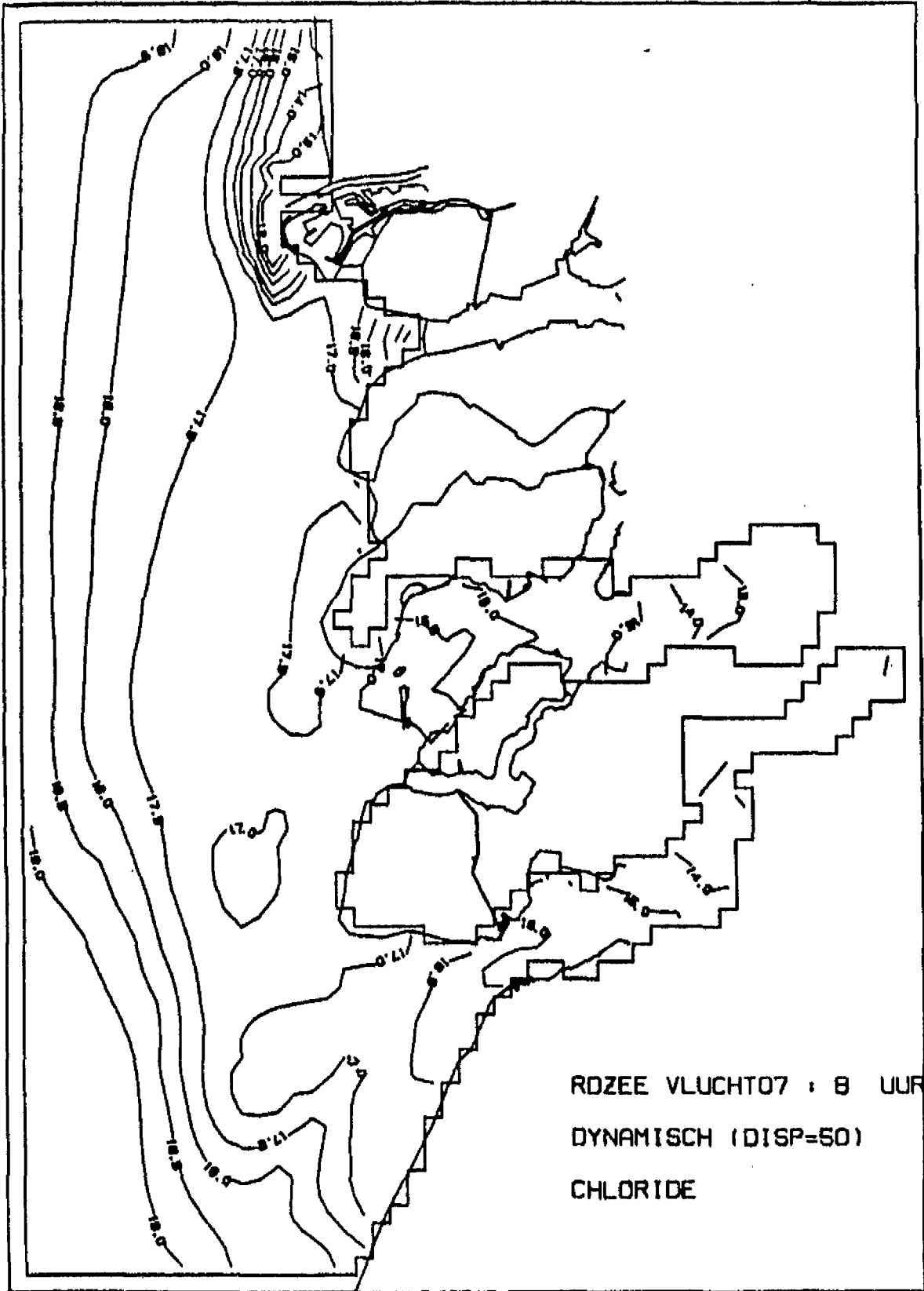
A4



Berekend concentratiepatroon - westenwind  
Tijdstip :4 uur voor hoogwater bij Scheveningen

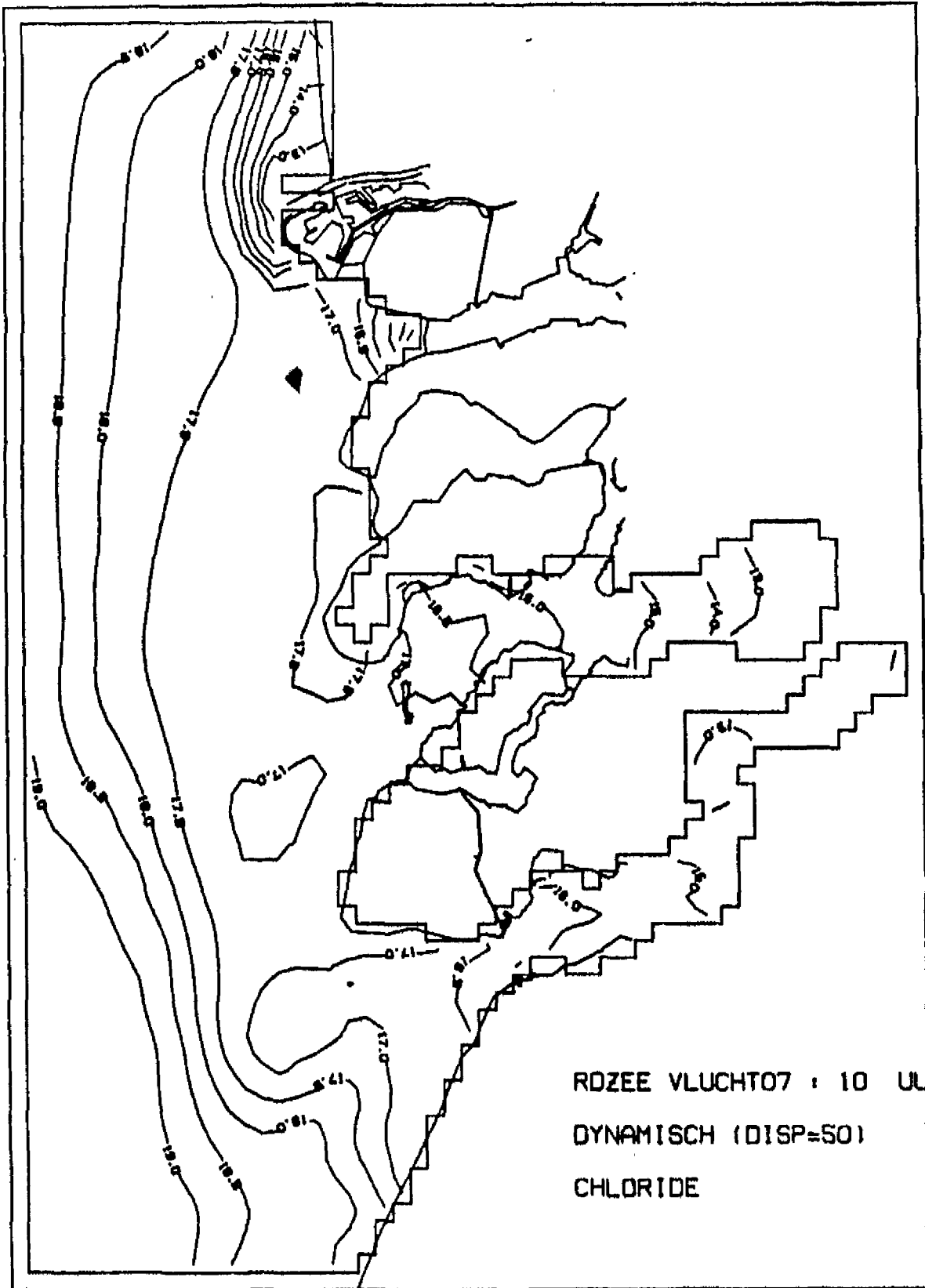
A4



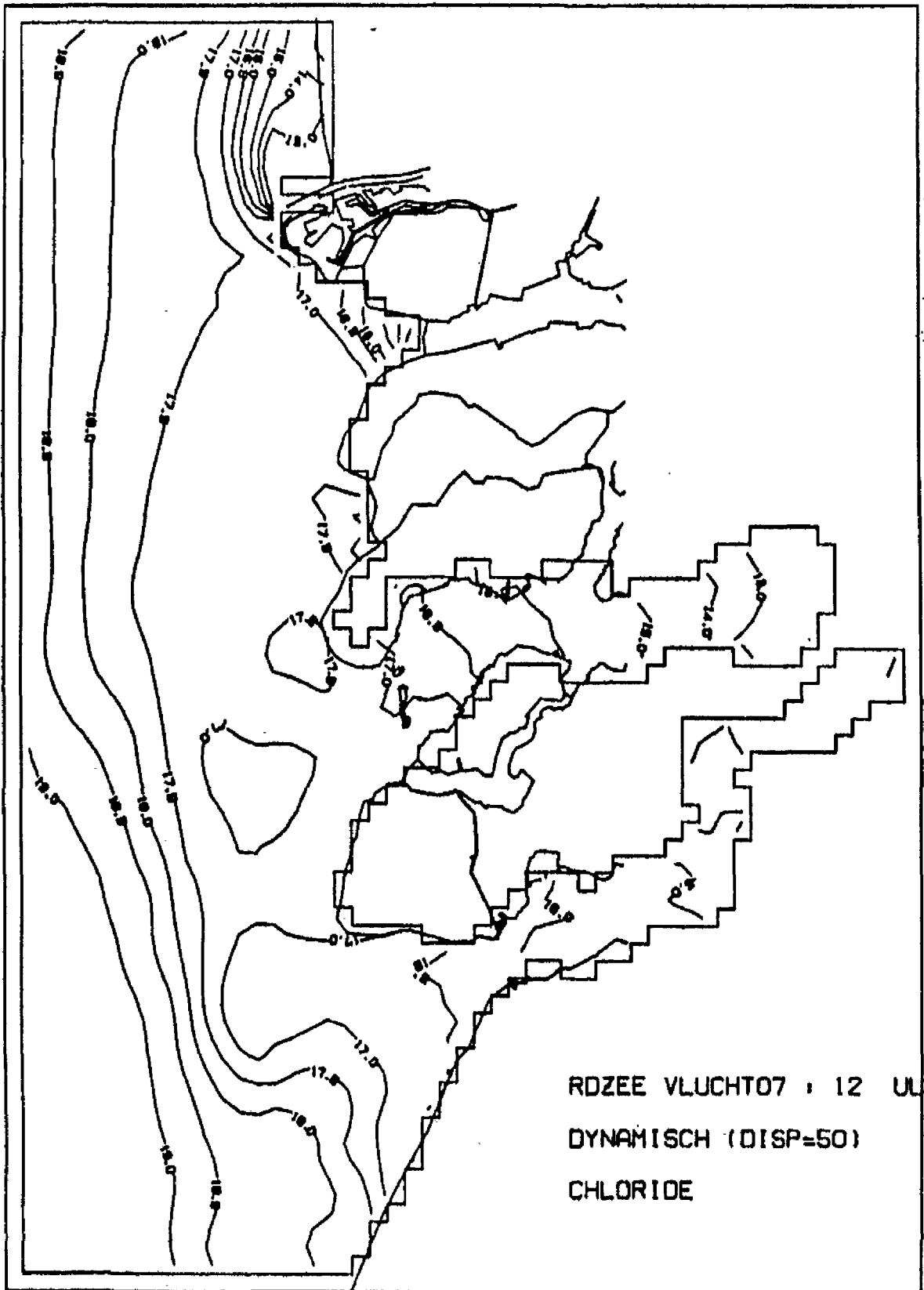


Berekend concentratiepatroon - westenwind  
 Tijdstip :2 uur voor hoogwater bij Scheveningen

A4

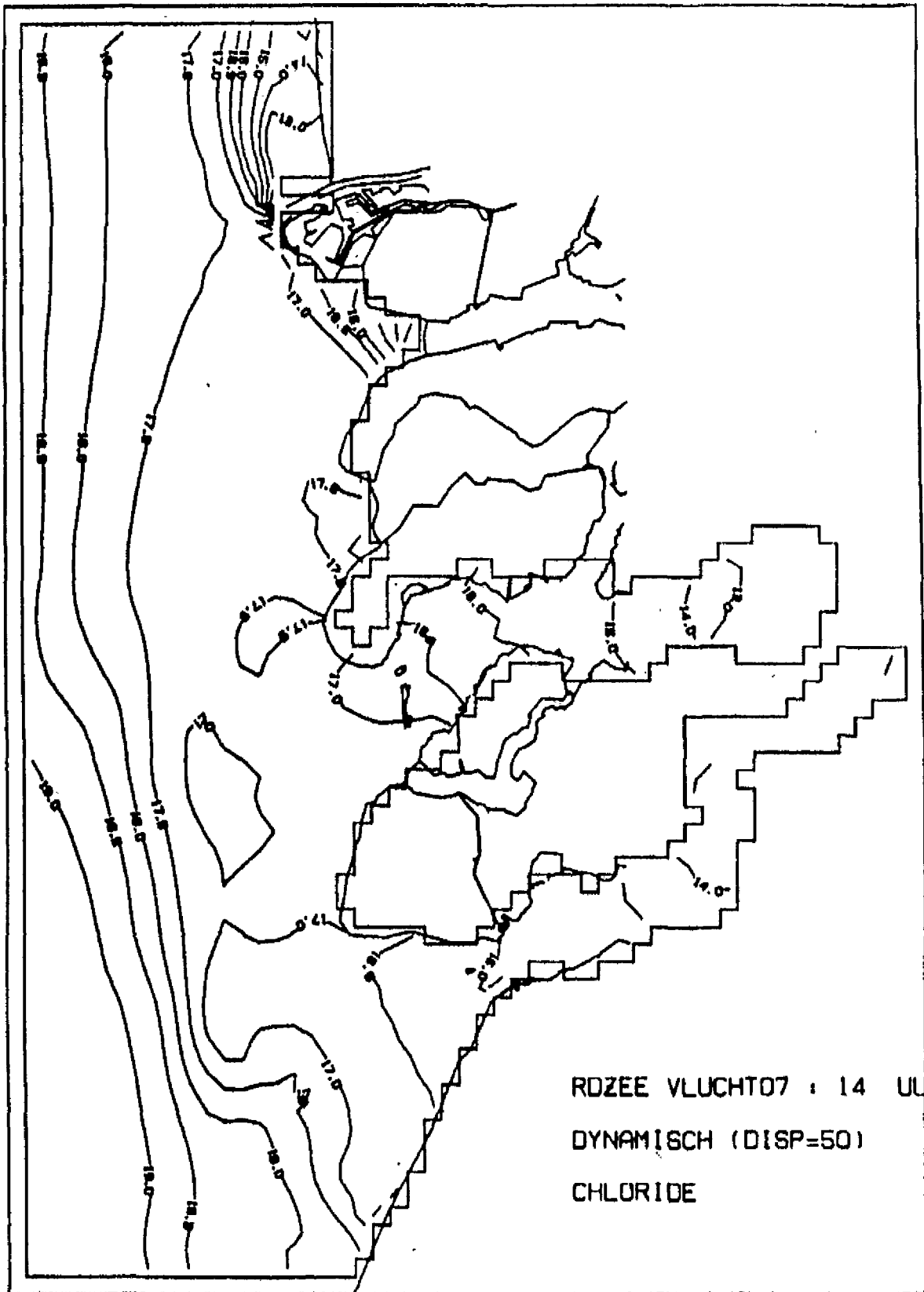


Berekend concentratiepatroon - westenwind  
Tijdstip : hoogwater bij Scheveningen



