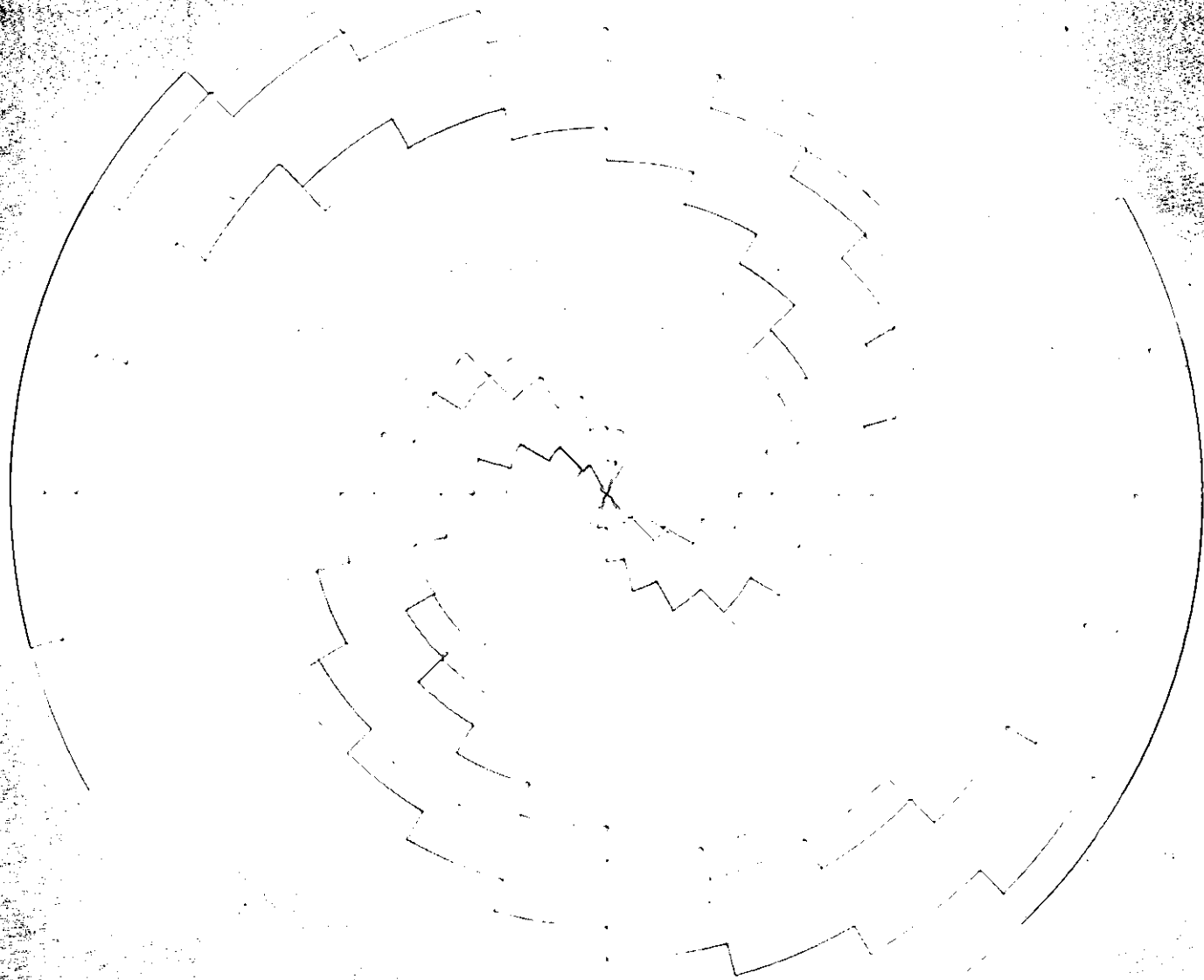


de theoretische
van de waterwetenschappen

rijksinstituut
voor zuivering
van afvalwater



Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater.
Hoofdafdeling Oppervlaktewater, district Zuid-west.

De Fluoridebelasting van de Westerschelde.

november 1979

J. Hendriksma

nota 79.027

1. INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

Geconfronteerd met vragen naar de gevolgen voor de waterkwaliteit van een tweetal fluoridelozingen in de Westerschelde is het zinvol een beeld te hebben van de totale fluoridebelasting van de Westerschelde. In grote lijnen kunnen een vijftal bronnen worden onderscheiden:

- toevoer van fluoride door zeewater;
- de fluoridevracht van de (Belgische) Schelde;
- de afvalgipslozingen nabij Terneuzen;
- fluoridelozingen Pechiney in de Quarleshaven (Sloe);
- fluoridelozingen van Hoechst op de Westerschelde (ter hoogte van Sloegebied).

In het navolgende zal globaal aangegeven worden in hoeverre elke bron bijdraagt aan het gehalte aan fluoride in de Westerschelde, waarbij met name de bijdragen van de afvalgipslozingen en de lozing van Pechiney punt van onderzoek zijn.

Daarnaast wordt aandacht besteed aan de toxiciteit van fluoride voor brak- en zoutwaterorganismen.

Nagegaan zal worden of in de Westerschelde van toxische concentratieniveaus sprake is.

2. TOXICITEIT FLUORIDE

Omtrent de toxiciteit van fluoride in brakke en zoute wateren is betrekkelijk weinig informatie voorhanden.

Verwezen kan worden naar Hemens & Warwick die onderzoek verrichtten naar fluoridevergiftigingen in de Richards Bay in Zuid-Afrika met een saliniteit van 20‰. Acute toxiciteitsonderzoekingen (96h) op een drietal karakteristieke vissoorten gaven daarbij tot 100 mg/l F^- geen schadelijke gevolgen te zien. De mossel *Perna perna* toonde zich gevoeliger; bij concentraties van ca. 7 mg/l F^- werd na 5 dagen duidelijke oversterfte waargenomen. Semichronische toxiciteitstesten (72 dagen bij 52 mg/l F^-) resulteerden voor sommige proefdieren, o.a. de krab *Tylodiplax blephariskios*, in een duidelijke oversterfte.

Bovendien trad sterke accumulatie tot gehalten van 500 mg F^- /kg product op.

Overigens moet opgemerkt worden dat fluoride-accumulatie voornamelijk in de niet eetbare delen (schaal-botten) plaatsvindt, ofschoon daarnaast tevens fluoride opname in "zachte" eetbare weefsels kan plaatsvinden zoals aangetoond in de krab *Callinectes sapidus* (3), Oliveira c.s. onderzochten de effecten op de groeisnelheid van 12 mariene phytoplanktonsoorten bij blootstelling aan fluorideconcentraties van 0-100 mg/l F^- . Bij de hoogste concentratie werd slechts bij 3 soorten 20-30% verminderde groei geconstateerd; bij lagere concentraties werd dikwijls een vergrote groeisnelheid gemeten t.o.v. die in natuurlijk zeewater. Een afdoende verklaring voor dit verschijnsel wordt niet gegeven. Wellicht is fluoride evenals bromide jodide een essentiële nutriënt voor sommige mariene algen(3). Het tolerantieniveau voor wat betreft de fluorideconcentraties is voor zoute wateren aanmerkelijk hoger dan voor zoete wateren (3). Vermoed wordt dat de samenstelling van zeewater hierbij een rol speelt, waardoor complexering van opgelost (toxisch) fluoride zou plaatsvinden.

