

32/446(368) 2e ex.

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

**Transport van water, bromide en nitraat in een zware
kleigrond in grasland**

**W. Hamminga
K. Oostindie
J.J.B. Bronswijk**

Rapport 368



DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1995

- 5 JAN. 1996

isn 912622

REFERAAT

Hamminga, W., K. Oostindie en J.J.B. Bronswijk, 1995. *Transport van water, bromide en nitraat in een zware kleigrond in grasland*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 368; 65 blz.; 18 fig.; 11 tab, 1 aanh.

In een zware kleigrond met sterke zwel en krimp is het transport van water en opgeloste stoffen onderzocht door een bromidetracer te spuiten op een gedraineerd graslandperceel. In de drainafvoer en het grondwater werden de bromide- en de nitraatconcentratie bepaald. Bromide en nitraat blijken overeenkomstige transportmechanismen te hebben. Er vindt preferent transport plaats via scheuren en mesoporiën, waardoor bromide en nitraat versneld uitspoelen naar het grondwater en de drainafvoer. Het transport in de bodemaggregaten gaat veel langzamer. Door de verschillen in transportsnelheid ontstaan grote concentratieverschillen in de tijd en de ruimte. Via drainafvoer komen aanzienlijke hoeveelheden nitraat in het oppervlaktewater terecht.

Trefwoorden: drainafvoer, grondwater, krimpscheur, preferente stroming, tracer

ISSN 0927-4499

©1995 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: 0317-474200; telefax: 0317-424812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	13
2 Ligging, bodemopbouw en bodemfysische karakteristieken van het proefveld	15
3 Indeling en inrichting van het proefveld	17
4 Tracertoediening en bemesting	19
5 Bemonstering van de grond, het grondwater en de drainafvoer	21
6 Meteogegevens en grondwaterstand	25
6.1 Neerslag en verdamping	25
6.2 Verloop grondwaterstand	26
6.3 Drainafvoer	27
7 Volumieke massa van de droge grond	29
7.1 De volumieke massa van de bemonsterde lagen	29
7.2 De variatie van de volumieke massa bij de bemonsteringen	29
8 Temporele en ruimtelijke variabiliteit van het vochtgehalte van de grond	35
9 Bromide in de grond, het grondwater en de drainafvoer	39
9.1 De teruggevonden hoeveelheid bromide in het profiel	39
9.2 Bromidetransport door de bodem	39
9.3 Variatie van de bromideconcentratie	40
9.4 Bromide en nitraat in het grondwater	42
9.5 Bromide en nitraat in de drainafvoer	43
10 Conclusies	45
Literatuur	47

Tabellen

1 De bodemopbouw van het proefveld bij Bruchem	16
2 Loting van de bemonsterde veldjes per bemonsteringsdatum	18
3 Gemiddelde volumieke massa van de grond ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij 6 bemonsteringen	31
4 Standaardafwijking van de volumieke massa van de grond ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	32

5 Variatiecoëfficiënt van de volumieke massa van de grond per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	32
6 Standaardafwijking van het bodemvochtgehalte (vol.%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	36
7 Variatiecoëfficiënt van het bodemvochtgehalte (vol.%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	37
8 De hoeveelheid bromide in de laag van 0-95 cm - mv. op de verschillende bemonsteringstijdstippen.	39
9 Gemiddelde bromideconcentratie in de grond ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	41
10 Standaardafwijking van de bromideconcentratie in de grond ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	41
11 Variatiecoëfficiënt van de bromideconcentratie in de grond (%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen	42

Figuren

1 Ligging van het proefveld bij Bruchem	15
2 Opstelling voor automatische drainafvoermeting, drainbemonstering en neerslagregistratie. De installatie werd gevoed met behulp van zonneënergie	17
3 Indeling van het proefveld. De positie van de drain, de grondwaterstands-buizen, de bemonsteringsstroken en de bemonsteringsplekken staan weergegeven	18
4 Toediening van de bromidetracer met behulp van een spuitboom	19
5 N-bemesting van het proefveld	19
6 Bemonstering van de grond met de grondkolomcilinder. Met een kraan werden de kolommen in de grond geduwd en er weer uitgetrokken.	21
7 Bemonstering van de grondkolom	22
8 Neerslag en verdamping per dag op het proefveld. De neerslag is deels afkomstig van de proeflocatie en deels van weerstation Zaltbommel. De verdampingsgegevens zijn ontleend aan weerstation Herwijnen.	25
9 Maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met het langjarig gemiddelde (1961-1990). Voor de neerslag zijn gegevens gebruikt van weerstation Zaltbommel en voor de verdamping van weerstation Herwijnen.	26
10 Gemeten grondwaterstandsverloop midden tussen twee drains	27
11 Cumulatieve drainafvoer (a) en drainafvoer per dag (b) vanaf de dag van tracertoediening tot 442 dagen na tracertoediening	28
12 Volumieke massa van het profiel bij de verschillende bemonsteringen. Naast de individuele waarden is ook het gemiddelde volumieke massa-profiel per bemonstering aangegeven	30
13 Volumieke massa-profielen van de zes bemonsteringen	31
14 Gemiddelde vochtprofielen van zes bemonsteringen met de waarden van de afzonderlijke monsters	33
15 Veldgemiddelde vochtprofielen op zes bemonsteringstijdstippen	36
16 De gemiddelde bromideprofielen op zes bemonsteringstijdstippen met de individuele waarden van de monsters	38

- 17 Gemiddelde bromideprofielen bij vijf bemonsteringen. Elk profiel geeft het gemiddelde van 15 grondkolommen, uitgezonderd dag 46 (9 kolommen) 40
- 18 Neerslag en potentiële verdamping (A), bromide in het grondwater met minimum en maximum gemeten waarden (B), nitraat in het grondwater (C), bromide in de drainafvoer (D), en nitraat in de drainafvoer (E) gedurende de periode van onderzoek. De bromide- en nitraatconcentraties in het grondwater zijn een gemiddelde van 20 grondwaterstandsbuizen 44

Aanhangsel

- Vochtgehalte, dichtheid en bromideconcentraties van de individuele kolommen bij 6 bemonsteringen 49

Woord vooraf

In de jaren 1991-1993 is door DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO), onderzoek gedaan naar het transport van water en stoffen door een gescheurde kleigrond naar grond- en oppervlaktewater. Dit onderzoek is uitgevoerd om kennis van stoffentransport op veldschaal te vergroten en computer-modellen voor water en stoffentransport te ontwikkelen of te verbeteren. Dit onderzoek werd financieel ondersteund door het Speerpuntprogramma Bodemonderzoek (project C3-14).

Het experiment is uitgevoerd in een perceel nabij Bruchem (gemeente Kerkwijk) wat in beheer is van Stichting Regionaal Onderzoeks Centrum (ROC) 'de Vlierd'. Hierbij willen we de stichting en het personeel bedanken voor het kosteloos beschikbaar stellen van het proefveld en het gebruik van de bedrijfsmachines. De hulp van de medewerkers van de proefboerderij, G. Bootsma, T.J. van Dieren, E.J. Eikelboom en L.C. van Ginkel, was onmisbaar bij de uitvoering van de proef. Speciale dank zijn we verschuldigd aan regionaal onderzoeker R. van Daalen en proefveldmedewerker A.J. Wierds voor hun adviezen en inzet gedurende het onderzoek.

Samenvatting

In een sterk gescheurde kleigrond in grasland bij Bruchem is het transport van bromide en nitraat onderzocht. Op 26 september 1991 werd een bromidetracer gespoten op een gedraineerd proefveld. De afstand tussen de onderlinge drains bedroeg 15 meter. Het proefveld had een afmeting van 15 bij 30 meter met in het midden één drain. Direct na de tracertoediening werd de eerste grondkolombemonstering uitgevoerd. Aan het einde van de proef waren totaal 6 bemonsteringen van de onverzadigde zone, tot een diepte van maximaal 1 m, uitgevoerd. Aan de grondmonsters werden dichtheid, vochtgehalte en bromideconcentratie bepaald. Wekelijks werden monsters genomen van het grondwater uit 20 buizen die verspreid in het proefveld waren geplaatst. De drainafvoer werd automatisch bemonsterd. In de watermonsters werden de concentraties van bromide en nitraat vastgesteld.

Voordat de bespuiting plaatsvond was er een droge periode, waardoor de grond sterk was uitgedroogd en veel scheuren vertoonde. Direct na de tracertoediening viel er neerslag en nam het scheurvolumen af door dichtzwellen van de grond. In het vroege voorjaar bleek de grond, als gevolg van neerslagoverschot, volledig gezwollen. In tijden van neerslagtekort scheurde de grond weer sterk. De dichtheid en het vochtgehalte waren tijdens de proef dan ook aan sterke veranderingen onderhevig. Deze zorgden er uiteindelijk voor dat bromide en nitraat zeer onregelmatig door de bodem werden getransporteerd.

Gemiddeld werd 12 g bromide per m² toegediend met een standaardafwijking van 0,78 g.m⁻². Bij de eerste bemonstering direct na de toediening werd 95% van de bromide teruggevonden. De variatie van de bromideconcentratie in de laag van 0-5 cm - mv. was hierbij groot door de aanwezigheid van de macroporiën. Zes dagen na de tracer-toediening werd tot op een diepte van 95 cm 104% van de toegediende bromide teruggevonden. Er was toen 40 mm neerslag gevallen en de bromide is al tot op een diepte van gemiddeld 55 cm in het profiel getransporteerd. Na 46 dagen werd nog 84% van de toegediende bromide teruggevonden en was een deel van de bromide via drainafvoer en in de ondergrond verdwenen. Bij de laatste bemonstering na 572 dagen bevatten de bemonsterde lagen nog 24% van de toegediende bromide en bedroeg de cumulatieve neerslag 1225 mm. Het resterende bromide bevindt zich dan nog voornamelijk in de bovenste lagen van het profiel. Lateraal transport door de matrix en snelle uitdroging van de bovengrond gevolgd door scheurvorming zorgen ervoor dat uitspoeling van het resterende bromide zeer langzaam gaat en alleen plaatsvindt aan de randen van de bodemaggregaten. Het transport van bromide door deze kleigrond blijkt te beschrijven door drie processen, nl. snel preferent transport via de macroporiën, langzamere preferente stroming door de mesoporiën en transport via de bodemaggregaten met lange verblijftijden.

In kleigronden vindt versneld transport plaats van nutriënten via de macroporiën en minder snel via de mesoporiën. De uitspoeling van bromide gaat op dezelfde wijze als van nitraat. Een verhoogde uitspoeling van bromide gaat gepaard met een verhoogde uitspoeling van nitraat. Er vindt onregelmatig transport plaats van bromide en nitraat door de bodem doordat een deel van de stoffen getransporteerd wordt via de scheuren,

een ander deel via de mesoporiën en de rest via de bodemaggregaten. Door de preferente stroming van stoffen via de scheuren en kleinere poriën worden grondwater en oppervlaktewater regelmatig bedreigd omdat telkens na een regenbui hoge concentraties stoffen hierin terecht komen. De EU-drinkwaternorm voor de $\text{NO}_3\text{-N}$ concentratie wordt hierbij regelmatig ruimschoots overschreden.

1 Inleiding

Gronden die de eigenschap hebben om te zwellen en te krimpen, zoals klei- en veengronden, komen veel voor. Via scheuren, die ontstaan onder droge omstandigheden, worden meststoffen en bestrijdingsmiddelen sneller naar de ondergrond en het grondwater getransporteerd dan zou worden verwacht op grond van de wet van Darcy. Transport van stoffen via de scheuren, waarbij de bodemmatrix niet of nauwelijks betrokken is, is een vorm van preferente stroming. Het voorkomen van preferente stroming in gronden heeft nogal wat consequenties. De beschikbaarheid van water voor planten is minder omdat een deel van het water direct naar de ondergrond stroomt, buiten het bereik van de wortels. Het toedienen van meststoffen en/of bestrijdingsmiddelen op het moment dat scheuren aanwezig zijn heeft tot gevolg dat er ongewenst verlies optreedt en dat de ondergrond en het grondwater worden verontreinigd. Als het een gedraineerde grond betreft wordt ook het oppervlaktewater bedreigd door een versnelde uitspoeling via preferente stroming in de scheuren, naar de drains en vervolgens naar het oppervlaktewater.

Het doel van het hier beschreven onderzoek is om het transport van stoffen in een gescheurde kleigrond nauwkeurig na te gaan. Het gedrag van water en opgeloste stoffen werd bestudeerd in grasland bij Bruchem. Hiertoe werd een bromidetracer gespoten op een proefveld in een droge periode. Doordat het hele bodemprofiel sterk was uitgedroogd, waren er veel grote scheuren aanwezig. Het verloop in de tijd van dichtheid, vochtgehalte en bromideconcentratie in de bodem is gemeten. Daarnaast werden ook de bromide- en de nitraatconcentraties in grondwater en drainafvoer gemeten.