Berekend concentratiepatroon - westenwind  
 Tijdstip : 2 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



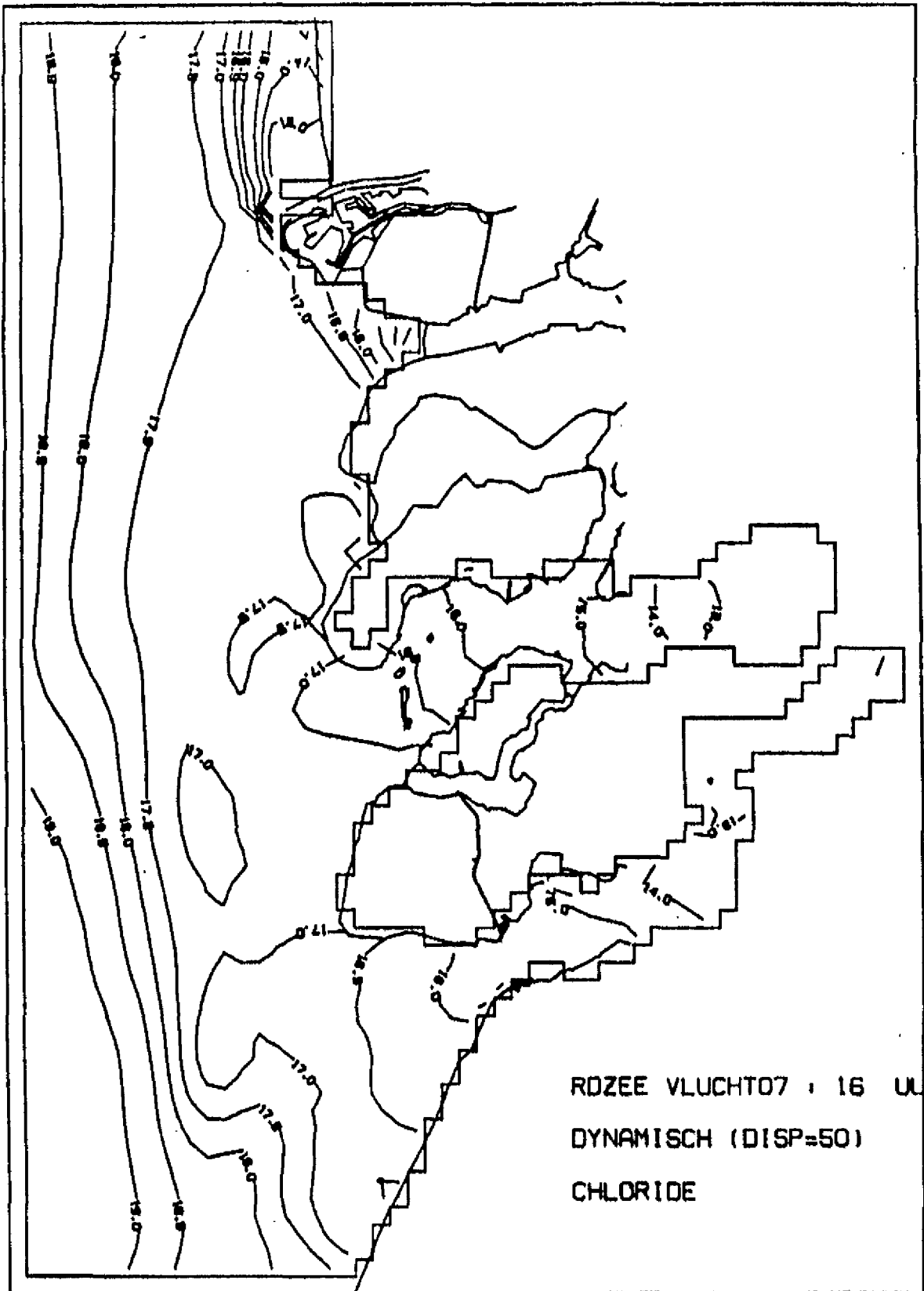
Berekend concentratiepatroon - westenwind  
 Tijdstip : 4 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig.75



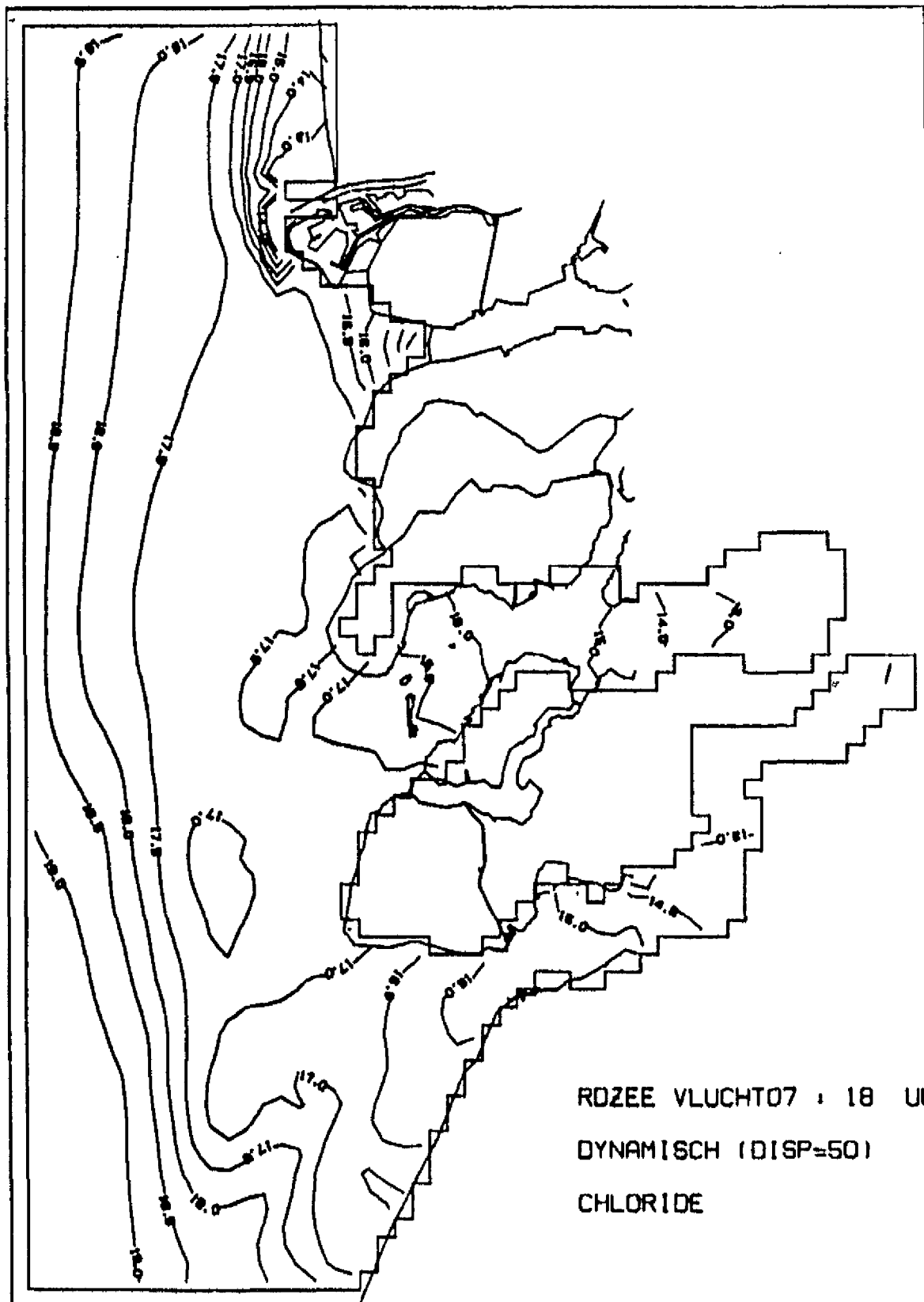
Berekend concentratiepatroon - westenwind  
 Tijdstip : 6 uur na hoogwater bij Scheveningen

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2176

fig.76

A4



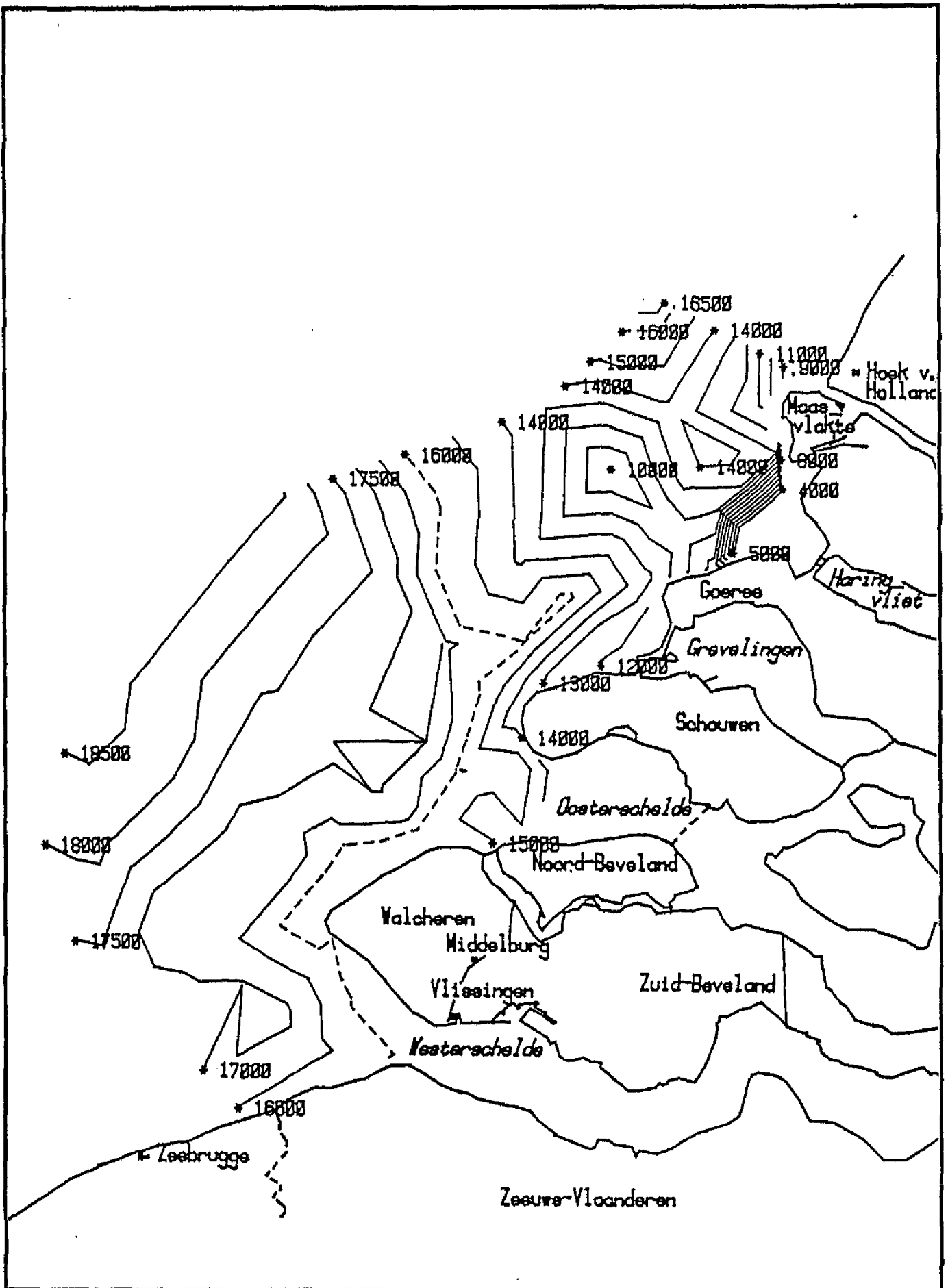
Berekend concentratiepatroon - westenwind  
 Tijdstip : 8 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