In natuurlijk zeewater is het fluoride-evenwicht: 50% F^-

47% $Mg F^+$

2,1% $Ca F^+$

1,1% $Na.F$ (3)

Totaal ca. 1,3 mg/l F^- .

De Gezondheidsraad noemt als richtlijn voor zowel zoet als zout water, dat geschikt is voor het leven van waterdieren, een voorlopige grenswaarde van 1,5 mg/l F^- .

Voor zover bekend wordt een wetenschappelijke onderbouwing van deze waarde niet gegeven.

3. FLUORIDEBELASTING WESTERSCHELDE

3.1. Bijdrage Noordzee

Het van nature in zee aanwezige gehalte aan totaal opgelost fluoride is direct gerelateerd aan het chloridegehalte volgens:

$$\frac{[F^-]}{[Cl^-]} \approx 6,75 \cdot 10^{-5} \quad (4,5)$$

Aan de hand van de gemiddelde chloridegradiënt in de Westerschelde (periode jan.- juni '79) is dan de bijdrage aan het fluoridegehalte in de Westerschelde door zeewater te berekenen. Een en ander is zichtbaar gemaakt in

bijlage 1 en tabel 1. Afleesbaar zijn de locaties grens, Lamswaarde, Hansweert, Terneuzen en Vlissingen.

3.2. Fluoridevracht (Belgische) Schelde

Aan de hand van de gemeten fluoride- en chlorideconcentraties aan de grens kan een schatting gemaakt worden van de fluoridevracht van de Schelde. Een en ander geschiedt als volgt:

De gemiddelde fluorideconcentratie aan de grens bedroeg in het eerste halfjaar van '79 ca. 1,50 mg/l, het gemiddelde chloridegehalte ca. 2600 mg/l (6).

De bijdrage van zeewater aan het fluoridegehalte nabij de grens kan begroot worden op 0,18 mg/l, de bijdrage van de afvalgipslozingen op ca 0,10 mg/l (zie 3.3).

Het aandeel van de Schelde is derhalve $1,50 - 0,18 - 0,10 = 1,22 \text{ mg/l F}^-$. Correctie voor het zoutgehalte geeft het fluoridegehalte zoals dat in (zoet) Scheldewater aanwezig is: $1,22 \cdot \frac{17000}{17000 - 2600} = 1,44 \text{ mg/l F}^-$. Aangenomen is een zeechloridegehalte van 17 kg/m^3 .

Met behulp van curve-fitting is het verband vastgesteld tussen de Schelde-afvoer en het chloridegehalte op de grens (7):

$$[Cl^-] = 0,3 + 9,09 \cdot e^{-0,0089Q}$$

$$\begin{aligned} [Cl^-] &= \text{chloridegehalte (kg/m}^3\text{)} \\ Q &= \text{afvoer Schelde (m}^3\text{/s)} \end{aligned}$$

Op deze manier is voor het eerste halfjaar van '79 een gemiddelde Schelde-afvoer van ca. $150 \text{ m}^3\text{/s}$ te berekenen.

De gemiddelde vracht wordt derhalve $150 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} = 0,21 \text{ kg/s F}^-$.

Voor een schatting van de concentratieverdeling van deze fluoridevracht over de Westerschelde is gebruik gemaakt van een eendimensionaal diffusiemodel (zie lit. 7), waarbij op de grens $0,21 \text{ kg/s F}^-$ ingebracht wordt. Binnen de vakindeling is volledige menging verondersteld. De resultaten zijn voor de locaties grens, Lamswaarde, Hansweert, Terneuzen en Vlissingen weergegeven in tabel 1.

3.3. Fluoride door afvalgipslozingen

Door de storting van, met onder meer fluoride verontreinigd, afvalgips en

andere fluoridelozingen ter hoogte van Terneuzen (spui kanaal Gent-Terneuzen) wordt jaarlijks ca. 4800 ton (=0,15 kg/s) fluoride in de Westerschelde gebracht, welke hoeveelheid naar verwachting grotendeels in oplossing gaat (8).

Voor een inzicht in de verspreiding hiervan over de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van het eendimensionale diffusiemodel (zie lit.7). De resultaten daarvan zijn zichtbaar in tabel 1.

3.4. Berekend en gemeten fluoridegehalte in de Westerschelde

Sommatie van de bijdragen van de Noordzee (3.1.), de Schelde (3.2.) en de afvalgipslozingen (3.3.) levert voor de verschillende locaties het totaal berekende fluoridegehalte.

Aangenomen is dat de fluoridelozingen in het Sloegebied de concentraties in de Westerschelde niet merkbaar beïnvloeden. In 3.5. wordt hierop nader ingegaan.

De gemeten concentraties betreffen een gemiddelde van 12 metingen over het eerste halfjaar van '79.

Tabel 1: berekende en gemeten concentraties (mg/l F^- in de Westerschelde).

	BEREKEND				GEMETEN
	Noordzee	Schelde	Afvalgips	Tot.	
Vlissingen	1,11	0,09	0,15	1,35	1,47
Terneuzen	0,84	0,43	0,36	1,63	1,76
Hansweert	0,57	0,80	0,28	1,65	1,91
Lamswaarde	0,44	0,96	0,24	1,64	1,87
grens Ned.-Belg.	0,18	1,29	0,10	1,57	1,50

Een en ander is tevens zichtbaar in bijlage 1.

Bij deze berekening zijn de lozingen van Pechiney en Hoechst van resp. ca. 850 en 500 kg opgelost F^- /etmaal verwaarloosd. De bijdrage van deze lozingen aan het fluoridegehalte te Vlissingen, d.i. nabij de lozingspunten, wordt geschat op ca. 1% (zie ook 3.5.3).

3.5. Fluoridebelasting Sloegebied

3.5.1. Inleiding

Locale problemen voor wat betreft het gehalte aan fluoride zouden zich voor kunnen doen in het Sloegebied en wel om de volgende combinatie van redenen:

- een vrij hoog achtergrondgehalte aan fluoride;
- de fluoridelozing van Pechiney in de Quarleshaven;
- de minder grote dispersie in vergelijking met de Westerschelde.

Door metingen is studie verricht naar de fluorideverdeling in het Sloegebied. Tevens is het mogelijk m.b.v. een eenvoudige diffusievergelijking het concentratieverloop globaal te beschrijven. Hierop wordt in het navolgende ingegaan.

3.5.2. Fluoridelozing Pechiney

Na 1-1-'82 mag gezien de lozingsvergunning ten hoogste geloosd worden: 3200 kg/etm. F^- gedurende ten hoogste 3 dagen per week, 2000 kg/etm. F^- gedurende de rest van de dagen.

Per week wordt aldus ten hoogste geloosd: 17.600 kg F^- .