Het proefveld wordt beschreven in hoofdstuk 2. De proefopzet en het toedienen van de tracer worden achtereenvolgens besproken in hoofdstuk 3 en 4. De technieken voor het bemonsteren van grond- en watermonsters staat in hoofdstuk 5. Het verloop van de grondwaterstand en de neerslag en verdamping worden gegeven in hoofdstuk 6. In dit zelfde hoofdstuk komt ook de drainafvoermeting aan de orde. In de hoofdstukken 7, 8 en 9 worden de veranderingen in dichtheid, vochtgehalte en bromideconcentratie tijdens de proef bediscussieerd. Het bromide- en nitraatgehalte van de watermonsters komt in hoofdstuk 9 aan bod. Uiteindelijk worden in hoofdstuk 10 conclusies getrokken uit de resultaten van dit onderzoek.

2 Ligging, bodemopbouw en bodemfysische karakteristieken van het proefveld

Het proefveld ligt bij Bruchem en is in gebruik als weiland en hooiland (fig.1). Het maakt deel uit van proefboerderij 'de Vlierd' van de Stichting ROC de Vlierd. Op dit inmiddels opgeheven bedrijf werden proeven gedaan ten behoeve van de melkveehouderij. Het ligt in een gebied met komkleigronden, gevormd door holocene rivierafzettingen in de Formatie van Tiel en Gorcum. Voor de ontwatering van de percelen zijn drainage-systemen aangelegd. Het slootwaterpeil wordt via onderbemaling beheerd.

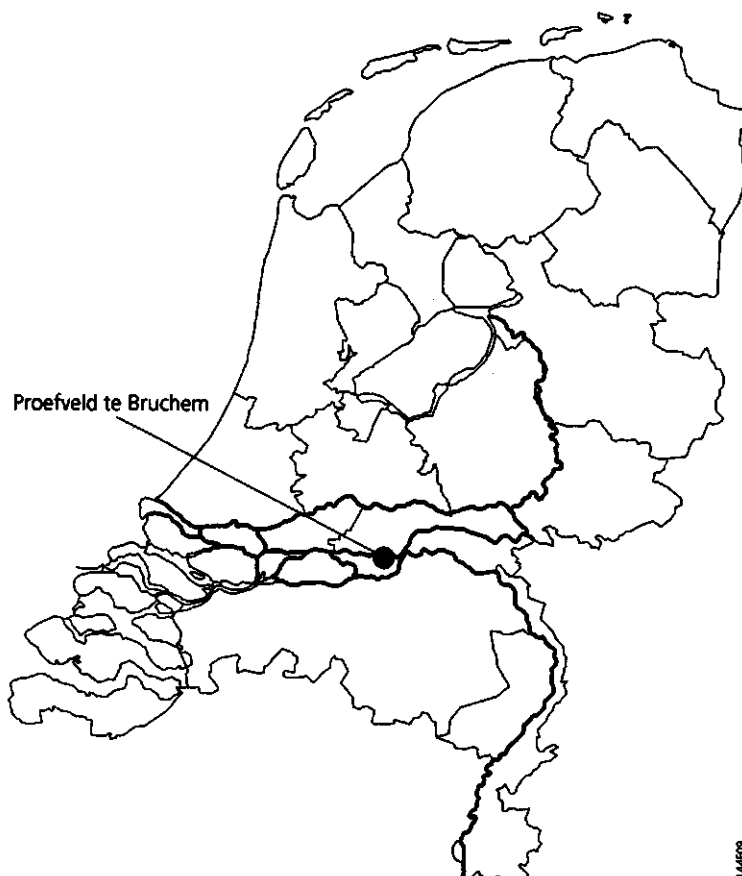


Fig. 1 Ligging van het proefveld bij Bruchem

De bovengrond van het profiel bestaat uit een kalkloze, zeer zware (58% lutum) 18 cm dikke, humusrijke laag. Deze gaat over in roestige, zeer humeuze kalkloze zeer zware klei (56% lutum) tot 30 cm diepte. De laag 30-58 cm bestaat uit roestige kalkloze zeer zware klei (60% lutum) en is matig humeus. Tussen 58 en 85 cm diepte is de grond iets lichter door een grotere siltfractie. Dieper in het profiel komt tot 120 cm matig humusarme, kalkloze, grijze, zeer zware klei voor die zwak roestig is. Het proefveld is gedraineerd op een diepte van 95 cm. Door deze verbeterde waterbeheersing wordt aan deze grond een Gt III* toegekend, met de GHG van boven 40 cm en de GLG tussen

80 en 120 cm. Op de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, wordt deze komkleigrond aangeduid als kalkloze poldervaaggrond; zware klei, profielverloop 4; Gt III* en gecodeerd met Rn44C (Bodemkaart van Nederland herziene uitgave, 1984). Het bodemprofiel voor dit perceel is beschreven in tabel 1. De waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van dit profiel laten zich het beste beschrijven in de 'Staringreeks' door de relaties behorend bij de bouwstenen B12 en O13 voor respectievelijk de bovengrond en ondergrond (Wösten e.a., 1994).

Tabel 1 De bodemopbouw van het proefveld bij Bruchem

Horizont	Diepte (cm - mv.)	Omschrijving bodemmateriaal
A11	0- 18	donker grijsbruine (10YR4/1,5), humusrijke (10% org. stof), kalkloze, zeer zware klei (58% lutum)
A12	18- 30	donker grijze (10YR4/1), zeer humeuze (8% org. stof), kalkloze, zwak roestige, zeer zware klei (56% lutum)
C11g	30- 58	grijsbruine (10YR5/1), matig humusarme (4% org. stof), kalkloze, roestige, zeer zware klei (60% lutum)
C12g	58- 85	grijsbruine (10YR5/1), matig humusarme (4% org. stof), kalkloze, sterk roestige, zeer zware klei (52% lutum)
C13g	85- 120	lichtgrijze (2,5YR6/1), zeer humusarme (2% org. stof), kalkloze, zeer zware klei (51% lutum)

3 Indeling en inrichting van het proefveld

Om de transportprocessen in zowel de onverzadigde zone als in het bovenste grondwater te kunnen bestuderen is gebruik gemaakt van een gedraineerd perceel. De drainafstand is 15 meter en boven het vanggebied van een drain midden tussen twee andere drains werd het proefveld aangelegd. Het veld was 30 m lang en 15 m breed. In het veld stonden 20 grondwaterstandsbuizen met een inwendige diameter van 2,8 cm en een filterdiepte tussen 1,2 m en 1,4 m. De neerslag werd gedurende het onderzoek automatisch geregistreerd met een tipping bucket regenmeter (Aerodynamic Raingauge).

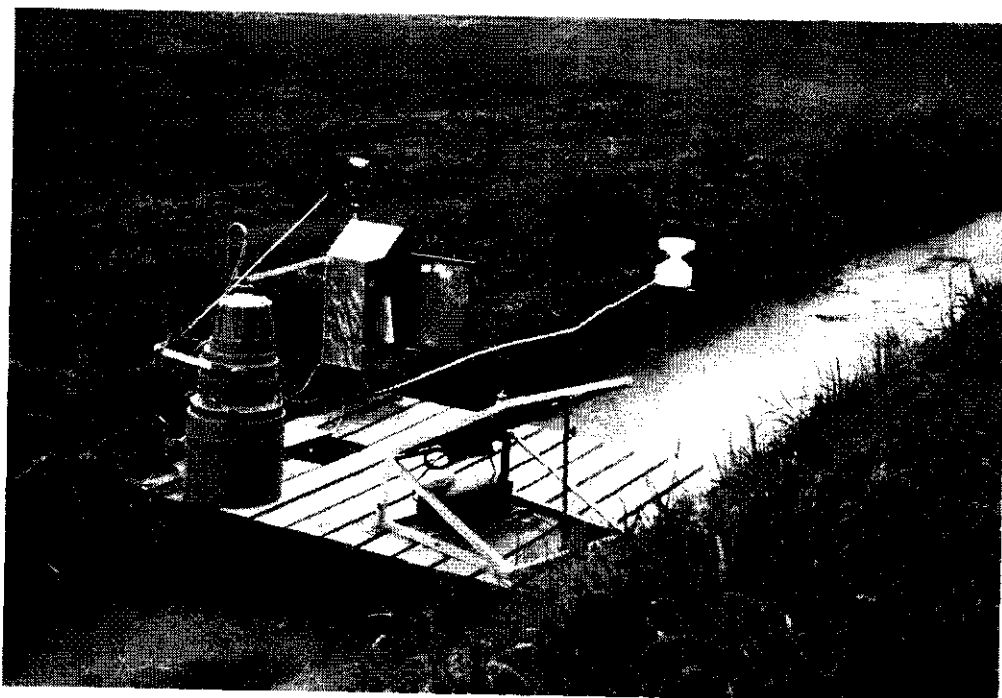


Fig. 2 Opstelling voor automatische drainafvoermeting, drainbemonstering en neerslagregistratie. De installatie werd gevoed met behulp van zonneënergie

De drainafvoer uit de centrale drain werd gedurende het onderzoek automatisch gemeten met een Pulsmag V magnetisch-inductieve flowmeter (Endress+Hauser) met een binnendiameter van 32 mm. De afvoer werd bemonsterd met een 1011 automatic sampler (Epic) (fig. 2). Het proefveld werd opgedeeld in drie stroken (A, B, C) evenwijdig aan de drain en vijf banen ($1 \frac{1}{5}$ m) loodrecht op de drain. Elk van de aldus verkregen 15 stroken ($1A \frac{1}{5} 5C$) werd verder opgedeeld in 10 veldjes van 1 m bij 1,65 m. De tracer werd toegediend over spuitbanen loodrecht op de drainrichting (fig. 3). De spuitbaanranden dienden tijdens de proef als looppaden. In totaal zijn zes grondkolombemonsteringen uitgevoerd, waarbij per bemonstering 15 grondkolommen zijn genomen. Per bemonstering werd hiervoor in elk van de 15 stroken 1 veldje geloot, zodanig dat de veldjes gelijkmatig waren verdeeld t.o.v. de drain (tabel 2). Zoals in tabel 2 is te zien, werden bij de derde bemonstering slechts negen van de vijftien plekken bemonsterd. Door hevige regenval moest deze bemonstering voortijdig worden gestaakt.

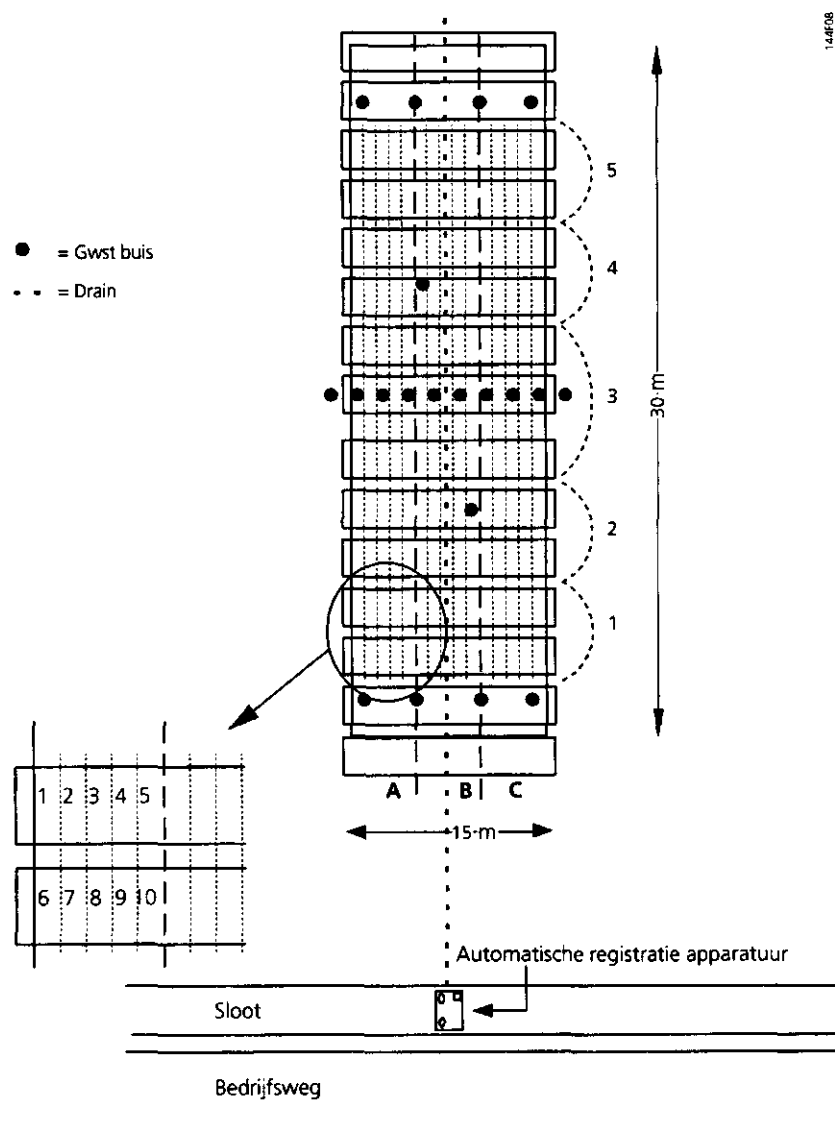


Fig. 3 Indeling van het proefveld. De positie van de drain, de grondwaterstandsbuizen, de bemonsteringsstroken en de bemonsteringsplekken staan weergegeven

