

opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland

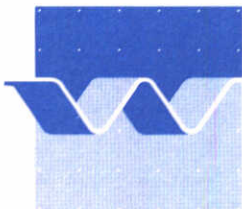
Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal waterbeweging en zouthuishouding

voorstudie t.b.v. modellering , nota ANW 91.11

december 1991

Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal waterbeweging en zouthuishouding

M. Karelse, J.A.G. van Gils



waterloopkundig laboratorium | WL

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

1.	Inleiding	1
1.1	Introductie	1
1.2	Doelstelling	2
1.3	Organisatie	2
2.	Analyse van het water- en zout/zoet systeem NZK	3
2.1	Beschrijving watersysteem	3
2.1.1	Geometrie	3
2.1.2	Daggemiddelde waterstand en debieten	3
2.1.3	Dagelijkse variatie in waterstand en debiet	4
2.2	Beschrijving zout/zoetsysteem	5
2.2.1	Globale beschrijving systeem	5
2.2.2	Zoutverdeling NZK	6
2.2.3	Zoutbelasting bij IJmuiden	7
2.2.4	Verblijftijd	8
2.2.5	Dagelijkse variatie zoutgehalte en snelheid	8
2.2.6	Invloed afvoerdebiet op zouttoestand	9
2.2.7	Grootte van de verticale uitwisseling	10
3.	Modellering van het NZK	11
3.1	Eisen aan waterkwantiteitsmodel	11
3.2	Mogelijkheden van het ZWENDL-NZK model	13
3.3	Mogelijkheden van een water- en zoutbalans	14
3.4	Mogelijkheden van een ééndimensionaal tweelagenmodel	15
3.5	Mogelijkheden van een DISTRO-model	16
3.6	Mogelijkheden van TRISULA-model	17
3.7	Vergelijking typen modellen aan de hand van scoretabel	18
4.	Samenvatting	20
	Referenties:	21

Appendix A: Afschatting van belang menging door wind en scheepvaart
in het NZK

Appendix B: Tweelagenmodel voor de Nieuwe Waterweg

Appendix C: DISTRO-folder

Appendix D: TRISULA-folder

Lijst van tabellen

- Tabel 1: Globale waterbalans voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, gemiddeld over de jaren 1985 tot en met 1988 (achter de tekst).
- Tabel 2: Waterbalans voor het Noordzeekanaal in 1980 (achter de tekst).
- Tabel 3: Toetsing van de modellen aan de criteria (in de tekst).

Lijst van figuren

- Figuur 1: Kaart met NZK en ARK.
- Figuur 2: Vervalt.
- Figuur 3: Daggemiddelde afvoerdebieten IJmuiden.
- Figuur 4: Gemiddelde getijcurve IJmuiden.
- Figuur 5: Variatie in waterstand NZK 17 km en in debieten NZK en ARK.
- Figuur 6: Modellen van zout/zoetsysteem NZK [1].
- Figuur 7: Isolijnen Cl-gehalte/maandelijkse vaartochten, '56 en '61.
- Figuur 8: Isolijnen Cl-gehalte/maandelijkse vaartochten, '84.
- Figuur 9: Verticale verdelingen gemeten in '84.
- Figuur 10: Schets gemiddelde zoutverdeling NZK.
- Figuur 11: Variatie geleidendheid in lengterichting; '84.
- Figuur 12: Verband tussen gemiddeld zoutgehalte in bovenlaag en afvoerdebiet.
- Figuur 13: Correlatie karakteristieke zoutparameters en afvoerdebiet.
- Figuur 14: Correlatie lokaal/daggemiddeld Cl-gehalte en afvoerdebiet.
- Figuur 15: Variatie Cl-gehalte in tijd op diverse plaatsen; 1980 tegen 1976.
- Figuur 16: Globale weergave tweelagenmodel waterbeweging Nieuwe Waterweg [11].
- Figuur 17: Overzicht van de aantallen geschutte schepen via de Noordzeesluizen bij IJmuiden.

1. Inleiding

1.1 Introductie

Bij de directies Noord-Holland en Utrecht overweegt men de realisatie van een operationeel waterhuishoudingsmodel voor het systeem Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK). Dit model zou moeten bestaan uit een waterkwantiteits- en een waterkwaliteitsdeel, die los van elkaar gebruikt moeten kunnen worden [1].

Het voorliggende rapport bespreekt de wijze waarop de waterbeweging en zouthuishouding gemodelleerd zouden kunnen worden, in het kader van het voornoemde operationeel waterhuishoudingsmodel.

Voor het Amsterdam-Rijnkanaal, een in verticale richting homogeen watersysteem, is het model ZWENDL in staat de waterbeweging en zouthuishouding adequaat weer te geven. Voor het gelaagde Noordzeekanaal daarentegen ligt het niet zo duidelijk. Om deze reden zal in het vervolg van dit rapport vrijwel uitsluitend over het Noordzeekanaal gesproken worden.

Voor de modellering van de waterbeweging en de zouthuishouding, maar ook voor de toekomstige waterkwaliteits-modellering van het NZK is het nodig meer inzicht te krijgen in de verticale uitwisseling tussen de (gemengde) bovenlaag en (gelaagde) onderlaag en in de grootte van de bodemsnelheden i.v.m. de bodem/wateruitwisseling. Behalve door dichtheidsverschillen, wind en spuien/doorspoelen aangedreven stromen kunnen ook varende schepen een bijdrage aan die uitwisseling leveren.

Het voorliggende rapport bevat een verslag van een studie, die op basis van beschikbare veldmeetgegevens (door RWS verstrekt) van het NZK een analyse geeft van het water- en zoutsysteem van het NZK en op grond daarvan aangeeft hoe de toekomstige modellering van het water- en zoutsysteem NZK/ARK eruit zou kunnen zien.

Voor het NZK is momenteel een tweetal waterbewegingsmodellen beschikbaar:

- het ééndimensionaal (1D), netwerk model ZWENDL-NZK, dat in staat is om de momentane waterstanden, debieten en 1D-chloridegehalten te berekenen in niet gelaagde omstandigheden.

Vanwege de verticale gelaagdheid en het optreden van dichtheidsstromen in het NZK, die beiden niet met het 1D-model gesimuleerd kunnen worden, is dit model niet zonder meer geschikt als basis voor een toekomstige waterkwaliteitsmodellering van het NZK.

- een sterk geschematiseerd 1-taks, 2-lagenmodel met een analytische oplossing van de zouttransportvergelijking [2]. Door de sterke schematisatie is dit model slechts beperkt toepasbaar en minder geschikt voor het beantwoorden van beheersvragen.

1.2 Doelstelling

Het doel van de studie is tweeledig:

- een analyse van de waterbeweging en zouthuishouding in het Noordzeekanaal met behulp van door Rijkswaterstaat toegeleverde veldgegevens;
- het uitbrengen van een advies met betrekking tot modellering van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, op basis van deze analyse en van door Rijkswaterstaat gespecificeerde wensen ten aanzien van een dergelijk model.

Deze doelstelling is verwoord in de opdrachtbrief van de directie Noord-Holland met nummer ANW90/18523 d.d. 23-11-'90.

1.3 Organisatie

Het project is van de zijde van Rijkswaterstaat begeleid door ir D.J. de Vries en ir P.H. Beuse van de Directie Noord-Holland. Verder is ing. W. de Vos als vertegenwoordiger van de Directie Utrecht in de projectgroep opgenomen. Het onderzoek is in hoofdzaak uitgevoerd door drs M. Karelse, die ook die verslag heeft samengesteld. Ir J.A.G. van Gils heeft paragraaf 3.3 en 3.4 verzorgd.

2. Analyse van het water- en zout/zoet systeem NZK

Uit een grote hoeveelheid veldgegevens, die door RWS verstrekt zijn en die slechts voor klein deel tot nu toe gepubliceerd zijn, is een analyse gemaakt van het watersysteem en van het daarmee samenhangend zout/zoet systeem in het NZK.

2.1 Beschrijving watersysteem

2.1.1 Geometrie

Het NZK (zie figuur 1) bestaat uit een 28 km lang kanaal (inclusief IJ) met daaraan verbonden het 60 km lange, ondiepere ARK. Het kanaal heeft een brede waaivorm bij het sluizencomplex van IJmuiden, kent diverse relatief grote havens in A'dam west en is aan de oostkant ook breed (Binnen IJ). Het kanaal kent over 22.5 km een diepgang van 15 m, over 5 km een diepgang van 11 m en het meest oostelijk deel is 6.0 m diep. Ook het ARK is 6.0 m diep.

De doorsnede van het kanaal zelf is 3300 m^2 (270/170 m bij 15 m).

Het wateroppervlak is $20 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ groot, vanwege vele havens en zijkanalen en met ARK mee zelfs $36 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ [3]. De geschatte inhoud van het NZK is $2.4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, met ARK mee $3.2 \cdot 10^8 \text{ m}^3$.

2.1.2 Daggemiddelde waterstand en debieten

Het peil van het Noordzeekanaal is NAP -0,4 m. Onder normale omstandigheden varieert dit peil als gevolg van het spui-/maalbedrijf tussen NAP -0,3 m en NAP -0,5 m. Het peil is het resultaat van:

- lozen van polderwater en via doorspoelen met Markermeerwater en Rijnwater uit de Lek (zie tabel 1 uit [1], tabel 2 uit [2]);
- spuien of malen van water uit het kanaal naar zee. In figuur 3 is voor een drietal jaren de daggemiddelde afvoer bij IJmuiden gegeven. Deze daggemiddelde afvoer is erg variabel met waarden lopend van 0-200 m^3/s .

Het spuien kan slechts plaatsvinden als de waterstand in het kanaal minimaal 8 tot 12 cm hoger is dan de waterstand in de buitenhaven (ter voorkoming van zoutindringing via de spuisluizen). Dit betekent dat de waterstand in de buitenhaven bij een gemiddelde verticaal getij op zee gedurende orde 9 uur hoger is dan het kanaalpeil en slechts gedurende orde 3 uur lager (zie fig.4).

De pompen van het gemaal mogen slechts draaien als het kanaalpeil lager is dan het buitenhavenpeil, dus bij gemiddelde omstandigheden maximaal 9 uur per getijperiode. De maximale debieten zijn:

$$Q_{\text{spui}} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \text{ en } Q_{\text{maal}} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$$

Het spuien gaat via een 7-tal kokers die gemiddeld op NAP - 6.85 m water uit het NZK naar zee spuien (hoogte kokers 4.8 m, breedte 5.9 m). Het malen gaat op gemiddeld niveau van NAP - 4.65 m. Over een lange periode is het doorspoeldebiet van Markermeer, Rijnwater (via ARK) en polderlozingen gelijk aan het spui- en maaldebiet bij IJmuiden: orde 85 m³/s.

2.1.3 Dagelijkse variatie in waterstand en debiet

Vooraf ten gevolge het al dan niet spuien van water kunnen er dagelijkse schommelingen in de waterstand optreden van wel 20 cm en kan lokaal het 1D-debiet variëren van 0 tot 500 m³/s. In figuur 5 wordt de waterstandsvariatie in het midden van het NZK getoond in samenhang met de grootte van het spuidebiet. Daarnaast wordt het gemeten debiet in het ARK getoond, waarbij opvalt dat het debiet van richting om kan draaien.

In [4] wordt op grond van drijfvermetingen de conclusie getrokken dat ook in de lange periode tussen 2 spuiperiodes er een vrij groot westwaarts gerichte stroming aanwezig kan zijn. Dit zou betekenen dat er dan ook een oostwaartse onderstroom in die periode aanwezig moet zijn.

In een kanaal als het NZK kunnen eigenslingeringen optreden (seiches) doordat er vrij plotseling een grote hoeveelheid water het kanaal in of uit gaat (bij start of einde spuien, bij openen van schutsluisdeuren of bij plotseling veranderen van windsterkte en/of richting). Theoretisch hebben deze schommelingen in het NZK een periode van orde 3/4 uur ($T = 2L/\sqrt{gh}$).

De helling van het wateroppervlak is behalve van de stroming mede afhankelijk van de windsterkte en richting.

2.2 Beschrijving zout/zoetsysteem

2.2.1 Globale beschrijving systeem

Het NZK is gemiddeld een brakwaterkanaal: het chloridegehalte varieert tussen 0.2 en 12 kg/m³. Het zoute water dringt via de schutsluizen bij IJmuiden het kanaal binnen: als een schip bij IJmuiden wordt geschut moeten de sluisdeuren open en dicht. Elke keer dat aan de zeezijde de sluisdeuren worden geopend stroomt het zwaardere zeewater uit de buitenhaven naar de sluiskolk en stroomt het lichtere brakker water uit het NZK als een bovenlaag naar zee af. Bij de daaropvolgende opening van de sluisdeuren aan de kanaalzijde kruipt het zoute water over de kanaalbodem naar binnen toe en wordt het weer door zoeter water uit het kanaal vervangen. Door het regelmatig (10 maal per dag voor Noordersluis) schutten van schepen ontstaat een constante stroom van zout zeewater over de kanaalbodem. Deze zouttong reikt tot in de Amsterdamse havens en het Binnen IJ en dringt soms het ARK binnen. Het zoete doorspoelwater uit Markermeer en uit de Rijn (via ARK) en uit de polders stroomt als een drijvende bovenlaag naar IJmuiden en wordt door menging met de zoute onderlaag steeds brakker. Het resultaat is dat het kanaal in de bovenlaag van ongeveer 6 m dikte varieert van zoet in Amsterdam Oost naar brak bij IJmuiden. Daardoor wordt met het spui/maal water bij IJmuiden ook weer zout terug naar zee gebracht.

In [1] zijn 2 extreme modellen voor het zout/zoetsysteem gegeven, waarbij uitgegaan is van een 2-lagen schematisatie. In model 1, zie figuur 6 wordt het zoute zeewater, dat via de schutsluizen het kanaal opdringt via een verticale stroming zout water uit de onderlaag naar de brakke bovenlaag getransporteerd en daar opgemengd en via de spuisluizen of het gemaal naar zee teruggevoerd. In het tweede model is de uitwisseling tussen beide lagen diffusief van aard, er vindt alleen zouttransport plaats en geen watertransport door het grensvlak.

2.2.2 Zoutverdeling NZK

Het in de modellen van figuur 6 geschetste beeld van de zoutverdeling is sterk vereenvoudigd. In werkelijkheid blijkt er geen scherp grensvlak aanwezig te zijn maar is er een overgangslaag ter dikte van de halve waterdiepte waarin het zoutgehalte nagenoeg lineair verloopt. Dit beeld van de zoutverdeling volgt uit de tot in 1985 uitgevoerde maandelijkse vaartochten, waarbij de zoutverdeling in het gehele kanaal gemeten werd in een meetnet met om de 1 km in langsrichting en om de 1 m in verticale richting een meetpunt. Deze meetgegevens leveren het meest complete beeld van de zouttoestand op het NZK. Bovendien zijn de resultaten geïntegreerd tot karakteristieke zoutwaarden:

- gemiddelde chloridegehalte over hele kanaal,
- gemiddelde chloridegehalte over de bovenste 6 m van het kanaal,
- gemiddelde chloridegehalte over de laag dieper dan NAP-10 m,
- gemiddelde chloridegehalten over de bovenste 6 m van het Binnen IJ.

Daarnaast zijn de resultaten compact weergegeven in isolijnenfiguren, zoals in de figuren 7 en 8 van een viertal metingen getoond wordt. In deze figuren is duidelijk het beeld te zien van een goed gemengde bovenlaag, waarin het zoutgehalte alleen in lengterichting varieert en een brede overgangslaag waarin het zoutgehalte toeneemt over de diepte tot het zoutgehalte bij de bodem.

Verschillen in de helling van de isolijnen in de overgangslaag in figuur 7 worden o.a. veroorzaakt door de wind:

- bij oostenwind neemt op het niveau van de overgangslaag het zoutgehalte toe met toenemende afstand tot IJmuiden;
- bij westenwind neemt het zoutgehalte op het niveau van de overgangslaag juist af met toenemende afstand tot IJmuiden.

In figuur 9 zijn voor enkele vaartochten uit 1984 de gemeten geleidendheidsverticalen weergegeven voor een vijftal plaatsen. Ook deze figuren tonen duidelijk de brede overgangslaag van 6-10 m dikte.

Figuur 10 toont een ruwe schets van de gemiddelde zouttoestand in het NZK:

- een goed gemengde bovenlaag, waarvan de dikte en het zoutgehalte afneemt met toenemende afstand tot IJmuiden;

- een overgangslaag met een nagenoeg lineair toenemend zoutgehalte van ongeveer 8 m dikte. Het bestaan van deze laag betekent dat een diffusieve beschrijving van de verticale uitwisseling voor de hand ligt;
- een onderlaag met een constant zoutgehalte, waarvan de dikte toeneemt en het zoutgehalte afneemt met toenemende afstand tot IJmuiden.

Het bestaan van een zoutgradiënt in lengterichting (zie tevens figuur 11 voor een zes-tal vaartochten op een drietal niveaus) betekent dat er in het kanaal dichtheidstromen aanwezig zijn: nabij het wateroppervlak een stroming naar IJmuiden toe en nabij de bodem een stroming naar A'dam toe.

2.2.3 Zoutbelasting bij IJmuiden

In [1] is een schatting gegeven van de gemiddelde waarden van de volgende grootheden:

- Netto schutsluisdebiet

Omdat getijgemiddeld de waterstand in de Buitenhaven hoger is dan die op het NZK is het netto debiet naar binnen gericht. In [1] wordt een debiet van 1 m³/s berekend.

- Bruto uitwisselingsdebiet

Op basis van het aantal schutcycli, de hoeveelheid water in de sluizen (deel volume wordt door schepen ingenomen) en de verversingsfactor van het schutkolkwater (gedeelte van inhoud schutkolk dat bij openen schutdeur door vers water van buiten de kolk vervangen wordt) zijn gemiddelde debieten berekend. Bij een keuze van 10 % scheepsvolume en een verversingsfactor van 1 volgt een bruto uitwisselingsdebiet gelijk aan 28 m³/s.

- Chloridevracht het NZK in

Gemiddeld over een langere periode zal er nagenoeg evenveel zout netto via de schutsluizen naar binnen stromen als er via de spuisluisen en hetemaal weer uit stroomt. In [1] is via een ruwe schatting aangegeven dat de chloridevracht die via de spuisluis en hetemaal uit stroomt een factor 4 groter is dan de via de schutsluis netto naar binnen stromende chloridevracht.

Een meer gedetailleerde beschouwing [5], waarbij de juiste vorm van de chlorideverticaal nabij IJmuiden in rekening gebracht wordt levert echter wel een gesloten (binnen de nauwkeurigheid van de rekenmethode) gesloten zoutbalans op, waarbij gemiddeld ca 250 kg/s (chloride) via de schutsluizen naar binnen stroomt.

2.2.4 Verblijftijd

Bij een gemiddelde chlorideconcentratie van 3.5 kg/m^3 is de totale $3.5 * 2.4 * 10^8 \text{ kg}$. Met de zoutstroom via de schutsluizen van ca 250 kg/s volgt daaruit een gemiddelde verblijftijd van ca 40 dagen van het zoute water.

Bij gelaagdheid stroomt het zoete doorspoelwater voornamelijk via de bovenlaag naar zee. Uitgaande van schatting dat 2/3 deel van het in het NZK aanwezige water doorspoelwater is en het gemiddelde debiet daarvan $85 \text{ m}^3/\text{s}$ is volgt een verblijftijd voor het doorspoelwater van orde 20 dagen.