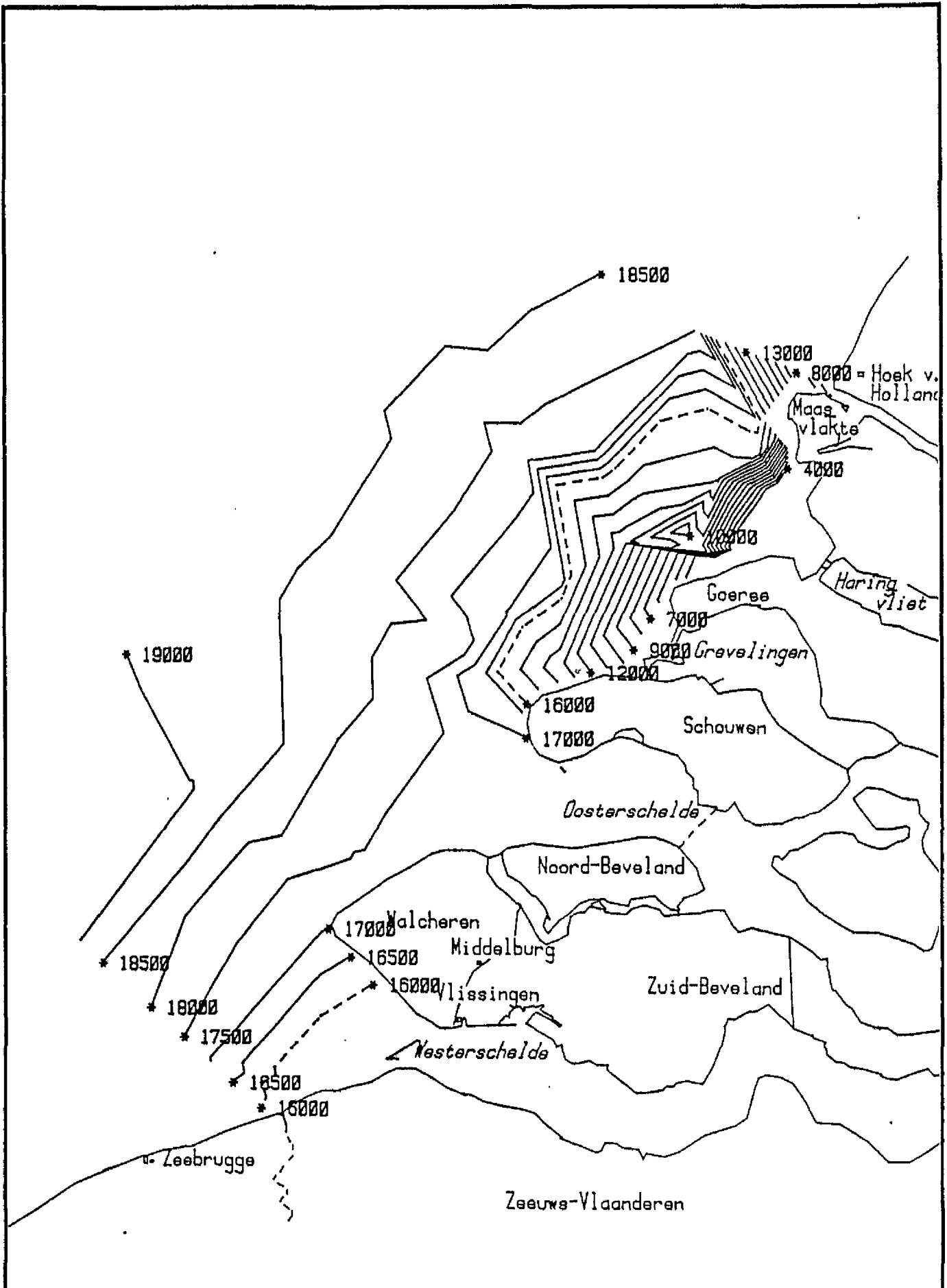
R 2176

fig.77



Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 12 (8-12-1981)  
 wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 NW 5, NW 5, NW 5

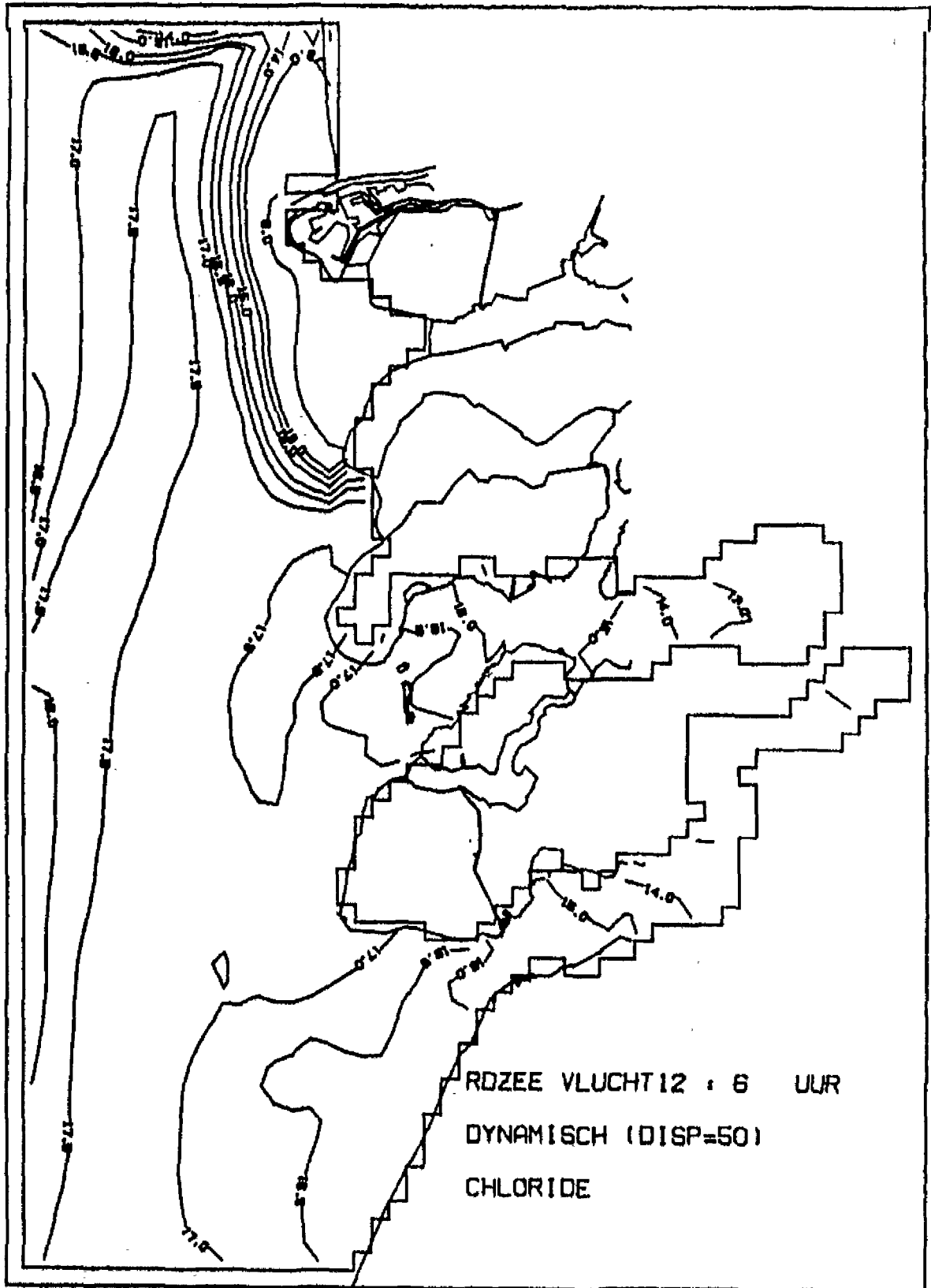
A4



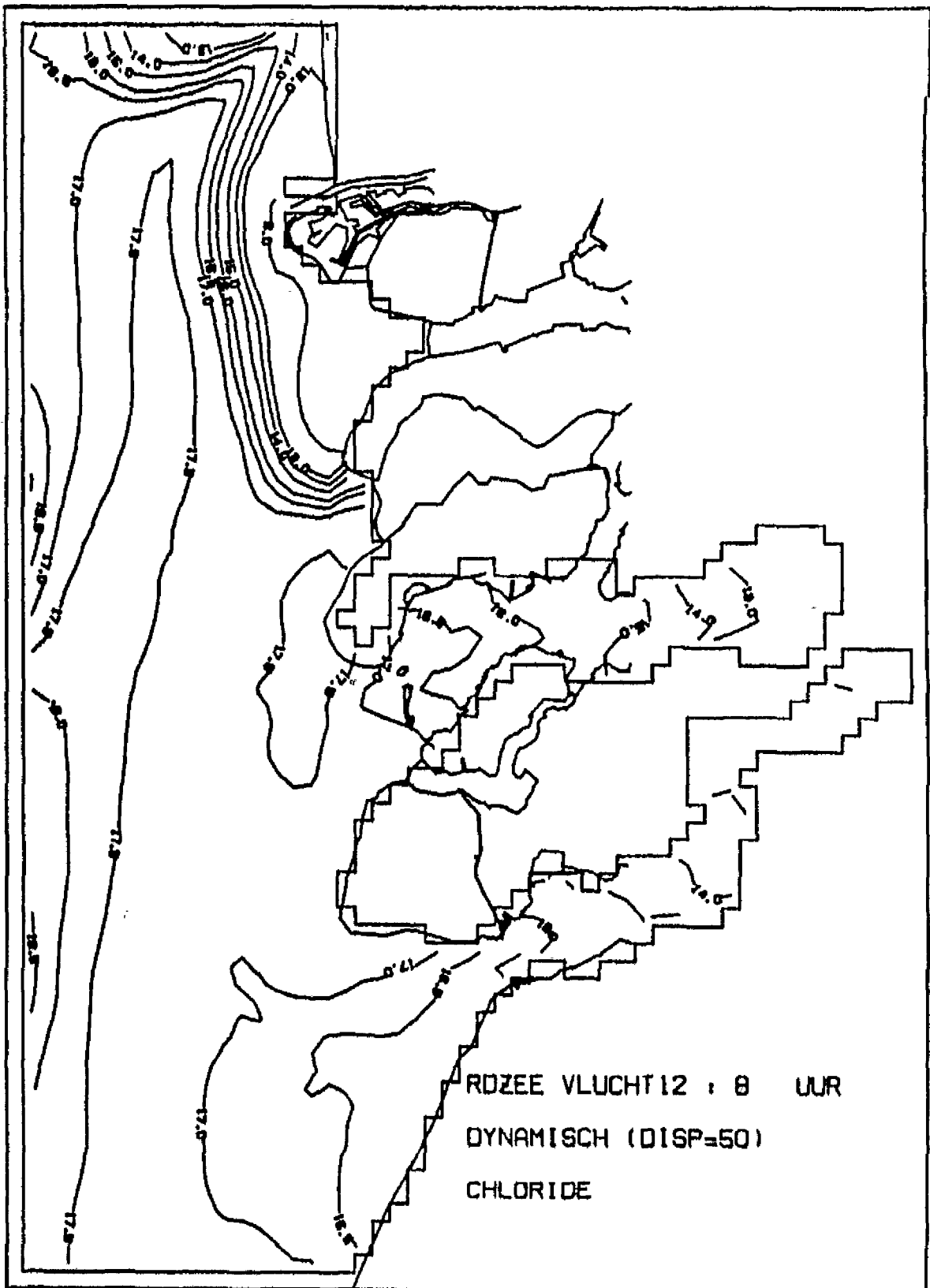
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 3 (17-3-1981)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 NW 3, NW 3, NW 3