Dit is gemiddeld ca. 2500 kg/etm. ($= 2,9 \times 10^{-2}$ kg/s F^-).

Thans bedraagt de lozing ca. 1400 kg/etm. F^- , gemeten als totaal fluoride.

De fractie hiervan in oplossing bedraagt ca. 850 kg/etm. F^- . De rest, 550 kg/etm. F^- , komt gecomplexeerd (als AlF_3) of geadsorbeerd aan zwevend slib voor. In hoeverre dit gebonden fluoride in de loop der tijd mobiliseert is niet bekend.

3.5.3. Fluoridemetingen Sloegebied

In april '79 zijn in het Sloegebied een achttal meetseries uitgevoerd ter verkrijging van een inzicht in een eventuele fluoridegradiënt als gevolg van de lozing van Pechiney.

Een overzicht van het Sloegebied en de bemonsteringsplaatsen is zichtbaar in bijlage 2.

De meetreeksen zijn uitgesplitst in:

- opkomend tij, bijlage 3, gemiddelde van 3 meetseries;
- afgaand tij, bijlage 4, gemiddelde van 3 meetseries;
- hoog resp. laag water, bijlage 5, gemiddelde van 2 meetseries.

Bij de constructie van de in de bijlagen 3, 4 en 5 gepresenteerde grafieken is er vanuit gegaan dat de invloed van de fluoridelozing van Pechiney op de Westerschelde niet merkbaar is. Gezien de relatief geringe omvang van de lozing lijkt deze aanname gerechtvaardigd, hetgeen eveneens ruwweg aangetoond kan worden door het volgende rekenvoorbeeld.

De geloosde hoeveelheid opgelost fluoride door Pechiney bedraagt thans ca. 850 kg/etm., dit is 10^{-2} kg/s..

Indien aangenomen wordt dat deze hoeveelheid zich ideaal mengt over zeevak 19, dit is een gebied voor de monding van de Quarleshaven met een lengte van ca. 5 km, is m.b.v. het eendimensionaal diffusiemodel in dat vak een verhoging te berekenen van 0,01-0,02 mg/l F^{-} . Indien geen ideale menging wordt verondersteld, maar nabij de oever rekening wordt gehouden met een grotere concentratieverhoging (bijv. een factor 3 t.o.v. de rest van het zeevak) is hier een verhoging te berekenen van ca. 0,04 mg/l F^{-} , hetgeen nauwelijks van betekenis is.

Aan de hand van de bijlagen 3, 4 en 5 kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

1. Onder alle getijde-omstandigheden is de bijdrage van Pechiney aan het gehalte aan fluoride in de Quarleshaven gemiddeld 0,15-0,20 mg/l oftewel 10 à 15% van de achtergrondsconcentratie;
2. Bij opkomend tij (bijlage 3) wordt de lozingspluim recht voor het lozingspunt aangetroffen, bij afgaand tij beweegt de pluim zich buitenwaarts (bijlage 4);
3. Gemiddeld de hoogste concentraties worden gemeten op tijdstippen waarop nauwelijks stroming optreedt (hoog resp. laag water, bijlage 5) en derhalve minimale uitwisseling.

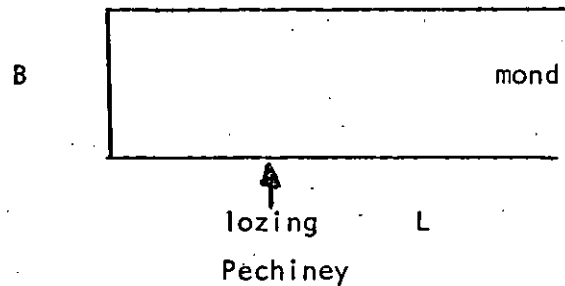
3.5.4. Modelmatige benadering van de verspreiding van fluoride in de Quarleshaven

Behalve door metingen kan een globale indicatie van de concentratieverhoging worden verkregen door toepassing van een eenvoudige diffusievergelijking, met behulp waarvan de transportverschijnselen in de Quarleshaven ruwweg worden vastgelegd.

De Quarleshaven wordt daartoe geschematiseerd als een rechthoekige bak met de volgende afmetingen:

- lengte $L = 4 \times 10^3$ m
- breedte $B = 500$ m
- diepte $H = 12$ m

figuur 1: geschematiseerde Quarleshaven



Hierbij is aangenomen dat de concentratieverhogingen zich uitsluitend in de Quarleshaven voordoen, het effect op de Van Cittershaven wordt verwaarloosbaar verondersteld. Bij opkomend tij lijkt deze veronderstelling zeker gerechtvaardigd daar de concentratieverhogingen in dit geval achterin de Quarleshaven zichtbaar zijn (bijlage 3); in de Van Cittershaven worden dan ook lagere concentraties gemeten, vergelijkbaar met die voorin de Quarleshaven. Tijdens afgaand tij wordt de fluoridepluim voorin de Quarleshaven aangetroffen (bijlage 4); de concentraties in de Van Cittershaven op vergelijkbare afstand tot het lozingspunt zijn nu eveneens lager zodat de gepleegde schematisatie ook in dit geval een redelijke benadering lijkt. Opgemerkt moet worden dat indien voor de diffusieberekeningen zou worden uitgegaan van de gehele haven in dit geval concentraties worden berekend die ca. een factor 2 kleiner zijn dan de thans berekende. Dit betekent een minder goede overeenstemming met de gemeten concentratiegradiënt. Aan deze benadering wordt derhalve verder geen aandacht besteed. Uiteraard wordt het kombergend vermogen van de Van Cittershaven wel meegenomen in de berekening van de gemiddelde stroomsnelheid in de havenmond. Voor een op deze manier geschematiseerde haven kan de volgende diffusievergelijking worden opgesteld:

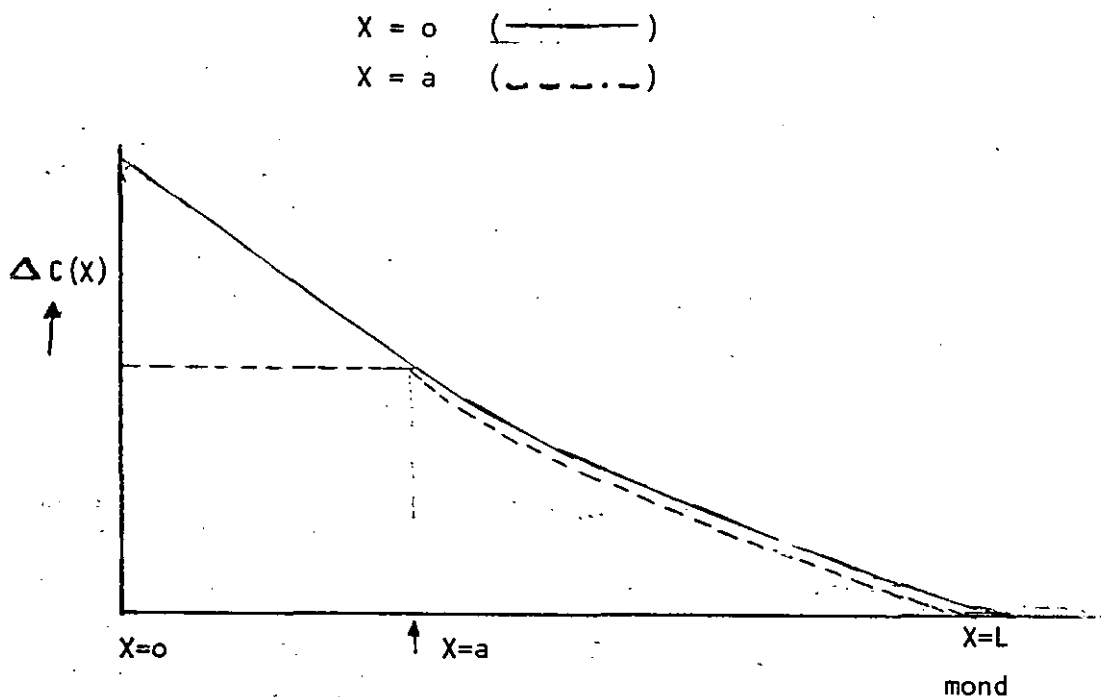
$$\Delta C(X) = \frac{Q \cdot L}{A \cdot D_0} \ln \frac{L}{X} \quad (1)$$