Dit betekent dat onder gemiddelde omstandigheden het systeem slechts langzaam verandert als gevolg van de in- en uitstromingen.

2.2.5 Dagelijkse variatie zoutgehalte en snelheid

In de voorgaande paragraaf is aangegeven dat de zouttoestand in het NZK onder invloed van in- en uitstromingen slechts langzaam verandert. Wel is het mogelijk dat in het gebied met de grote verticale zoutgradiënten door snelle verandering van het peil van het wateroppervlak en/of verandering van de helling van het wateroppervlak en het interne grensvlak (door wind) het lokale chloridegehalte ook snel verandert. De waterstand kan t.g.v. spuien lokaal orde 5 cm per uur zakken.

Door het spuien en door discontinuïteit in windsterkte en richting is het mogelijk dat er in het kanaal een interne staande golf ontstaat met een periode van orde $2L/[\Delta\rho/\rho gh/2]^{0.5} = 0.6 \text{ dag}$. (dichtheidsverschil $\Delta\rho = 15 \text{ kg/m}^3$)

De snelheidsverdeling kan op een dag sterk variëren:

nabij de spuisluizen neemt het debiet toe van 0 naar $350 \text{ m}^3/\text{s}$ binnen het halve uur, op het ARK neemt het debiet toe van 20 naar $100 \text{ m}^3/\text{s}$ binnen een uur.

Dit betekent dat nabij de spuisluisen op het niveau van de aanzuigdiepte van de sluisen een snelheid van 35 cm/s aanwezig kan zijn. In het kanaal levert dit een debiet in bovenlaag en een deel van de overgangslaag naar IJmuiden toe op, terwijl eronder een terugstroming in oostwaartse richting kan ontstaan. In [4] is aangegeven, dat er ook in de perioden tussen 2 spuiperioden in een westwaartse stroming nabij het oppervlak gemeten wordt, die er op duidt dat er dan ook een oostwaartse retourstroming nabij de bodem moet zijn. Voor de voorliggende studie waren verder geen snelheidsgegevens beschikbaar.

2.2.6 Invloed afvoerdebiet op zouttoestand

In het verleden is via diverse studies [2,6] reeds een verband gelegd tussen de gemiddelde zouttoestand in het NZK en het afvoerdebiet bij IJmuiden. Het resultaat van deze studie wordt getoond in figuur 12 [2] waarbij het gemiddelde zoutgehalte in de bovenlaag van 0-6 m is gerelateerd aan een over 2 weken (voorafgaand aan de meting) gemiddeld afvoerdebiet voor 29 vaartochten uit de periode '76- '81. De getrokken lijn is de analytische oplossing die geijkt is aan de meetgegevens [2].

In figuur 13 is eenzelfde exercitie toegepast op de 11 vaartochten uit 1984 waarbij de vier karakteristieke zoutwaarden aan over een maand (voorafgaand aan meting) gemiddelde debieten gecorreleerd zijn: de correlatie tussen beide grootheden blijkt niet erg groot te zijn, vooral voor het gemiddelde zoutgehalte in de laag < 10 m is de correlatie aan het gemiddelde afvoerdebiet klein.

In figuur 14 zijn de daggemiddelde chloridegehalten in de 3 meetpunten in het binnenspuikanaal uitgezet tegen over weekgemiddelde debieten. Ook deze figuur toont de zwakke correlatie tussen zoutgehalte en afvoerdebiet.

Vergelijking van de zouttoestand van een nat jaar (1980 met 117 m³/s als gemiddeld afvoerdebiet) en een droog jaar (1976 met 78 m³/s) met behulp van WORSRO-metgegevens toont (zie figuur 15):

- gemiddeld lagere waarden aan het oppervlak in het natte jaar;
- gemiddeld hogere waarden aan de bodem in het natte jaar.

Het bovenstaande betekent dat gemiddeld over langere perioden de gelaagdheid in het NZK toeneemt met verhoging van het afvoerdebiet.

2.2.7 Grootte van de verticale uitwisseling

De energie die zorgt voor verticale menging is onder meer afkomstig van turbulentie geïnduceerd door stroming. Aangezien de uitwisseling niet-lineair afhangt van de snelheid moet voor een goede modellering niet van daggemiddelde maar van momentane snelheden gebruik worden gemaakt.

De optredende verticale uitwisseling zorgt ervoor dat de gelaagdheid afneemt in de loop van de tijd, doch tengevolge van de aanvoer in de bovenlaag van zoet water en zout water in de onderlaag wordt dit effect weer gecompenseerd en ontstaat er een bepaald evenwicht na verloop van tijd. Voor een systeem in evenwicht zal maximaal het netto zouttransport dat via de schutsluizen het kanaal in stroomt, 250 kg/s volgens par. 2.2.3, verticaal getransporteerd worden van onderlaag naar bovenlaag, zodat eenzelfde zoutflux via de spuisluizen en hetemaal weer uit kan stromen. Bij een diffusieve beschrijving van de verticale zoutflux volgt via een aanname over de zoutgradiënt dCl/dz en het uitwisselingsoppervlak A de grootte van de verticale diffusiecoëfficiënt D :

$$\text{transport per m}^2 = 250/A = - D \, dCl/dz$$

Neem $A = 107 \text{ m}^2$ en $dCl/dz = 2 \text{ kg/m}^4$ dan volgt $D = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Een schatting van de grootte van de diffusiecoëfficiënt met behulp van literatuurrelaties [9] levert maximale waarden (bij spuien) die van dezelfde orde van grootte zijn, de grootte is echter zeer sterk afhankelijk van de onbekende grootte van de snelheidsgradiënt du/dz in de overgangslaag.

Behalve dat er door de stroming (t.g.v. afvoerdebiet en dichtheidsstromen) verticale menging ontstaat, leveren ook de windwerking en de scheepvaart menging op. In appendix A is een schatting op basis van een energiebeschouwing gegeven van het onderling belang van de genoemde drie energiebronnen. Uit deze analyse komt naar voren dat de menging door scheepvaart in belangrijke mate de verticale uitwisseling bepaalt.

3. Modelling van het NZK

3.1 Eisen aan waterkwantiteitsmodel

Uit de in hoofdstuk 2 geschetste beschrijving van het water- en zoutsysteem in het NZK volgen inhoudelijke eisen, die aan een waterkwantiteitsmodel van het NZK gesteld moeten worden. Uitgangspunt daarbij is dat het model de relevante gegevens voor een waterkwaliteitsmodel van het NZK moet kunnen leveren. Naast deze criteria om verschillende modellen te kunnen vergelijken van inhoudelijke aard (wat zijn de mogelijkheden en beperkingen van de type modellering) zijn door de toekomstige gebruiker ook allerlei criteria van praktische/operationele aard aangereikt om de verschillende modellen te vergelijken.

Uit de analyse van het zout/zoetsysteem volgen de hiernavolgende, inhoudelijke eisen aan het waterkwantiteitsmodel:

- a1) Goed weergeven van momentane waterstanden en debieten in het hele kanaal uitgaande van bekende randvoorwaarden (spuien/malen, lozingen en onttrekkingen enz.). Het model moet beheersvragen kunnen beantwoorden, zoals grootte van de stroomsnelheden op een bepaalde plaats als functie van de afvoer bij IJmuiden.
- a2) Het model moet de chlorideverdeling met zowel variatie in verticale als in longitudinale richting goed weergeven. De aanwezigheid van een overgangslaag van een halve waterdiepte betekent dat een twee lagen modellering te grof (definitie lokatie grensvlak, dispersie door grensvlak) is en dat een modellering met meerdere lagen gewenst is. Van direct praktisch belang is met name dat de invloed van het afvoerdebiet op de ligging van de zouttong berekend kan worden.
Als verificatiemateriaal zijn de chlorideverdelingen van de maandelijkse vaartochten uit '83, '84 en '85 geschikt.
- a3) Het model moet de snelheidsverdeling goed weergeven. Aangezien de stroomsnelheid behalve door het afvoerdebiet ook bepaald wordt door dichtheidsstromen en wind moet het model het effect van beide kunnen weergeven. Verder moet gezien de variatie in de tijd van de snelheid de rekentijdstap van het model klein zijn (orde 1/4 uur).

Er is nagenoeg geen verificatiemateriaal aanwezig en daarom is het zinvol dit alsnog te verzamelen via drijfvermetingen of akoestische snelheidsprofielmeeters.

- a4) In verband met het belang van de menging door scheepvaart in het NZK moet de bijdrage van dit mechanisme aan de verticale uitwisseling in de modellering in rekening gebracht worden.

De menging door scheepvaart in het NZK hangt geheel van de scheepsintensiteit af, een eerste aanname is dat deze grootheid niet zeer sterk over de dag zal variëren (wel dag/nacht verschil?). Dit mechanisme is daarom wellicht weer te geven als een gemiddelde menging over een periode in de orde van 6 uur.

- a5) Het model moet de verticale uitwisseling door stroming goed weergeven. Om de verticale snelheidsverdeling en de verticale menging door stroming en wind goed weer te geven zijn de variaties binnen een dag van belang (transporten zijn niet lineaire functie van de snelheid) en zijn rekentijdstappen in de orde van 15 minuten nodig.

- a6) De stroming en verticale menging door wind moet goed weergegeven kunnen worden.

Criteria van meer praktisch/operationele aard die door Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland en Utrecht opgesteld zijn [1] luiden:

- b1) Zijn het NZK en het ARK als één model weer te geven?
- b2) Zijn grote havens en zijkanalen als tak in het model op te nemen?
- b3) De uitkomsten van het waterkwantiteitsmodel moeten als invoer voor DELWAQ of een ander waterkwaliteitsmodel kunnen dienen.
- b4) Is het model geschikt voor operationeel gebruik (weergeven van huidige situatie om strategie op de betreffende dag te bepalen, hoeveel rekentijd vergt het doorrekenen van 1 dag)?

- b5) Is er een gebruikersvriendelijke schil of kan deze eenvoudig worden gemaakt zodat niet specialisten (met enige kennis van inhoudelijke achtergronden) het model kunnen draaien?
- b6) Hoeveel voorbereiding vergt de opzet van een model?
- b7) Kan het model op een PC draaien (met acceptabele rekentijden)? Het model moet een langere periode kunnen doorrekenen (orde maanden), vanwege de tijdschaal van verandering van de zouttoestand (verblijftijden van orde 1 maand).
- b8) Wat is de status van het type model of programma (operationeel/in voorbereiding/nog te ontwikkelen) en is er al een bestaande applicatie voor het NZK?
- b9) Hoe is het onderhoud en de ondersteuning van het programma geregeld? In welke is dit nu al in een bestaand kader geregeld?

In de hierna volgende paragrafen wordt aangegeven in hoeverre diverse "programma's" in staat zijn een waterkwantiteitsmodel voor het NZK te leveren dat aan de gegeven criteria voldoet. Naast de mogelijkheden en beperkingen van het programma is het ook belangrijk de huidige status te vermelden ten aanzien van meerdere criteria.

3.2 Mogelijkheden van het ZWENDL-NZK model

Er is een ZWENDL-model van het NZK gebouwd waarin de grote havens als tak in de geometrieschematisatie zijn opgenomen. Met dit model zijn de waterstanden en de debieten in het kanaal goed te simuleren als de randcondities goed bekend zijn (spui/maalperioden, lozingen enz.). De effecten van dichtheidsstromen en verticale menging in een gelaagd systeem kan dit model niet weergeven. Dit betekent dat dit model niet rechtstreeks geschikt is als model dat gegevens aan een toekomstig waterkwaliteitsmodel kan leveren, doch wel als een operationeel model voor het voorspellen van waterstanden en debieten.

Een beschrijving van het programma is te vinden in [13].

Overigens zou de bestaande ZWENDL-schematisatie van het NZK, die ooit met een andere doelstelling ontwikkeld is, eerst een revisie moeten ondergaan om geschikt te worden gemaakt voor de hier beoogde doeleinden.

3.3 Mogelijkheden van een water- en zoutbalans

De eenvoudigste mogelijkheid om de water- en zoutbeweging in het systeem te modelleren is het opstellen van een water- en zoutbalans voor verschillende omstandigheden.

Een dergelijke aanpak valt in een aantal onderdelen uiteen:

- keuze van de schematisatie;
- vaststellen van de geometrie van de elementen, de volumens van de elementen, de aan- en afvoeren van water en de zoutgehalten voor verschillende karakteristieke toestanden van het systeem;
- het berekenen van debieten en dispersiecoëfficiënten op de elementgrenzen op grond van de continuïteitsvergelijkingen voor water en zout.

Voordelen van deze aanpak:

- de realisatie is eenvoudig en goedkoop;
- het opstellen van een dergelijke waterbeweging kost vrijwel geen rekentijd, wat met name voor waterkwaliteitssommen met een langere simulatieperiode erg praktisch is.

Nadelen van deze aanpak:

- we kunnen de waterbeweging niet voorspellen, alleen beschrijven;
- deze aanpak kan alleen gebruikt worden voor het doorrekenen van ingrepen op de waterkwaliteit (b.v. verschillende lozingsscenario's);
- de aanpak is niet geschikt om het effect van ingrepen op de waterkwantiteit door te rekenen.

Het is mogelijk om met deze aanpak quasi-dynamische simulaties uit te voeren: een opeenvolging van verschillende evenwichtstoestanden die op massabehoudende wijze achter elkaar geschakeld worden. In snel variërende omstandigheden, wanneer de dynamica van groot belang is (versnelling en vertraging van watermassa's), is deze aanpak niet bruikbaar. Immers, de impulsvergelijking die de dynamica beschrijft blijft buiten beschouwing.

3.4 Mogelijkheden van een ééndimensionaal tweelagenmodel

Van de eisen aan een waterbewegingsmodel, die in paragraaf 3.1 zijn genoemd, wijzen a2) en a3) in de richting van een gedetailleerde 2Dv of 3D modellering (zie volgende paragrafen). Er kleven echter ook nadelen aan een dergelijke aanpak, waardoor het wellicht loont een eenvoudiger weg te kiezen. Een dergelijke keuze is bijvoorbeeld gemaakt in een waterkwaliteitsstudie voor het Noordelijk Deltabekken [11]. Voor de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas en de Oude Maas gebruikt men in die studie een ééndimensionaal tweelagenmodel voor de waterbeweging waarin een aantal fysische verschijnselen in sterk geparametriseerde vorm wordt meegenomen.

Het belangrijkste voordeel van deze aanpak is de relatief korte rekentijd, wat met name voor waterkwaliteitssommen voor langere perioden van belang is. Een belangrijk nadeel is het feit dat de uitwisselingsprocessen in verticale richting gestopt moeten worden in een entrainment-debiet en een dispersiecoëfficiënt, waardoor de voorspellende waarde van het model voor stromingstoestanden die sterk afwijken van de huidige beperkt is.

Het geparametriseerde model voor de Nieuwe Waterweg is kort weergegeven in appendix B.

Er is een aantal redenen waarom dit concept voor het Noordzeekanaal niet zonder meer bruikbaar is.

- De dikte van de bovenlaag wordt in het bovengeschetste model vastgelegd, zodanig dat de dwarsdoorsnede van beide lagen gelijk is. Dit is in het Noordzeekanaal niet gewenst. De precieze dikte van de bovenlaag moet door het kwantiteitsmodel voorspeld worden omdat:
 - deze de stroomsnelheden bepaalt;
 - deze de bepalende invoergrootte is voor de modellering van phytoplankton, de 'mengdiepte' [12].
- In het model voor de Nieuwe Waterweg zijn de dichtheidsstromingen een tweede orde effect en derhalve verstoort in de 'entrainment'-formule. Het is de vraag of dit voor het Noordzeekanaal de juiste aanpak is, aangezien de dichtheidsstromingen hier waarschijnlijk dominant zijn.

Om voor het Noordzeekanaal een tweelagenmethode toe te passen is het in elk geval noodzakelijk de dikte van de gemengde bovenlaag en het dichtheidseffect op de stroming expliciet te modelleren. Dit zou kunnen gebeuren met een (tweelagen-) model waarin voor de onder- en bovenlaag op gekoppelde wijze een soort ZWENDL-som wordt gemaakt. Vervolgens kan men de uitwisseling tussen boven- en onderlaag afleiden uit theoretische beschouwingen, of uit de continuïteitsvergelijking voor zout, op basis van waargenomen zoutgehalten. Hierbij zal aandacht moeten worden besteed aan de zeerandvoorwaarde in de onderlaag, de windgeïnduceerde stromingen en aan het effect van scheepvaart. Dit leidt tot de conclusie dat een dergelijk tweelagenmodel voor het Noordzeekanaal opnieuw ontwikkeld zou moeten worden.

3.5 Mogelijkheden van een DISTRO-model

Op grond van de criteria uit par 3.1 (vooral a2 t/m a6) ligt het gebruik van een tweedimensionale, breedtegemiddelde modellering voor de hand. Het programmapakket DISTRO (zie bijlage C) komt daarmee in aanmerking voor het bouwen van een waterkwantiteitsmodel van het NZK. Bij de bouw van het model moet nog beslist worden of:

- vertakte versie gebruikt wordt om b.v. havens weer te geven;
- welke inlaat- en lozingspunten meegenomen moeten worden;
- hoe het ARK in het model opgenomen wordt, waar bijvoorbeeld het debiet genomen moet worden;
- hoe de zeerandvoorwaarde geschematiseerd wordt.

De geometrie van het model kan via een bestaand voorberekingsprogramma uit de bestaande ZWENDL-schematisatie gehaald worden.

DISTRO rekent impliciet in de verticale richting en expliciet in lengterichting. De te kiezen tijdstap hangt behalve van de keuze van de lengte-stap sterk af van het verschijnsel dat men wil weergeven:

- het modelleren van lange oppervlaktegolven vraagt een tijdstap in de orde van 1 minuut;
- het modelleren van de gemiddelde stroming (zonder oppervlaktegolven) vraagt een tijdstap in de orde van 1 uur.

Ten aanzien van de in paragraaf 3.1 vermelde eisen valt nog op te merken:

- a4) Het effect van menging door scheepvaart moet nog in DISTRO worden opgenomen.
- a6) De optie om de windinvloed te modelleren is tot nu toe niet gebruikt in DISTRO.
- b3) Er is een koppelingsprogramma DISTRO/DELWAQ dat al diverse malen gebruikt is. Dit programma zal alleen voor het doorgeven van bronnen/putten van DISTRO naar DELWAQ uitgebreid moeten worden. De grootte van de resultatenbestanden kan een probleem worden omdat er lange tijden doorgerekend moet worden, echter de berekeningen kunnen in delen uitgevoerd worden.
- b7) DISTRO kan op PC draaien en de berekeningen kunnen in stukken uitgevoerd worden (doortstartfaciliteit).

3.6 Mogelijkheden van TRISULA-model

Trisula (zie bijlage D) is een 3D-programmapakket dat in ontwikkeling is, doch waarvan wel een operationele versie bestaat. In dit pakket zijn geavanceerde turbulentiemodellen opgenomen, die naar keuze toegepast kunnen worden (ook eenvoudige modellen zijn beschikbaar). Met dit pakket kunnen 3D-modellen gebouwd worden, doch ook 2Dh en 2Dv-modellen (2 horizontale resp. 1 horizontale en 1 verticale dimensie).

Er is een operationele versie van het programma beschikbaar voor het uitvoeren van modelonderzoek. De meeste ervaring is opgedaan met 2Dh-modellen voor het modelleren van vlakke homogene getijstromen.