A4



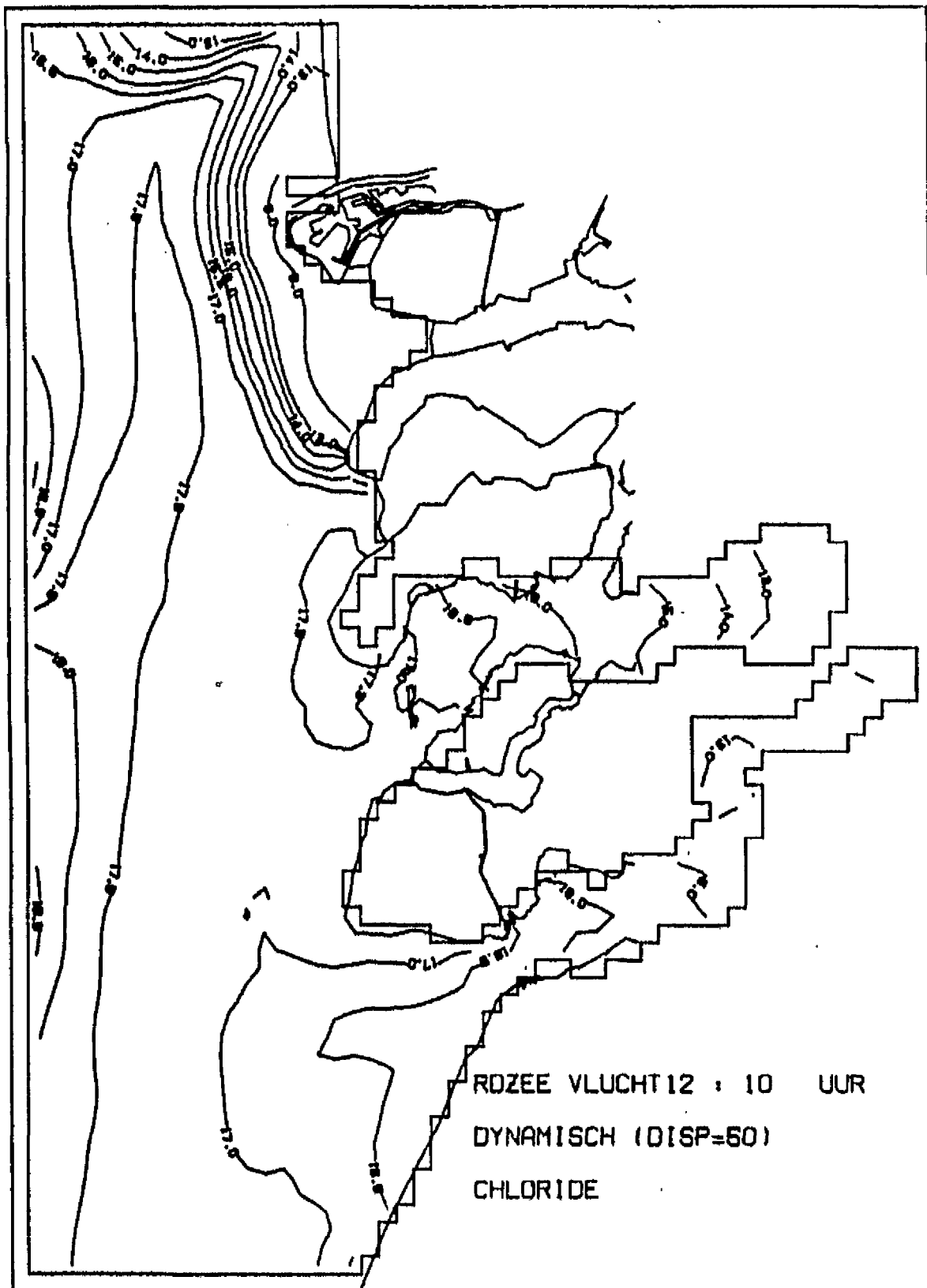


Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : 4 uur voor hoogwater bij Scheveningen



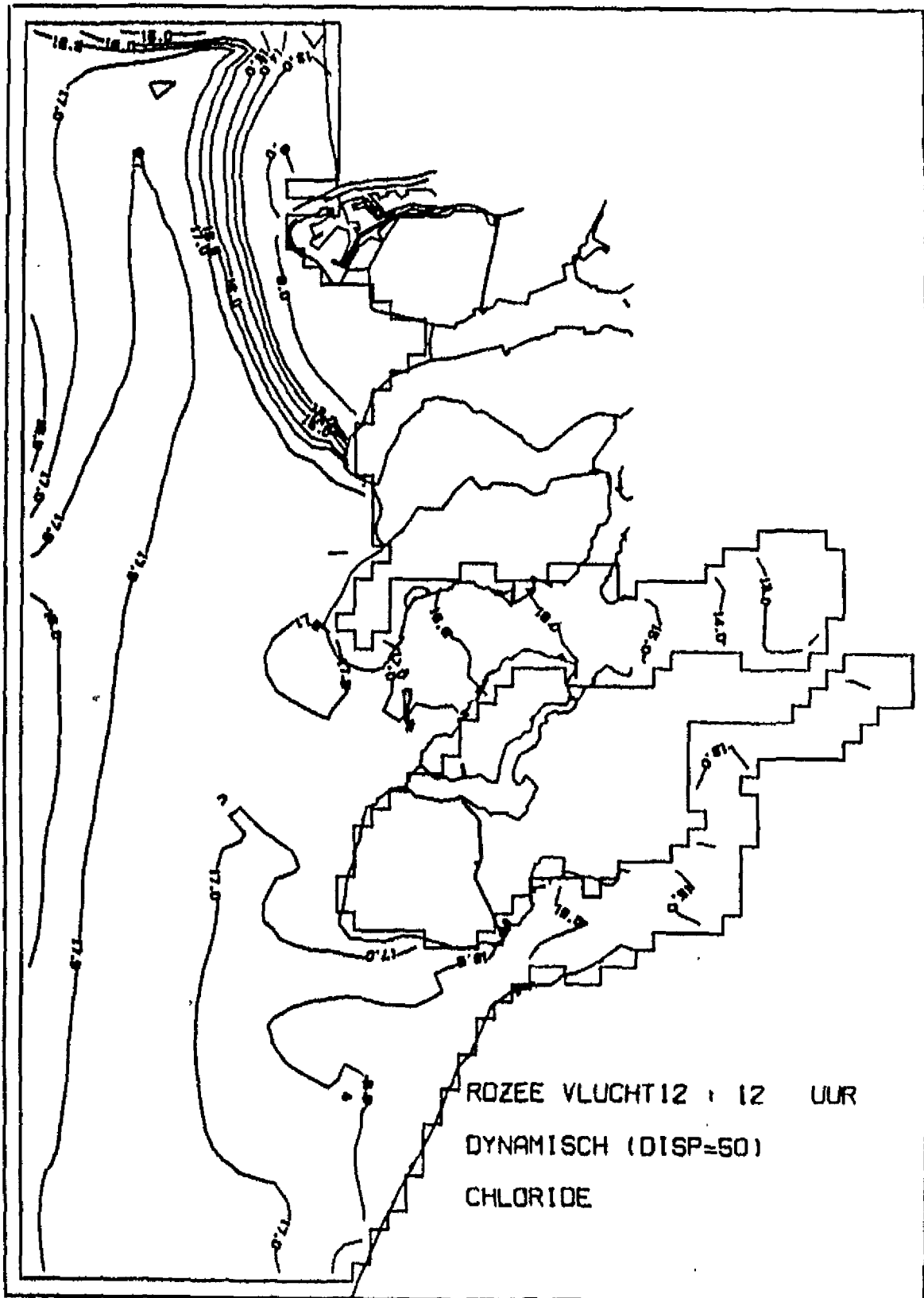
Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : 2 uur voor hoogwater bij Scheveningen

A4



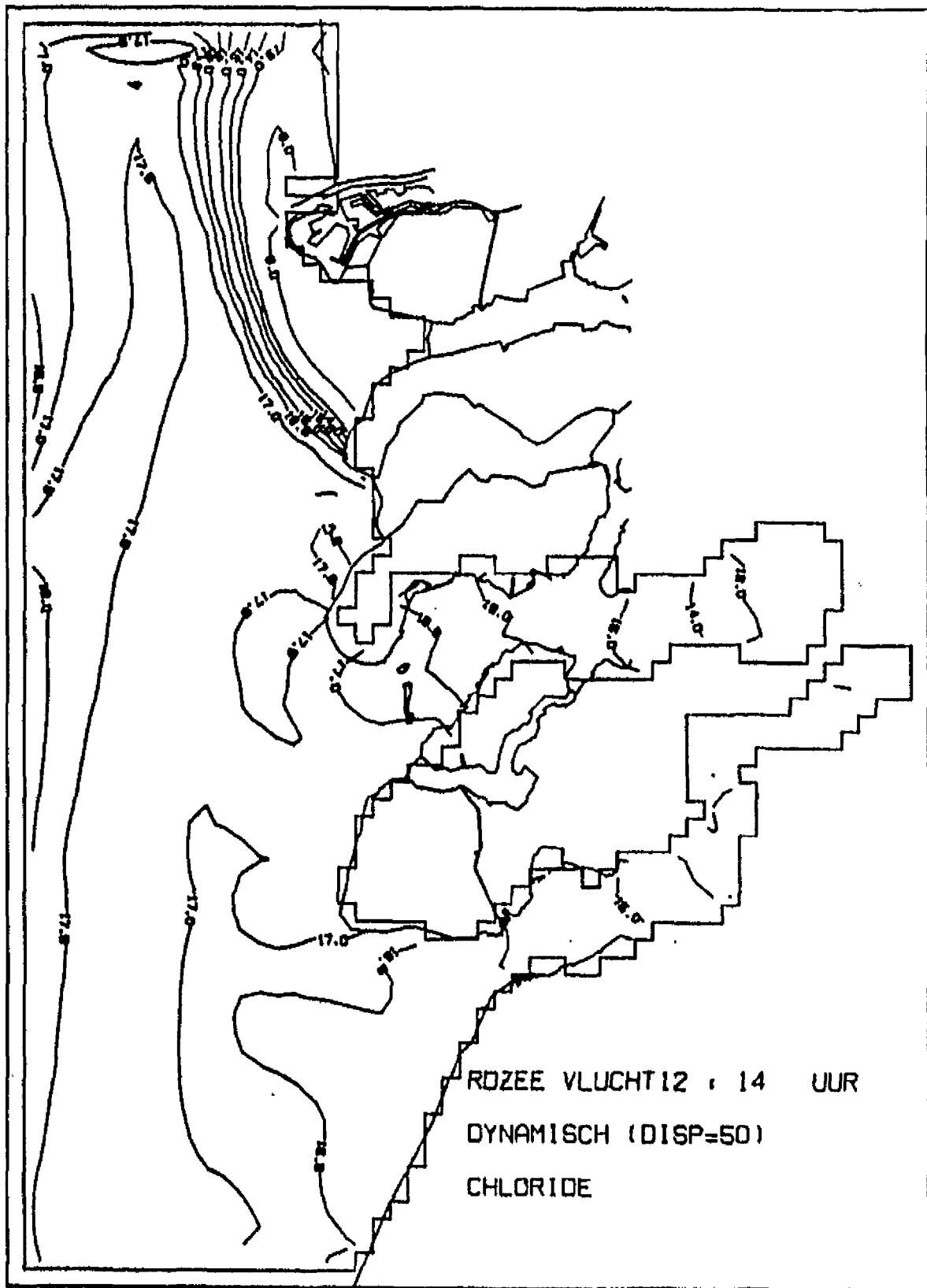
Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : hoogwater bij Scheveningen

A4



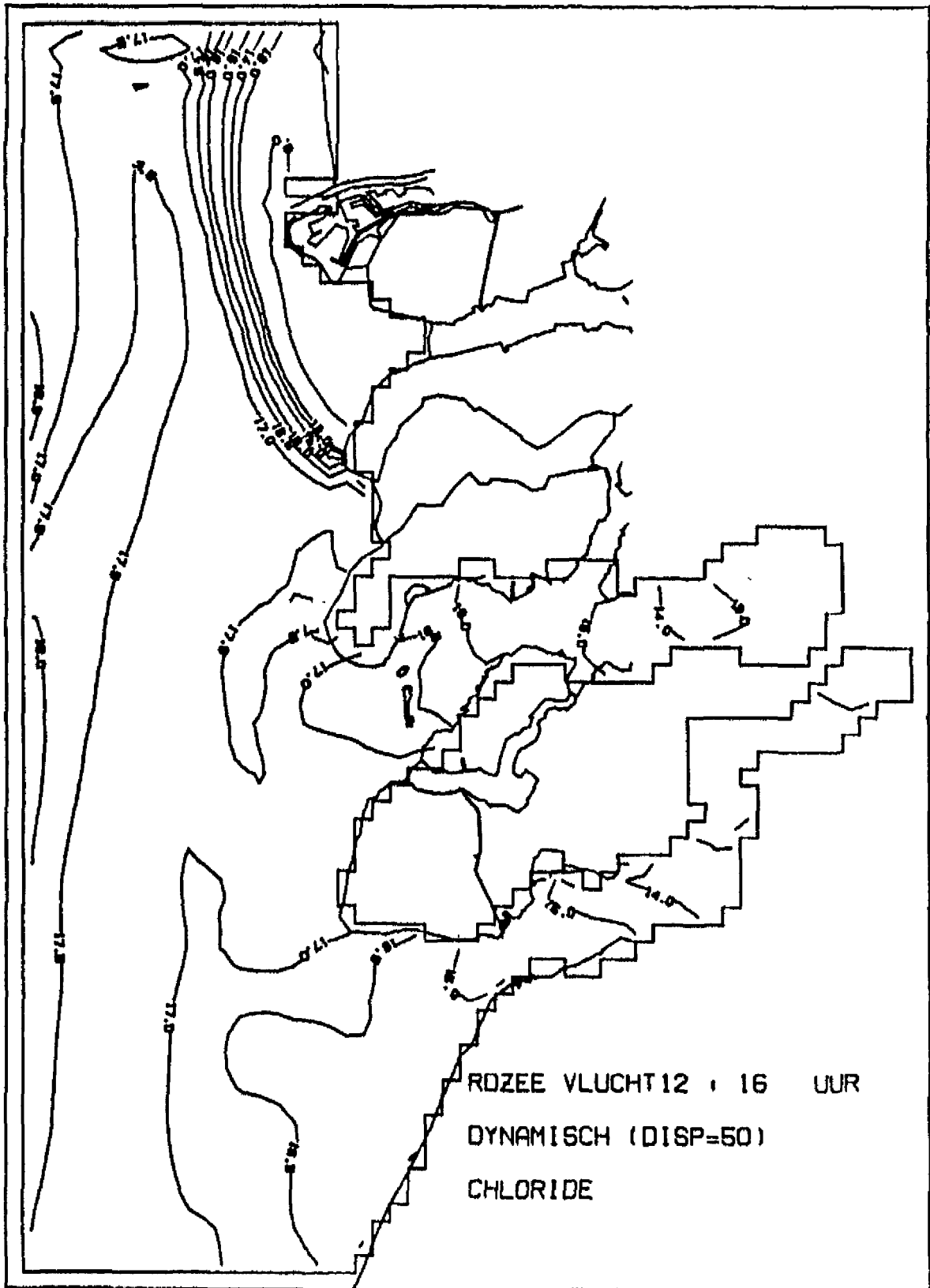
Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
Tijdstip : 2 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