Tabel 2 Loting van de bemonsterde veldjes per bemonsteringsdatum

Datum	Dag	Plaatscode														
		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C
26-09-91	0	8	2	2	5	5	10	9	4	8	1	3	4	8	6	6
02-10-91	6	2	9	10	3	8	8	4	1	2	5	5	6	6	2	4
11-11-91	46							6	7	9	3	9	8	5	1	10
22-04-92	209	4	5	8	1	7	9	2	6	6	8	4	2	10	3	5
26-08-92	335	3	10	9	9	9	6	10	8	5	6	1	7	7	7	3
20-04-93	572	1	7	4	8	3	5	5	9	3	9	6	1	2	5	2

4 Tracertoediening en bemesting

Op 26 september 1991 werd bromide op het veld gespreid met behulp van een veldspuit met 6 Teejet spuitdoppen op een vaste hoogte van 25 cm (Porskamp en Sonneveld, 1983). Met een constante rijsnelheid werd 0,05 mm bromideoplossing met een concentratie van 360 g KBr.l^{-1} toegediend (fig. 4). Gemiddeld werd hierdoor een hoeveelheid van 12 g Br.m^{-2} op het proefveld gespoten. De standaardafwijking bedroeg hierbij 0.78 g Br.m^{-2} (Bronswijk e.a., 1995a).

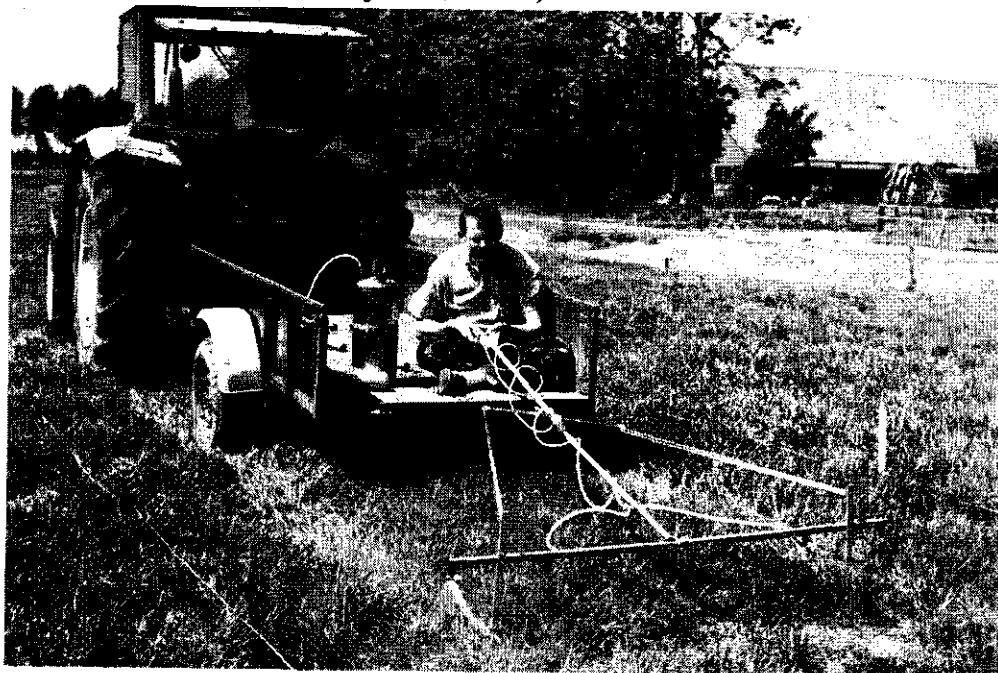


Fig. 4 Toediening van de bromidetracer met behulp van een spuitboom

Tijdens de proef werd het proefveld bemest met kunstmest, runderdrijfmest en door beweiding. De N-giften zijn samengevat in fig. 5.

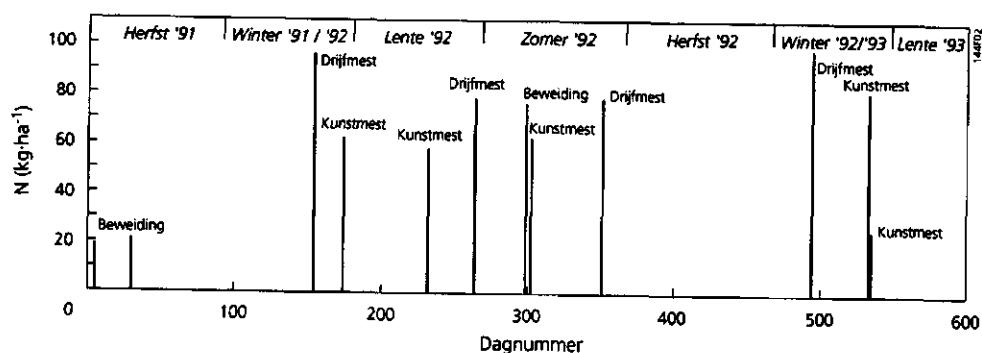


Fig. 5 N-bemesting van het proefveld

5 Bemonstering van de grond, het grondwater en de drainafvoer

De onverzadigde zone werd op zes tijdstippen bemonsterd met een grondkolomcilinder (Domhof en Van Soesbergen, 1982; Hendrickx e.a, 1991; Ritsema e.a., 1991) die met behulp van een kraan werd ingeduwd en uitgetrokken (fig. 6). Door gebruik te maken van een kraan worden de grondkolomcilinders geleidelijker in de grond geduwd en vindt er minder verstoring van de grond plaats door droge of natte lagen dan bij het gebruik van een pneumatische hamer.



Fig. 6 Bemonstering van de grond met de grondkolomcilinder. Met een kraan werden de kolommen in de grond geduwd en er weer uitgetrokken.

De cilinder waarmee de grondkolommen werden genomen, heeft een totale lengte van 1,2 m en een inwendige diameter van 0,09 m. Na het uittrekken van de cilinder werd deze horizontaal op een werktafel gelegd, de afneembare zijde gedemonteerd en de grondkolom opgedeeld in stukken van 0,05 m (fig. 7). Op deze manier werden per grondkolomcilinder maximaal 20 monsters genomen. Niet alle grondkolommen hadden een lengte van 1 m. Door een hoge grondwaterstand (o.a. bij de derde bemonstering) en door het eigen gewicht van de grondkolom, viel soms een deel van de kolom uit de cilinder. In het veld werden de grondmonsters in plastic zakken gedaan en afgesloten van de buitenlucht. De gemiddelde massa van de zakken was vooraf bepaald. In het laboratorium werden de monsters gewogen en daarna gedurende 5 dagen bij 70° C gedroogd. Na drogen werden de monsters nogmaals gewogen en vochtgehalte en dichtheid berekend. Aan de gedroogde monsters werd vervolgens 400 ml water toegevoegd, waarna ze gedurende een uur intensief werden geschud. Na het bezinken van de vaste

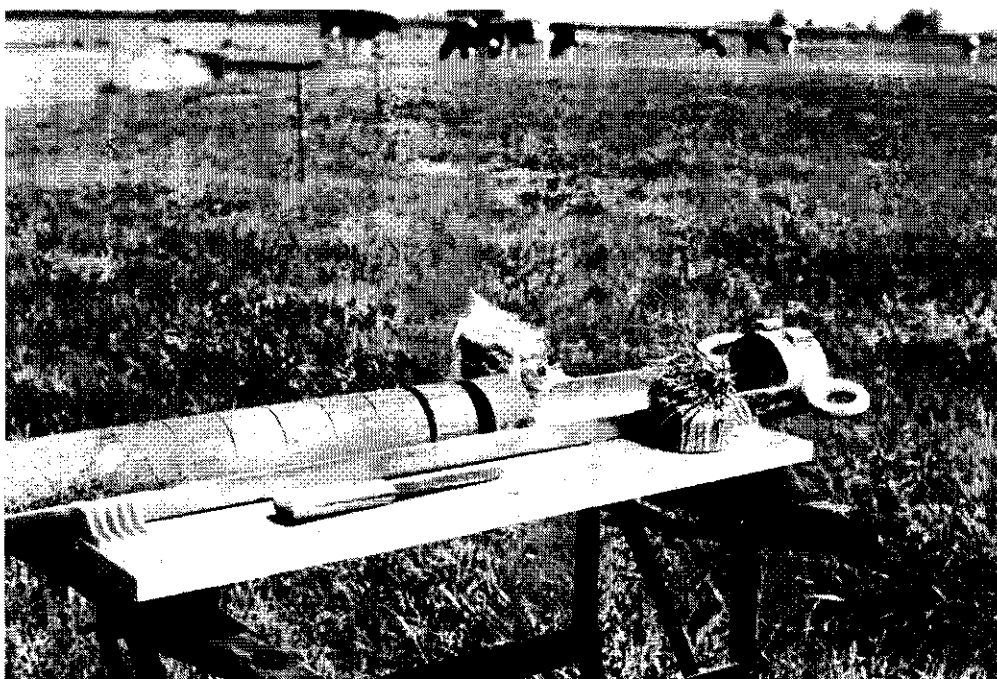


Fig. 7 Bemonstering van de grondkolom

deeltjes werd uit de waterfase een monsters genomen en hierin met behulp van HPLC de bromideconcentratie bepaald.

De grondwaterstandsbuizen werden geplaatst met het filter op een diepte tussen 1,2 m en 1,4 m. De grondwaterstand werd in alle buizen bij elk veldbezoek handmatig gemeten. Regelmatig werden grondwatermonsters genomen om het bromidetransport in het bovenste deel van de verzadigde zone te kunnen volgen. In de monsters werd ook het nitraatgehalte gemeten om eveneens het transport naar het grondwater na te gaan. Het grondwater werd bemonsterd volgens de 'zuigmethode' (Van den Toorn, 1981), door het aanbrengen van onderdruk in een vacuumbestendig vat.

In perioden met veel neerslag vond er afvoer van water plaats via de drains. Het automatische drainafvoer monsternamapparaat was zo geprogrammeerd dat dan op geregelde tijdstippen, om de vier uur, watermonsters uit de drain werden genomen en verzameld in een carrousel. In deze flessencarrousel, met maximaal 24 (meng)monsters, werden de monsters verzameld en vervolgens ook op bromide- en nitraatgehalte gemeten, om het transport naar het oppervlaktewater te bepalen.

Voor de meting van zowel bromide als nitraat werd gebruik gemaakt van de HPLC (High Performance Liquid Chromatography)-methode. Het watermonster werd hierbij geïnjecteerd en met behulp van een hogedrukpomp via een vloeibare fase (eluens) door een ionenscheidende (Ionosper-A) kolom geperst. Het eluens bestond uit een fosfaatbuffer bestaande uit 0,1 M K_2SO_4 en 0,02 M KH_2PO_4 (Harmsen, 1982; 1986; Hamminga en Bouter, 1990; Hamminga en Harmsen, in prep.). Nitraat is in een groot deel van de

monsters bepaald middels de flow-injectie methode. Deze methode geeft dezelfde meetresultaten als de HPLC-methode, maar neemt veel minder tijd in beslag.