$\Delta C(X)$	= de concentratieverhoging op plaats x	(kg/m ³)
Q	= massastroom van de lozing	(kg/s)
L	= lengte haven	(m)
A	= dwarsdoorsnede haven	(m ²)
D ₀	= diffusiecoëfficiënt in de havenmond	(m ² /s)

Aangenomen is dat de concentratiegradiënt zich enkel voordoet in de lengterichting m.a.w. over de dwarsdoorsnede wordt volledige menging verondersteld. Tevens is aangenomen dat nabij de havenmond geen concentratieverhoging meer merkbaar is.

Het in (1) mathematisch omschreven concentratieverloop geldt voor lozing geheel achterin de haven.

figuur 2: concentratieverloop in de Quarleshaven bij lozing op:



De lozing van Pechiney vindt niet achterin de haven plaats, maar op $X \approx 1500$. Afgevraagd dient te worden hoe de concentratiegradiënt in dit geval zal verlopen.

Welnu, in de stationaire toestand zal, onafhankelijk van de plaats van lozing, Q kg/s de haven verlaten.

Een en ander houdt in dat bij gelijke uitwisselingsdebieten door eb en vloed het concentratieverloop lozingspunt-havenmond vastgelegd is, onafhankelijk van de plaats van lozing, aangezien de mengprocessen niet veranderen.

In het traject lozingspunt-achterin haven is in de stationaire toestand in theorie geen concentratiegradiënt aanwezig (anders is de toestand niet stationair).

In fig. 2 is het concentratieverloop voor beide gevallen aangegeven.

De berekening van de te verwachten concentratieverhogingen als gevolg van de lozing van Pechiney in de Quarleshaven geschiedt m.b.v. formule 1 (zie appendix).

$$\Delta C(X) = \frac{Q \cdot L}{A \cdot D_0} \ln \frac{L}{X}$$

$$Q = 850 \text{ kg/etm. } F^- = 10^{-2} \text{ kg/s } F^-$$

$$L = 4 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$A = B \cdot H = 500 \cdot 12 = 6 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

$$D_0 = K \cdot |u| \cdot h \text{ (lit.9)}$$

K = dimensieloze diffusieconstante ≈ 30

h = diepte in havenmond $\approx 15 \text{ m}$

|u| = gemiddelde stroomsnelheid in havenmond

$$|u| = \frac{\text{opp. gehele haven} \cdot \text{getijverschil}}{\text{natte doorsnee havenmond} \cdot \text{getijduur}} = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 3,8}{500 \cdot 15 \cdot 6,2 \cdot 3600} = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$\rightarrow D_0 = k \cdot |u| \cdot h = 30 \cdot 6,8 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \approx 30 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Delta C(X) = \frac{10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^3 \cdot 30} \ln \frac{4 \cdot 10^{-3}}{X} = 2,22 \cdot 10^{-4} \ln \frac{4 \cdot 10^{-3}}{X} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Ingevuld voor verschillende waarden van X:

X (m)	C(X) (mg/l F ⁻)
≤ 1500	0,22
2000	0,15
2500	0,10
3000	0.064
3500	0.030
4000	0 (per definitie)

Tabel 2: berekende concentratieverhogingen in de Quarleshaven ten gevolge van de fluoridelozing van Pechiney.

Het theoretische afgeleide concentratieverloop is zichtbaar in bijlage 6 en vertoont voor wat de gemiddelde concentratieverhoging aan fluoride betreft goede overeenstemming met de gemeten resultaten (bijlage 3,4 en 5).

4.

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In het voorgaande is aandacht besteed aan de belasting van de Westerschelde met fluoride, in de eerste plaats om een inzicht te hebben in de bijdragen van de verschillende fluoridebronnen aan het totale gehalte aan fluoride in de Westerschelde; in de tweede plaats om na te gaan of dit gehalte uit een oogpunt van toxiciteit aanvaardbaar is.

Een viertal fluoridebronnen zijn onderscheiden:

- toevoer door zeewater;
- toevoer door de Belgische Schelde;
- afvalgipsstortingen verontreinigd met fluoride;
- fluoridelozing Pechiney en Hoechst.

Met behulp van een eendimensionaal diffusiemodel zijn voor de Westerschelde de verhogingen aan fluoride berekend t.g.v. de Schelde-afvoer en de afvalgipslozingen. Via het lineaire verband zoutgehalte-fluoridegehalte is de bijdrage van de Noordzee aan het fluoridegehalte in de Westerschelde eenvoudig te bepalen. Opgeteld leveren deze drie bronnen het berekende gehalte aan fluoride in de Westerschelde.

In het oostelijk gedeelte wordt het fluoridegehalte grotendeels bepaald door de Belgische Schelde; nabij Vlissingen is de invloed van de niet-natuurlijke fluoridebronnen gering. De bijdrage van de gipslozingen is over het algemeen aanmerkelijk kleiner dan die van de Schelde en de Noordzee. De gemeten resultaten wijken qua niveau nogal af van de berekende. In de discussie (hfdst. 5) wordt hierop nader ingegaan.

Enkel locale invloed heeft de fluoridelozing van Pechiney in de Quarleshaven waar concentratieverhogingen van ca. 0,2 mg/l F^- gemeten zijn, ofschoon in de eigenlijke lozingspluim ongetwijfeld hogere concentraties zullen voorkomen. De aan de hand van een eenvoudige diffusievergelijking berekende concentratieverhogingen in de Quarleshaven stemmen goed overeen met de gemeten waarden.

Omtrent de toxiciteit van fluoride in brakke en zoute wateren is betrekkelijk weinig informatie voorhanden.