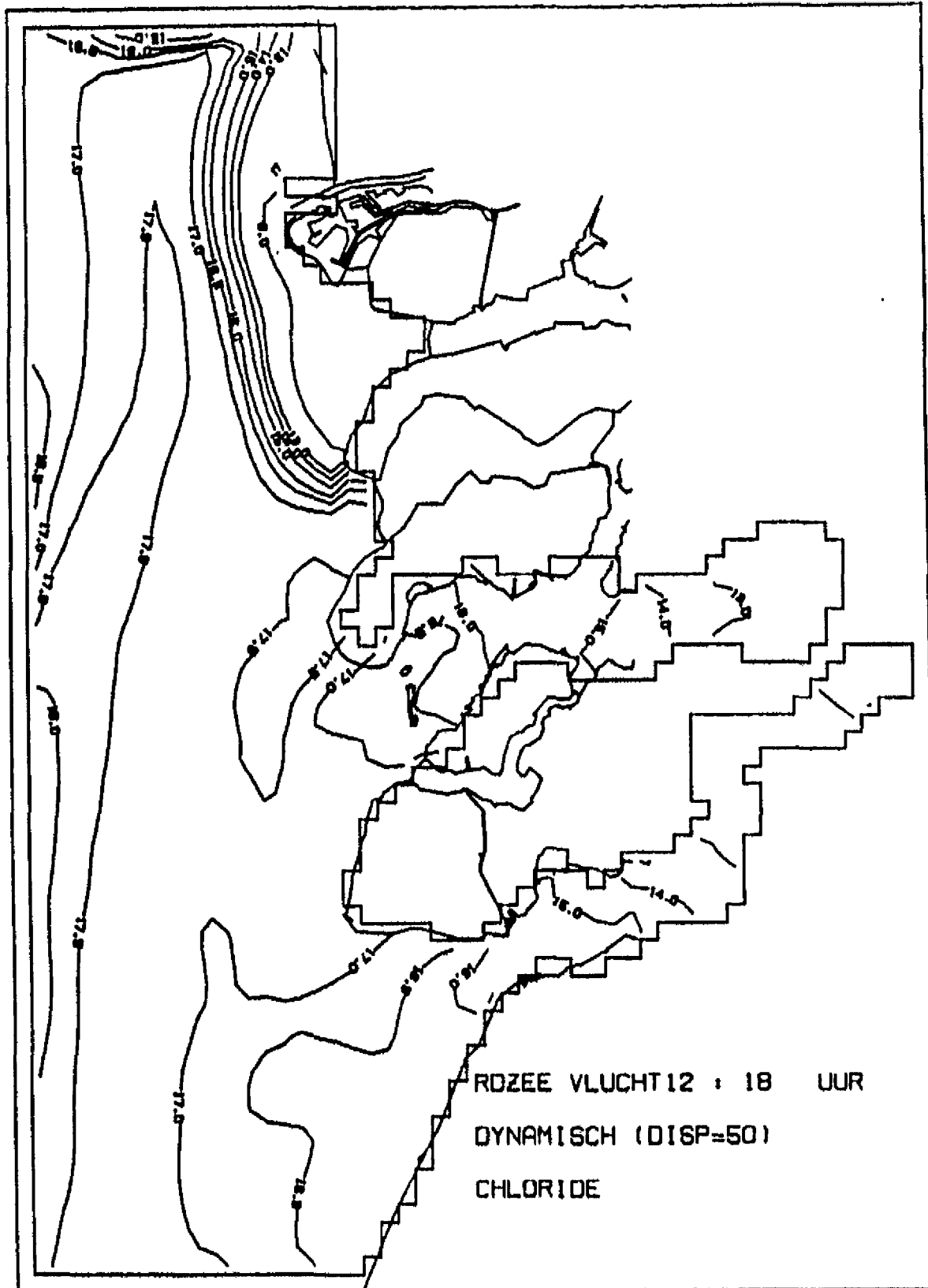
Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : 4 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4

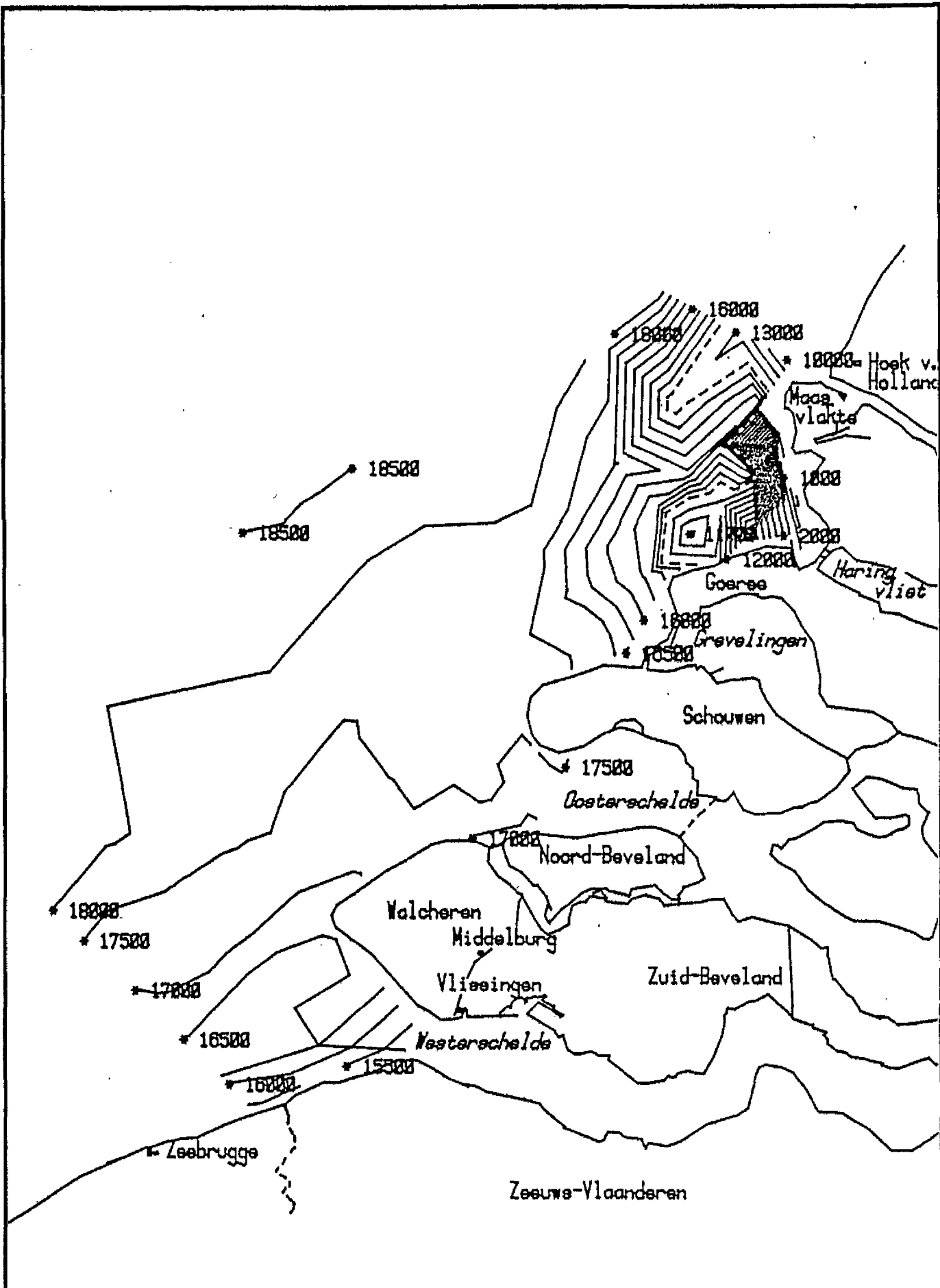


Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : 6 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



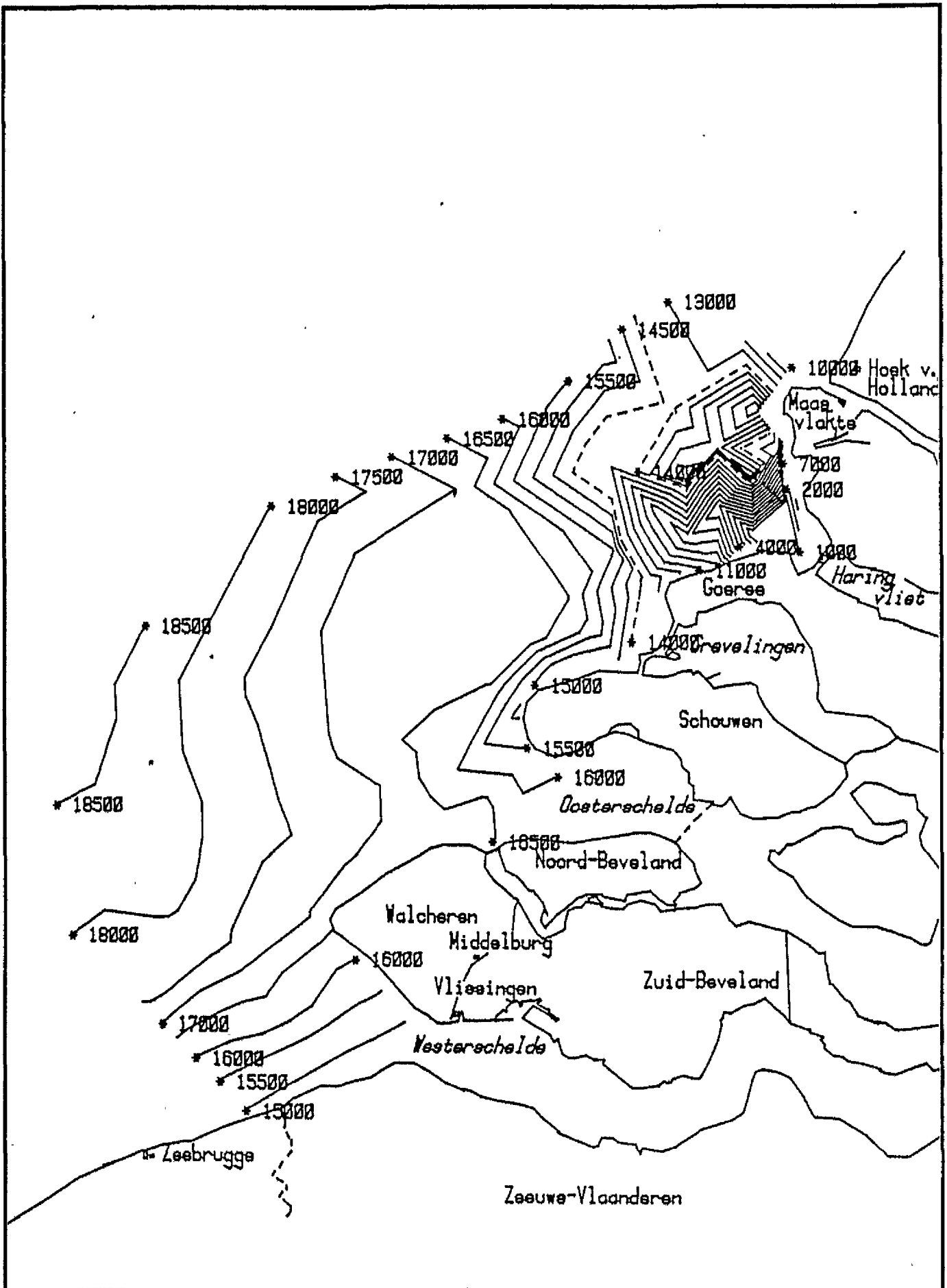
Berekend concentratiepatroon - noordwestenwind  
 Tijdstip : 8 uur na hoogwater bij Scheveningen



Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 15 (9-2-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 4, ZW 4, ZW 4-5