6 Meteogegevens en grondwaterstand

6.1 Neerslag en verdamping

De neerslag werd automatisch gemeten met een tipping bucket regenmeter (Aerodynamic Raingauge) die iedere 0,2 mm neerslag een puls voor de counter in de data-logger afgeeft. Tevens werd gebruik gemaakt van de regenstrookjes van een bij de proefboerderij opgestelde regenmeter. Voor een deel van de waarnemingsperiode zijn neerslaggegevens gebruikt van het nabij gelegen weerstation Zaltbommel, omdat er problemen waren met de energievoorziening van de meetopstelling. Bij de vergelijking van de eigen metingen met de waarnemingen van het meteorologisch station van het KNMI in Zaltbommel, bleken de gegevens goed met elkaar overeen te komen. In fig. 8 staat van de periode 26 september 1991 (dag 0) tot en met 20 april 1993 (dag 572) de neerslag weergegeven zoals gemeten op het proefveld en bij het weerstation Zaltbommel (KNMI, 1992; 1993). In dezelfde fig. is ook de referentiegewasverdamping volgens Makking weergegeven zoals gemeten bij het weerstation Herwijnen (KNMI, 1991; 1992; 1993).

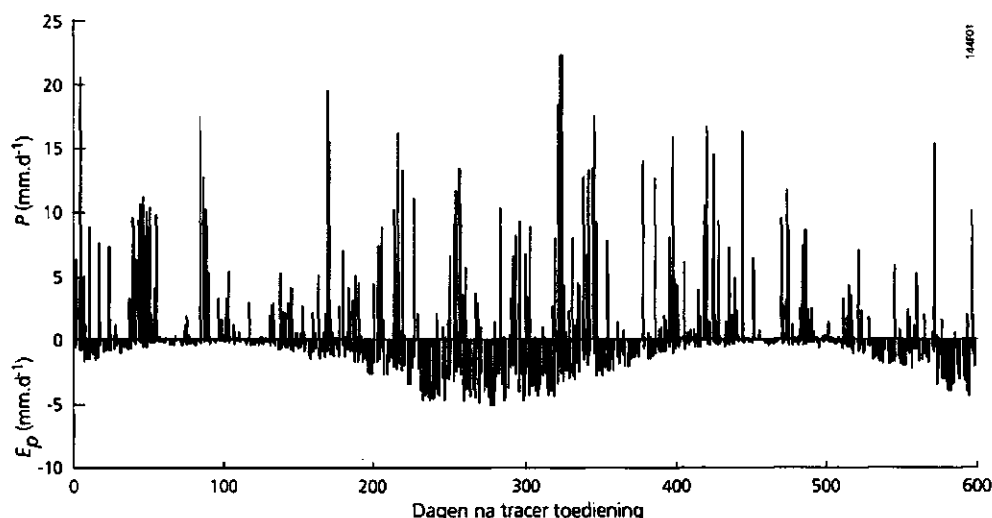


Fig. 8 Neerslag en verdamping per dag op het proefveld. De neerslag is deels afkomstig van de proeflocatie en deels van weerstation Zaltbommel. De verdampingsgegevens zijn ontleend aan weerstation Herwijnen.

Het maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort gedurende de onderzoeksperiode is vergeleken met het langjarig gemiddelde van de periode 1961-1990 (fig. 9), waarbij ook gebruik is gemaakt van de meetgegevens van de weerstations Zaltbommel en Herwijnen. In vergelijking met het langjarig gemiddelde waren de maanden september en oktober in 1991 droog. In november 1991 was er sprake van een groot neerslagoverschot en december 1991 komt overeen met het langjarig gemiddelde. Januari, februari en de maanden mei tot en met juli 1992 waren droger dan gemiddeld en de maanden maart, april en augustus tot en met november 1992 weer natter. December

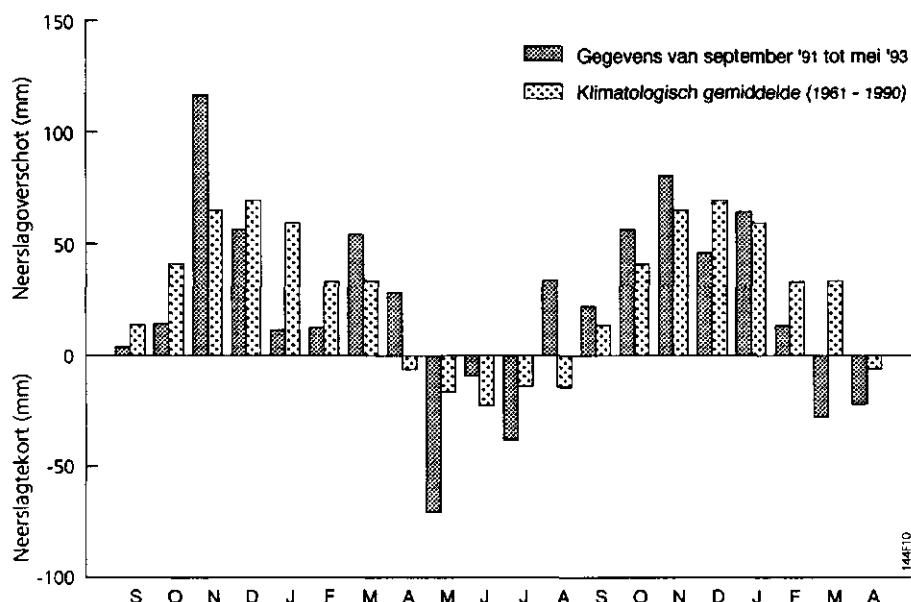


Fig. 9 Maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met het langjarig gemiddelde (1961-1990). Voor de neerslag zijn gegevens gebruikt van weerstation Zalthommel en voor de verdamping van weerstation Herwijnen.

1992 en februari tot en met april 1993 hadden minder neerslag dan gemiddeld en januari 1993 was nagenoeg gelijk aan het gemiddelde. Tijdens de periode van onderzoek is in vergelijking met het langjarig gemiddelde 104,5 mm neerslag minder gevallen.

6.2 Verloop grondwaterstand

Het verloop van de grondwaterstand is in fig. 10 weergegeven met meetgegevens van de buis die midden tussen twee drains was geplaatst. In natte perioden staat hierin het grondwater hoger dan in de grondwaterstandsbuizen die dicht bij de drain staan. In droge perioden waarin het grondwater lager staat dan de drainagediepte is er geen verschil in het waterniveau tussen de buizen onderling. Tijdens de veldproef varieerde de gemeten grondwaterstand tussen de drains van 69,5 tot 127 cm - mv. Dit neemt niet weg dat het grondwaterniveau wel lager of hoger geweest kan zijn, omdat het grondwaterniveau niet continu werd geregistreerd. De hoogste grondwaterstand in de twintig buizen was 69,5 cm - mv. op 8 november 1991. De laagste stand werd direkt bij het begin van de proef gemeten en was 127 cm - mv. op 29 augustus 1991.

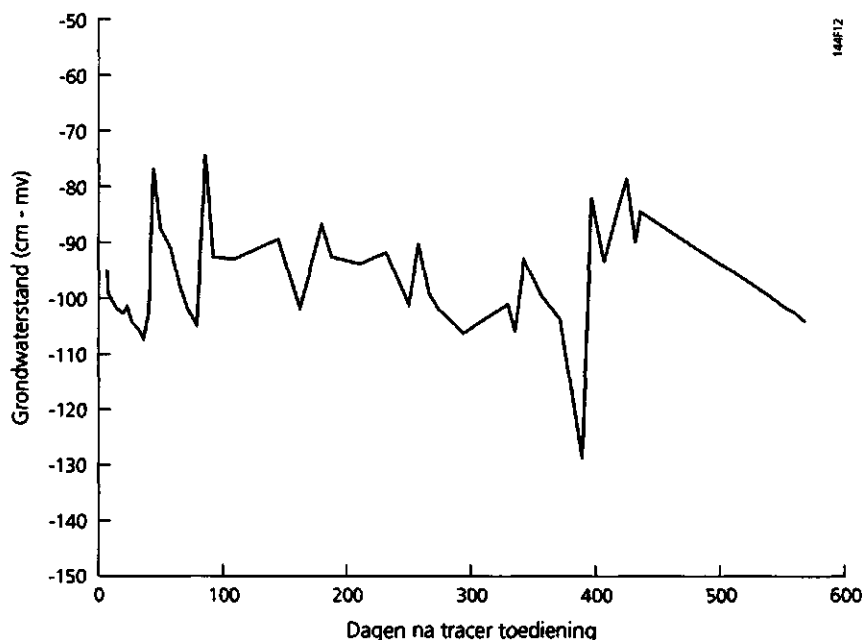


Fig. 10 *Gemeten grondwaterstandsverloop midden tussen twee drains*

6.3 Drainafvoer

De Pulsmag V drainafvoermeter werd in een zogenaamde 'zwanehals' constructie ingebouwd, zodat de meetbuis gevuld bleef met water. Bij stroming van water langs de meetelektroden in de meetbuis worden pulsen afgegeven aan de datalogger, die vervolgens de drainafvoer berekend.

Er was geen continue registratie van de drainafvoer gedurende de onderzoeksperiode door problemen met de energievoorziening en de overdracht van de meetgegevens ter plaatse. De gegevens van de cumulatieve drainafvoer en de afvoer op dagbasis staan weergegeven in respectievelijk fig. 11 a en b. De drainafvoer is hierin uitgezet tot aan 442 dagen na de tracertoediening.

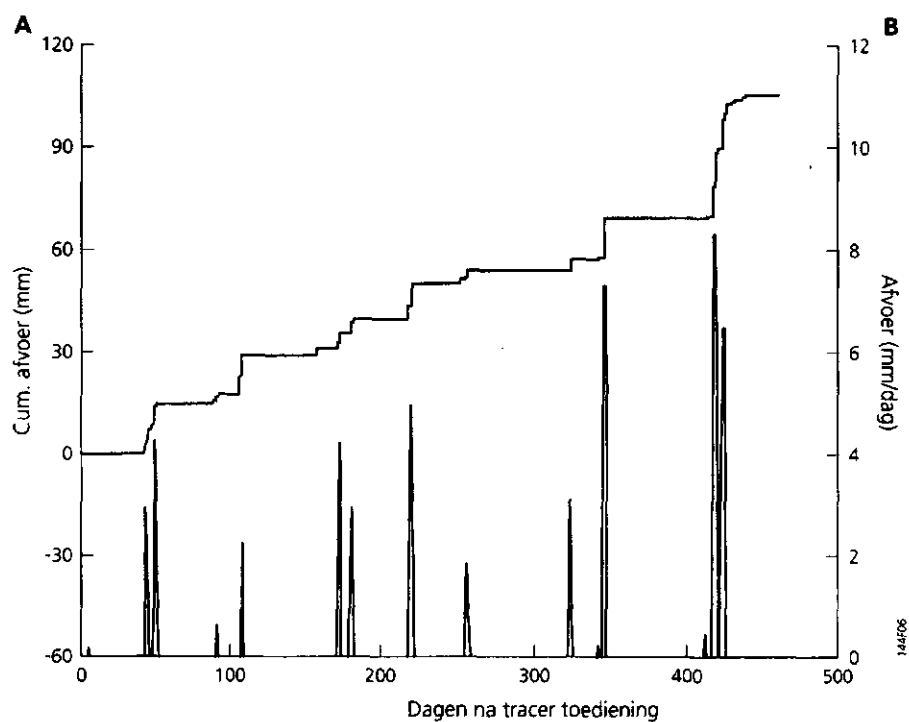


Fig. 11 Cumulatieve drainafvoer (a) en drainafvoer per dag (b) vanaf de dag van tracertoediening tot 442 dagen na tracertoediening

7 Volumieke massa van de droge grond

7.1 De volumieke massa van de bemonsterde lagen

De volumieke massa in kleigronden kan sterk variëren door de zwel- en krimp eigenschappen van het bodemmateriaal. In volledig gezwollen toestand is de volumieke massa per volume grond het kleinst. Naarmate de grond minder water bevat treedt er krimp op en zal de grond, als gevolg van deze krimp gaan scheuren. Door de krimpscheuren kan een sneller transport van water en opgeloste stoffen naar de ondergrond plaats vinden. Door de dynamiek van de zwel- en krimpprocessen is het niet mogelijk om één representatief volumieke massa-profiel te geven voor deze grondsoort. In fig. 13 is daarom voor alle zes bemonsteringen een gemiddeld volumieke massa-profiel gegeven, met daaromheen de gemeten waarden. In de bijlagen staan de volumieke massa-profielen van alle kolommen afgebeeld. De volumieke massa in de bovenste 5 -10 cm van het profiel is bij alle bemonsteringen het laagst door een hoger organisch-stofgehalte en de aanwezigheid van graswortels. De wortels worden aangetroffen tot op ongeveer 80 cm diepte, maar hun aantal per oppervlakte-eenheid neemt met de diepte af. Het sterkst beworteld is de bovenste 30 cm van het profiel. Dit zorgt voor een relatief lagere volumieke massa in dit gedeelte van het profiel ten opzichte van de diepere lagen. Dieper is de volumieke massa meer afhankelijk van de vochttoestand van het profiel en neemt af als er meer water aanwezig is en neemt toe als het vochtgehalte lager is.