Dit programmapakket heeft meer mogelijkheden dan het DISTRO-pakket: de gebruikte numerieke techniek is geavanceerder, de derde dimensie kan meegemodellerd worden en er kan uit verschillende turbulentie modellen gekozen worden. Verder is het gekoppeld aan DELWAQ te gebruiken.

De 2Dv-versie van het programma is momenteel alleen geënt op een eentaksbenadering met een rechthoekige dwarsdoorsnede.

3.7 Vergelijking typen modellen aan de hand van scoretabel

In de hiernavolgende scoretabel is een vijftal typen modellen onderling vergeleken met behulp van de in paragraaf 3.1 opgesomde criteria. In deze tabel zijn de mogelijkheden/beperkingen van het type model geschetst aan de hand van de waardering: voldoet zeer goed aan criterium tot voldoet geheel niet aan criterium.

Tabel 3: Toetsing van de modellen aan de criteria

Toetsing modellen aan criteria					
criterium	MODELLEN				
	ZWENDL	balans 2D	2L- model	DISTRO	TRISULA
a1 voorspellen waterstand debiet	++	--	++	++	++
a2 voorspellen chloride-verdeling	--	o	+	++	++
a3 voorspellen snelheid in gelaagd systeem	-	-	o	++	++
a4 menging scheepvaart	--	o	o	+	+
a5 menging stroming	--	-	+	++	++
a6 menging wind	--	-	+	++	++
b1 één model NZK/ARK	++	++	++	o	+
b2 vertakt model	++	++	++	++	+
b3 koppeling DELWAQ	++	++	++	++	++
b4 operationeel gebruik	++	++	++	+	o
b5 gebruikersvriendelijk	+	+	+	-	-
b6 voorbereiding model-opzet	+	++	o	-	-
b7 PC-versie	+	+	+	o	o
b8 status type model	++	++	--	++	+
status NZK-model	o	-	--	-	-
b9 onderhoud en ondersteuning	+	-	-	o	+

waardering: --: zeer zwak/ -: zwak/ o: redelijk/ +: sterk/ ++: zeer sterk

Het bovenstaande pakket criteria is niet consistent, soms betekent het goed voldoen aan het ene criterium het minder goed voldoen aan een ander. Voor de waterkwaliteit lijken bijvoorbeeld de variaties binnen een dag niet interessant voor de gebruiker, temeer omdat er perioden van orde maanden gesimuleerd moeten worden. Voor het goed weergeven van de verticale menging zijn de variaties binnen een dag wel weer van belang.

Het is zaak dat het belang van de criteria onderling wordt afgewogen.

Wat betreft een operationeel model voor het beheer van waterstanden en snelheden zijn de criteria a1 en b1 tot en met b9 belangrijk. Daarvoor lijkt het model ZWENDL de beste keuze.

Ten aanzien van een beleidsondersteunend model voor problemen op het gebied van de waterbeweging en zouthuishouding, zijn de eisen a2, a3 en a4 cruciaal. In dat geval lijkt DISTRO of TRISULA een goede keuze.

Voor een beleidsondersteunend waterkwaliteitsmodel, dat ook de langere tijdschalen aan moet kunnen (seizoenen en jaren), verdient de balansaanpak waarschijnlijk de voorkeur, op grond van de criteria b4 tot en met b8. Een dergelijke aanpak zal misschien later ondersteund moeten worden door DISTRO- of TRISULA-berekeningen als:

- er ingrepen in het systeem worden gepleegd die de water- en zoutbeweging drastisch beïnvloeden en de beschikbare balansen onbruikbaar maken;
- er in de ruimte of in de tijd gedetailleerde informatie nodig is over stroomsnelheden of verticale menging.

4. Samenvatting

Het Noordzeekanaal is een brakwatersysteem met een relatief zoete, goed gemengde bovenlaag (met dikte van 5 à 6 m) en een relatief zoute, gelaagde (nagenoeg lineair verloop), overgangslaag van orde 8 m dik en een zoute, homogene onderlaag van 1 à 2 m dikte. Via de schutsluizen wordt brak kanaalwater uitgewisseld voor vers zeewater met hoog zoutgehalte. Via het Amsterdam-Rijnkanaal, het IJsselmeer en diverse andere inlaatpunten komt van de andere kant vers, zoet water het systeem in, dat via de spuisluisen en hetemaal in IJmuiden het kanaal weer verlaat na een gedeeltelijke opmenging met zout in het NZK.

In het NZK wordt als er gespuid wordt een kunstmatig getij opgewekt met de grootste zeewaartse debieten tijdens de laagwaterperiode op zee. Dag- of weekgemiddeld wordt de waterbeweging gekenmerkt door afwatering naar zee van het ingelaten zoete water en door landinwaarts stromend zout water nabij de bodem. De stroomsnelheden zijn klein, de maximale snelheden zijn bij het spuien bij IJmuiden lokaal 0,3 m/s.

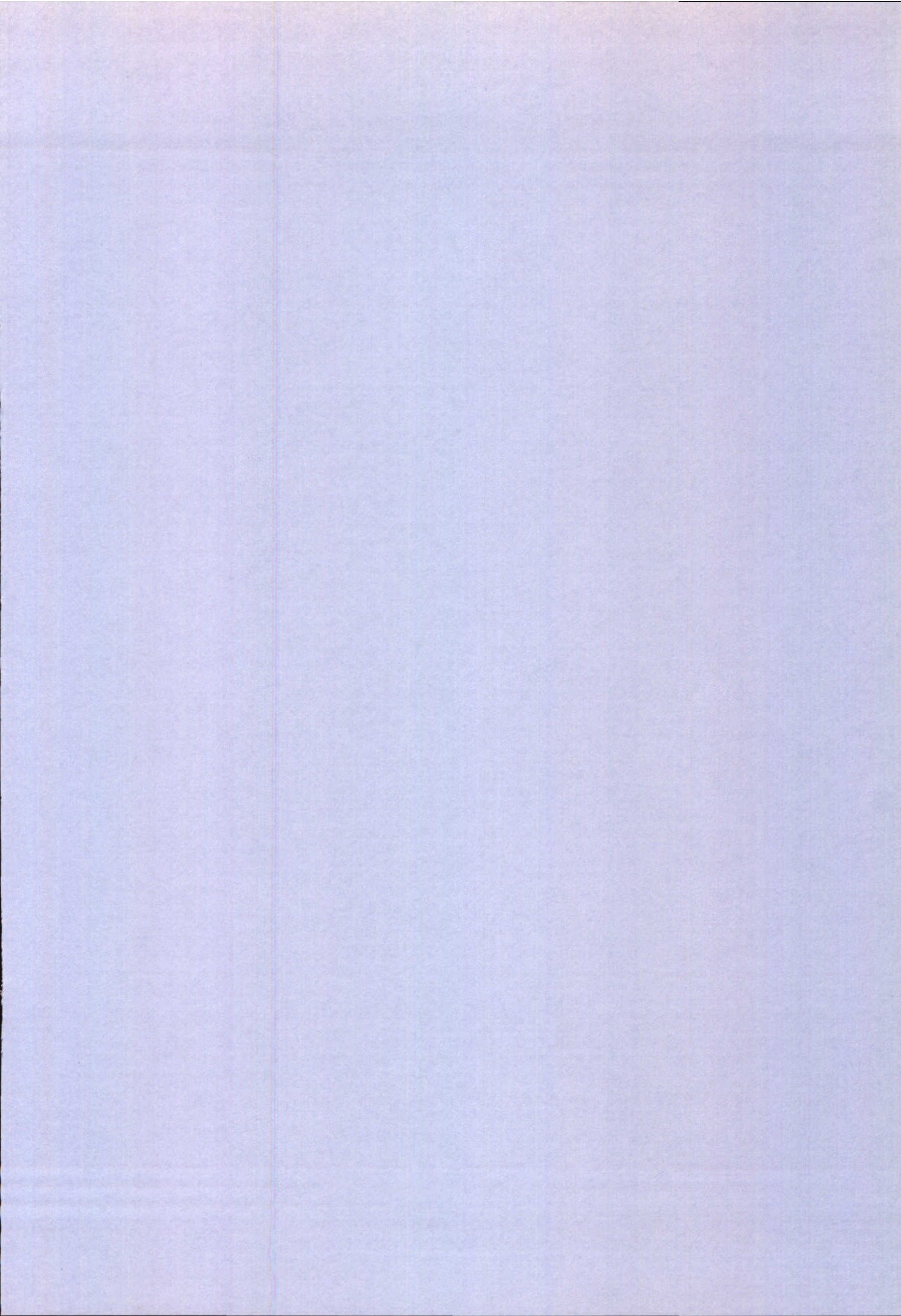
Bij de gegeven in- en uitstroomrandvoorwaarden (toevoer van zout en zoet water, afvoer van water) verandert de zouttoestand slechts langzaam. De verblijftijd van het afwateringswater en van het zeewater ligt in de orde van 20 a 30 dagen. De aanvoer van vers zout en zoet water vergroot de bestaande gelaagdheid, terwijl vooral de menging door de scheepvaart in het kanaal de gelaagdheid weer verkleint.

Voor het operationeel beheer van het kanaal moeten waterstanden en debieten voorspeld kunnen worden. Het ZWENDL-model moet aan deze wensen kunnen voldoen. Aan een beleidsondersteunend instrument voor de waterhuishouding en de waterkwaliteit worden hogere eisen gesteld. Bij de modellering van de water- en zoutbeweging van dit systeem (ook ten behoeve van een toekomstige waterkwaliteitsmodellering) is het belangrijk dat de dichtheidsstroming, de verticale gelaagdheid en de verticale menging (vooral de menging door scheepvaart) goed weergegeven worden. Voor het voorspellend berekenen van de zoutverdeling en snelheidsverdeling lijkt de toepassing van een DISTRO- of TRISULA-model de beste benadering. Voor waterkwaliteitsberekeningen over een lange termijn is het verstandig te starten op basis van een waterbalansmodel.

Referenties:

- [1] Rijkswaterstaat, "Verkenning van de mogelijkheden voor waterkwantiteitsmodellering van het Noordzeekanaal (/Amsterdam-Rijnkanaal)", Directie Noord-Holland, notitie Hans de Vries en Peter Beuse, 14 september 1990.
- [2] Rijkswaterstaat, "Doorspoeling Noordzeekanaal", Dienst Binnen Wateren, werkdocument nr. 90.134X.
- [3] Rijkswaterstaat, "De waterbeheersing van Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaalboezem", folder.
- [4] Waterloopkundig Laboratorium, "Koelwaterlozing AVI WEST", verslag Z404, september 1990.
- [5] DHV, "Alternatieve methoden voor het transport van zeezand door de sluizen van IJmuiden", concept, april 1991.
- [6] Vos, P de, "Rendement van doorspoelen van het Noordzeekanaal met IJsselmeerwater", RWS, Studiedienst IJmuiden, rapport nr 61-05, 1961.
- [7] Waterloopkundig Laboratorium/Rijkswaterstaat, "Onderzoek naar menging door scheepvaart in de werksluis van het Volkeraksluizencomplex", M896/WZWW 43004.01, september 1984.
- [8] Rijkswaterstaat, "Kwalitatieve interpretatie van zoutmetingen in de Oosterschelde bij constante zoetwater aanvoer op het Volkerak", nota DDWT 80, 1980.
- [9] Waterloopkundig Laboratorium, "Momentum and mass transfer in stratified flows", report on literature study R880, december 1974.
- [10] Waterloopkundig Laboratorium, "Wind effect on the distribution of velocity and temperature in stratified enclosed systems", report R898II, oktober 1978.

- [11] Waterloopkundig Laboratorium, "Waterkwaliteitsonderzoek Noordelijk Deltabekken: Regionaal waterkwaliteitsmodel. Modelconcept en eerste calibratie.", concept rapport T262, maart 1990.
- [12] Waterloopkundig Laboratorium, "De waterkwaliteit van het Noordzeekanaal in relatie tot eutrofiëringsverschijnselen. Oriënterend modelonderzoek.", rapport T467, juli 1991 (Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, nota ANW 91.07).
- [13] Rijkswaterstaat, "Gebruikersdocumentatie ZWENDL", RIZA, mei 1990.



APPENDIX A:

Afschatting van belang menging door wind en scheepvaart in het NZK

Inzicht in de invloed van de scheepvaart op de menging in een kanaal met dichtheidsverschillen, zoals het NZK, kan verkregen worden door de energiedissipatie van de schepen in het kanaal te vergelijken met de dissipatie van stromingsenergie. Dissipatie van stromingsenergie vindt plaats door wrijving van het water langs de bodem en de wanden van het kanaal. Een derde bron van energie vormt de wind, de dissipatie van windenergie aan het wateroppervlak zal in de bovenvermelde vergelijking meegenomen worden.

Al Dissipatie van stromingsenergie in het NZK

De dissipatie van stromingsenergie E_s door wrijving wordt gegeven door

$$dE_s/dt = B L \tau U$$

- waarin: B : breedte kanaal = 220 m (gemiddeld over diepte)
L : lengte kanaal = 28 km
 τ : bodemschuifspanning = $p (g/C^2) U^2$
g : versnelling van de zwaartekracht = 9.8 m/s²
C : coëfficiënt van de Chézy = 60 (m^{0.5}/s)
U : de over de diepte gemiddelde snelheid = 0.15 m/s (max)
p : gemiddelde dichtheid

Substitutie levert $dE_s/dt = 0.5 \cdot 10^5$ Watt.

Slechts een klein deel van deze energieproduktie wordt omgezet in menging (te vertalen als een vergroting van de potentiële energie van het systeem): orde 1% [7].

A2 Dissipatie van schepen in het NZK

De energie E_b die door de scheepvaart wordt gedissipeerd is gelijk aan

$$dE_b/dt = n P$$

waarin n : gemiddeld aantal schepen op het kanaal

P : gemiddeld vermogen dat schepen op het kanaal gebruiken

(1 Watt = 735 pk)

In figuur 17 is voor een groot aantal jaren het aantal schepen gegeven dat de Noordzeesluizen gepasseerd is. Het merendeel van deze schepen komt van of gaat naar de havens van Amsterdam. Op basis van figuur 17 is in het vervolg uitgegaan van de passage van:

13.000 zeeschepen per jaar

20.000 binnenschepen per jaar

Aannemende dat elk schip dat in IJmuiden aankomt vanuit zee of vanuit Amsterdam orde 2 uur op het kanaal vaart volgt voor n :

3 zeeschepen en 4.5 binnenvaartschip.

Een andere aanname is dat een binnenvaartschip gemiddeld 500 pk voor de voortstuwing gebruikt en dat een zeeschip 2500 pk gebruikt van het gemiddelde vermogen van 10000 pk.

Hieruit volgt:

$$dE_b/dt = (3 * 2500 + 4.5 * 500) * 735 = 7 \cdot 10^6 \text{ Watt}$$

De energie gedissipeerd door de scheepvaart is dus twee orden groter dan de energie, die door de stroming wordt gedissipeerd. Deze energie wordt echter maar voor klein deel gebruikt voor menging: in de eerste plaats is er energieverlies bij de overdracht van de motor naar de schroef en in de tweede plaats wordt de door de schroef in het water gestopte energie slechts voor klein deel gebruikt voor verticale menging (vergroting van de potentiële energie): orde 1% [7,8]

A3 Dissipatie uit wind

De dissipatie van windenergie E_w is gelijk aan:

$$dE_w/dt = B L T_{aw} U_s$$

waarin:

T_{aw} : de windschuifspanning aan het wateroppervlak

U_s : de stroomsnelheid aan het wateroppervlak

Uit [10] volgt het verband tussen T_{aw} en de windsnelheid W_s op 10 m hoogte:

$$T_{aw} = (0.002-0.003) W_s^2$$

en het verband tussen windsnelheid W_s op 10 m hoogte en de stroomsnelheid van het water U_s :

$$U_s = 0.03 W_s$$

Samen levert dit op:

$$dE_w/dt = B L (0.6-0.9) 10^{-4} W_s^3$$

Dit levert bij een gemiddelde windsnelheid van 5 m/s een dissipatie van

$$dE_w/dt = (0.5-0.9) 10^5 \text{ Watt}$$

Gemiddeld over een periode zal in het algemeen deze windbijdrage kleiner zijn omdat gemiddeld de windsterkte kleiner is.

Conclusie:

Aannemende dat de efficiëntie van de omzetting van windenergie in menging (vergroting potentiële energie) hetzelfde is als die van stromingsenergie en van de scheepvaart volgt als conclusie dat gemiddeld de menging door wind van dezelfde orde van grootte is als de menging door stroming en dat beiden een of meer orden kleiner zijn op het NZK dan de menging door scheepvaart.

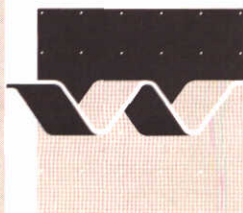
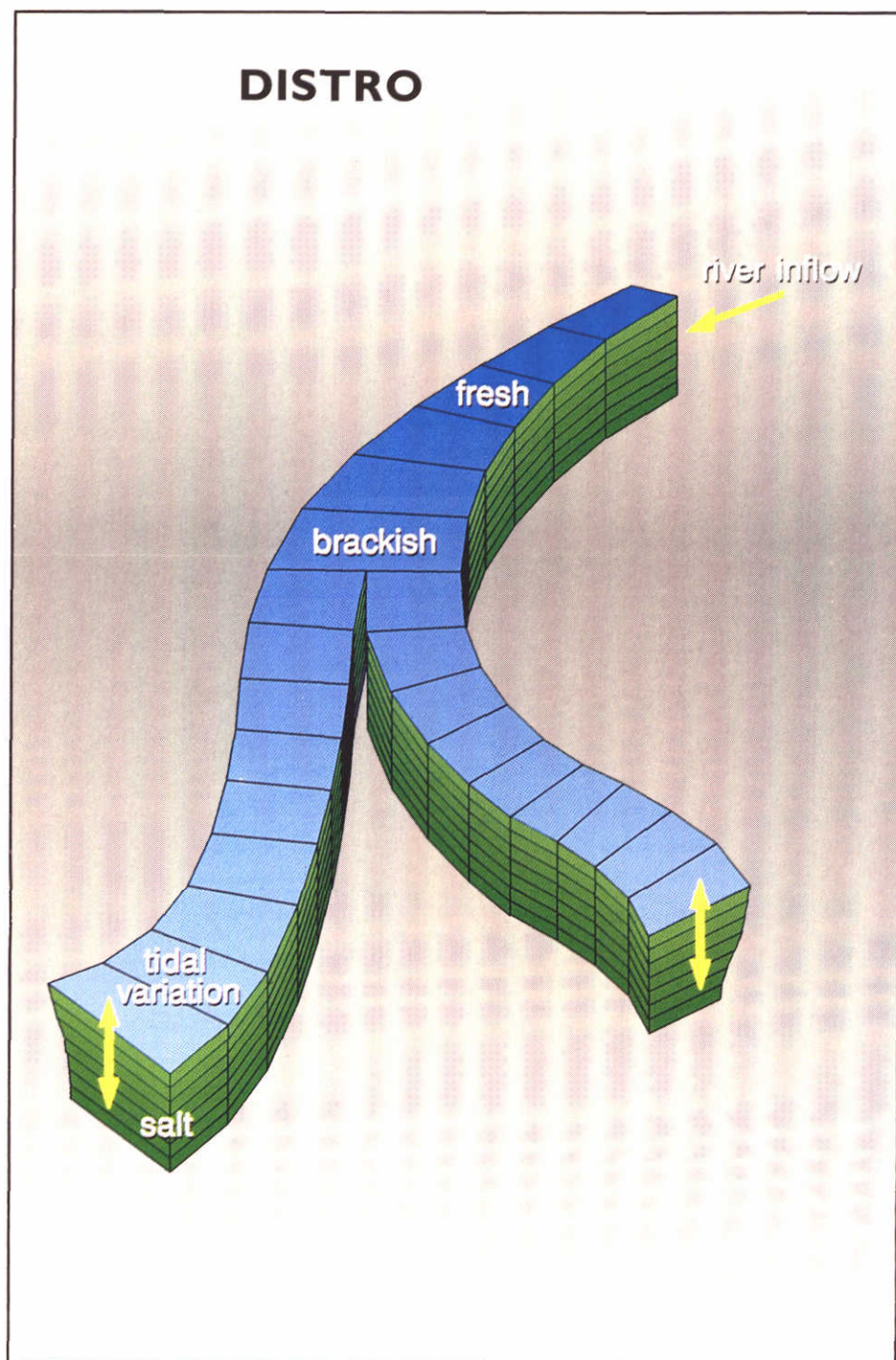
Appendix B: Tweelagenmodel voor de Nieuwe Waterweg

Het tweelagenmodel voor de waterbeweging in de Nieuwe Waterweg, de Oude Maas en de Nieuwe Maas, gebruikt in de studie 'Waterkwaliteitsonderzoek Noordelijk Deltabekken' [11], ziet er als volgt uit:

- de 1D basisschematisatie (gebaseerd op ZWENDL, zie figuur 16a) wordt gesplitst in een bovenlaag (index 1) en een onderlaag (index 2), zie figuur 16b;
- het scheidingsvlak tussen boven- en onderlaag wordt zodanig aangebracht dat de dwarsdoorsnede van beide gelijk is ($A_1 = A_2$);
- de met ZWENDL berekende waterbeweging wordt eveneens in twee lagen gesplitst ($U_1 = U_2$ en dus $Q_1 = Q_2$);
- een uit de literatuur gehaalde 'entrainment'-formule berekent opwaartse debieten op het scheidingsvlak, zie figuur 16c;
- in de bovenlaag en de onderlaag worden extra horizontale debieten toegevoegd om de opwaartse stromingen te compenseren, zodanig dat het volume van de lagen niet verandert (aldus ontstaat een 'gravitatiecirculatiestroming');
- het geheel wordt aangevuld door een verticale dispersiecoëfficiënt die afhangt van het getal van Richardson (figuur 16d).