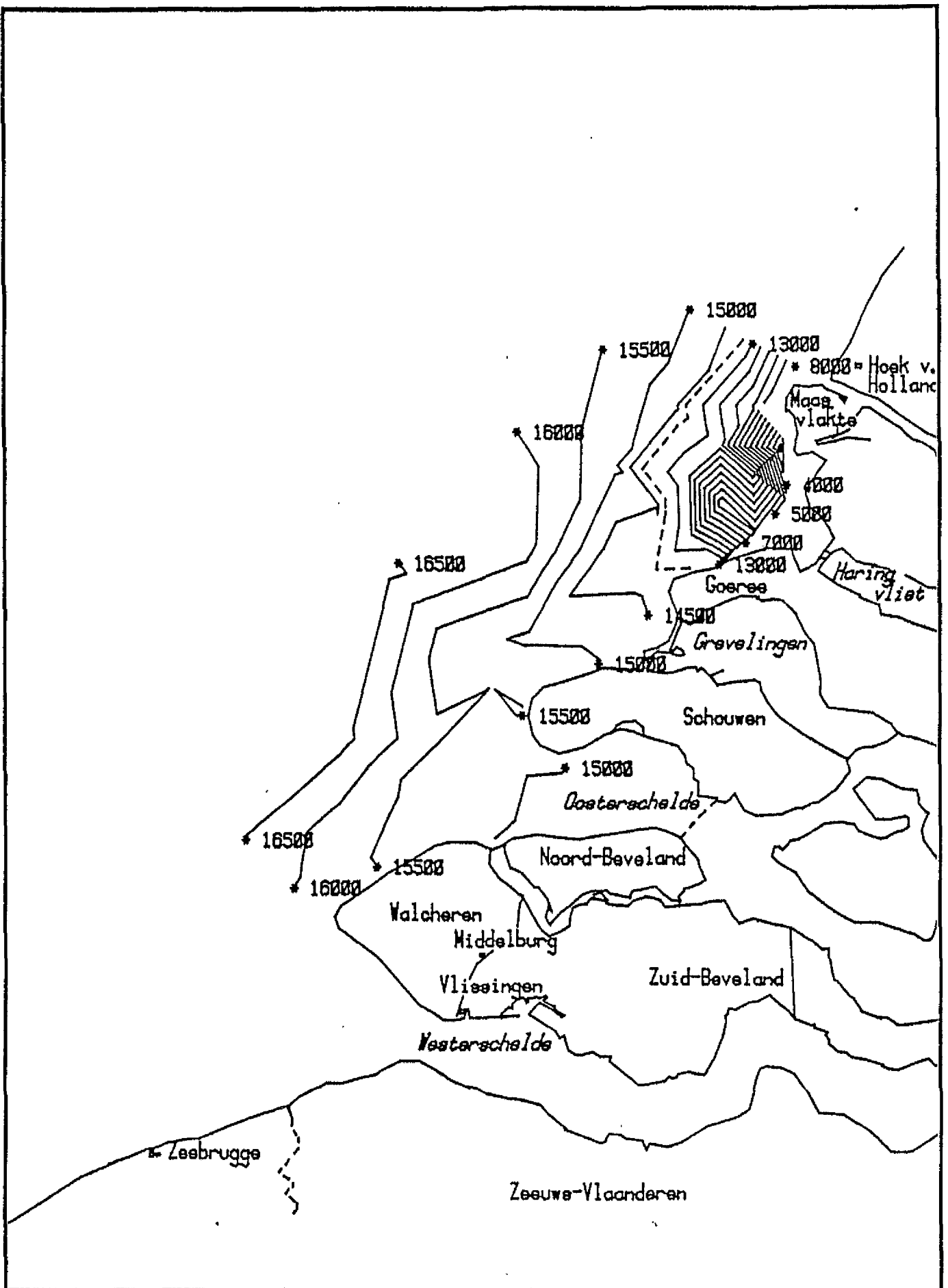
A4





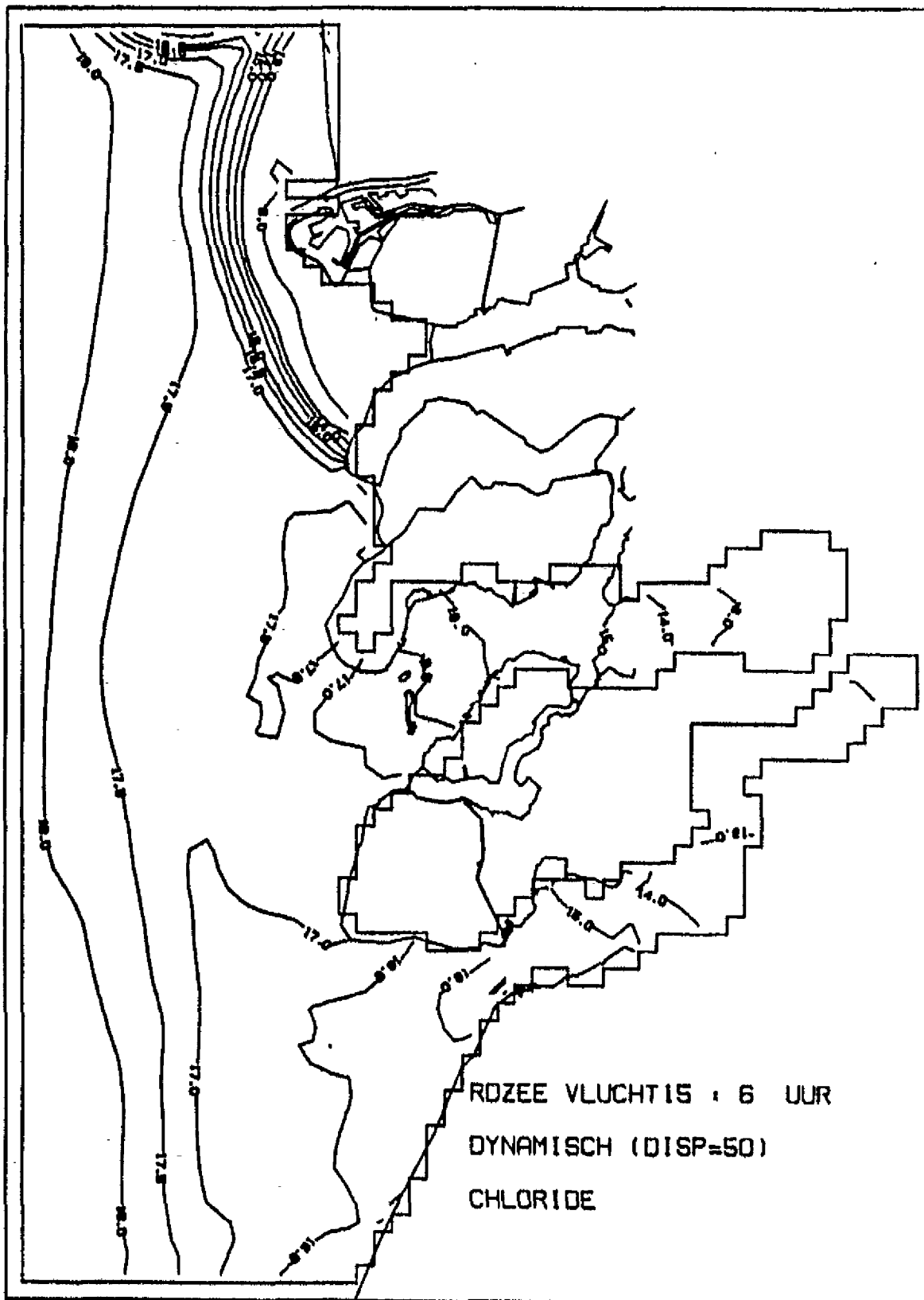
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 13 (7-1-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 ZW 6, NO 5, ZO 3

A4



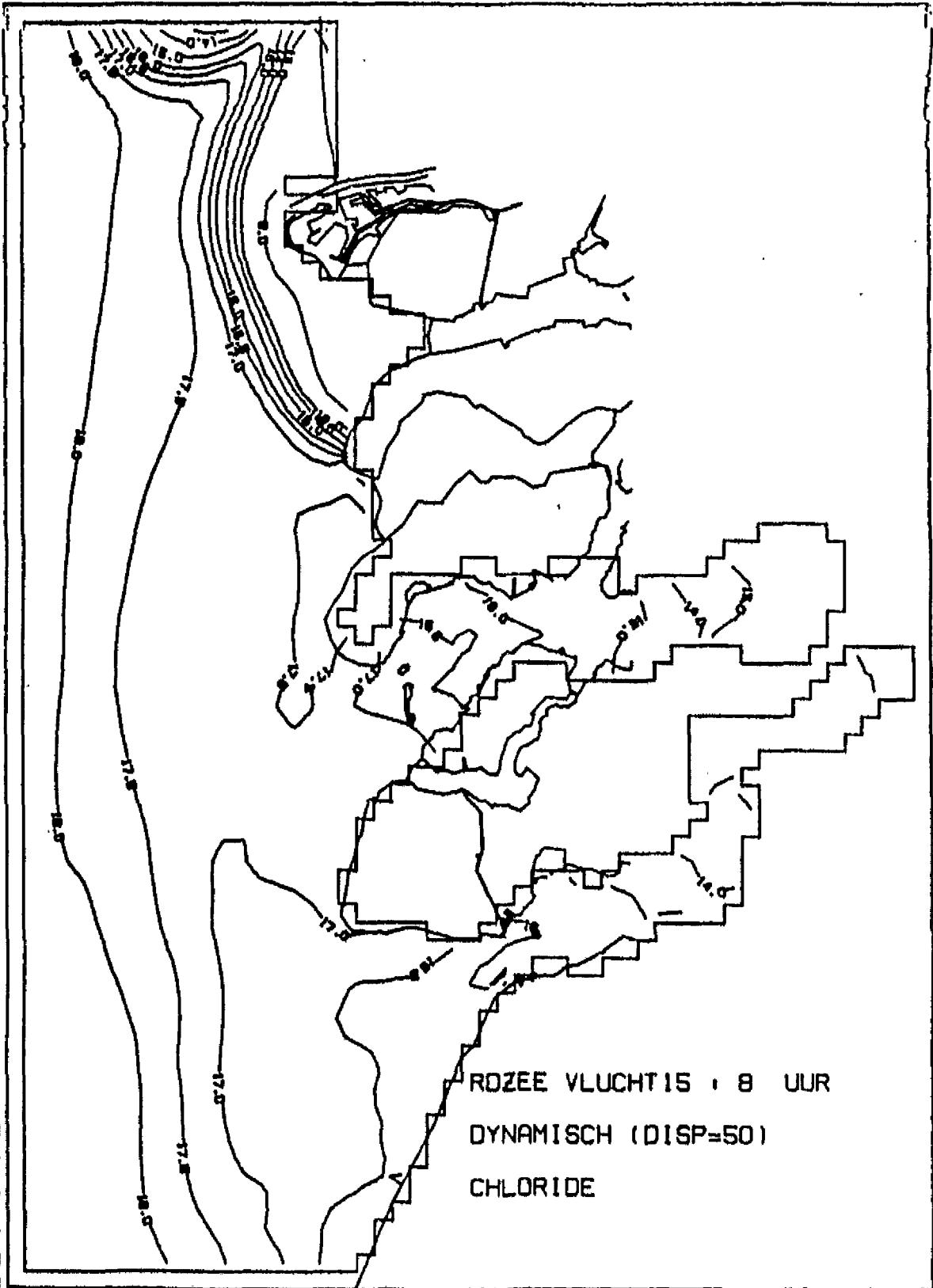
Chloridegehalten, gemeten bij vlucht 14 (14-1-1982)  
 Wind op de twee dagen ervoor en op de meetdag:  
 NO 4, ZO 4, ZO 3

A4



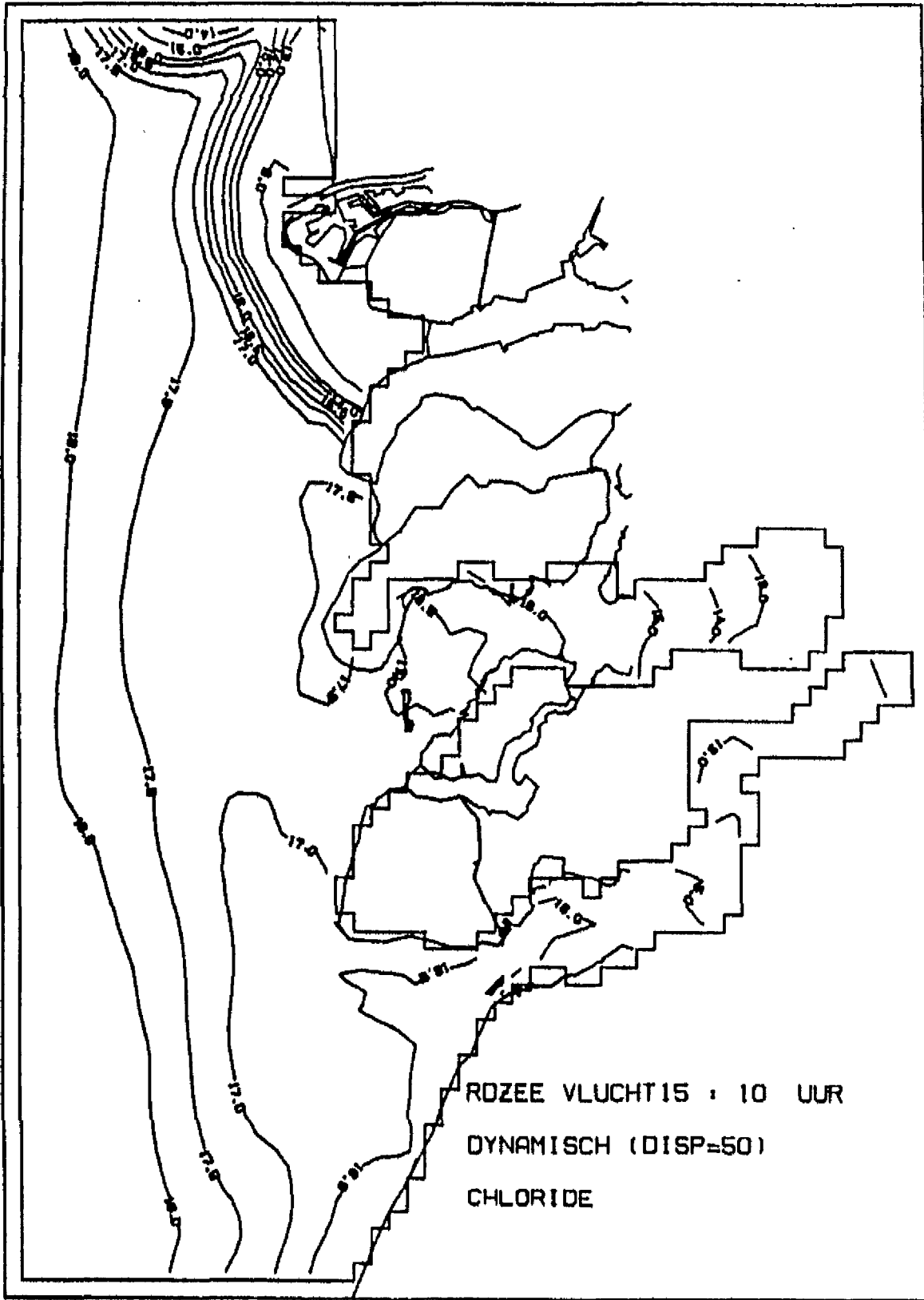
Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
Tijdstip : 4 uur voor hoogwater bij Scheveningen