7.2 De variatie van de volumieke massa bij de bemonsteringen

Door de zwel- en krimpeigenschappen van de onderzochte zware klei treden er grote verschillen in volumieke massa op tussen de individuele monsters onderling zoals in fig. 12 te zien is. Ook de tijd van het jaar waarin de bemonstering werd uitgevoerd en de vochttoestand van de bodem hebben invloed op de gemeten volumieke massa. De gemiddelde volumieke massa per laag van 5 cm bij de zes bemonsteringen staan in tabel 3. De laagste volumieke massa bedroeg $0,95 \text{ kg.dm}^{-3}$ en werd gemeten bij de eerste bemonstering op 5-10 cm - mv. De hoogst gemeten volumieke massa van $1,52 \text{ kg.dm}^{-3}$ werd vastgesteld bij de vierde bemonstering in de laag tussen 90 en 95 cm diepte. Fig. 13 geeft de gemiddelde volumieke massa-profielen weer van de zes bemonsteringen. In vergelijking met de andere bemonsteringen is de volumieke massa bij de eerste bemonstering tot een diepte van 50 cm relatief laag. Dit is ook het geval bij de derde bemonstering in de laag dieper dan 50 cm. Daarentegen is de volumieke massa bij de vijfde bemonstering tot op een diepte van 85 cm hoger dan bij de andere bemonsteringen. Het grootste verschil in volumieke massa van $0,38 \text{ kg.dm}^{-3}$ werd gevonden tussen 5 en 10 cm diepte. Het kleinste verschil is $0,05 \text{ kg.dm}^{-3}$ in de laag 55-60 cm - mv. Het bodemprofiel is op grond van verschillen in dichtheid in de tijd per dieptelaag in drieën te delen. Een laag tussen 5 en 45 cm diepte met volumieke massaverschillen $>0,10 \text{ kg.dm}^{-3}$, een tussenlaag van 45 tot 70 cm diepte met verschillen

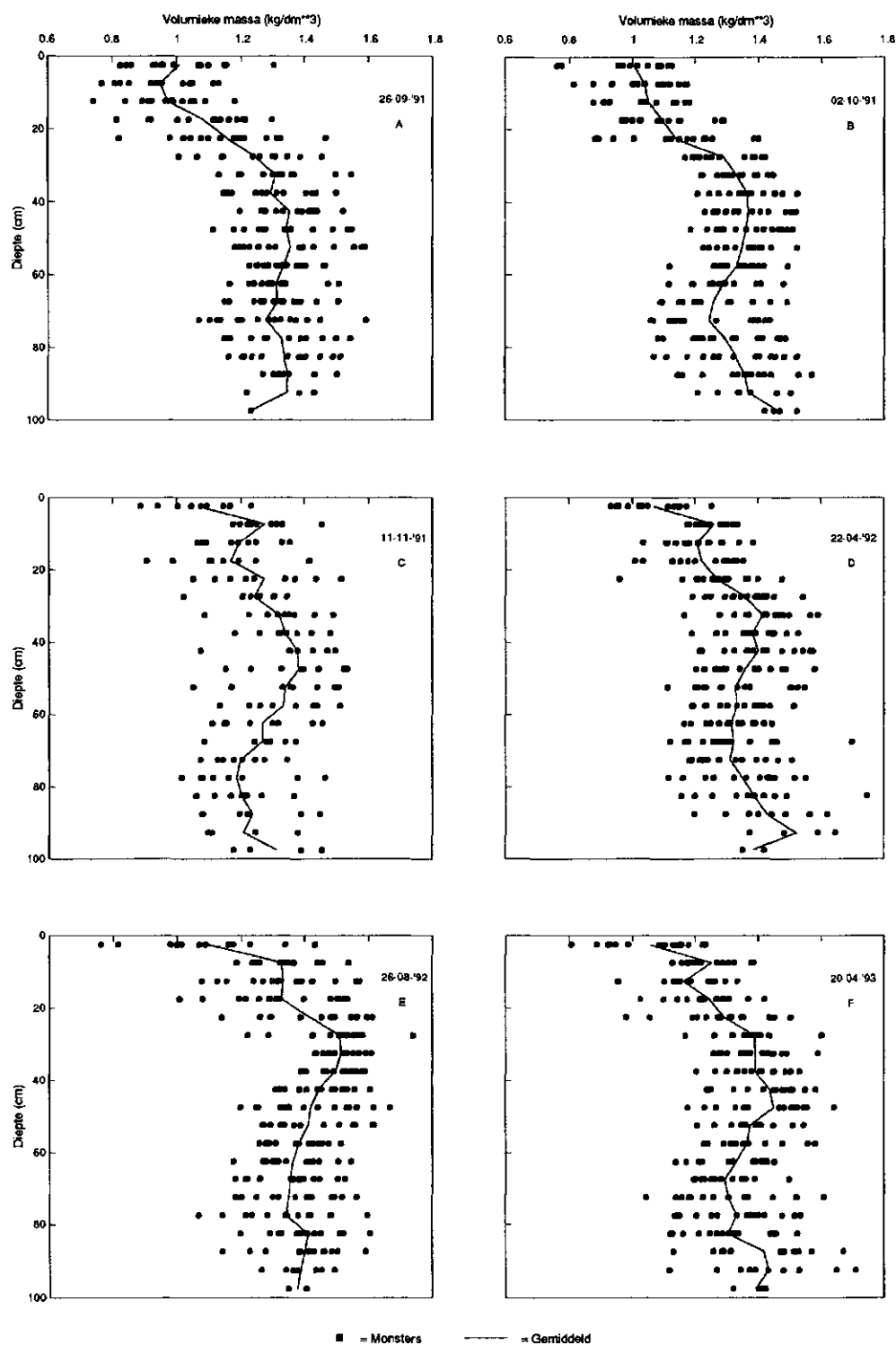


Fig. 12 Volumieke massa van het profiel bij de verschillende bemonsteringen. Naast de individuele waarden is ook het gemiddelde volumieke massa-profiel per bemonstering aangegeven

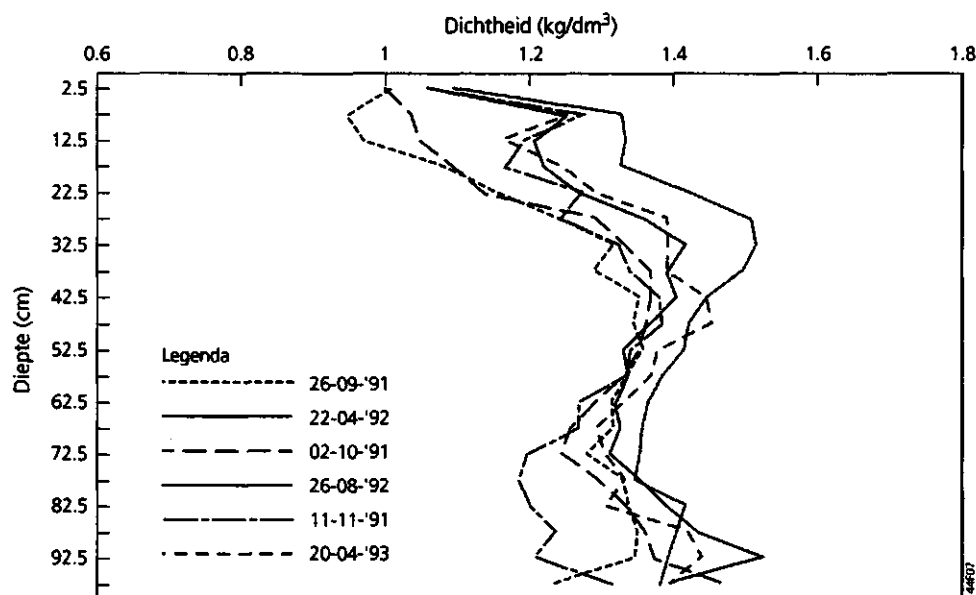


Fig. 13 Volumieke massa-profielen van de zes bemonsteringen

$<0,10 \text{ kg.dm}^{-3}$ en de laag tussen 70 en 95 cm eveneens met verschillen $>0,10 \text{ kg.dm}^{-3}$. De toplaag van 5 cm, met daarin veel wortels en ander organisch materiaal, heeft in de tijd 'slechts' een maximaal verschil van $0,10 \text{ kg.dm}^{-3}$. De standaardafwijking varieert bij de bemonsteringen tussen $0,05 \text{ kg.dm}^{-3}$ en $0,17 \text{ kg.dm}^{-3}$ (tabel 4). Opvallend is hierbij

Tabel 3 Gemiddelde volumieke massa van de grond ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij 6 bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	1,01	1,00	1,07	1,07	1,10	1,06
5- 10	0,95	1,04	1,27	1,26	1,33	1,25
10- 15	0,97	1,05	1,19	1,21	1,33	1,16
15- 20	1,08	1,10	1,17	1,22	1,33	1,25
20- 25	1,16	1,14	1,27	1,27	1,42	1,29
25- 30	1,24	1,29	1,24	1,36	1,51	1,39
30- 35	1,31	1,33	1,32	1,42	1,52	1,39
35- 40	1,29	1,37	1,34	1,38	1,50	1,39
40- 45	1,35	1,37	1,38	1,40	1,45	1,44
45- 50	1,34	1,36	1,38	1,36	1,42	1,45
50- 55	1,36	1,35	1,34	1,33	1,41	1,38
55- 60	1,34	1,33	1,33	1,33	1,38	1,37
60- 65	1,31	1,29	1,27	1,32	1,36	1,33
65- 70	1,32	1,26	1,27	1,32	1,35	1,29
70- 75	1,28	1,24	1,20	1,31	1,35	1,30
75- 80	1,33	1,29	1,19	1,35	1,34	1,33
80- 85	1,34	1,33	1,20	1,39	1,41	1,31
85- 90	1,35	1,36	1,23	1,43	1,40	1,42
90- 95	1,35	1,37	1,21	1,52	1,39	1,44
95- 100	1,23	1,47	1,31	1,39	1,38	1,39

Tabel 4 *Standaardafwijking van de volumieke massa van de grond ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen*

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	0,13	0,11	0,10	0,09	0,17	0,13
5- 10	0,10	0,10	0,08	0,05	0,09	0,08
10- 15	0,10	0,10	0,10	0,09	0,14	0,10
15- 20	0,13	0,11	0,16	0,11	0,16	0,10
20- 25	0,15	0,15	0,14	0,12	0,14	0,14
25- 30	0,14	0,09	0,09	0,09	0,12	0,11
30- 35	0,11	0,07	0,11	0,11	0,05	0,09
35- 40	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	0,09
40- 45	0,08	0,10	0,12	0,11	0,09	0,10
45- 50	0,13	0,10	0,12	0,11	0,14	0,16
50- 55	0,14	0,08	0,15	0,13	0,12	0,10
55- 60	0,07	0,08	0,12	0,09	0,08	0,10
60- 65	0,08	0,09	0,12	0,08	0,10	0,10
65- 70	0,09	0,12	0,08	0,14	0,10	0,08
70- 75	0,14	0,14	0,08	0,10	0,13	0,16
75- 80	0,13	0,13	0,15	0,13	0,14	0,13
80- 85	0,11	0,14	0,09	0,14	0,10	0,12
85- 90	0,08	0,12	0,14	0,12	0,11	0,15
90- 95	0,09	0,10	0,12	0,10	0,07	0,16
95- 100		0,04	0,11	0,04	0,03	0,04

Tabel 5 *Variatiecoëfficiënt van de volumieke massa van de grond per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen*

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	12,7	10,6	9,7	8,7	15,5	12,1
5- 10	10,9	9,7	6,4	4,3	7,0	6,8
10- 15	10,4	9,6	8,4	7,5	10,8	9,0
15- 20	11,8	9,8	14,0	8,9	12,0	8,3
20- 25	13,3	13,5	11,4	9,1	10,1	10,9
25- 30	11,3	7,2	7,1	6,6	8,0	7,7
30- 35	8,3	5,0	8,4	7,5	3,6	6,5
35- 40	8,4	6,3	6,1	6,0	4,3	6,5
40- 45	6,2	7,3	8,7	8,1	5,9	6,9
45- 50	10,0	7,4	8,7	8,3	9,8	11,1
50- 55	10,3	5,8	11,1	10,0	8,7	7,4
55- 60	5,3	6,4	8,9	7,0	5,7	7,4
60- 65	6,4	6,9	9,6	6,4	7,2	7,5
65- 70	7,0	9,5	6,3	10,7	7,6	6,3
70- 75	11,0	11,3	6,9	7,7	9,5	12,2
75- 80	9,7	9,9	12,5	9,6	10,4	9,8
80- 85	8,6	10,7	7,3	10,2	7,1	9,2
85- 90	5,7	9,0	11,5	8,6	8,2	10,4
90- 95	6,9	7,0	9,6	6,8	5,1	11,1
95- 100		2,7	8,7	2,5	2,2	2,7

dat de grootste standaardafwijkingen niet per sé voorkomen in die lagen waar de meeste zwel en krimp zou worden verwacht, nl. de boven en de ondergrond maar ook voorkomt in de tussenlaag (zie ook fig.12). De variatiecoëfficiënt varieert tussen 2,2 en 15,5% (tabel 5). De boven- en de onderlaag hebben meestal de hoogste waarden.