Appendix C: DISTRO-folder

DISTRO: modelling of density currents
A program for the computation of non-steady laterally averaged flows and transport phenomena



purpose

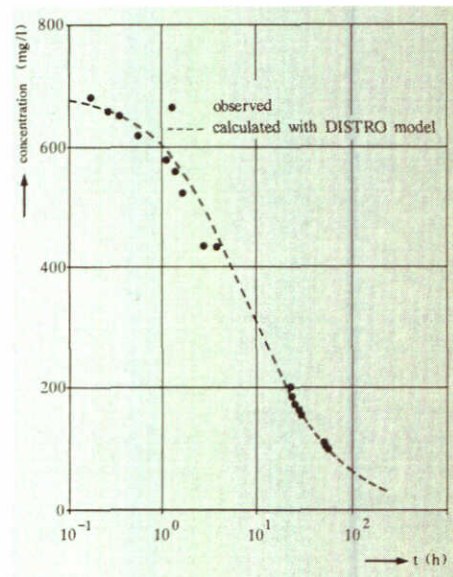
DISTRO is a surface water model for the dynamic computation of water levels, tidal flows (including density currents) and concentrations of conservative water quality parameters in branched rivers and estuaries.

features

- laterally averaged (two-dimensional) channel network modelling
- vertical dimension via multi-layer approach with adaptive grid (coupled with water level)
- water elevation, 2D flow and density distribution
- hydrostatic flow field
- density as a function of salinity and temperature
- transport of constituents
- developed and verified in close conjunction with our experimental testing facilities, especially the Delft Tidal Flume and Rhine-Meuse estuary scale model.

range of applications

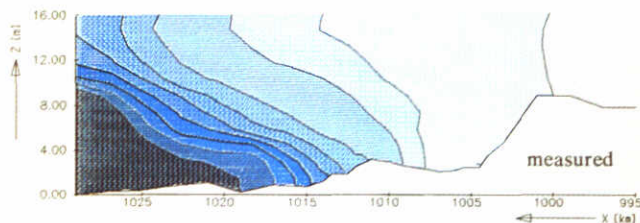
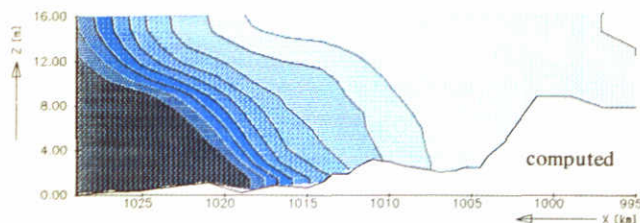
- tidal flow
- salt intrusion
- far-field cooling water dispersion
- large scale pollutant dispersion
- silt transport
especially meant for well mixed to moderately stratified river mouths and branched estuaries.



Decrease in the concentration of a cohesive sediment (kaolinite) due to sedimentation under stationary flow conditions.

examples of application

- water flow and fresh water dispersion in the Oosterschelde estuary
- salt intrusion in the Rotterdam Waterway
- pilot studies for the Delft Tidal Flume
- brine disposal into the Eems-Dollard estuary
- water quality of Botlek harbour, Rotterdam
- storm surge barrier Rotterdam Waterway



Computed and measured salinity distribution in the Rotterdam Waterway.

methodology

DISTRO is a branched two-dimensional laterally integrated flow model, especially applicable for salt intrusion. The basic equations of DISTRO are derived from those on the conservation of mass (water), momentum, and heat or dissolved matter. The latter can be salt, in which case density currents will occur, but also other conservative materials which do not influence the density can be treated. To handle complex geometries, the model is equipped with nodes and with a storage width as well as a current width, which can be functions of the longitudinal and the vertical coordinates. Variations in the bottom topography are also taken into account. The output of DISTRO can be used as input for a water quality model for non-conservative transport and for silt transport, called DELWAQ.

The model equations are derived by averaging laterally and over the turbulent time scale. The turbulent exchange in vertical direction is modelled by choosing a mixing length turbulence model or a so called k-epsilon model, simulating the kinetic energy (k) and the dissipation (epsilon) of turbulence.

The numerical solution uses a finite-difference method on a grid with, in each branch, equal distances in longitudinal direction and with water depth dependent distances in vertical direction. At each time step the water depth, the horizontal and the vertical velocities, the salt concentrations and temperatures are computed for each grid point.

input data

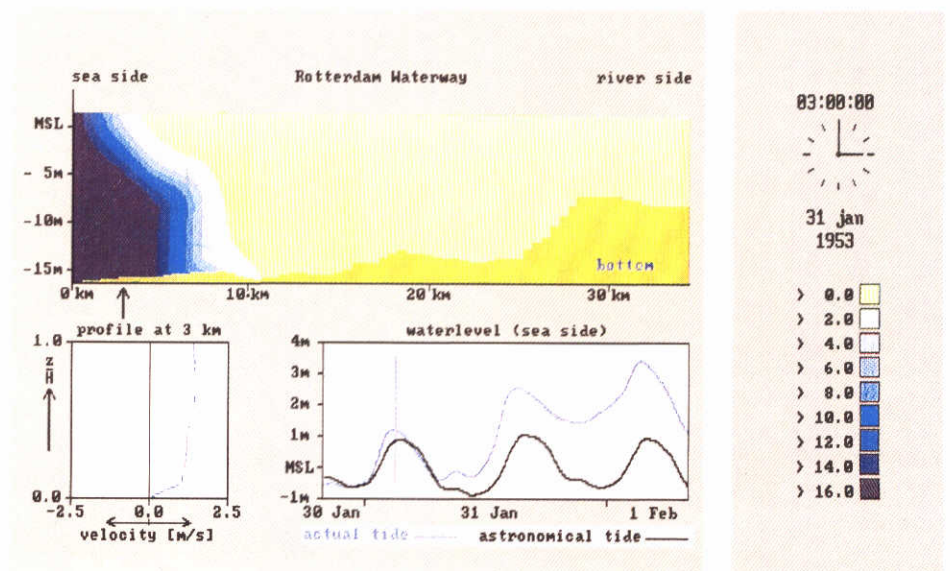
- bathymetry
- bottom friction and wall friction
- water levels or velocities at the boundaries
- salt concentrations and temperatures at the boundaries during inflow
- position and magnitude of sources and sinks
- dispersion coefficients
- parameters for the temperature balance equation
- silt erosion and sedimentation parameters

output options

- time histories of all variables at selected locations
- velocity (vector) fields
- isolines
- concentration and temperature contour plots
- computer animations and video visualization of salt intrusion and tidal motion

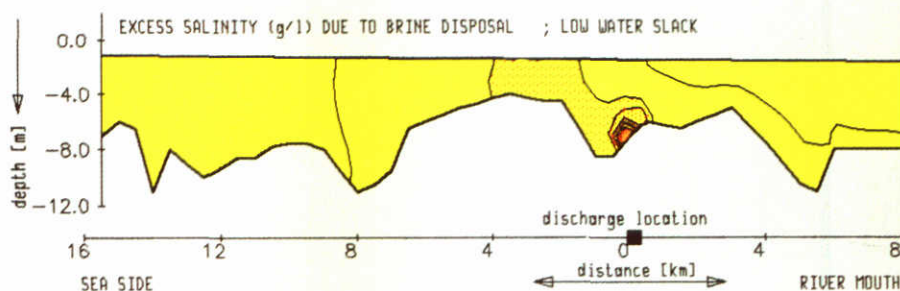
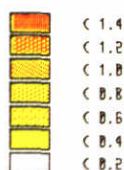
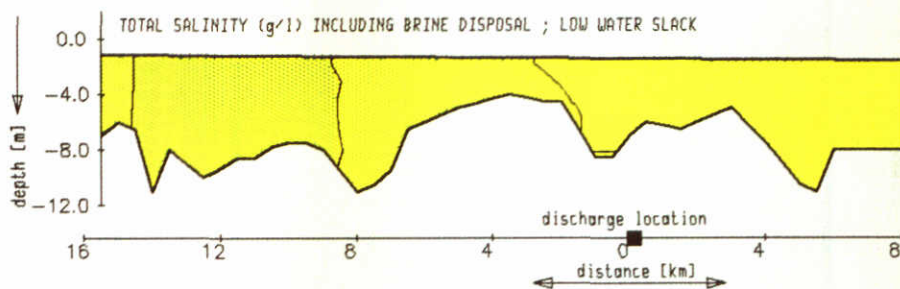
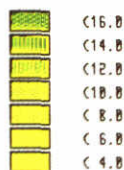
validation

References 1, 2 and 3 describe validation procedures and results.



Storm surge and salt penetration into the Rotterdam Waterway.

Vertical salinity distribution in a tidal channel reach around a brine disposal location.



references

1. Perrels, P. A. J. and Karelse, M., 'A two-dimensional laterally averaged model for salt intrusion in estuaries', In 'Transport Models for Inland and Coastal Waters', Acad. Press., pp. 484-535, 1981.
2. DELFT HYDRAULICS, 'Computation of density currents in estuaries', Report R897-I-IX, 1982.
3. DELFT HYDRAULICS and Rijkswaterstaat Tidal Water Division, 'Necessity of compensating measures at the closure of the compartmentsdams' (in Dutch), Report Z97/GWAO-86.001, 1986

contact point

DELFT HYDRAULICS
Estuaries and Seas Division,
Section: Estuaries

addresses

delft hydraulics

consultancy & research

hydraulic engineering
transport and infrastructure
coastal zone development
water resources development
ecology
industrial technology

main office

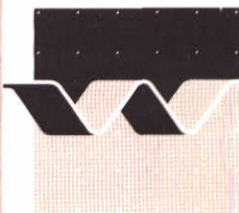
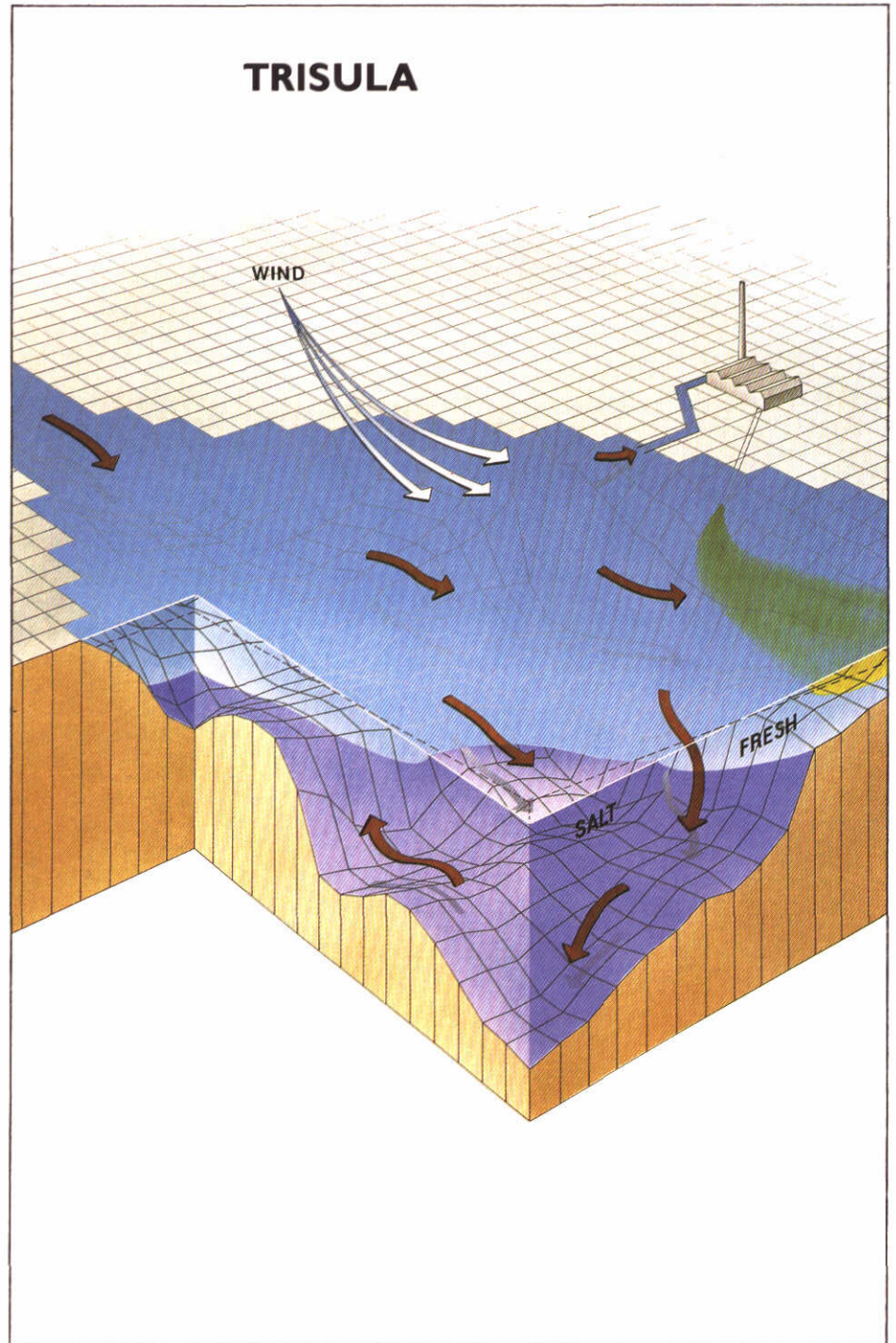
Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 56 93 53
telefax +31 15 61 96 74
telex 38176 hydnl

location 'De Voorst'

Voorsterweg 28, Marknesse
p.o. box 152
8300 AD Emmeloord
The Netherlands
telephone +31 52 74 29 22
telefax +31 52 74 35 73
telex 42290 hylvo-nl

Appendix D: TRISULA-folder

TRISULA: a program for the computation of non-steady flow and transport phenomena on curvilinear co-ordinates in 2 or 3 dimensions



features

3 dimensional model:

- curvilinear, orthogonal co-ordinates
- vertical dimension via multi-layer approach
- sigma transformation for the vertical co-ordinate, the so-called sigma stretching
- water elevation, 3D flow and density distribution
- hydrostatic flow field
- density as a function of salinity and temperature
- wind drag on water surface
- transport of constituents
- option to switch to one horizontal layer scheme, or one vertical plane scheme
- development and verification of the model in close conjunction with our experimental testing facilities.

range of applications:

- wind-generated currents in lakes
- tidal flow in estuaries and coastal seas
- salt intrusion in estuaries
- far-field cooling water dispersion
- large scale pollutant dispersion
- sediment and mud transport.

output options:

- time histories of all variables on selected locations
- velocity (vector)fields
- isolines of free surface
- concentration fields (isolines).

colophon

delft hydraulics

consultancy & research

estuaries and seas
harbours, coasts and offshore technology
rivers, navigation and structures
water resources and environment
hydrosurveys
industrial hydrodynamics and dredging technology

main office

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 56 93 53
telefax +31 15 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

location 'De Voorst'

Voorsterweg 28, Marknesse
p.o. box 152
8300 AD Emmeloord
The Netherlands
telephone +31 52 74 29 22
telefax +31 52 74 35 73
telex 42290 hylvo-nl

Artist impression by J. ten Hove.

TRISULA: a program for the computation of non-steady flow and transport phenomena on curvilinear co-ordinates in 2 or 3 dimensions

introduction

TRISULA is a DELFT HYDRAULICS program for the calculation of non-steady flow and transport phenomena for two-dimensional (2D), vertically averaged conditions and for three-dimensional (3D) multi-layer conditions.

Whether the problem is related to the stability of a hydraulic structure, to salt intrusion, to the dispersion of pollutants, or to the transport of silt and sediment, flow simulations usually are the basis of this type of research or consultancy work.