De weliswaar beperkte hoeveelheid gegevens die ter beschikking staat, wijst er niet op dat voor toxische situaties behoeft te worden gevreesd. Overigens kan opgemerkt worden dat het tolerantieniveau voor wat betreft fluoride voor zoute wateren aanmerkelijk hoger is dan voor zoete wateren. Vermoed wordt dat de samenstelling van zeewater hierbij een rol speelt waardoor complexering van opgelost fluoride zou plaatsvinden.

5. DISCUSSIE

Zoals reeds eerder vermeld, wijken de gemeten concentraties in de Westerschelde nogal af van de berekende waarden. Wellicht vindt in de Westerschelde door de veranderende fysisch-chemische omstandigheden ontsluiting plaats van vanuit de Schelde toegevoerd gebonden fluoride (welke bijdrage niet gemeten wordt), waardoor de totale fluoridevracht van de Schelde te laag is berekend.

De aanwezigheid van mogelijk andere aanzienlijke fluoridebronnen dan in dit rapport vermeld, wordt onwaarschijnlijk geacht. Hooguit kan gewezen worden op de onnauwkeurigheid waarmee de fluoridebelasting vanuit Terneuzen e.o. bekend is, ofschoon fluoridevrachten berekend uit spuigegevens van het kanaal Gent-Terneuzen redelijk overeenstemmen met emissiegegevens van Zuid-Chemie op dit kanaal. Overigens zouden de fluoridebelastingen nabij Terneuzen ter verklaring van het geconstateerde verschil globaal het dubbele moeten bedragen van de in deze nota gehanteerde waarde (gebaseerd op emissiegegevens). Dit wordt niet waarschijnlijk geacht.

Daar het diffusiemodel de invloed van afvoervariaties in de Schelde op het chloridegehalte goed reproduceert, is het onwaarschijnlijk dat het verschil tussen gemeten en berekend fluoridegehalte geheel verklaard kan worden uit onnauwkeurigheden in het model.

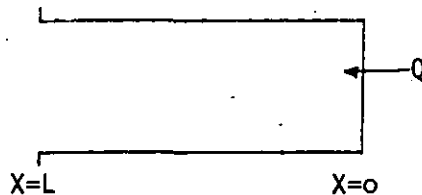
Literatuur

1. Hemens, J. & Warwick R.J.
The effects of fluoride on estuarine organisms
Water Research, vol. 6 (1972), p 1301-1308
2. Sigler, W.F. & Neuhold, J.M.
Fluoride intoxication in fish, a review
Journal of Wildlife Diseases, vol. 8 (1972), p 252-254
3. Oliveira, L.; Antia N.J.; Bisalputra, T
Culture studies on the effects from fluoride pollution on the growth
of marine phytoplankters.
Journal of Fish. Res. Board Can. vol. 35 (1978), p 1500-1504
4. Warner, T.B.
Normal fluoride content of seawater
Deep Sea Research 18 (1971), p 1255-1263
5. Goldberg, E.D.
A guide to marine pollution
Gordon & Breach, New York 1972
6. Rijkswaterstaat
Kwaliteitsonderzoek in de rijkswateren
7. Eulen, J.R.
Invloed op het aquatisch milieu van de lozing van zoet water vanuit het
Zoommeer op de Westerschelde
RIZA, nota nr. 78.016
8. RIZA
Oplosbaarheid fluoride in afvalgips
nota CH 79-02
9. RIZA; Waterloopkundig Laboratorium
Eendimensionale dispersie in de Swinhaven
Speurwerkverslag S 132-III, januari 1971

APPENDIX

EENDIMENSIONALE DIFFUSIEVERGELIJKING VOOR GETIJDEHAVENS

De haven wordt geschematiseerd zoals afgebeeld in onderstaande figuur.



De lozing Q (kg/s) vindt plaats aan het einde van de haven ($X=0$), terwijl de lengte van de haven L (m) is.

Verondersteld wordt dat de lozing zelf geen volume heeft.

De verspreiding van het verontreinigd water vindt plaats tengevolge van turbulente diffusie. De diffusiecoëfficiënt $D(X)$ wordt verondersteld in de haven te voldoen aan:

$$D(X) = D_0 \frac{X}{L} \quad (1)$$

waarbij gedacht wordt aan het feit dat $D(X)$ evenredig is met de lokale stroomsnelheid, terwijl de stroomsnelheid tussen de getijrivier enerzijds en het doodlopende eind anderzijds lineair verloopt. Overigens wordt in de beschrijving van de diffusie over het getij gemiddeld; bovendien wordt de toestand stationair verondersteld. De diffusiecoëfficiënt op $X=L$ wordt D_0 genoemd, terwijl in de rivier de diffusiecoëfficiënt oneindig groot wordt gedacht, d.w.z. alle concentratie wordt onmiddellijk door de rivier afgevoerd.

De diffusievergelijking komt voort uit de eis (voor een stationaire toestand) dat het diffusief transport voor elk doorsnede in de haven Q moet bedragen:

$$-D(X) \frac{dC(X)}{dX} = Q \quad (2)$$

($C(X)$ in kg/m)

Substitutie van vgl. (1) levert:

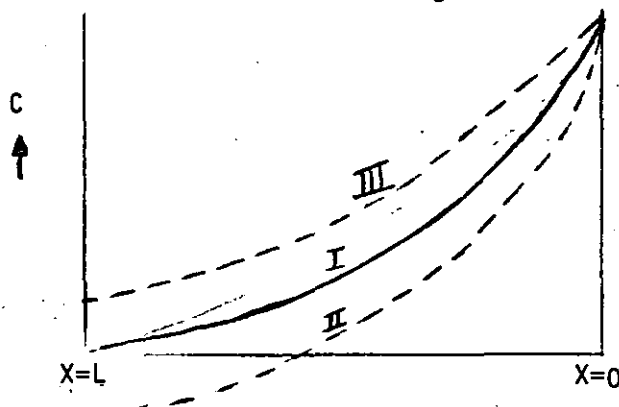
$$\frac{\delta c'(x)}{\delta(x)} = \frac{QL}{x D_0} \quad (3)$$

met de oplossing:

$$c'(x) = -\frac{QL}{D_0} \ln x + \text{const.} \quad (4)$$

Voor het bepalen van de integratieconstante in vgl. (4) is een randvoorwaarde nodig. Aan de rivierzijde geldt op $X=L$ dat daar de concentratie 0 is tengevolge van de snelle rivierafvoer, dit is echter niet zonder meer een randvoorwaarde voor vgl. (4) daar op $X=L$ de diffusiecoëfficiënt discontinu is door de sprong van D_0 naar ∞ .

In onderstaande figuur zijn concentratieprofielen volgens vgl. (4) geschetst voor diverse waarden van de integratieconstanten.



In curve II komt een negatieve concentratie voor in een deel van de haven; dit is onmogelijk zodat deze curve buiten beschouwing gelaten kan worden. Wel kan men echter veronderstellen dat dat deel van de curve met $c > 0$ het concentratieverloop ongeveer zal schetsen in de opbouwphase (kort na $t=0$). Beschouwt men een dergelijke opbouwphase, dan is curve I de eerste curve die voldoet aan het stationaire proces; de afvoer door turbulente diffusie is dan overal gelijk aan de toevoer Q . Dit betekent dan dat verder opbouw van het gehele concentratieprofiel niet plaatsvindt; het is derhalve niet aannemelijk dat curve III zal optreden.