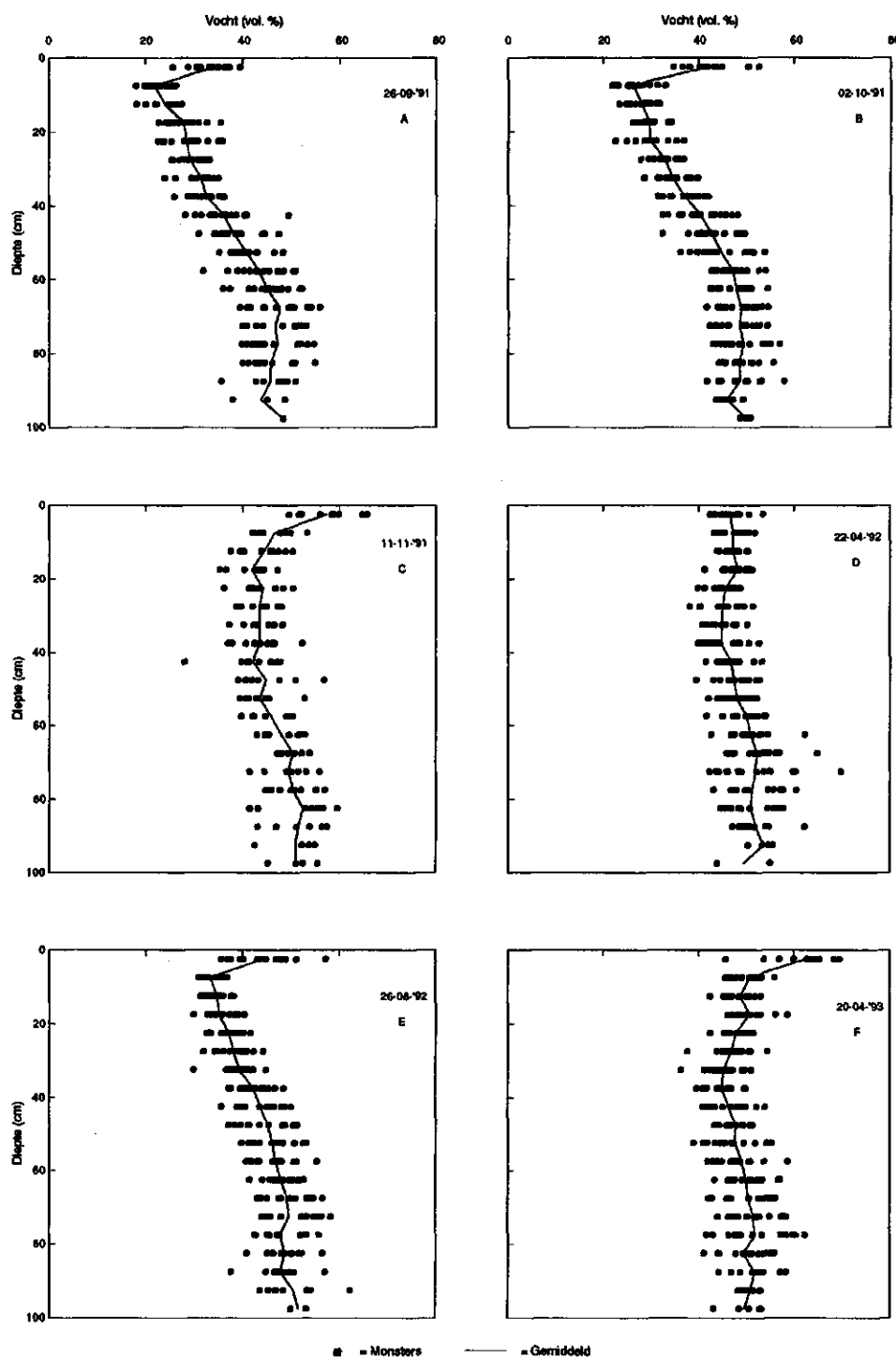


Fig. 14 Gemiddelde vochtprofielen van zes bemonsteringen met de waarden van de afzonderlijke monsters

8 Temporele en ruimtelijke variabiliteit van het vochtgehalte van de grond

In fig. 14 staan de vochtprofielen weergegeven van de zes bemonsteringen. Het bodemvochtgehalte is sterk seizoengebonden. De profielen A en B zijn direct na de zomer genomen en vertonen een sterk uitgedroogde bovengrond, en een geleidelijk toenemend vochtgehalte met de diepte. De zode, die rijk is aan organische stof, is nog relatief nat. In november 1991 is het vochtgehalte van het bodemprofiel toegenomen (profiel C) als gevolg van toenemende neerslag. Vochtprofiel E, waarvan de monsters genomen zijn na de zomer van 1992, is ook weer droog, maar niet zo droog als in dezelfde periode van 1991. De beide voorjaarsvochtprofielen D en F zijn, overeenkomstig de verwachting, veruit het natst. De laatste bemonstering heeft een hoger vochtgehalte in de top van het profiel als gevolg van recente neerslag. Uit fig. 15 blijkt duidelijk dat op het tijdstip van tracertoediening de grond zeer sterk was uitgedroogd (profiel A). In de bijlage staan de vochtprofielen van alle kolommen afgebeeld.

De ruimtelijke variabiliteit van de gemeten vochtprofielen is bijzonder groot (fig. 14). Gemiddeld is de standaardafwijking van het bodemvochtgehalte 3,81 vol.% met een maximale afwijking van 7,23 vol.% bij de vierde bemonstering en een minimale afwijking van 0,80 vol.% bij de tweede bemonstering (tabel 6). Bij de derde bemonstering komen ten opzichte van de andere bemonsteringen de hoogste standaardafwijkingen voor, mogelijk doordat er bij deze bemonstering minder kolommen werden genomen. De standaardafwijkingen bij de bemonsteringen onder droge omstandigheden verschillen niet van die bij nattere bemonsteringen. Naarmate de grond meer is uitgedroogd neemt de variatiecoëfficiënt toe. Zoals te zien in tabel 7, is de variatiecoëfficiënt van de monsters van eerste bemonstering gemiddeld duidelijk hoger dan van de monsters uit de relatief natte vierde en zesde bemonstering. De dikte van de bovenlaag, die in het proefveld niet overal gelijk is, veroorzaakt grote verschillen in zowel dichtheid als vochtgehalte. Hierbij speelt een rol dat in uitgedroogde toestand het aantal en het volume van de krimpstrepen toeneemt. Hierdoor wordt de variabiliteit in vochtgehalte en dichtheid groter (Berndt and Coughlan, 1977).

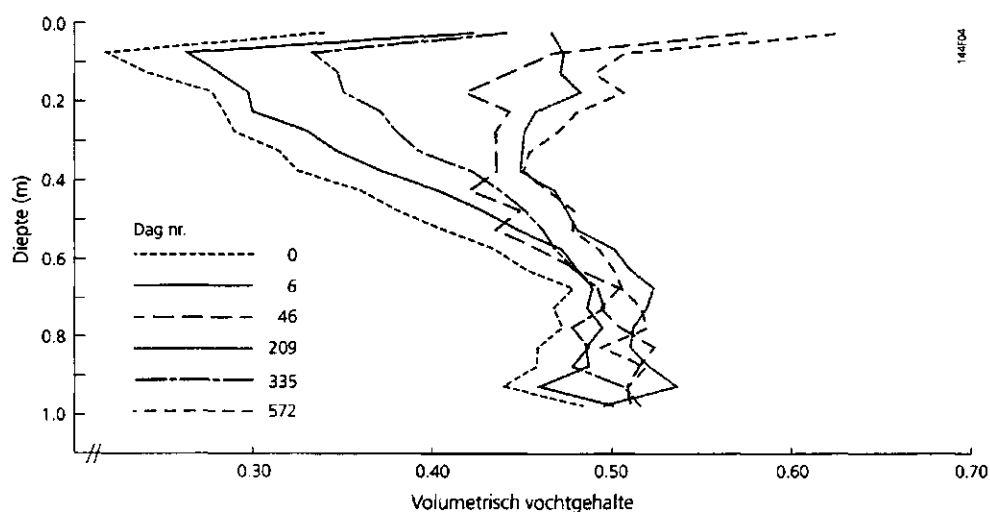


Fig. 15 Veldgemiddelde vochtprofielen op zes bemonsteringstijdstippen

Tabel 6 Standaardafwijking van het bodemvochtgehalte (vol.%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	3,87	4,58	5,34	2,77	5,83	6,01
5- 10	2,08	3,44	3,64	2,76	2,08	2,77
10- 15	2,64	2,72	4,17	1,67	2,46	2,75
15- 20	3,32	2,47	3,62	2,60	2,64	3,37
20- 25	4,10	3,55	4,06	2,56	2,69	2,54
25- 30	2,31	2,47	3,50	3,39	3,23	3,74
30- 35	3,02	3,48	3,29	2,95	3,25	3,52
35- 40	2,92	3,31	4,48	3,66	3,09	2,93
40- 45	4,94	4,66	5,74	2,84	4,00	3,97
45- 50	4,23	4,61	5,50	3,56	5,05	2,58
50- 55	3,27	5,11	4,03	2,77	4,25	4,97
55- 60	5,05	3,10	4,01	3,34	4,02	4,50
60- 65	4,43	3,35	3,71	4,23	3,13	4,07
65- 70	5,32	3,81	2,55	5,19	4,53	4,58
70- 75	5,11	3,76	4,33	7,23	5,09	4,24
75- 80	5,24	4,68	3,99	4,94	4,09	6,24
80- 85	4,43	3,09	6,12	4,67	3,59	4,56
85- 90	4,58	4,22	5,09	4,28	3,95	3,45
90- 95	4,51	1,68	4,92	2,00	6,04	1,36
95- 100		0,80	3,71	5,59	1,64	3,65

Tabel 7 Variatiecoëfficiënt van het bodemvochtgehalte (vol.%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	11,4	10,8	9,3	5,9	13,2	9,6
5- 10	9,5	13,1	7,8	5,8	6,2	5,5
10- 15	11,0	9,7	9,4	3,5	7,1	5,6
15- 20	12,0	8,3	8,7	5,4	7,5	6,7
20- 25	14,4	11,8	9,2	5,6	7,2	5,3
25- 30	8,0	7,5	8,0	7,5	8,5	8,0
30- 35	9,6	10,0	7,6	6,6	8,3	7,8
35- 40	9,0	8,9	10,3	8,2	7,3	6,5
40- 45	13,7	11,5	13,6	6,1	9,1	8,6
45- 50	11,1	10,8	12,3	7,5	11,2	5,4
50- 55	8,0	11,4	9,3	5,8	9,2	10,4
55- 60	11,6	6,6	8,7	6,7	8,6	9,1
60- 65	9,8	7,0	7,7	8,3	6,5	8,2
65- 70	11,1	7,8	5,1	9,9	9,2	9,1
70- 75	10,9	7,7	8,8	13,9	10,3	8,2
75- 80	11,1	9,5	7,9	9,7	8,6	12,0
80- 85	9,6	6,4	11,7	9,2	7,4	9,2
85- 90	10,0	8,7	9,9	8,2	8,3	6,7
90- 95	10,3	3,7	9,7	3,7	11,9	2,7
95- 100		1,6	7,3	11,3	3,2	7,4