A4

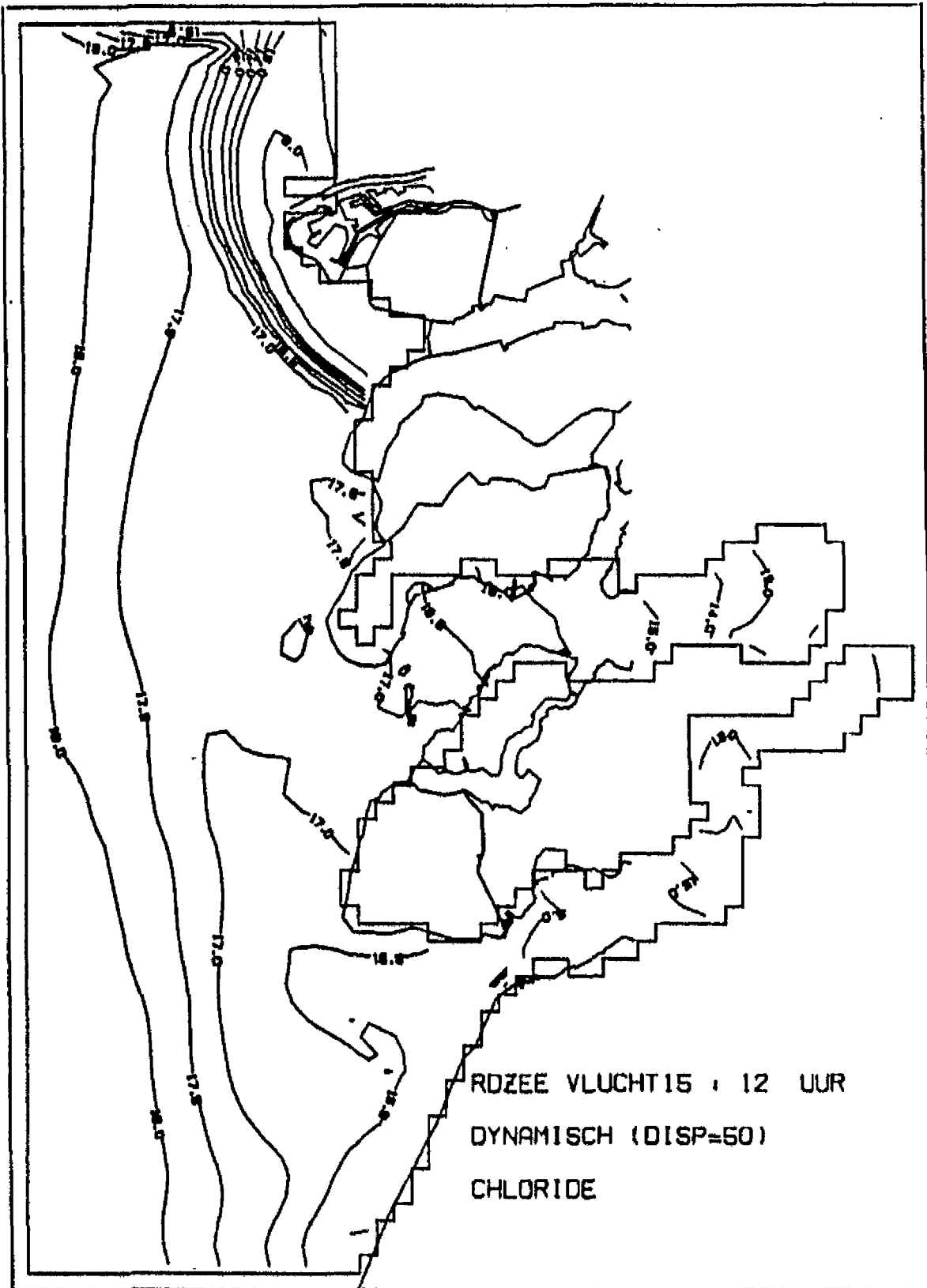


Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
 Tijdstip : 2 uur voor hoogwater bij Scheveningen

A4

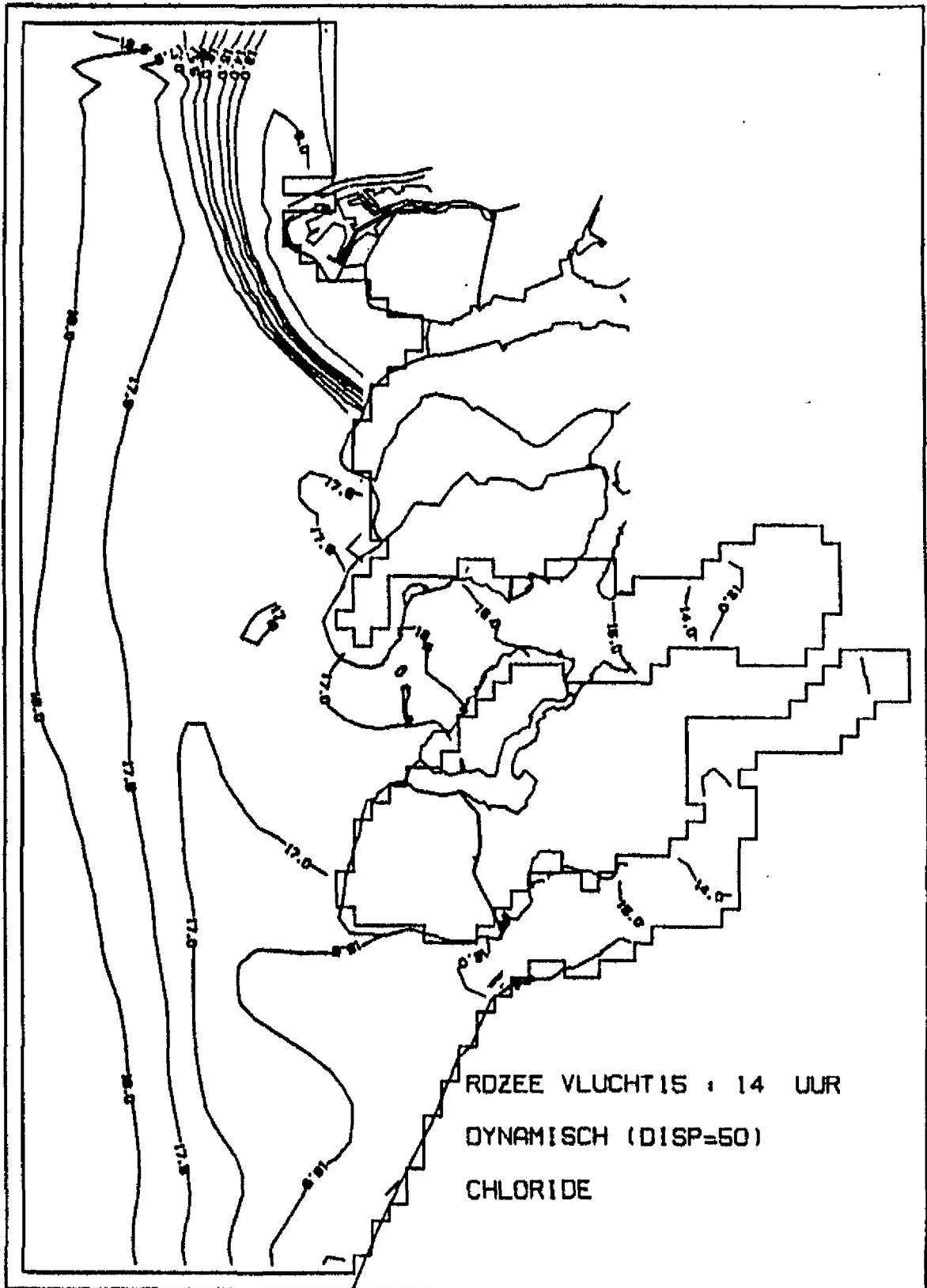


Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
 Tijdstip : hoogwater bij Scheveningen



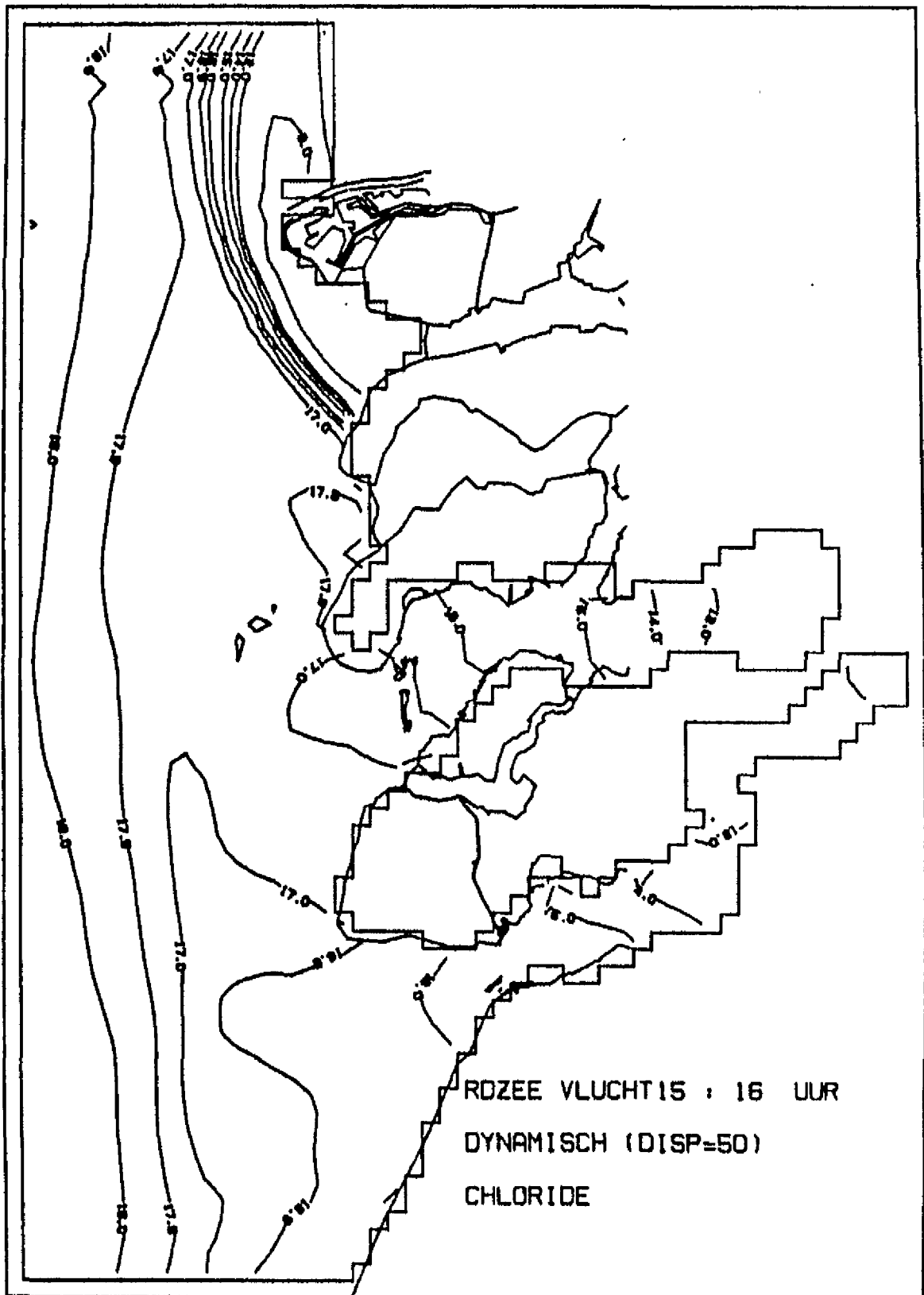
Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
 Tijdstip : 2 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



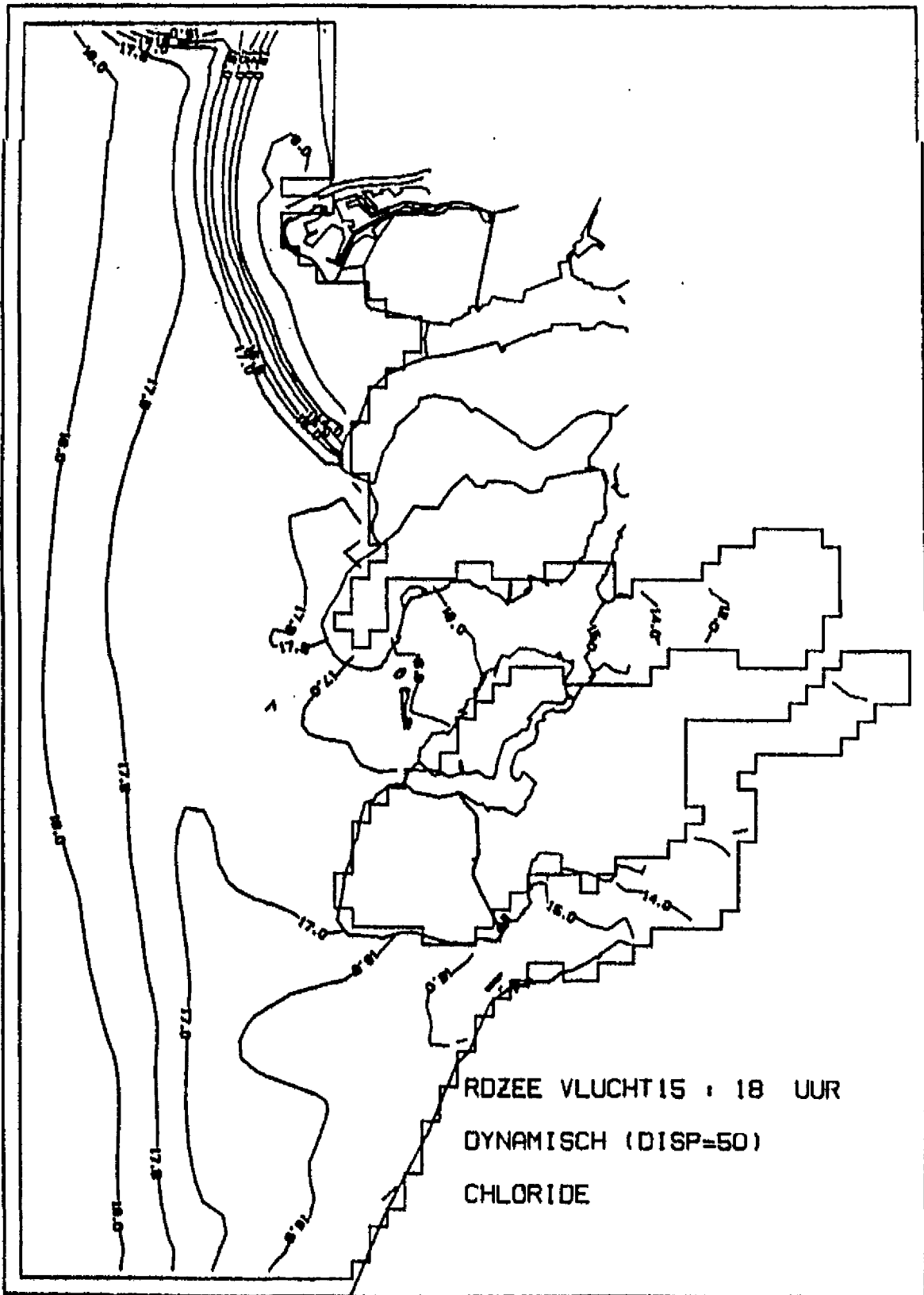
Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
 Tijdstip : 4 uur na hoogwater bij Scheveningen