Met de randvoorwaarde $c=0$ op $X=L$ (curve I) volgt dan uit vgl. (4).

$$c'(x) = \frac{QL}{D_0} \ln \frac{x}{L} \quad (\text{kg/m})$$

$$\text{oftewel} \quad c(x) = \frac{QL}{A D_0} \ln \frac{x}{L} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5)$$

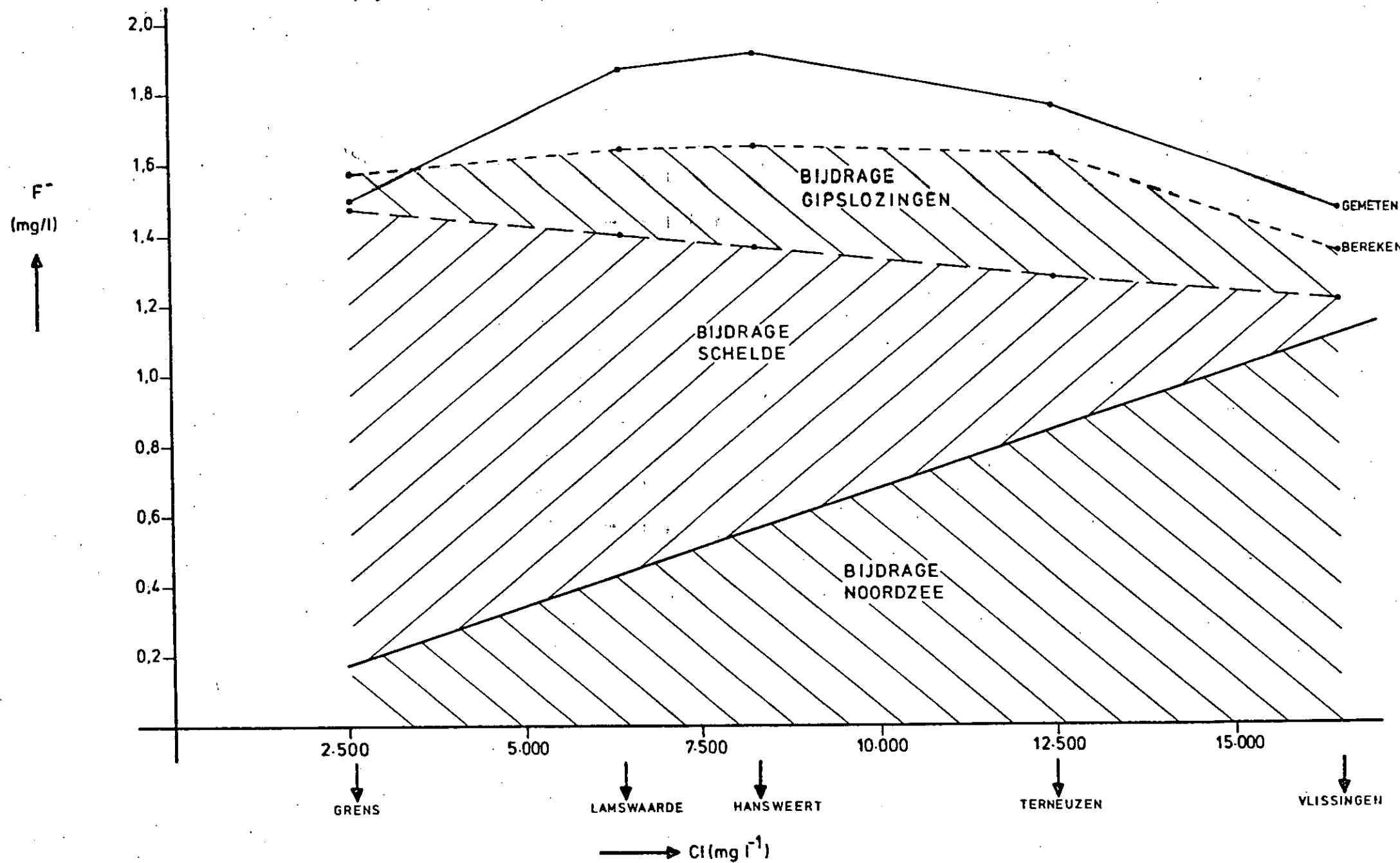
waarin A de dwarsdoorsnede (m^2) weergeeft.