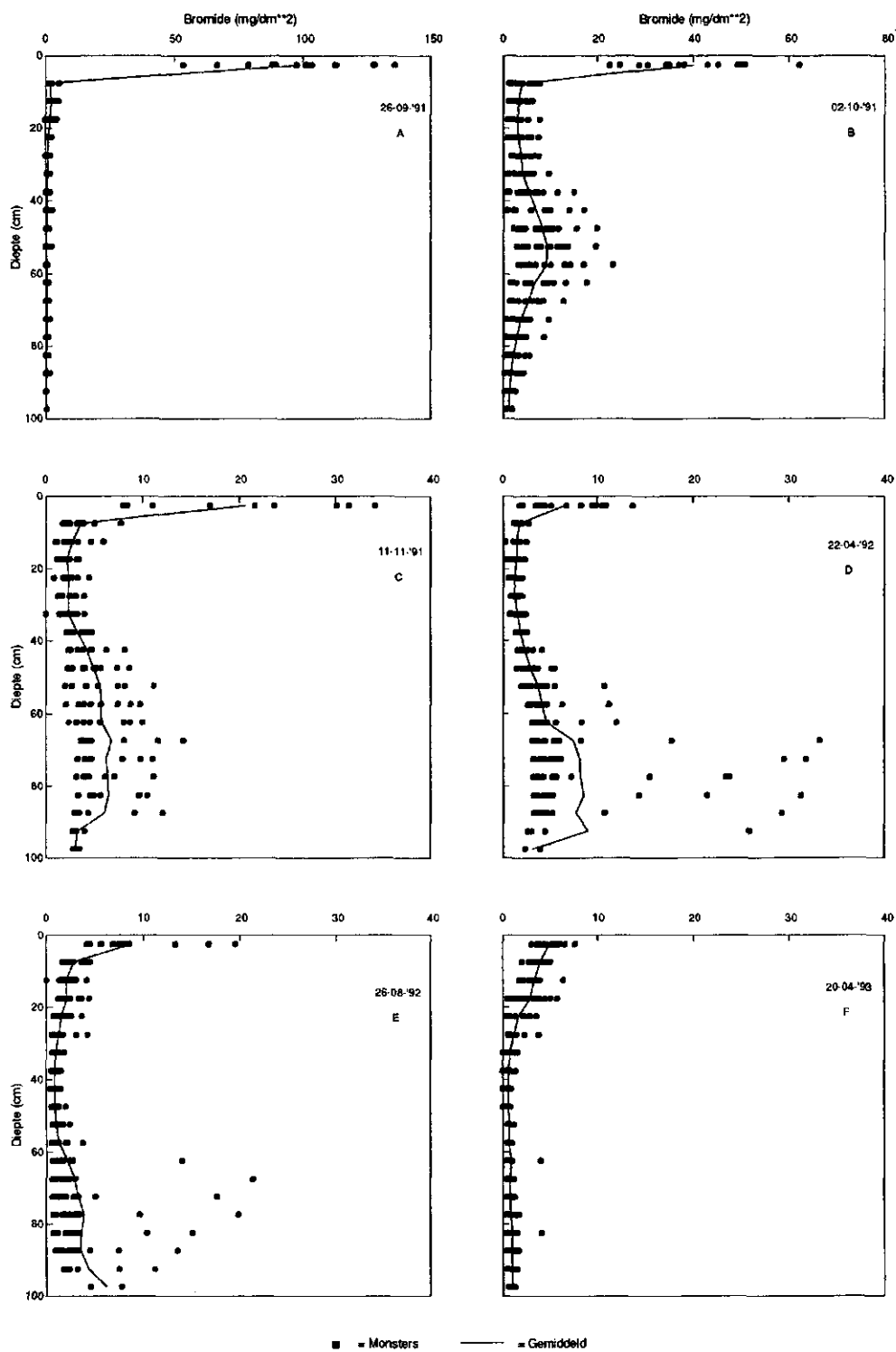


Fig. 16 De gemiddelde bromideprofielen op zes bemonsteringstijdstippen met de individuele waarden van de monsters

9 Bromide in de grond, het grondwater en de drainafvoer

9.1 De teruggevonden hoeveelheid bromide in het profiel

Op 26 september 1991 werd gemiddeld 119,46 mg bromide per dm² op het proefveld gespoten. Bij de eerste grondkolombemonstering op dezelfde dag werd 94,8% van de toegediende bromide teruggevonden (tabel 8). In de tabel is ook te zien dat bij de tweede bemonstering 104,3% werd teruggevonden in de bovenste 95 cm van het profiel. Bij de derde bemonstering werd na 46 dagen nog 84,3% teruggevonden en is er al bromide dieper in het profiel getransporteerd. Na 209 dagen is 30% van de bromide uit de bemonsterde zone verdwenen, 59% na 335 dagen, en na 572 dagen resteert nog bijna een kwart van de toegediende bromide binnen 95 cm -mv.

Tabel 8 De hoeveelheid bromide in de laag van 0-95 cm - mv. op de verschillende bemonsteringstijdstippen. De teruggevonden hoeveelheid bromide is weergegeven in procenten van de toegediende hoeveelheid (119,46 mg.dm⁻²)

Bemonstering	Datum	Dag	Gemiddeld (mg.dm ⁻²)	St.afwijking (mg.dm ⁻²)	Variatiecoëf. (%)	Recovery (%)
1	26-09-91	0	113,2	31,3	27,6	94,8
2	02-10-91	6	124,6	60,8	48,8	104,3
3	11-11-91	46	100,7	45,2	44,9	84,3
4	22-04-92	209	83,6	64,3	77,0	70,0
5	26-08-92	335	49,0	38,9	79,5	41,0
6	20-04-93	572	28,3	11,1	39,3	23,7

9.2 Bromidetransport door de bodem

Het transport van bromide door een zwellende en krimpende grond hangt sterk af van het moment van toediening, neerslag en verdamping en de interactie van de stof met de bodemdeeltjes. Op de dag van de tracertoeediening was de grond sterk uitgedroogd en dus sterk gescheurd, zoals al was geconstateerd bij de beschrijving van de dichtheid en het vochtgehalte. In fig. 16 staan de gemiddelde bromideprofielen zoals die werden vastgesteld bij vijf bemonsteringen. Bij de eerste bemonstering bevindt zich alle bromide uiteraard in de bovenste 10 cm van het bodemprofiel. Na zes dagen is er 40 mm neerslag gevallen waardoor de gemiddelde bromidepiek al ongeveer tot 55 cm diepte in het profiel is doorgedrongen. In de drainafvoer en het grondwater wordt dan ook al bromide aangetroffen (zie fig. 19). Aangezien de drain op 95 cm diepte ligt en het grondwater wordt bemonsterd tussen 1,2 en 1,4 m diepte is op dag 6 duidelijk sprake van versnelde uitspoeling. Geleidelijk aan verplaatst de bromide zich verder in de grond en na 46 dagen en 148 mm neerslag is al zo'n 16% van de bromide uit de bovenste 95 cm van het profiel verdwenen. Tot en met dag 209 is er 440 mm neerslag gevallen en na 335 dagen 757 mm. Meer als de helft van de bromide is dan door de bemonsteringszone getransporteerd. Tussen de vierde en de vijfde bemonstering neemt de bromideconcentratie toe in de bovenste lagen van het profiel, mogelijk door verdamping en opwaarts capillair transport.

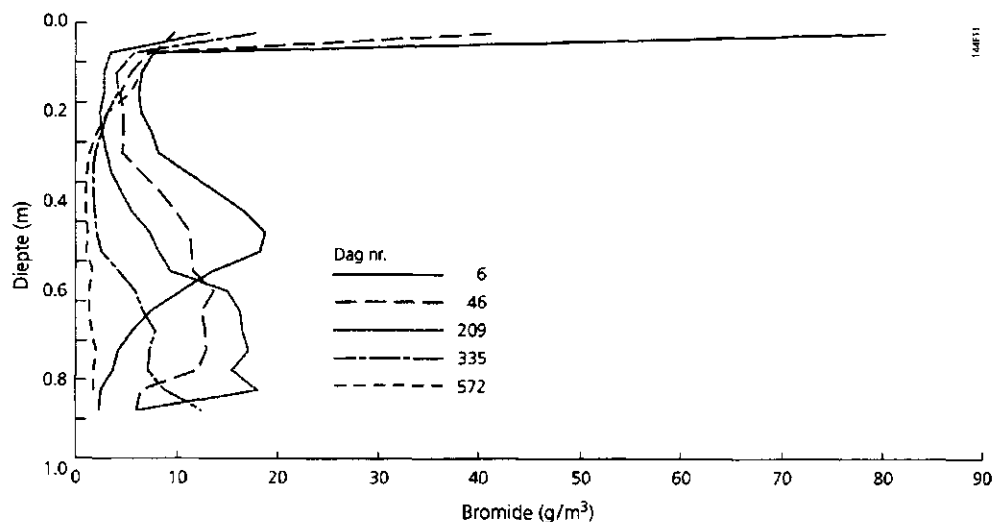


Fig. 17 Gemiddelde bromideprofielen bij vijf bemonsteringen. Elk profiel geeft het gemiddelde van 15 grondkolommen, uitgezonderd dag 46 (9 kolommen)

Na 572 dagen en 1225 mm neerslag is nagenoeg alle bromide uit de bemonsteringszone gespoeld en resteert slechts een klein deel in de top van het profiel. De gemiddelde bromideprofielen van de zes bemonsteringen staan samengevat weergegeven in fig. 17.

9.3 Variatie van de bromideconcentratie

Voor de zes bemonsteringen is van verschillende bemonsterde lagen de gemiddelde gemeten bromideconcentratie weergegeven in tabel 9. Bij de eerste bemonstering komt de hoogst gemeten bromideconcentratie van $197,7 \text{ mg.dm}^{-3}$ voor in de laag van 0 - 5 cm diepte. Naarmate er meer tijd verstreken is vanaf de tracertoediening neemt de concentratie van bromide in de bovenste laag af en is bij de laatste bemonstering nog 5% van de eerste bemonstering. De grootste standaardafwijkingen zijn terug te vinden op die plaatsen in het profiel waar de meeste bromide aanwezig is (tabel 10). De hoogste variatiecoëfficiënten in tabel 11 zijn voornamelijk te vinden in de lagen dieper dan 25 cm. Blijkbaar vindt hieronder redistributie plaats, die een grote variatiecoëfficiënt tot gevolg heeft.

Tabel 9 Gemiddelde bromideconcentratie in de grond ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	197,7	80,2	41,1	13,0	17,7	9,8
5- 10	4,1	7,8	7,2	3,5	5,9	7,9
10- 15	4,3	6,6	5,5	2,9	4,2	6,6
15- 20	3,8	6,3	4,4	2,8	4,3	5,7
20- 25	2,7	6,4	4,8	2,4	3,1	3,3
25- 30	1,9	7,5	4,8	2,6	2,6	2,4
30- 35	1,7	8,1	4,7	3,1	1,9	1,6
35- 40	1,2	10,9	6,5	3,7	1,9	1,3
40- 45	1,4	13,9	8,4	4,6	1,8	1,2
45- 50	1,0	16,8	9,9	5,7	1,9	1,2
50- 55	1,0	18,8	11,2	7,3	2,1	1,4
55- 60	0,8	18,3	11,4	8,2	2,6	1,3
60- 65	0,7	13,5	11,6	9,3	4,4	1,9
65- 70	1,0	10,4	13,5	14,9	6,0	1,5
70- 75	0,9	7,4	12,4	16,2	6,7	1,6
75- 80	0,8	5,7	12,7	16,4	7,8	1,7
80- 85	0,5	4,3	12,8	17,1	7,3	2,2
85- 90	0,9	3,7	12,1	15,4	7,1	2,0
90- 95	0,3	2,6	6,5	18,0	8,8	2,0
95-100	0,9	2,4	6,0	6,3	12,4	2,1

Tabel 10 Standaardafwijking van de bromideconcentratie in de grond ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	44,1	21,8	19,0	7,1	8,5	2,5
5- 10	2,0	3,3	3,5	0,7	1,9	1,8
10- 15	2,0	2,8	3,1	0,9	1,9	2,1
15- 20	2,0	3,2	1,5	0,9	1,9	2,9
20- 25	0,9	4,1	1,9	0,8	1,7	1,9
25- 30	1,3	4,0	1,7	0,7	2,0	1,6
30- 35	0,9	5,5	2,2	0,9	0,6	0,7
35- 40	0,8	7,7	1,8	0,8	0,5	0,5
40- 45	1,5	9,3	3,7	1,3	0,6	0,4
45- 50	0,7	9,4	3,9	2,2	0,7	0,4
50- 55	1,1	8,6	5,8	4,3	1,0	0,4
55- 60	0,5	11,4	5,0	4,3	1,6	0,3
60- 65	0,6	9,0	5,2	4,7	6,4	1,6
65- 70	0,7	6,1	7,7	15,5	9,9	0,4
70- 75	0,8	4,3	5,5	17,8	8,3	0,6
75- 80	0,5	3,9	5,9	13,9	9,8	0,8
80- 85	0,8	3,0	5,6	16,6	7,5	1,8
85- 90	1,1	2,6	6,7	15,8	6,4	0,8
90- 95	0,2	1,6	0,9	19,6	6,7	0,7
95-100	1,4	0,5	1,6	3,1	0,6	