A4



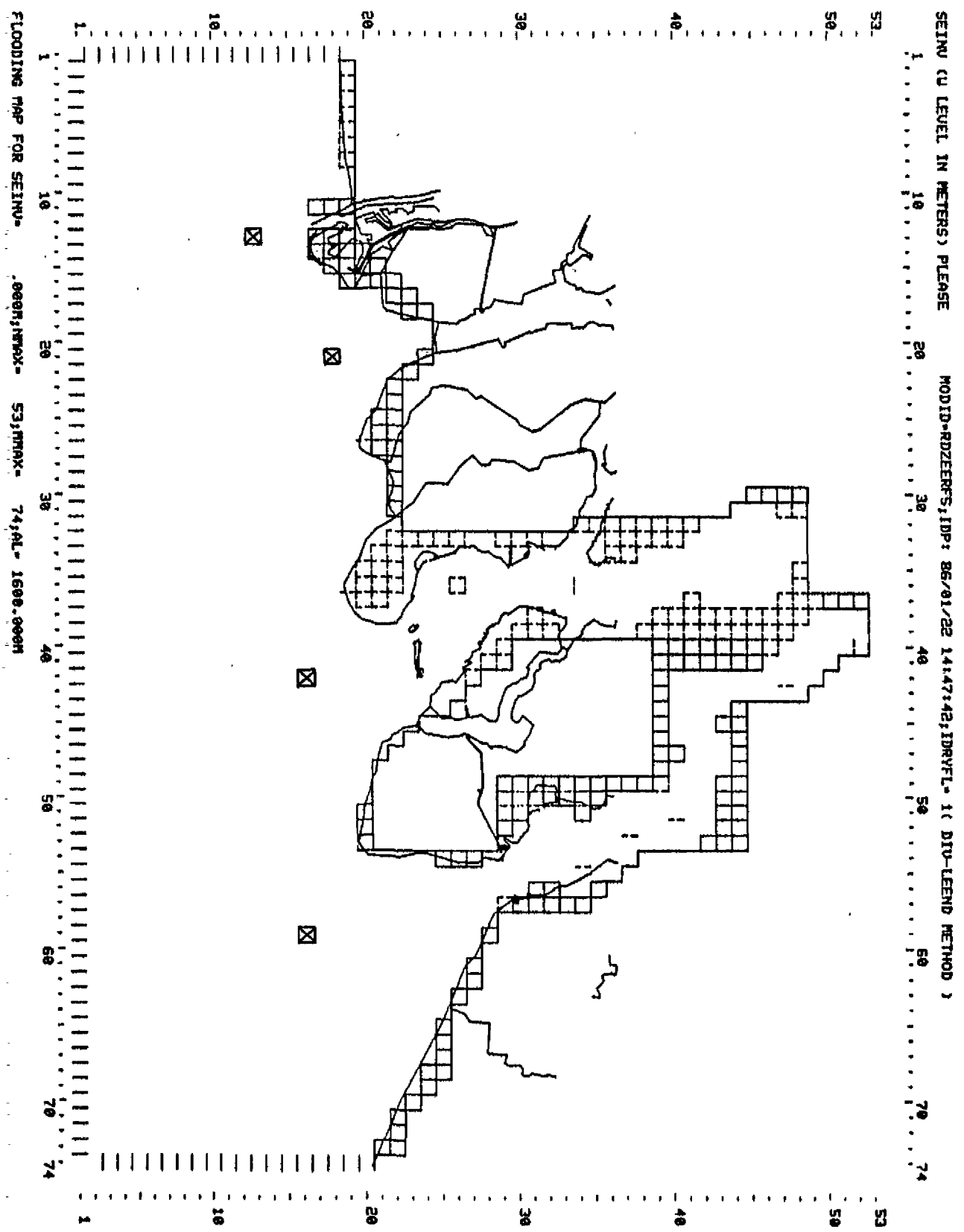
Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
Tijdstip : 6 uur na hoogwater bij Scheveningen



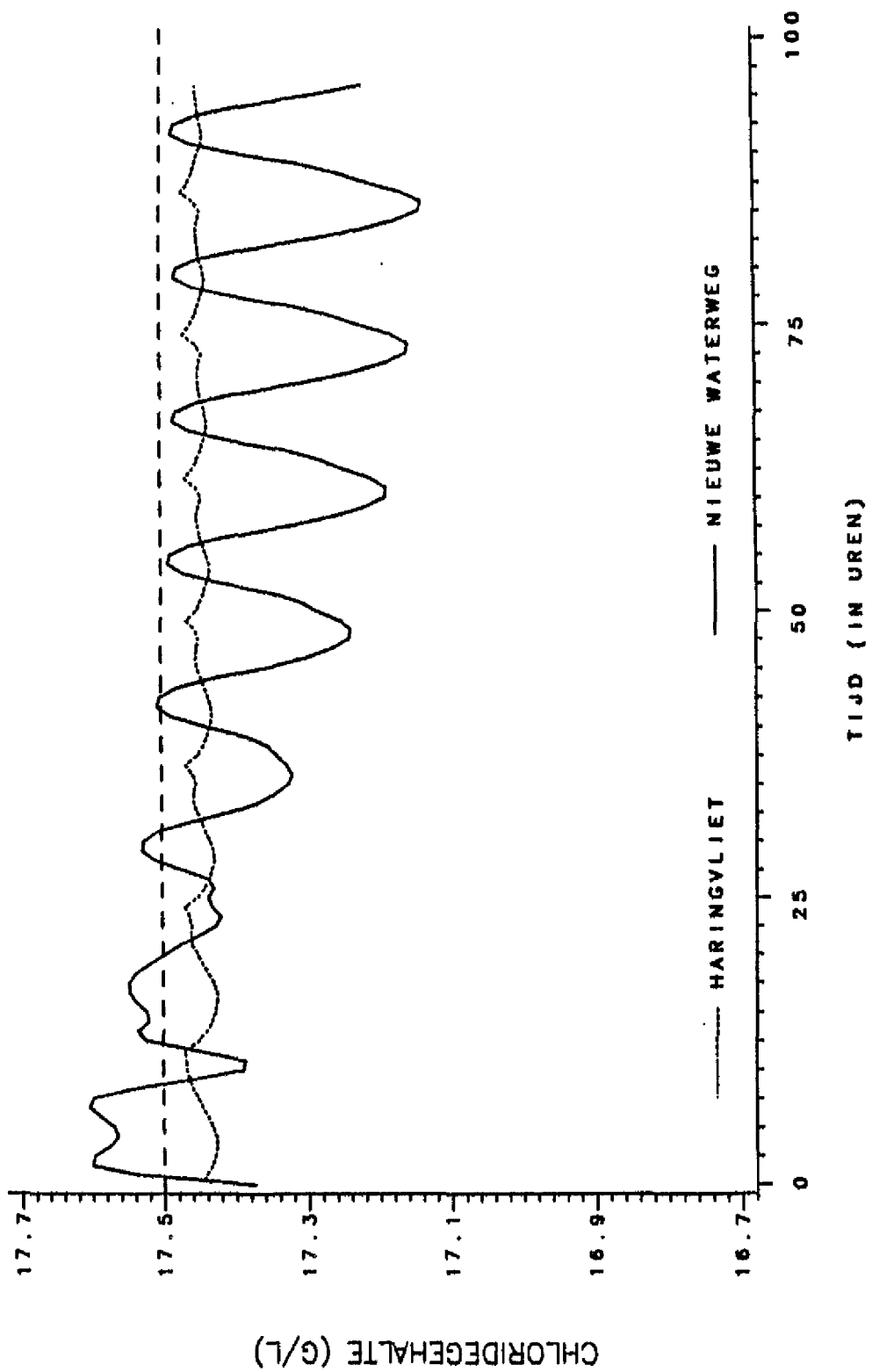


Berekend concentratiepatroon - zuidwestenwind  
 Tijdstip : 8 uur na hoogwater bij Scheveningen

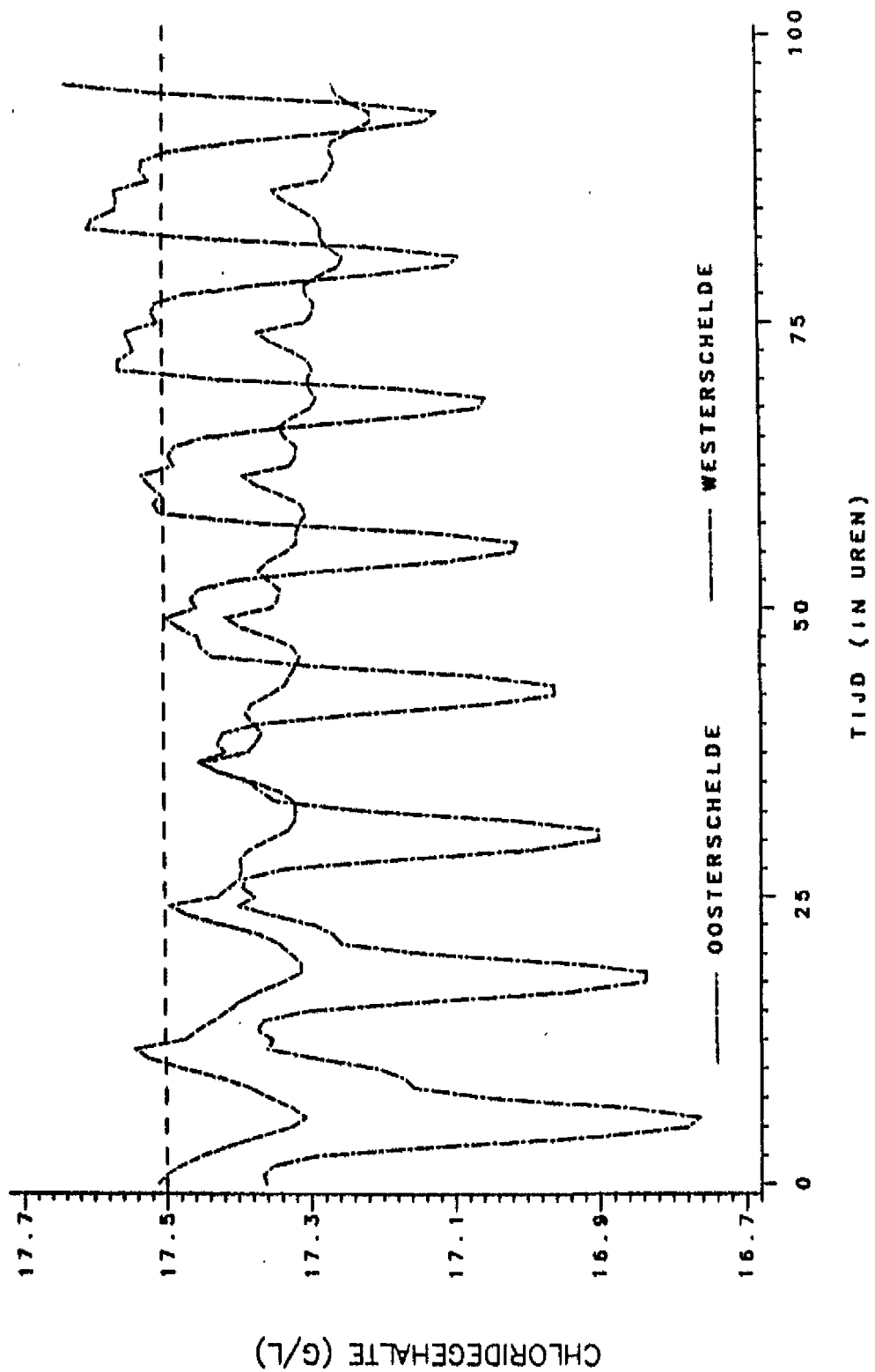
A4



Ligging van de vier elementen in het rekenrooster



Verloop van de chlorideconcentratie in twee punten gedurende de berekening - referentiesituatie



Verloop van de chlorideconcentratie in twee punten gedurende de berekening - referentiesituatie