Bron: Waterloopkundig Laboratorium

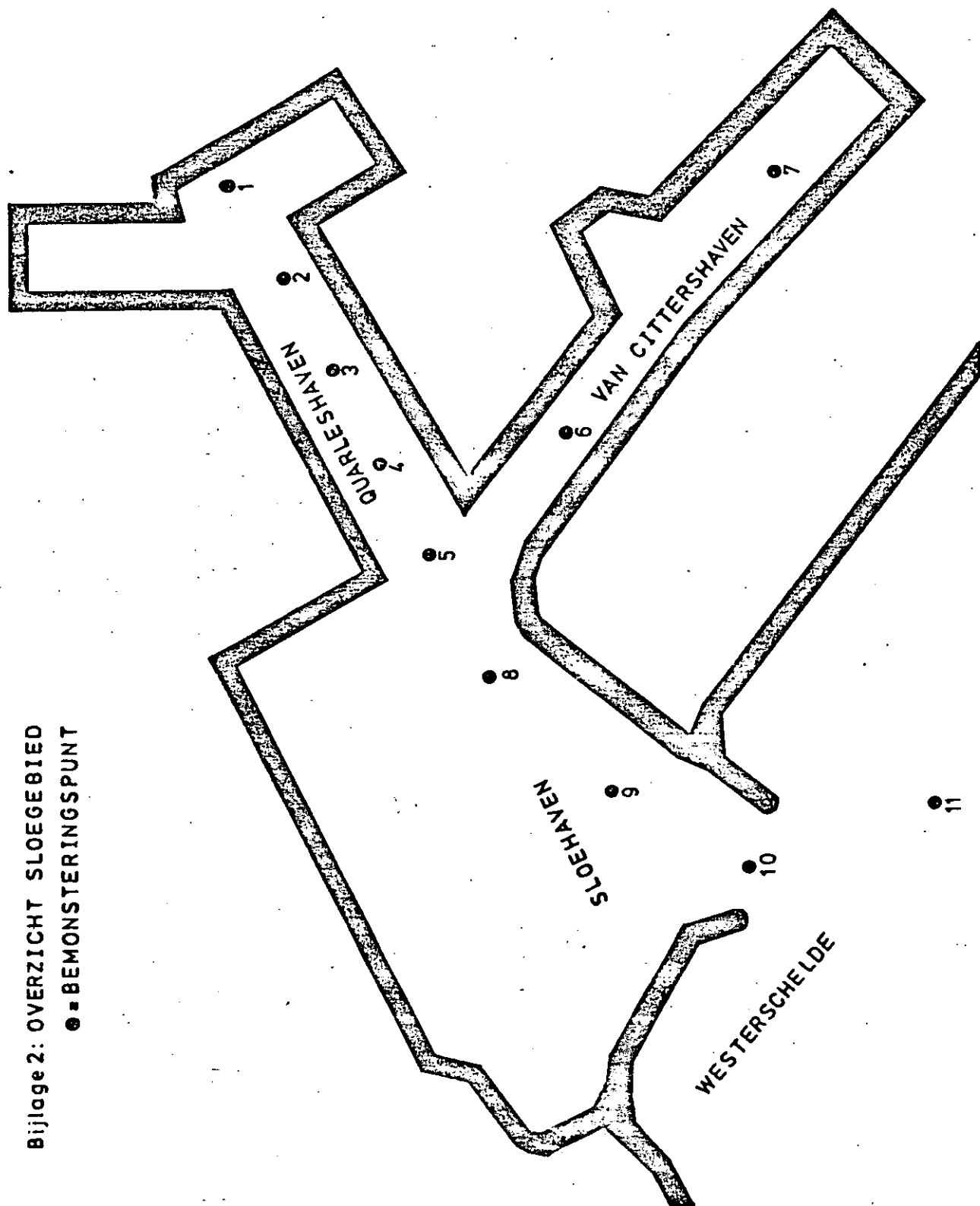
G.A.L. Delvigne, G. Abraham

"Afvalwaterlozing in steekhaven van getijrivier"

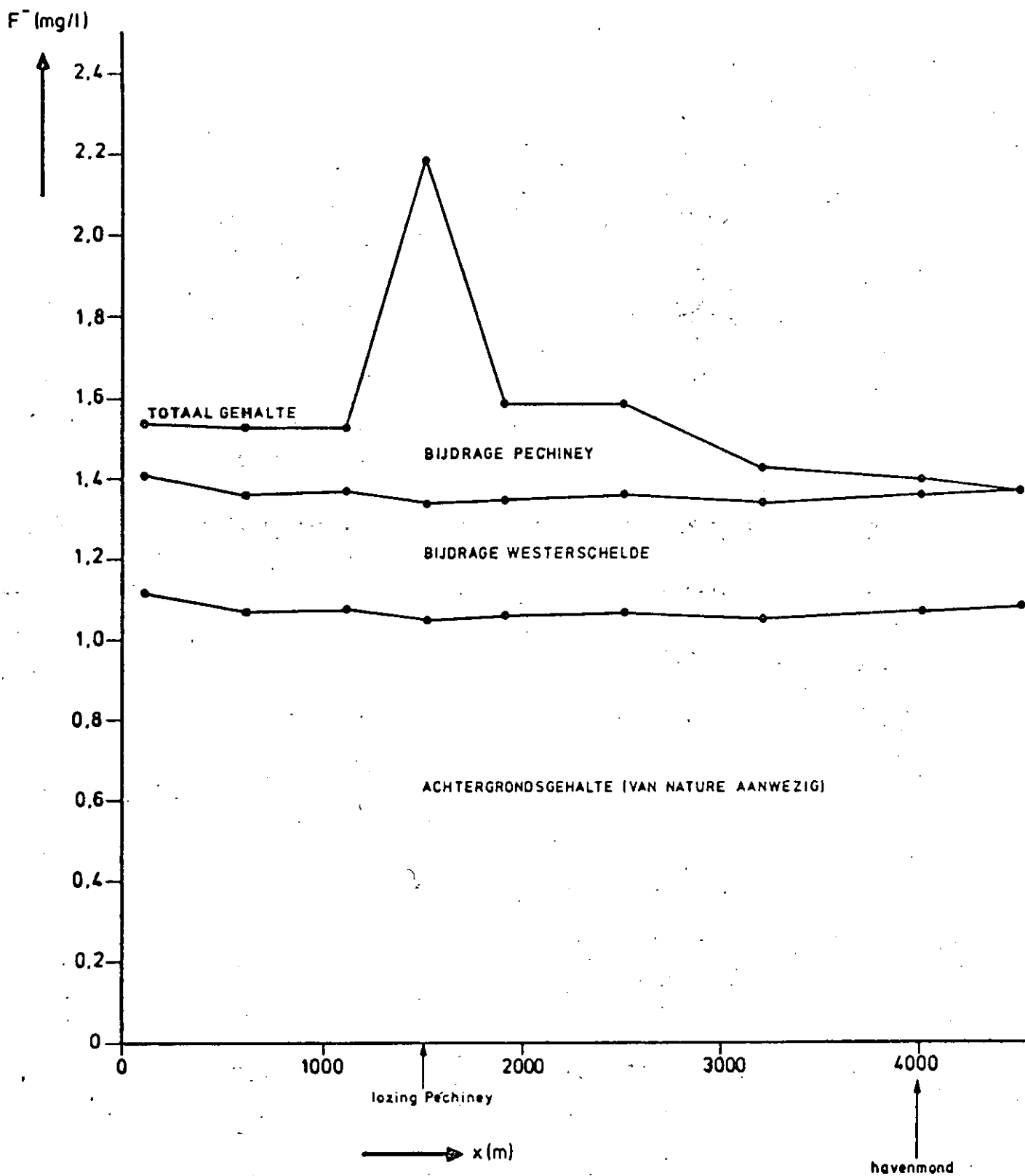
Bijlage 1: GEMETEN EN BEREKEND FLUORIDEGEHALTE IN DE WESTERSCHELDE (PERIODE: JANUARI-JUNI 1979)