3d model

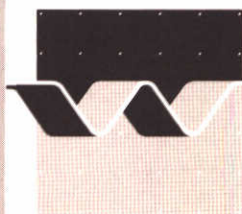
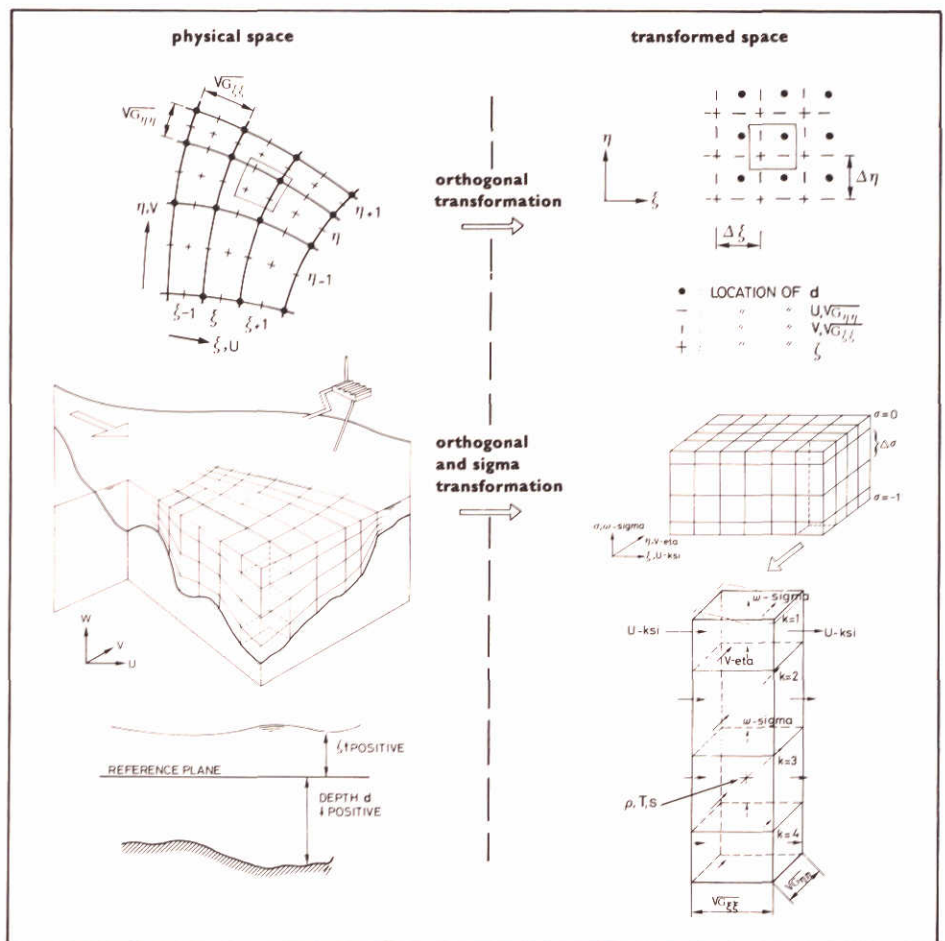
The TRISULA program has been developed by DELFT HYDRAULICS in collaboration with the Netherlands Ministry of Transport

and Public Works and with the Rand Corporation.

The numerical model of TRISULA essentially simulates water elevation, flow velocity in three dimensions and density as a function of salinity and temperature. In the flow equations hydrostatic conditions are assumed.

Wind drag on the water surface can be included. At the surface and bottom quadratic friction laws are applied. The vertical dimension is treated through a multi-layer approach, using a variable number of layers with variable thickness. The model has curvilinear, orthogonal co-ordinates and can be transformed into a two-dimensional horizontal or vertical plane scheme.

The numerical aspects include implicit solution methods and the so-called sigma transformation for the vertical co-ordinate.



This sigma stretching of the vertical grid leads to a smooth representation of the topography, giving the same order of vertical resolution for the shallow and deeper parts of the water.

Vertical transport processes are represented by well-proven descriptions of turbulent exchange of mass and momentum. Higher order turbulence models are implemented.

Transport of constituents is calculated using the advection-dispersion equation from the DELFT HYDRAULICS water-quality model DELWAQ, which includes a user defined number and type of constituents and their interactions. The DELWAQ coupling is also applied for simulations of sediment transport processes, such as erosion and sedimentation.

The TRISULA program includes a number of special facilities of which the most important are:

- simulation of the drying and flooding of *intertidal flats*
- simulation of the discharge of heat and effluents and the intake of cooling water at any location and depth in the computational field
- representation of thin dams like groynes and breakwaters
- pre- and postprocessing features for the analysis and representation of input and results
- modular set-up, enabling the implementation of various turbulence models.

quality assurance

Since the twenties DELFT HYDRAULICS has gathered vast experience in using experimental facilities for hydraulic modelling. This experience was of major importance for the development and verification of TRISULA. Scale model experiments have been carried out for both the study of fundamental processes and the validation of the numerical model.

The close cooperation of skilled and experienced scientists, mathematicians and software engineers was necessary for the application of an advanced theoretical formulation and numerical solution. This resulted in a model of high quality, using very efficient computing techniques.

TRISULA applications

3D simulations are of particular interest in situations where the flow field shows significant variations in the vertical direction. This may be essential in wind driven circulation problems and in partially mixed or layered flow problems. Examples are salt intrusion in estuaries, fresh water river discharges in bays and thermal stratification in lakes and seas.

Other typical applications are the optimization of the location of cooling water intakes and waste-water outlets. Further, as sedimentation and erosion processes in the bottom layer are sensitive to variations in the local flow conditions, TRISULA is a powerful instrument to simulate (in combination with DELWAQ) the morphology of the seabottom and river bed.

In the case of well-mixed shallow flow conditions, a one-layer model can be used for true two-dimensional horizontal (depth averaged) flow simulations.

addresses

delft hydraulics

consultancy & research

estuaries and seas
 harbours, coasts and offshore technology
 rivers, navigation and structures
 water resources and environment
 hydrosurveys
 industrial hydrodynamics and dredging technology

main office

Rotterdamseweg 185
 p.o. box 177
 2600 MH Delft
 The Netherlands
 telephone +31 15 56 93 53
 telefax +31 15 61 96 74
 telex 38176 hydnl

location 'De Voorst'

Voorsterweg 28, Marknesse
 p.o. box 152
 8300 AD Emmeloord
 The Netherlands
 telephone +31 52 74 29 22
 telefax +31 52 74 35 73
 telex 42290 hylvo-nl

AANVOER	Inlaat Wijk bij Duurstede 1)	12,3 m ³ /s	37,0 %
NAAR ARK	Inlaat Vreeswijk 2)	2,7 m ³ /s	8,0 %
	Gemalen + Vecht (sluitpost)	18,5 m ³ /s	55,0 %
AFVOER	Amsterdam-Rijnkanaal	33,5 m ³ /s	100,0 %
VAN ARK			
AANVOER	Amsterdam-Rijnkanaal	33,5 m ³ /s	40,2 %
NAAR NZK	Inlaat Oranjesluizen 3)	7,4 m ³ /s	8,9 %
	Gemaal Zeeburg	4,9 m ³ /s	5,8 %
	Amstel (incl. sluitpost)	13,9 m ³ /s	16,7 %
	Gemaal Zaandam	8,8 m ³ /s	10,6 %
	Gemaal Halfweg	6,2 m ³ /s	7,4 %
	Gemaal Spaarndam	5,0 m ³ /s	6,0 %
	Overige gemalen (noordzijde)	2,9 m ³ /s	3,4 %
	Overige gemalen (zuidzijde)	0,8 m ³ /s	1,0 %
AFVOER	Gemaal+spuisluizen IJmuiden	83,3 m ³ /s	100,0 %

1) gebaseerd op de jaren 1985 en 1986.

2) gebaseerd op de jaren 1985, 1986 en 1987.

3) in 1988 gedurende een half jaar geen inlaat; werkelijke waarde ligt iets hoger (10 à 15 m³/s)

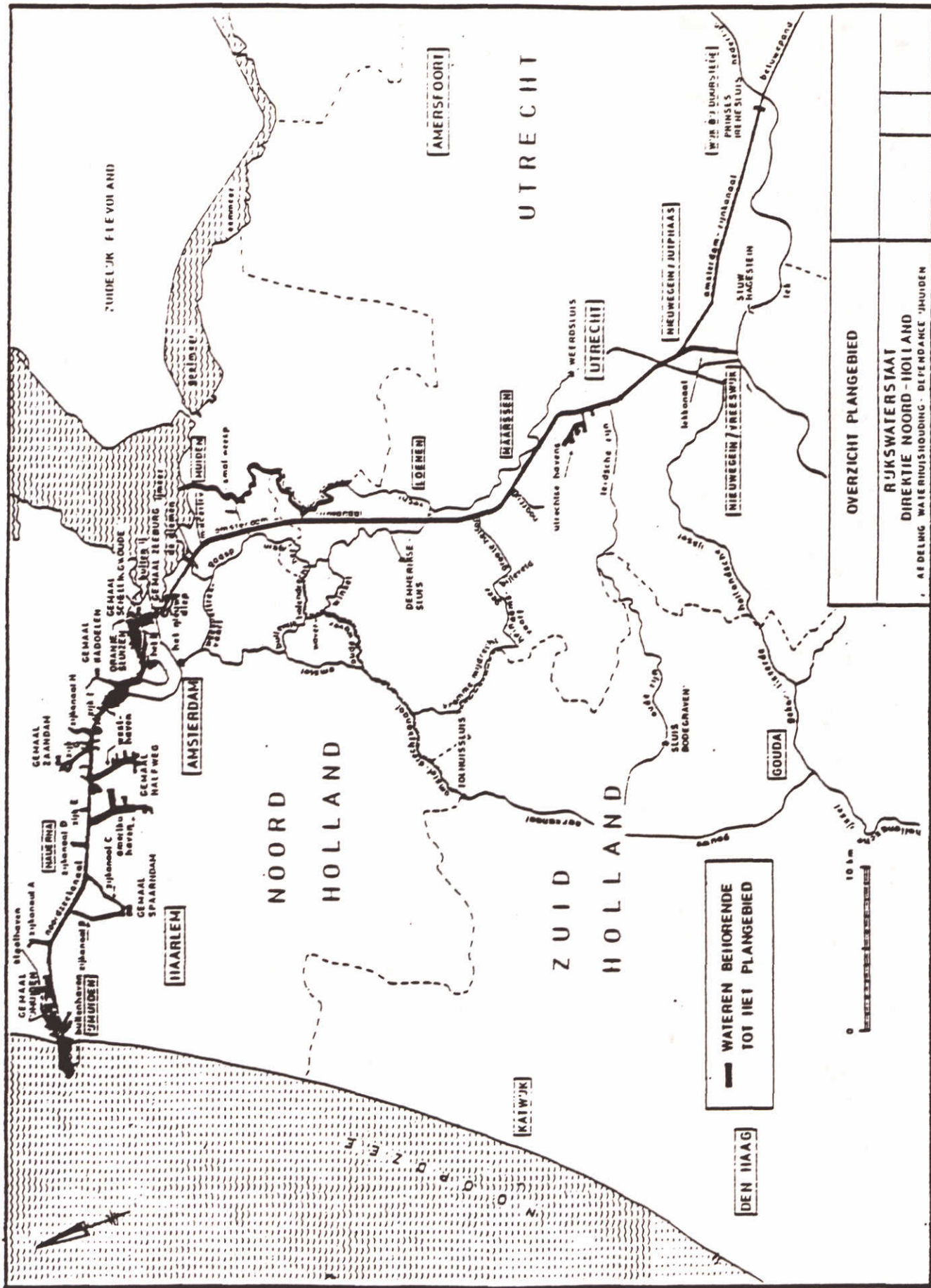
Tabel 1: Globale waterbalans voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, gemiddeld over de jaren 1985 tot en met 1988

Aanvoer (Jaar 1980)	m ³ /sec	%	
Uitwaterende sluisen	: 11	9%	
Nauerna km 12			
Halfweg km 18			
Rijnland	: 10	9%	
Spaarnedam km 10			
Halfweg km 13			
Amsterdam/Zeeburg	: 10	9%	} 74%
IJtunnel km 25			
Schellingwoude	: 39	33%	
Oranjesluizen km 28			
AmsterdamRijnkanaal	: 36	31%	
BinnenIJ km 28			
Overige posten	: 11	9%	
Diffuus km --			

Afvoer

IJmuiden km 0 :117 100%

Tabel 2: Waterbalans voor het Noordzeekanaal in 1980

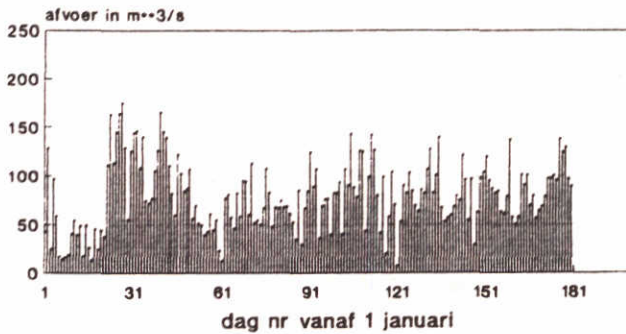


Figuur 1: Kaart met NZK en ARK

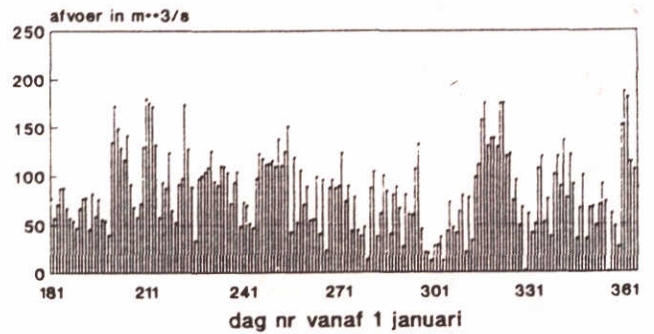
Figuur 2: Vervalt

NZK afvoer IJmuiden etmaal-gemiddelde debieten

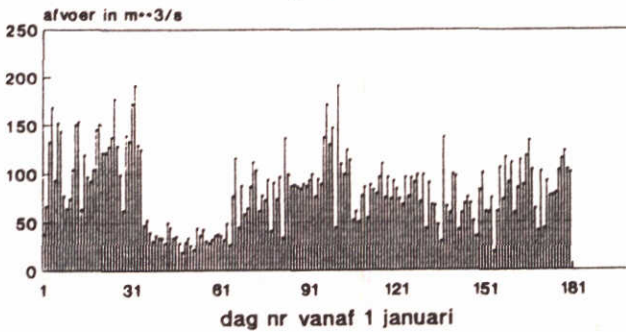
NZK afvoer IJmuiden etmaal-gemiddelde debieten



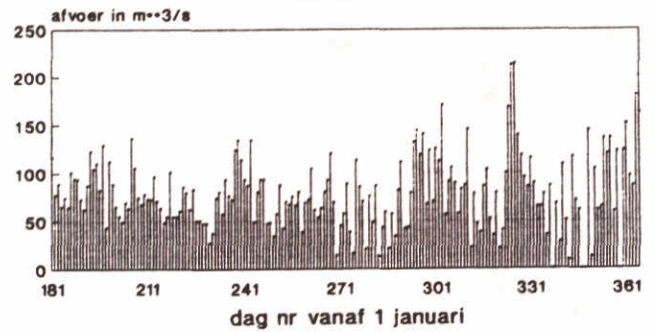
— jan.-juni 1985



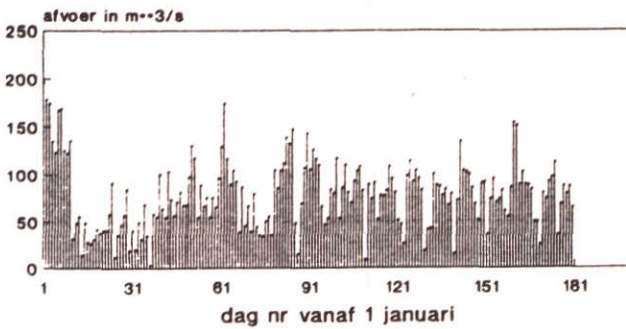
— juli-dec. 1985



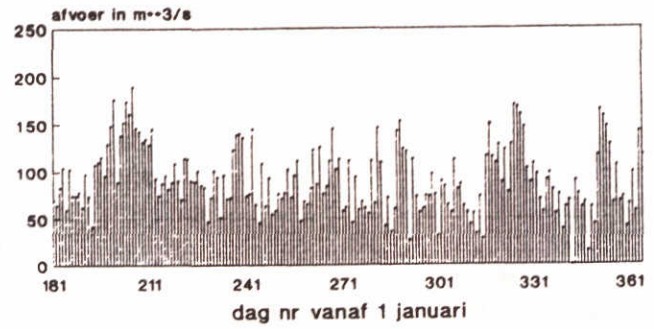
— jan.-juni 1986



— juli-dec. 1986



— jan.-juni 1987

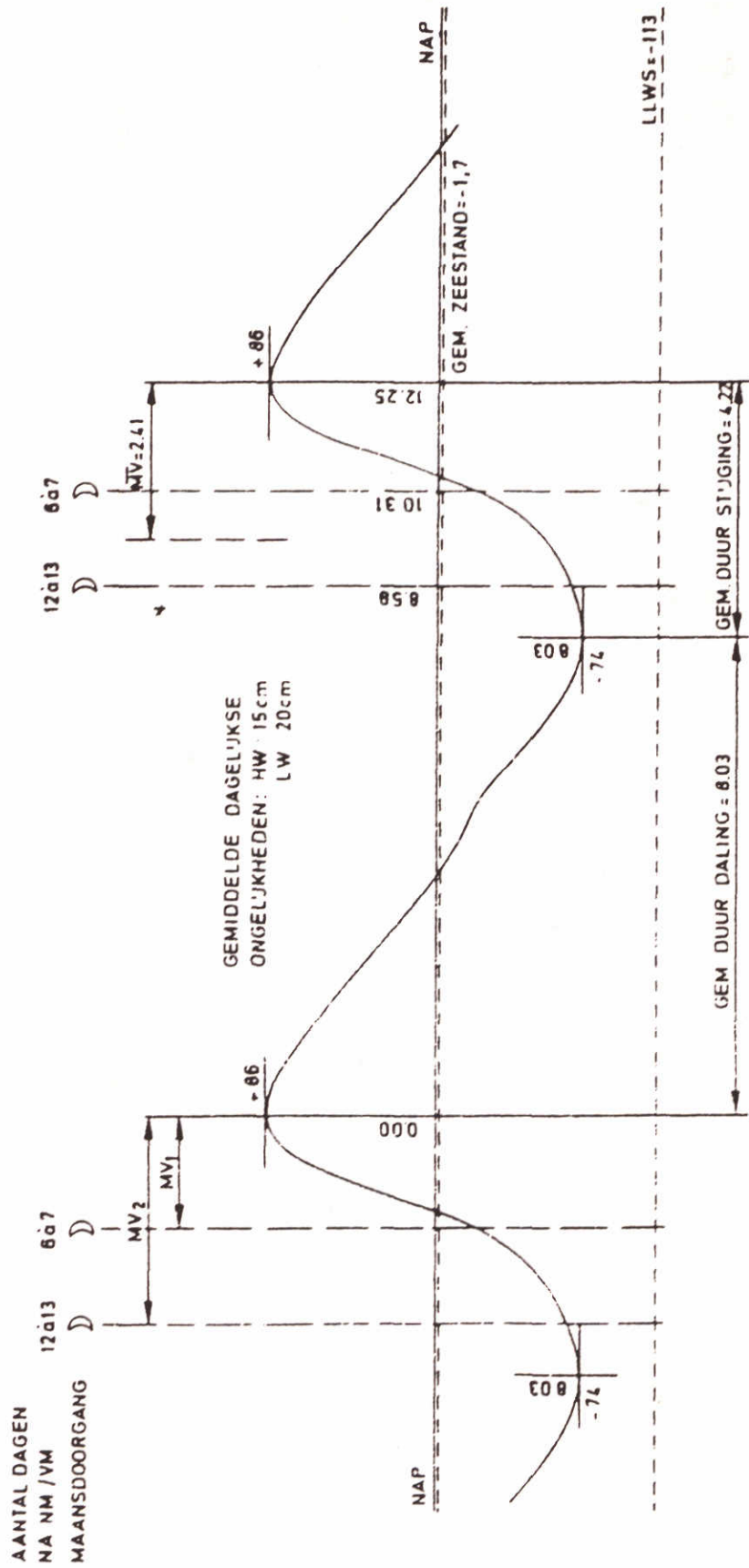


— juli-dec. 1987

viaemaal/spulsluizen

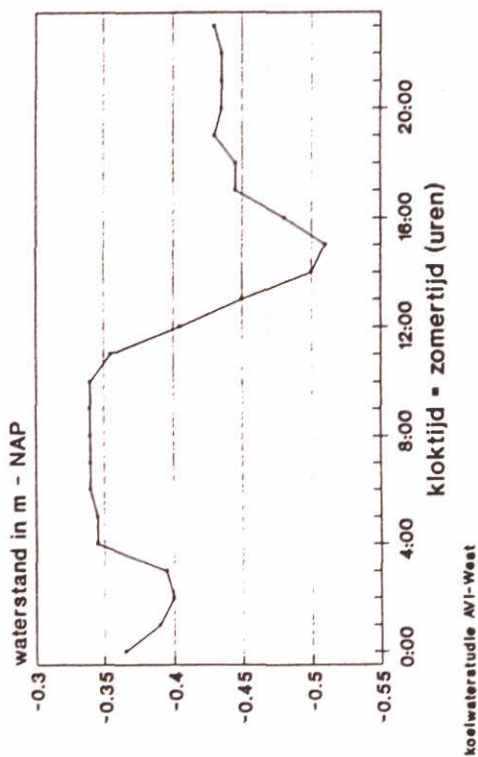
viaemaal/spulsluizen

Figuur 3 : Daggemiddelde afvoerdebieten IJmuiden

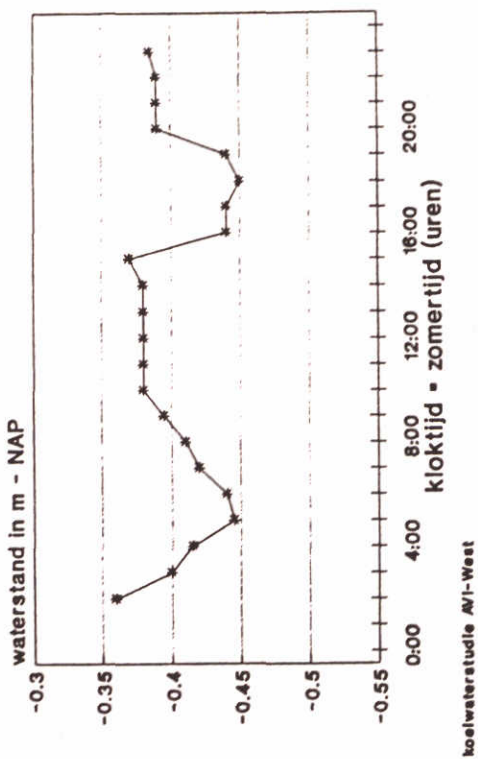


Figuur 4 : Gemiddelde getijcurve IJmuiden

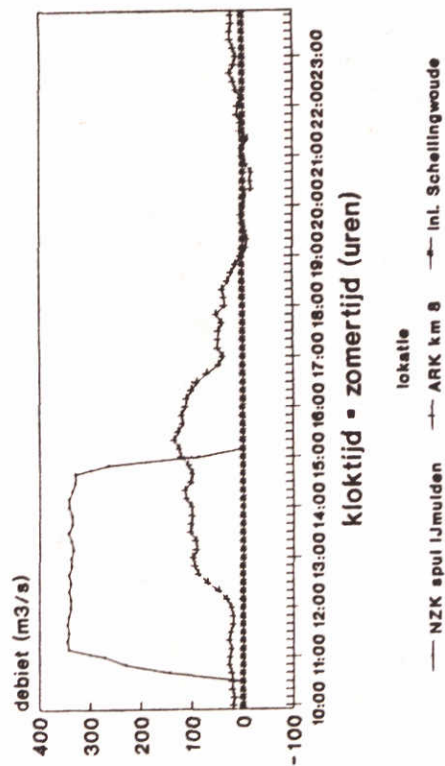
Gemiddelde waterstand NZK 25-4-1990



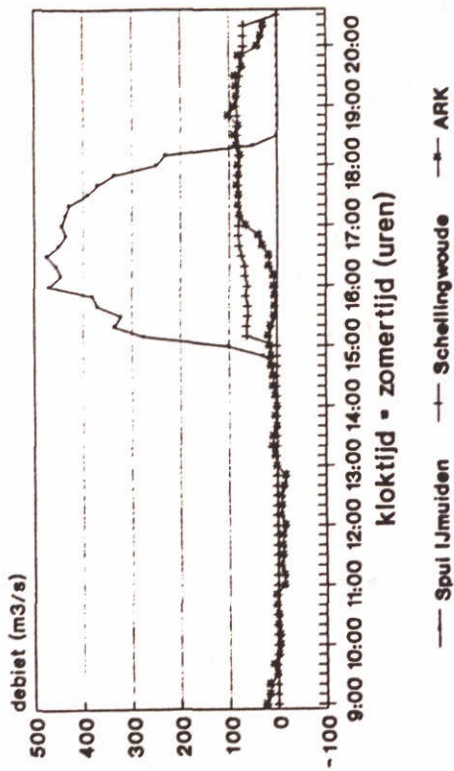
Gemiddelde waterstand NZK 27-6-1990



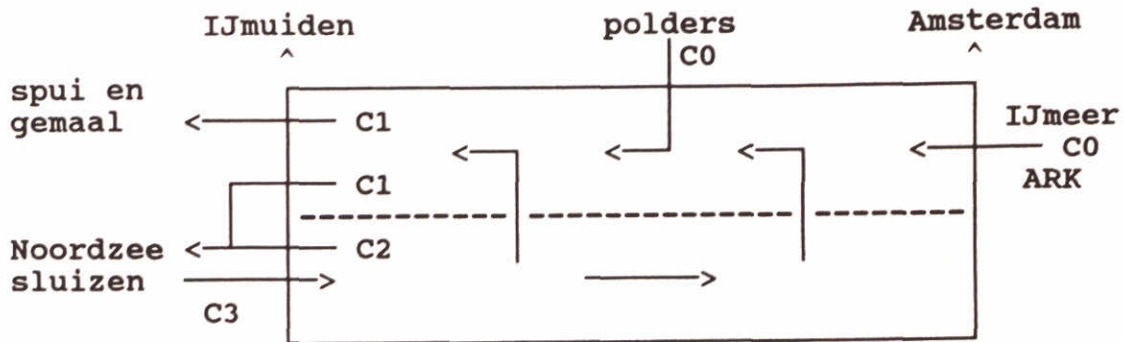
Debieten NZK en ARK 25-4-1990



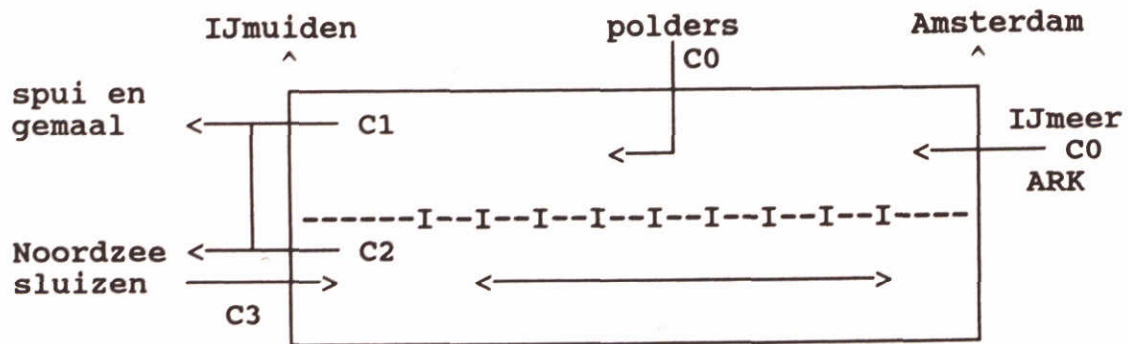
Debieten NZK en ARK 27-6-1990



Figuur 5 : Variatie in waterstand NZK 17 km en in debieten NZK en ARK

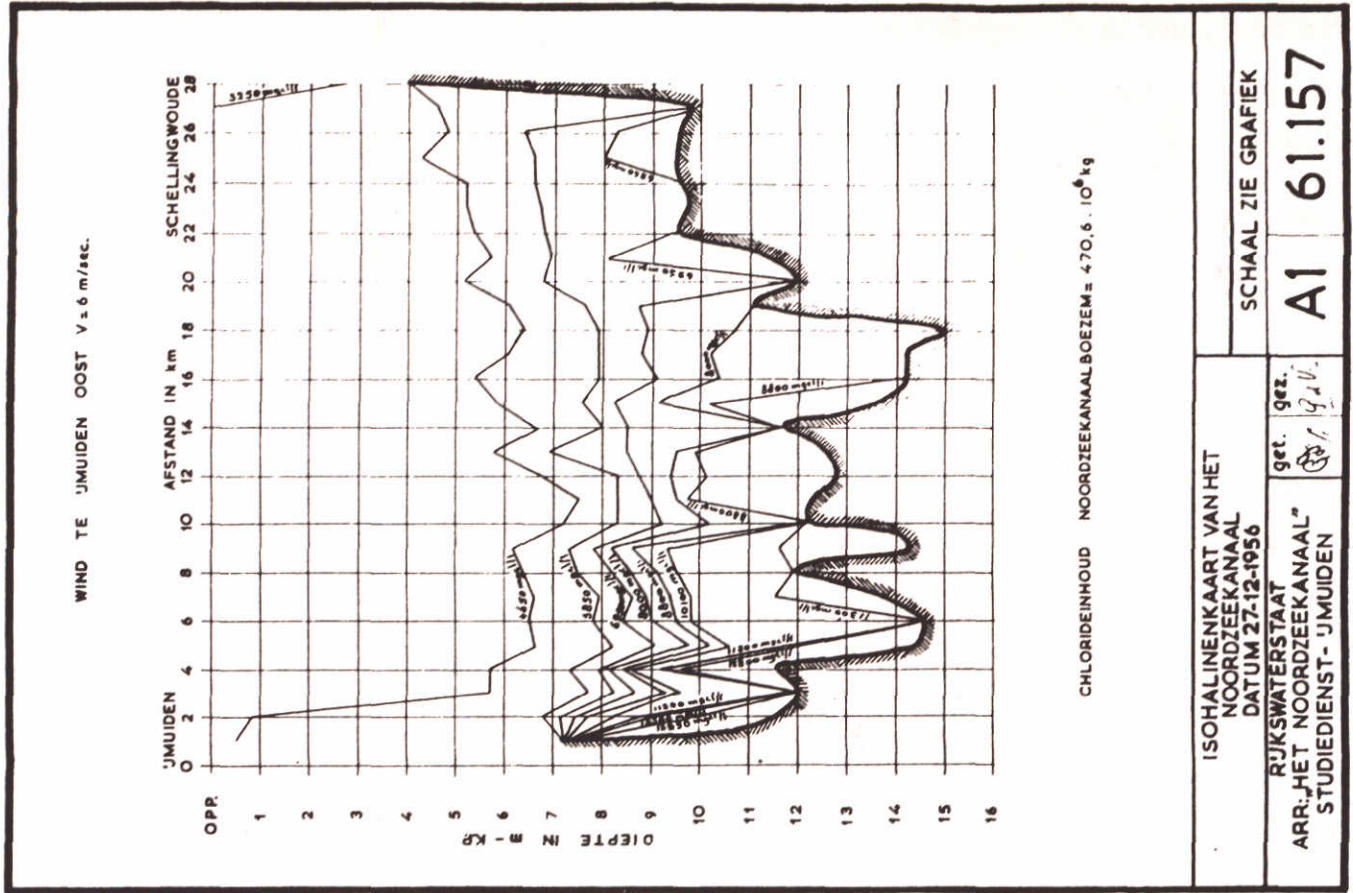
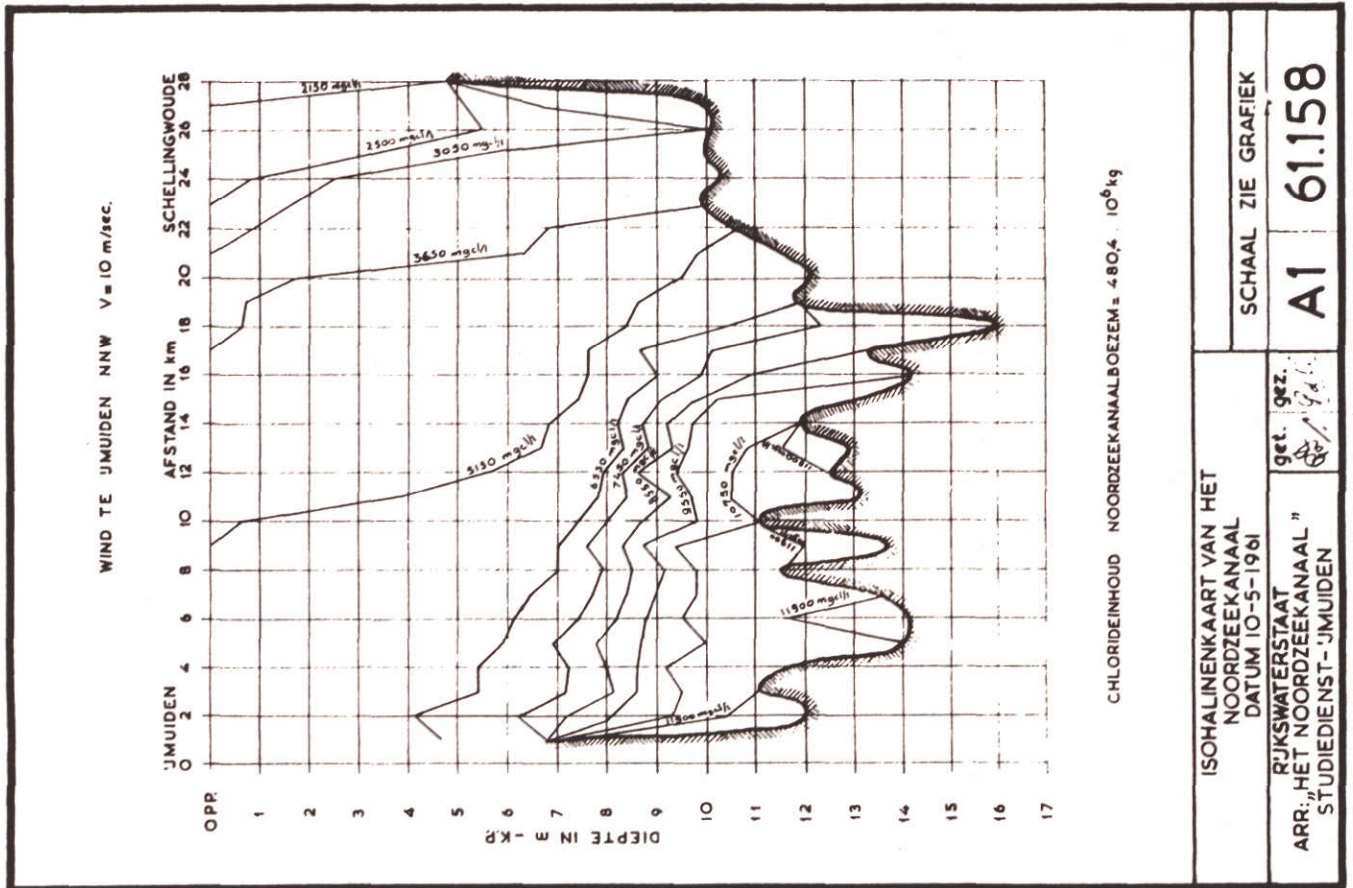


Model 1 Waterbeweging Noordzeekanaal met advectieve debieten van onderlaag naar bovenlaag.

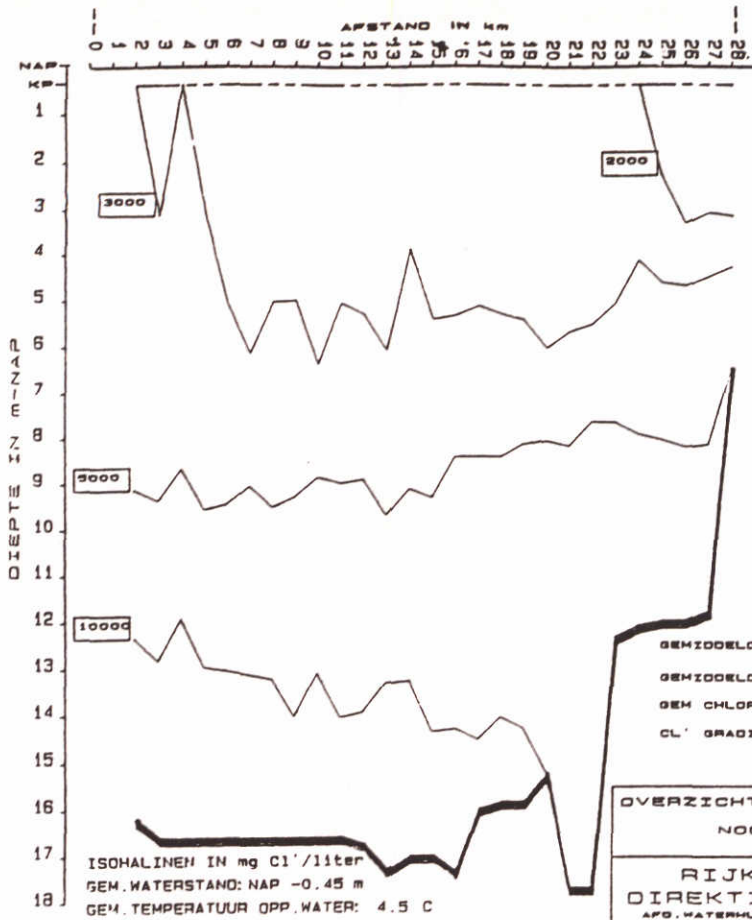


Model 2 Waterbeweging Noordzeekanaal met dispersieve uitwisseling (I) tussen onderlaag en bovenlaag.