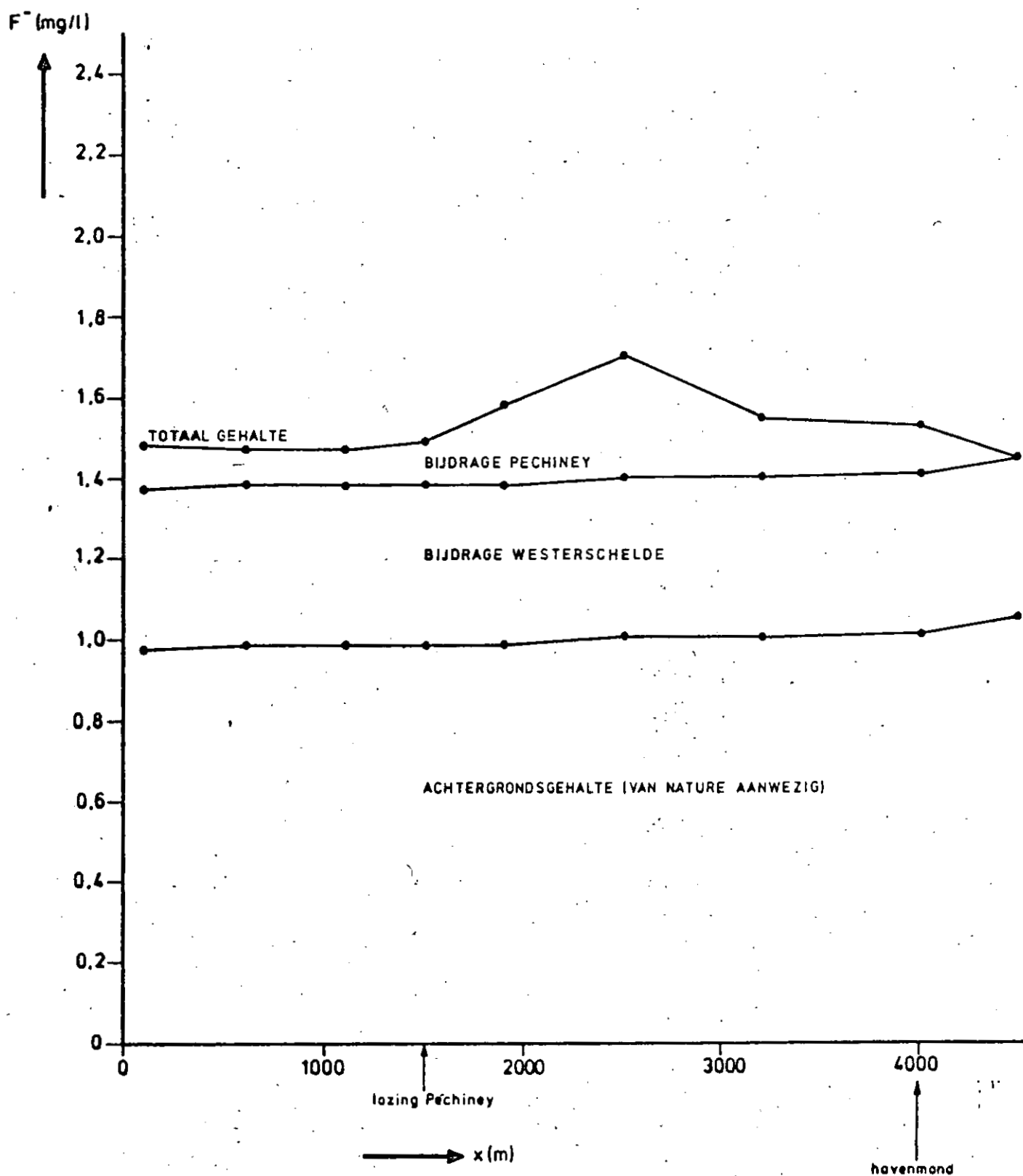
Bijlage 2: OVERZICHT SLOEGEBIED
● = BEMONSTERINGSPUNT



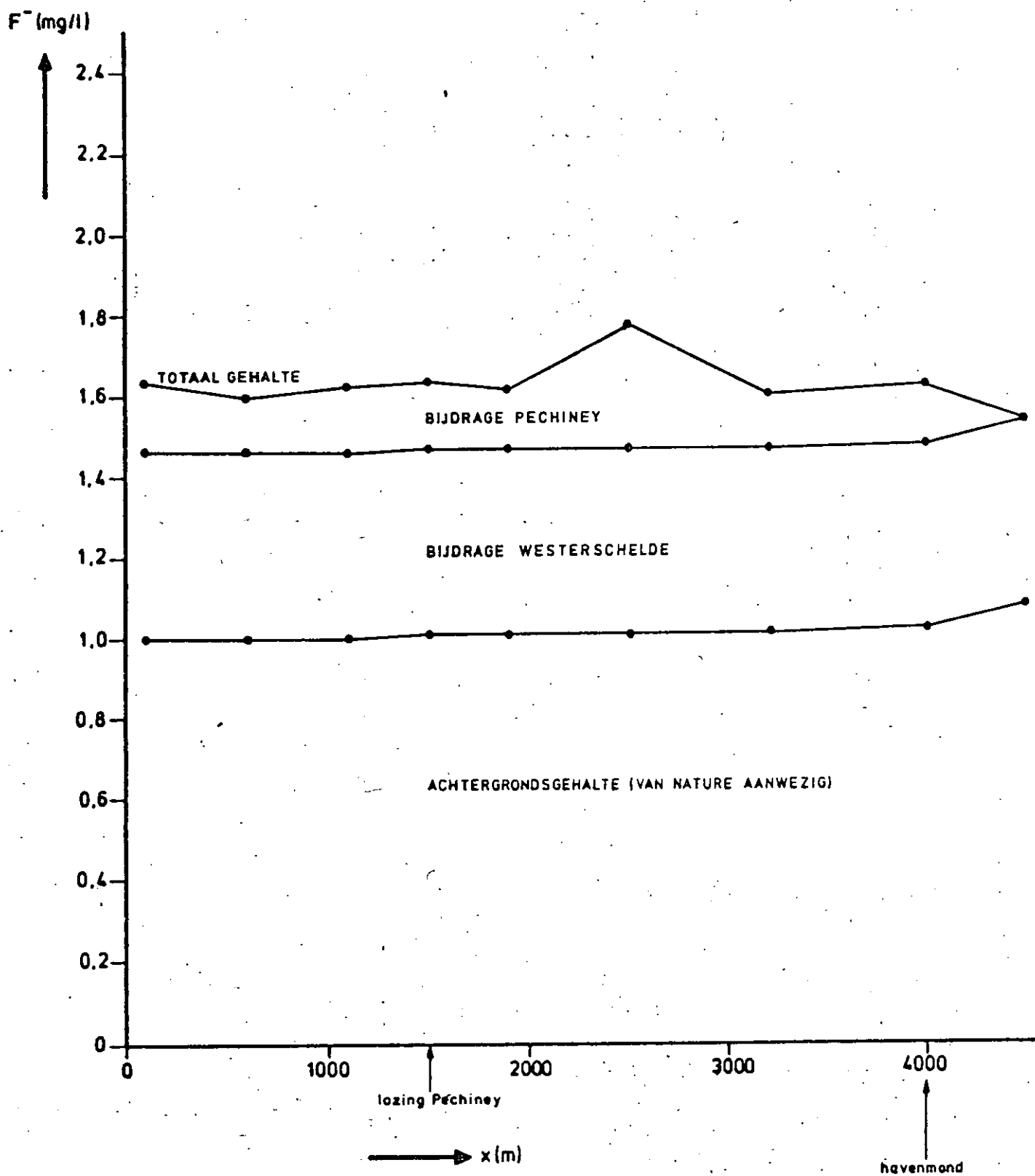
**Bijlage 3: OPBOUW FLUORIDEGEHALTE IN DE QUARLESHAVEN
(OPKOMEND TIJ)**



Bijlage 4: OPBOUW FLUORIDEGEHALTE IN DE QUARLESHAVEN
(AFGAAND TIJ)



Bijlage 5: OPBOUW FLUORIDEGEHALTE IN DE QUARLESHAVEN
(GEM. HOOG- EN LAAG WATER)



Bijlage 6: BEREKENDE CONCENTRATIEVERHOOGINGEN AAN FLUORIDE (ΔF^-) IN DE QUARLESHAVEN ALS GEVOLG VAN EEN FLUORIDELOZING VAN 10^{-2} kg/s TER PLAATSE VAN $X=1500$ m