Figuur 6 : Modellen van zout/zoetsysteem NZK [1]



Figuur 7 : Isolijnen Cl-gehalte/maandelijkse vaartochten, '56 en '61



CL⁻-GEHALTE OPPERVLAKTEWATER
 (LABORATORIUMGEVEENS)

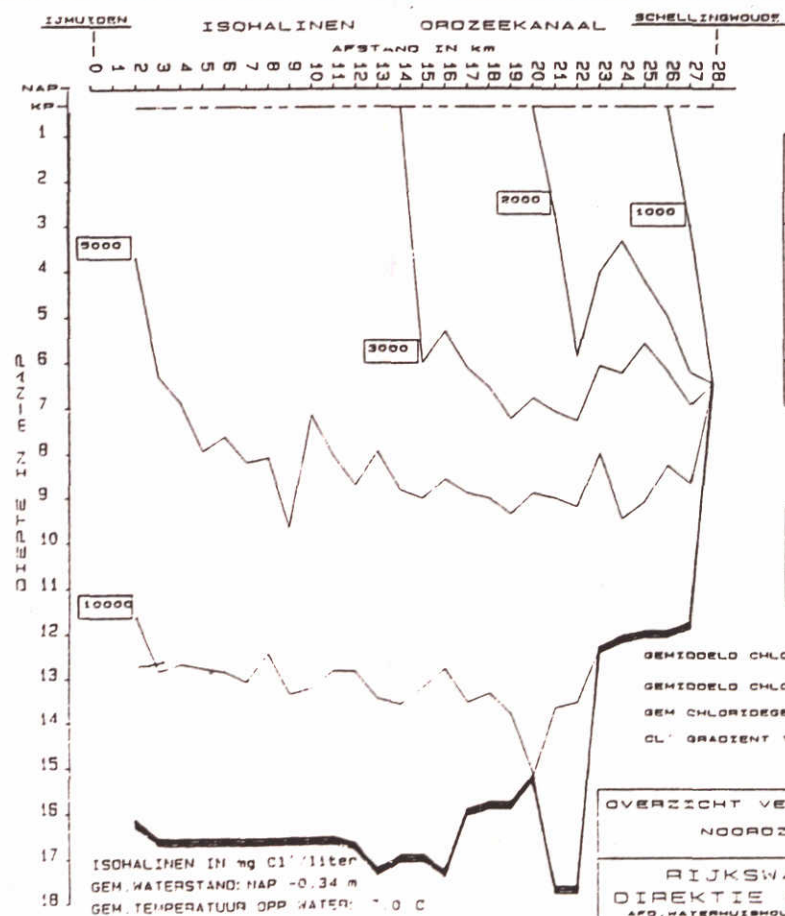
MEETPUNT		GETITR. GELEID.	
N. Z. K.	KM4	2970	3091
	KM17	2680	2753
	KM25	1680	1806
A'DAM-RIJNK.	KM 5	231	362

WIND
 (REGISTRATIE IJMUIDEN)

DATUM	03-03-85	04-03-85
RICHTING	ZO	ZO-Z
SNELHEID IN m/s	5-6	8-4

GEMIDDELD CHLORIDEGEHALTE 4266 mg/l
 GEMIDDELD CHLORIDEGEHALTE OVER DE BOVENSTE 5 m 2805 mg/l
 GEM CHLORIDEGEHALTE IN LAAG DIEPER DAN KP-10m 9372 mg/l
 CL⁻ GRADIËNT TUSSEN KM 4 EN KM.17 58.9 mg/l

OVERZICHT VERZILTINGSTOESTAND
 NOOROZEEKANAALBOEZEM
 RIJKSWATERSTAAT
 DIREKTIE NOORD-HOLLAND
 AFD. WATERHUIZHOUING-DEPENDANCE IJMUIDEN



CL⁻-GEHALTE OPPERVLAKTEWATER
 (LABORATORIUMGEVEENS)

MEETPUNT		GETITR. GELEID.	
N. Z. K.	KM4	4310	4365
	KM17	2170	2295
	KM25	1340	1436
A'DAM-RIJNK.	KM 5	214	331

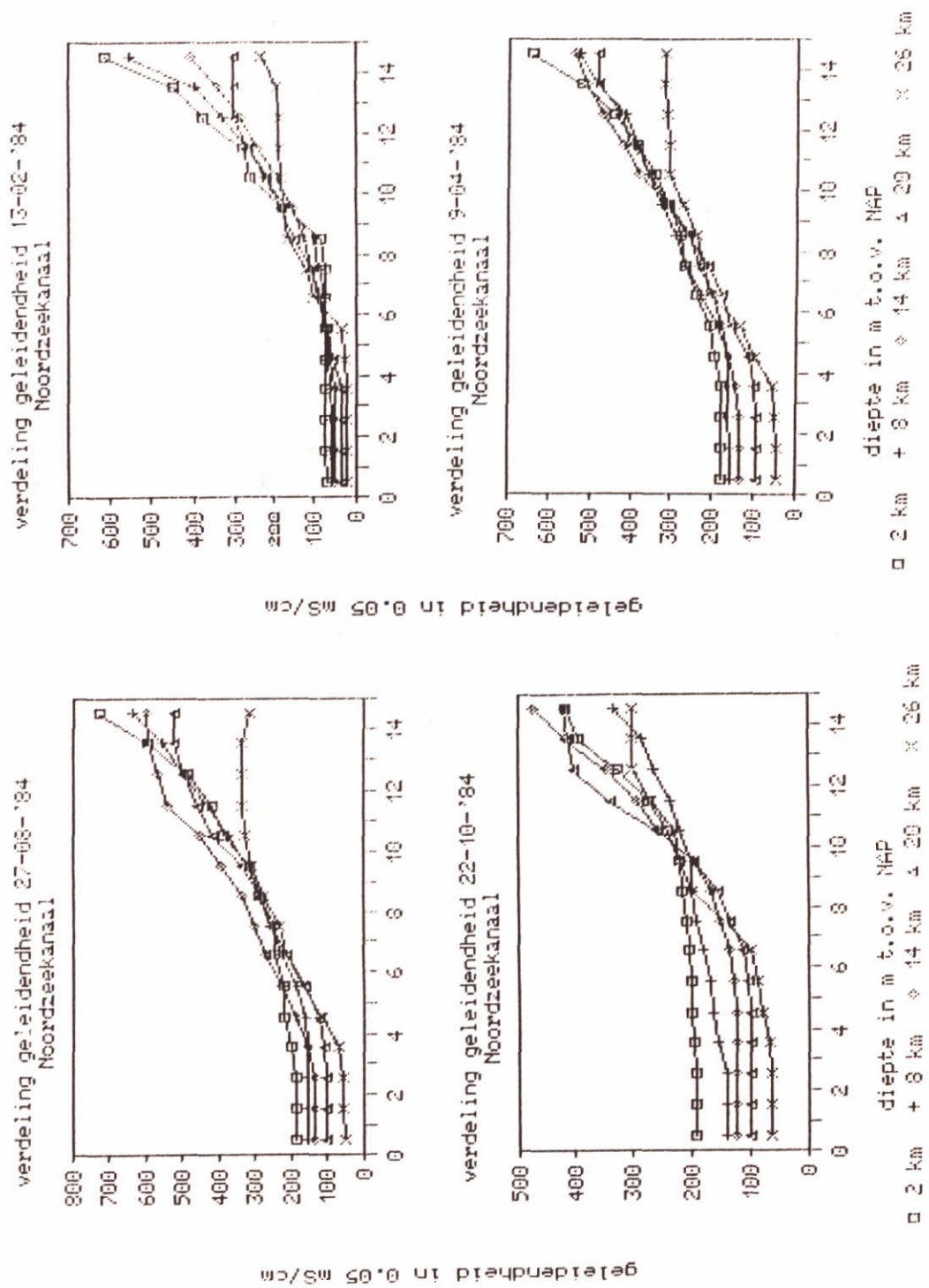
WIND
 (REGISTRATIE IJMUIDEN)

DATUM	31-03-85	01-04-85
RICHTING	ZW	ZW-Z-ZW
SNELHEID IN m/s	8-5-9	8-5-11

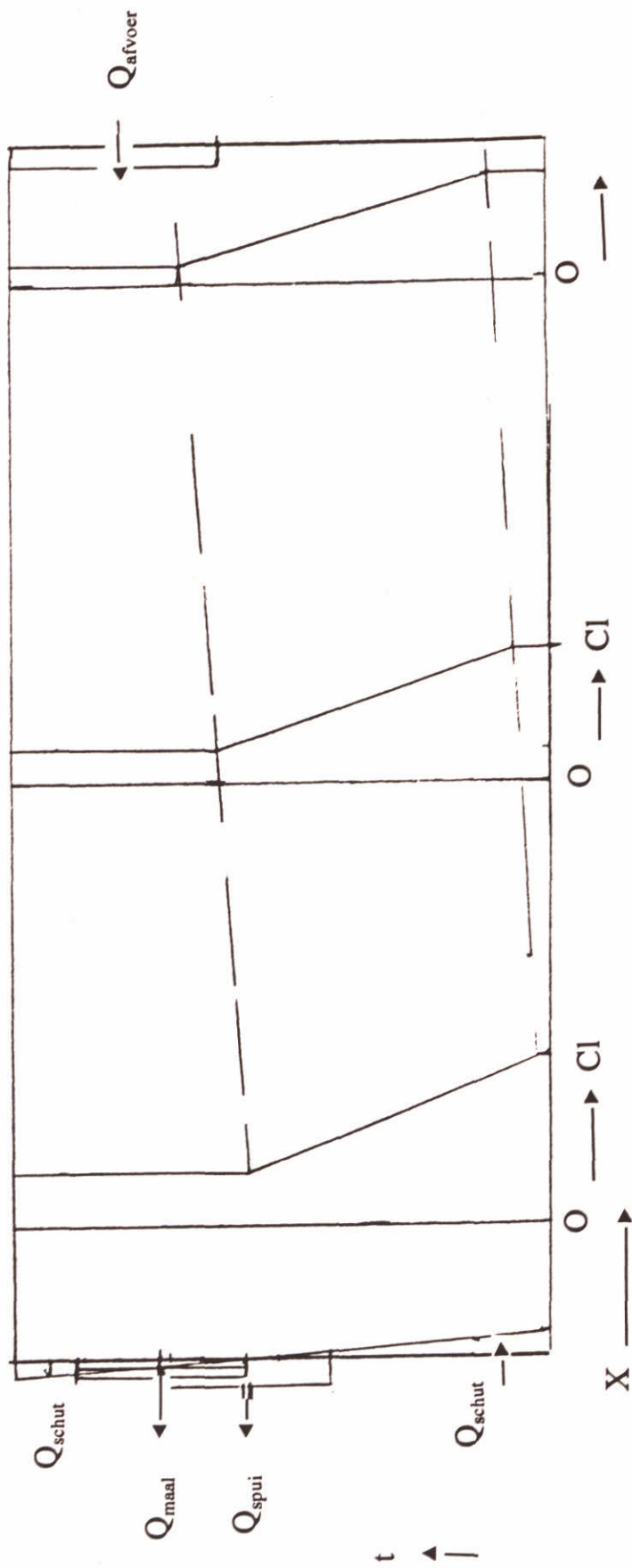
GEMIDDELD CHLORIDEGEHALTE 4430 mg/l
 GEMIDDELD CHLORIDEGEHALTE OVER DE BOVENSTE 5 m 2982 mg/l
 GEM CHLORIDEGEHALTE IN LAAG DIEPER DAN KP-10m 9616 mg/l
 CL⁻ GRADIËNT TUSSEN KM 4 EN KM.17 99.9 mg/l

OVERZICHT VERZILTINGSTOESTAND
 NOOROZEEKANAALBOEZEM
 RIJKSWATERSTAAT
 DIREKTIE NOORD-HOLLAND
 AFD. WATERHUIZHOUING-DEPENDANCE IJMUIDEN

Figuur 8 : Isolijnen Cl-gehalte/maandelijkse vaartochten, '84

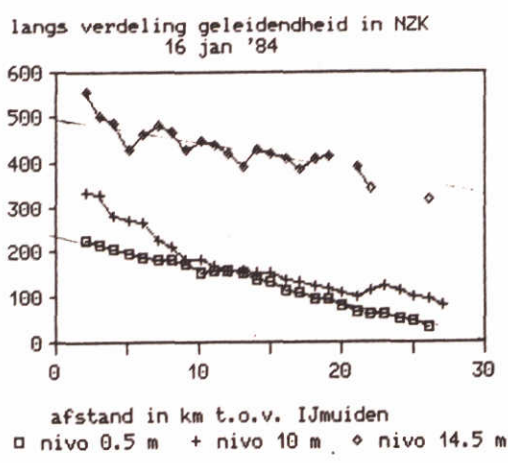


Figuur 9 : Verticale verdelingen gemeten in '84

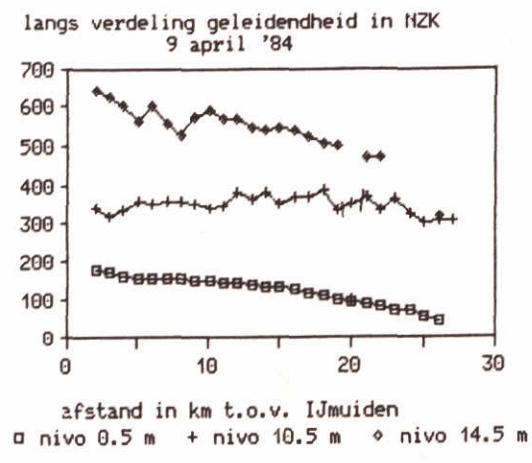


Figuur 10 : Schets gemiddelde zoutverdeling NZK

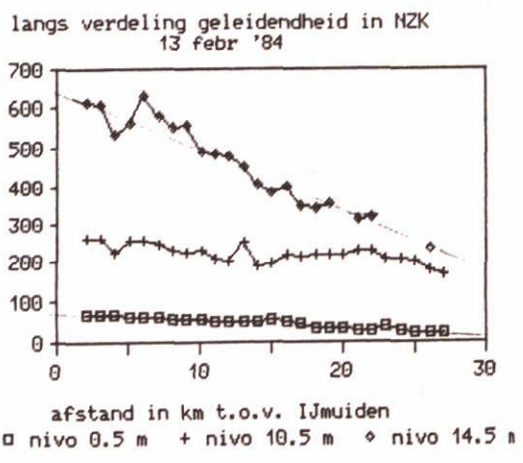
geleidendheid in 0.05 mS/cm



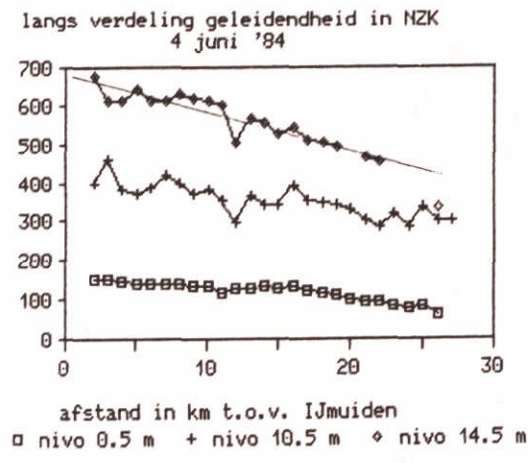
geleidendheid in 0.05 mS/cm



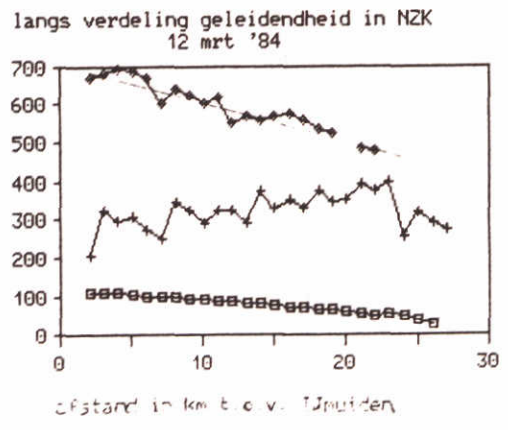
geleidendheid in 0.05 mS/cm



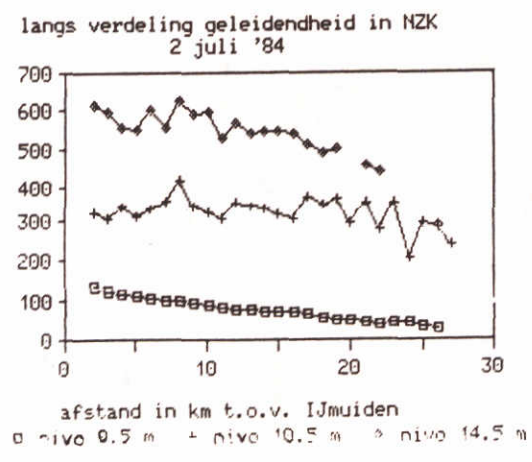
geleidendheid in 0.05 mS/cm



geleidendheid in 0.05 mS/cm



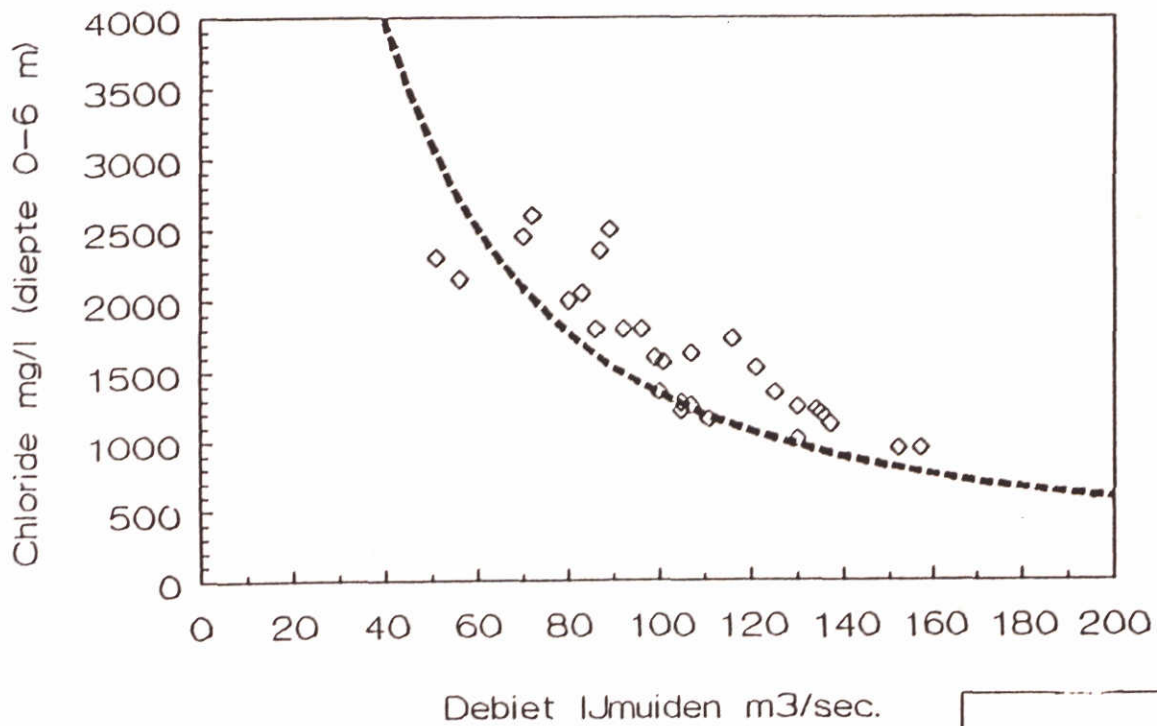
geleidendheid in 0.05 mS/cm



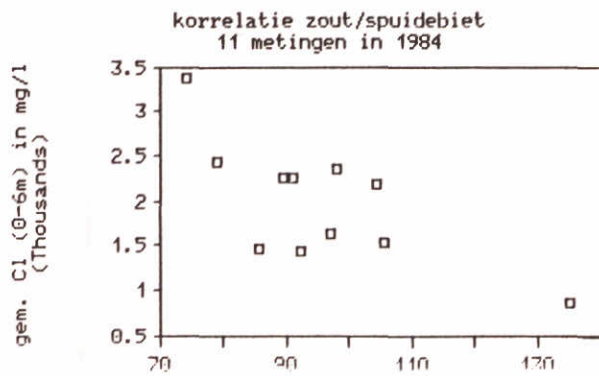
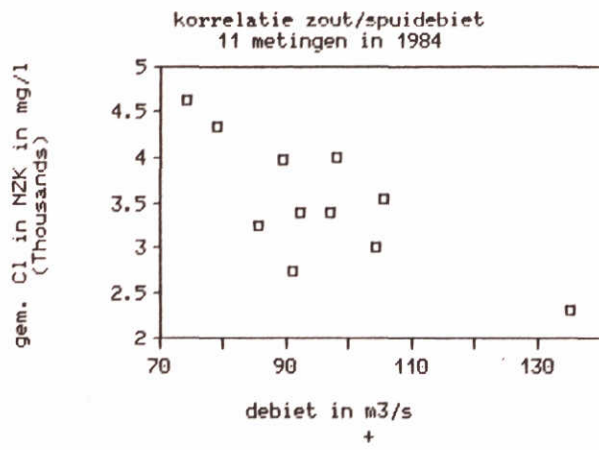
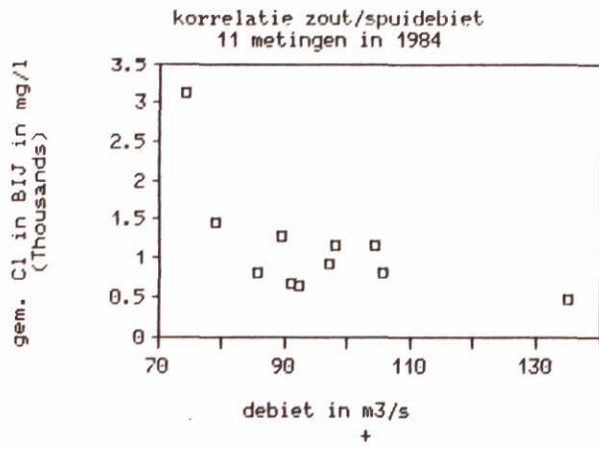
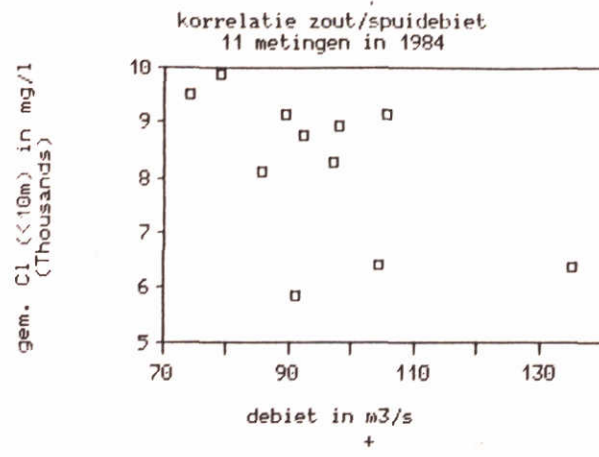
Figuur 11 : Variatie geleidendheid in lengterichting; '84

Gemiddelde Chloridegehalten

◇ Meten ----- Model

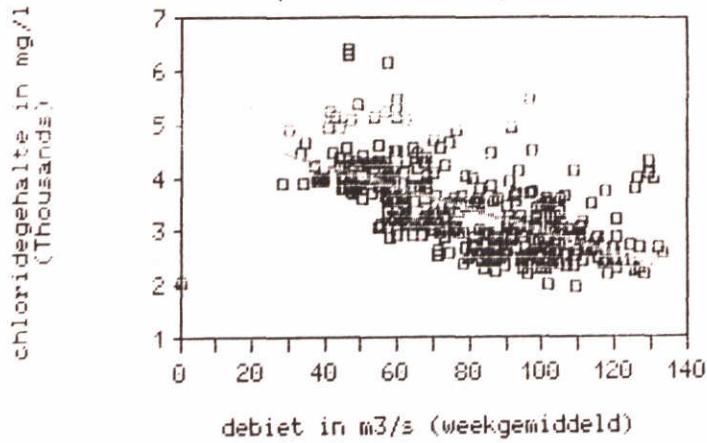


Figuur 12 : Verband tussen gemiddeld zoutgehalte in bovenlaag en afvoerdebiet

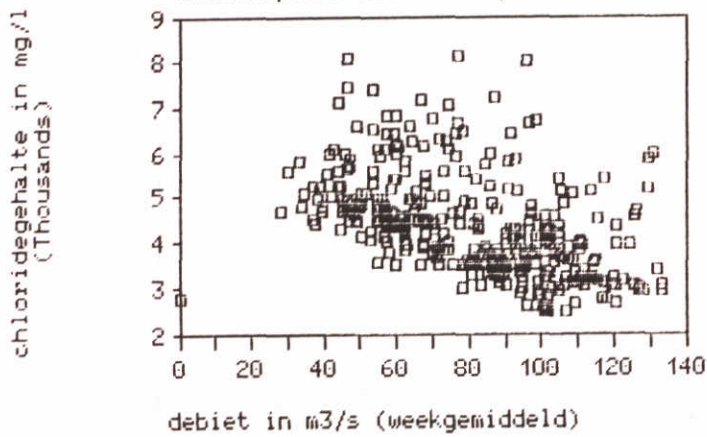


Figuur 13 : Correlatie karakteristieke zoutparameters en afvoerdebiet

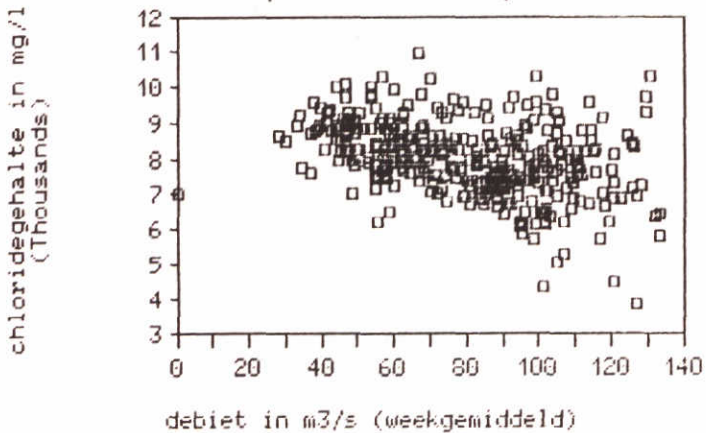
korrelatie chloridegehalte/spuidebiet
binnenspuikanaal -1.4 m; '89



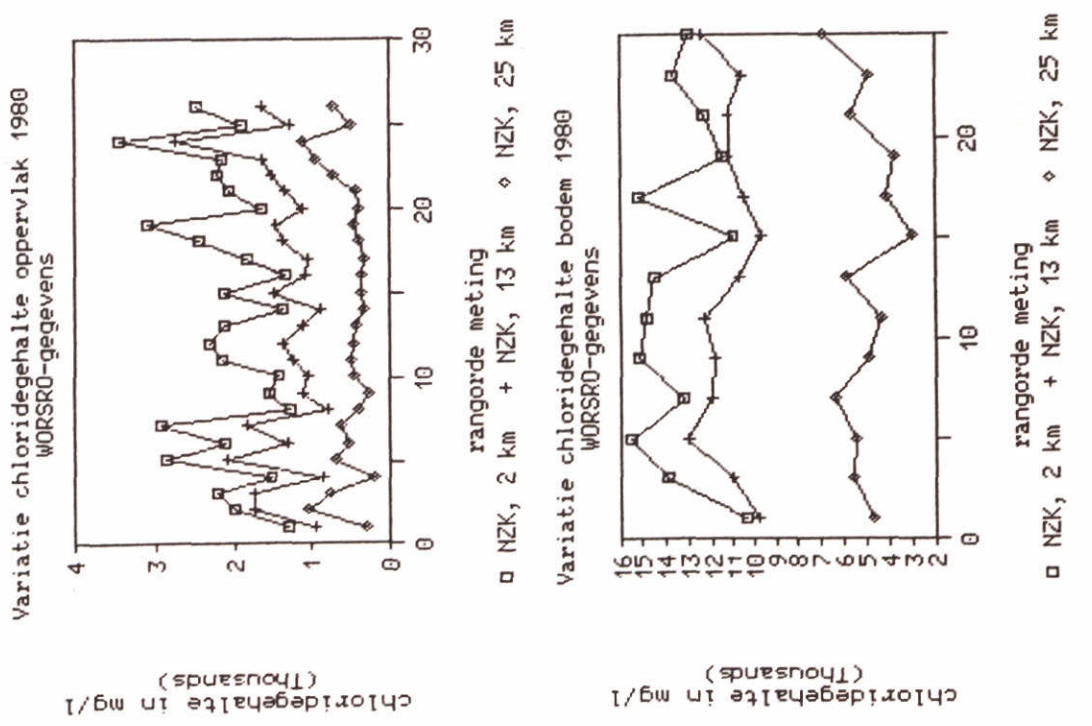
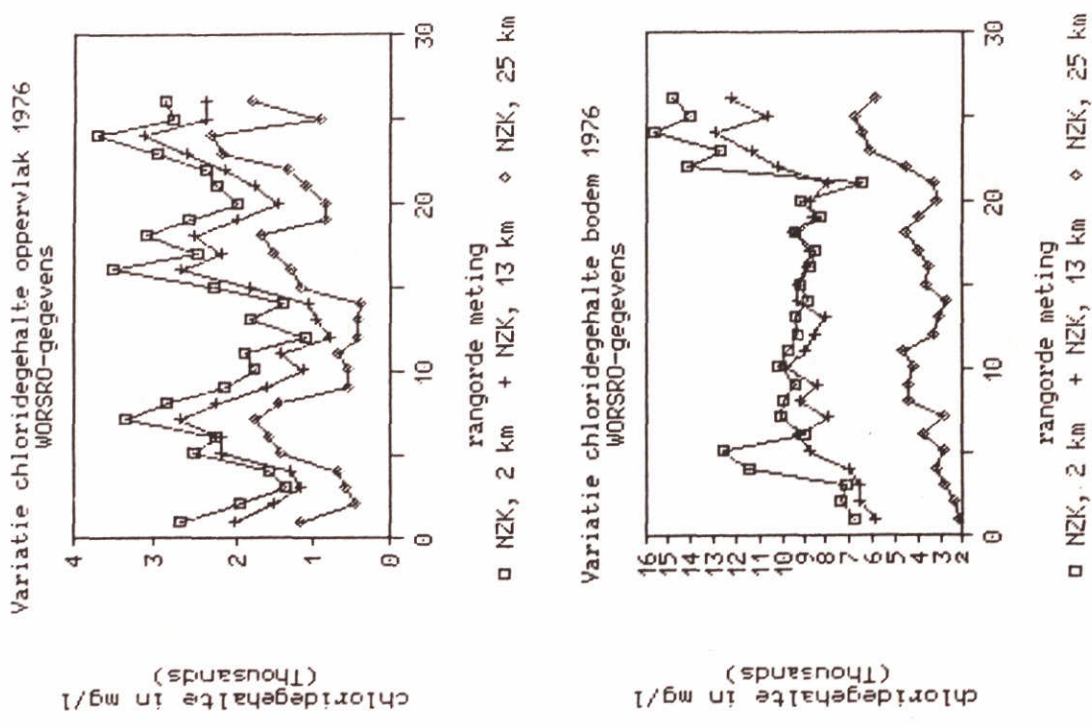
korrelatie chloridegehalte/spuidebiet
binnenspuikanaal -6.4 m; '89



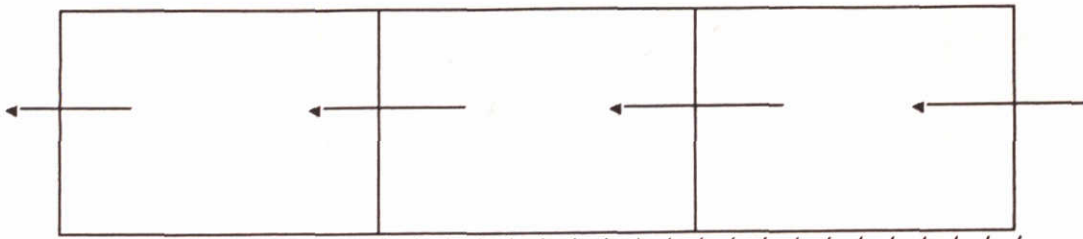
korrelatie chloridegehalte/spuidebiet
binnenspuikanaal -10.4 m; '89



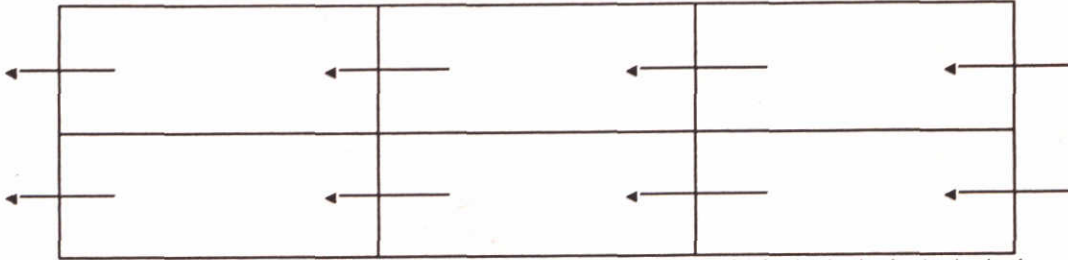
Figuur 14 : Correlatie lokaal/daggemiddeld Cl-gehalte en afvoerdebiet



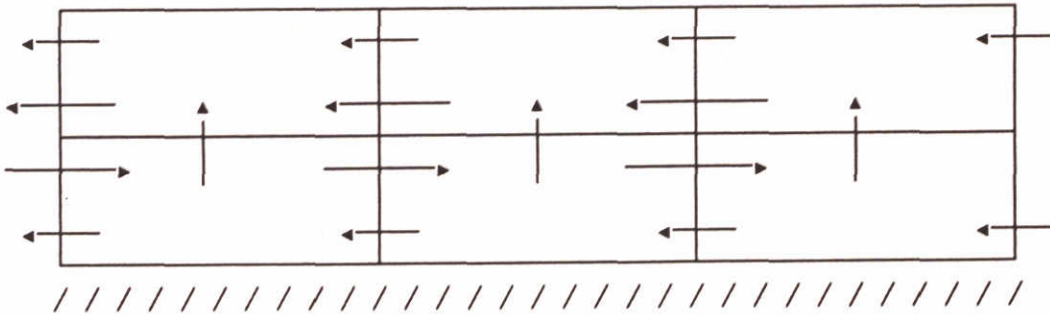
Figuur 15 : Variatie Cl-gehalte in tijd op diverse plaatsen; 1980 tegen 1976



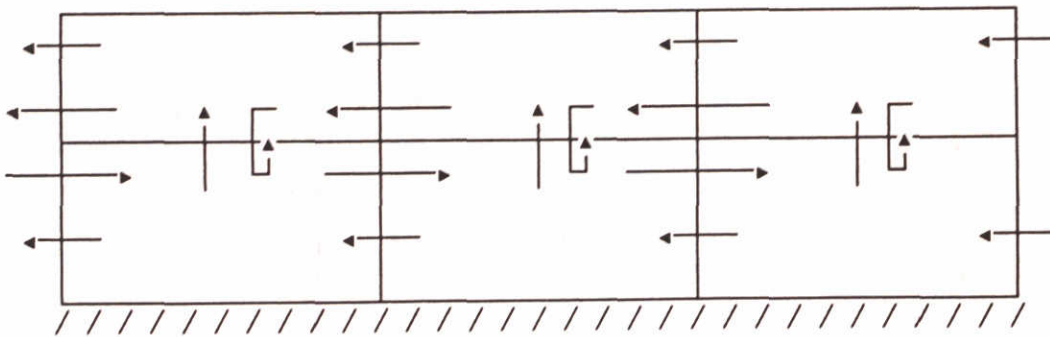
Figuur 16a: Eén dimensionale waterbeweging



Figuur 16b: Splitsing in twee lagen

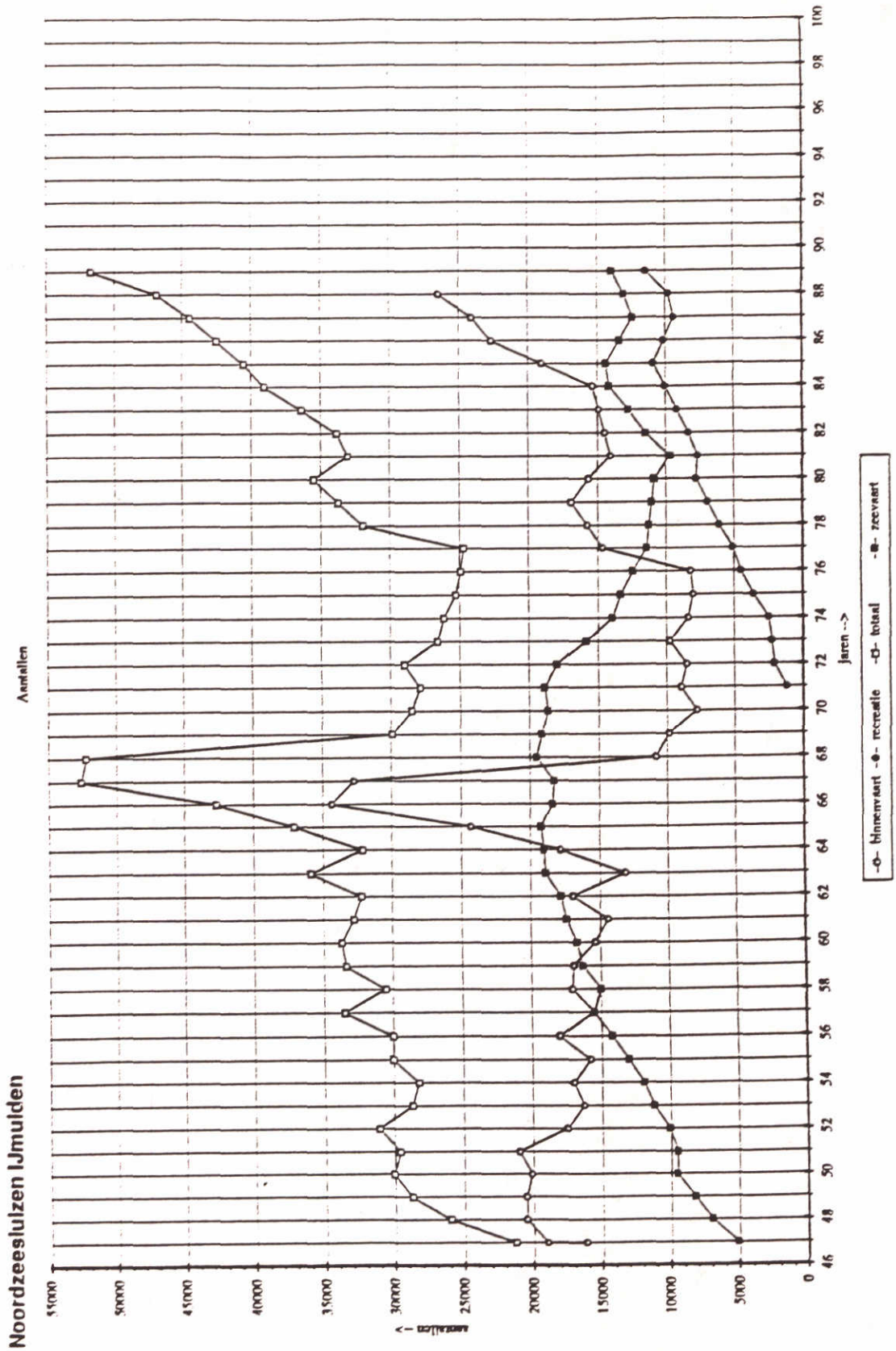


Figuur 16c: Toevoeging entrainment debieten



Figuur 16d: Toevoeging verticale dispersie

Figuur 16 : Globale weergave tweelagenmodel waterbeweging Nieuwe Waterweg [11]



Figuur 17 : Overzicht van de aantallen geschutte schepen via de Noordzeesluizen bij IJmuiden



hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