Tabel 11 Variatiecoëfficiënt van de bromideconcentratie in de grond (%) per laag van 5 cm bij zes bemonsteringen

Diepte cm - mv.	Bemonstering					
	1	2	3	4	5	6
0- 5	22,3	27,2	46,1	54,2	47,9	25,0
5- 10	47,8	41,8	48,7	19,7	33,1	22,4
10- 15	47,1	41,9	55,5	30,4	44,5	32,0
15- 20	51,6	50,5	33,1	33,4	44,8	51,8
20- 25	33,0	63,7	40,1	33,5	53,7	58,1
25- 30	70,9	52,6	35,6	27,1	78,6	69,0
30- 35	51,3	67,5	46,8	28,7	30,1	45,1
35- 40	72,2	70,7	28,4	21,2	27,0	40,1
40- 45	102,5	67,0	43,5	27,8	33,7	32,4
45- 50	73,5	56,2	39,0	38,7	37,8	33,5
50- 55	109,0	45,5	51,3	58,1	44,9	28,1
55- 60	67,5	62,3	44,2	52,1	61,4	22,5
60- 65	96,3	67,2	45,0	50,5	147,0	86,0
65- 70	76,7	58,4	56,8	103,5	165,4	29,1
70- 75	88,1	58,3	44,2	109,8	124,3	36,4
75- 80	55,6	69,0	46,3	84,9	125,1	44,6
80- 85	183,5	69,6	43,5	97,3	102,7	81,3
85- 90	114,5	71,6	55,8	103,0	89,6	40,3
90- 95	75,7	61,7	13,8	108,8	76,2	34,1
95-100		58,9	8,0	25,8	25,3	26,8

9.4 Bromide en nitraat in het grondwater

In de dagen direct na de tracertoediening is 40 mm neerslag gevallen (fig. 18A). Bij de eerste grondwaterbemonstering na 5 dagen werd een grote hoeveelheid bromide in het grondwater aangetroffen. De bromideconcentratie nam nog verder toe en bereikte een dag later de hoogste gemiddelde concentratie van 34,5 mg.l⁻¹. Zoals in fig. 18B is te zien is er een grote spreiding van de bromideconcentratie in het grondwater. Zo zijn tussen dag 5 en dag 11 waarden vastgesteld die liggen tussen 0,9 en 70,1 mg.l⁻¹. In drogere perioden neemt de bromideconcentratie in het grondwater af zoals bijvoorbeeld te zien is tussen dag 6 en dag 35. Bij regenrijke perioden rond dag 50 en dag 90 (fig. 18A) is er weer een stijging te zien in de hoeveelheid bromide in het grondwater. Na ongeveer 100 dagen neemt de hoeveelheid bromide in het grondwater geleidelijk af en na 568 dagen zit er gemiddeld nog 4 mg bromide per liter in het grondwater (Bronswijk e.a., 1995b). Net als bij bromide is een verhoogde uitspoeling van nitraat te zien bij elke neerslagrijke periode. Het uitspoelingspatroon is nagenoeg gelijk aan dat van bromide. In fig. 18C is te zien dat de hoeveelheid nitraat in het grondwater steeds verder afneemt en zelfs tot nul reduceerd. De EG-drinkwaternorm wordt tijdens het experiment in het grondwater langdurig overschreden.

9.5 Bromide en nitraat in de drainafvoer

Net als in het grondwater zijn ook in de drainafvoer bromidepieken vast te stellen in perioden van veel neerslag. Zoals in fig. 18D is te zien neemt de bromideconcentratie in het drainagewater af naarmate de drain over een langere periode afvoert. Direct na de eerste mm's regen vanaf de tracertoediening wordt bromide in de drainafvoer aangetroffen. Er is dus sprake van een zeer snel transport door de bovenste 95 cm van het profiel. De grote scheuren die tot op grote diepte reiken in het sterk uitgedroogde profiel zijn hiervoor verantwoordelijk. Na acht dagen wordt de hoogste bromidepiek gemeten, hierna neemt de gemiddelde concentratie in de drain steeds verder af. Rond dag 175 komt nog een opvallend hoge bromidepiek in de drainafvoer voor, welke wordt veroorzaakt door bromide dat niet via de scheuren direct naar het grondwater werd verplaatst maar via de kleinere mesoporiën. De af te leggen weg naar het grondwater is een stuk langer en kost dan ook veel meer tijd (Bronswijk e.a., 1995b). 500 dagen na tracertoediening is er bijna geen uitspoeling meer van bromide uit de drain. De uitspoeling van nitraat via de drain is te zien in fig. 18E. Het uitspoelingsniveau ligt gedurende de hele meetperiode gemiddeld op $70 \text{ mg NO}_3\text{-N.l}^{-1}$ en overschrijdt daarmee de EG-drinkwaternorm ruimschoots.

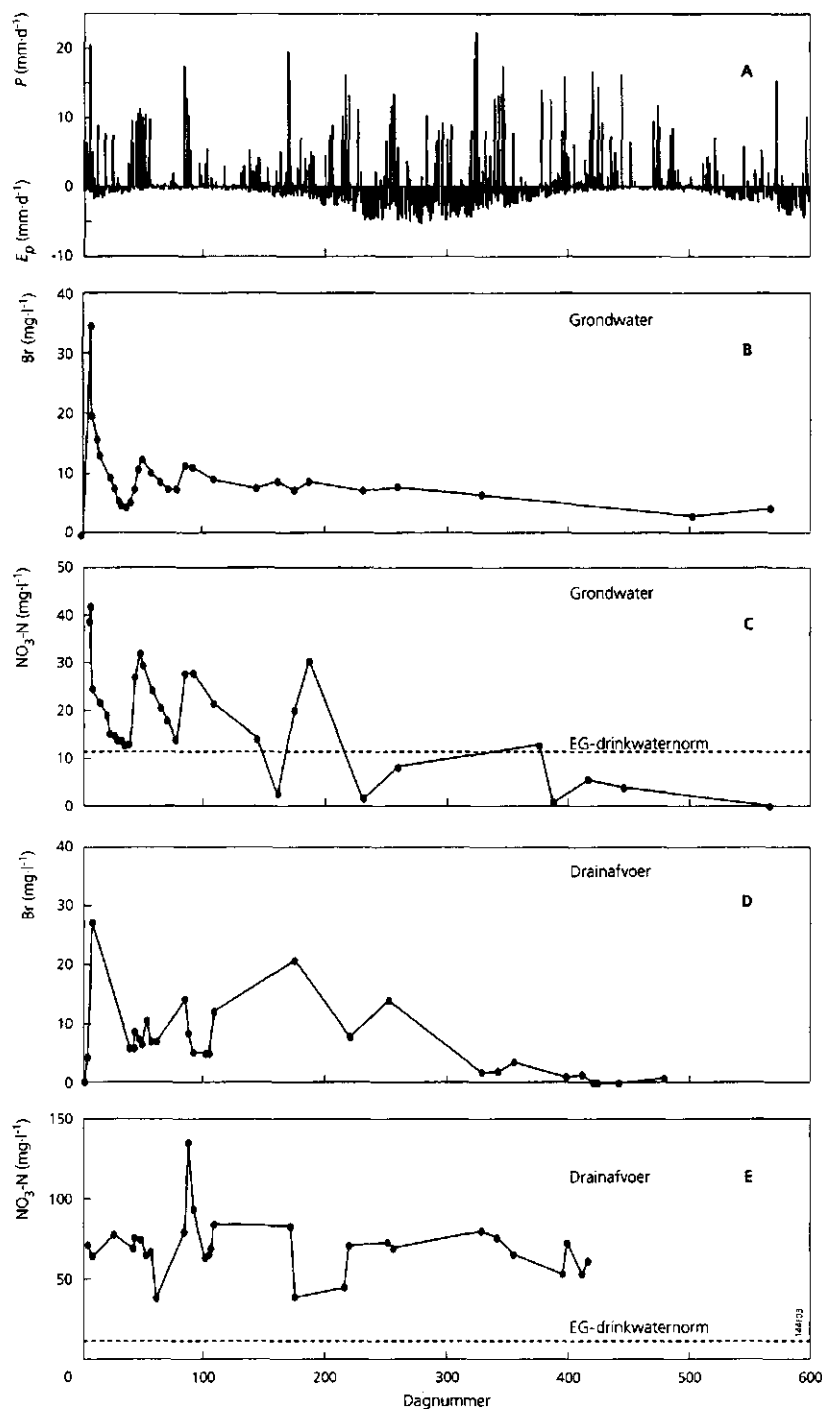


Fig. 18 Neerslag en potentiële verdamping (A), bromide in het grondwater met minimum en maximum gemeten waarden (B), nitraat in het grondwater (C), bromide in de drainafvoer (D), en nitraat in de drainafvoer (E) gedurende de periode van onderzoek. De bromide- en nitraatconcentraties in het grondwater zijn een gemiddelde van 20 grondwaterstandsbuizen

10 Conclusies

Op basis van het gedrag van bromide komt uit dit onderzoek naar voren, dat in zware kleigronden drie soorten transportmechanismen kunnen worden onderscheiden. a) Transport via de macroporiën (snelle preferente stroming) door de duidelijk zichtbare scheuren. Hierdoor komen bromide en nitraat versneld in het grondwater en de drainafvoer terecht. b) Transport via mesoporiën (langzame preferente stroming) waardoor een deel van de nitraat en bromide lateraal en verticaal vervoerd wordt wat een grote ruimtelijke variabiliteit veroorzaakt. Via dit transport duurt het langer voordat de stoffen in het grondwater en de drainafvoer worden waargenomen. Langs deze transportweg wordt het overgrote deel van de stoffen vervoerd. c) Transport in de bodemaggregaten, voornamelijk veroorzaakt door diffusie direct na mest- en tracertoeiening. De bromide en nitraat komen later in kleine hoeveelheden weer beschikbaar via diffusie naar de randen, en transporteren langzaam door het bodemprofiel. Dit proces gaat vele malen langzamer dan bij macroporiën en mesoporiëntransport, waardoor er een lange verblijftijd is in de bodem.

Onregelmatige transport en uitspoeling van bromide en nitraat geïnitieert door bovengenoemde transportmechanismen, veroorzaken grote concentratieverschillen in de tijd en van plek tot plek in de grond, het grondwater en het drainagewater. Als er op het moment van toediening van stoffen grote scheuren en mesoporiën aanwezig zijn is er sprake van zeer snelle uitspoeling direct bij de eerste regenbui na de toediening. Bij het toedienen van bestrijdingsmiddelen, meststoffen, enz., dient men er rekening mee te houden dat de vochttoestand van de grond een cruciale rol speelt bij de bodemfysische transportprocessen. Speciaal in droge perioden kunnen grondwater en oppervlaktewater snel verontreinigen.

Er blijken aanzienlijke hoeveelheden nitraat in het oppervlaktewater te komen via drainafvoer. Door snel transport van nutriënten via de macroporiën wordt via denitrificatie weinig nitraat omgezet. Het gevolg hiervan is dat tijdens dit experiment een maximale hoeveelheid nitraat in het grondwater werd gemeten van $42 \text{ mg.l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$, waarmee de EG drinkwaternorm ($11,3 \text{ mg.l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$) bijna 4 keer wordt overschreden. In de drainafvoer was de gemiddelde nitraatconcentratie gedurende de meetperiode ongeveer $70 \text{ mg.l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ en dus veel hoger dan de EG drinkwaternorm. De hoogste gemeten nitraatconcentratie in de drainafvoer was $136 \text{ mg.l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$, meer dan 10 keer de EG drinkwaternorm.

Bromide en nitraat hebben overeenkomstige transportmechanismen wat tot uiting komt bij de vergelijking van de uitspoeling van beide ionen naar het grondwater en in de drainafvoer. Een verhoogde uitspoeling van bromide gaat gepaard met een verhoogde uitspoeling van nitraat. Bromide is dan ook een geschikte tracer om het transportmechanisme van nutriënten te bestuderen.

Literatuur

- Berndt, R.J. and K.J. Coughlan, 1977. *The nature of changes in bulk density with water content in cracking clay*. Aust. J. Soil Res., 15: 27-37.
- Bodemkaart van Nederland, 1984. *Herziene uitgave van blad 45 West 's-Hertogenbosch 1 : 50 000*. Stichting voor Bodemkartering Wageningen.
- Bronswijk, J.J.B., W. Hamminga and K. Oostindie, 1995a. *Field-scale solute transport in a cracking clay soil*. Water Res. Res. 31,3: 517-526
- Bronswijk, J.J.B., W. Hamminga and K. Oostindie, 1995b. *Rapid nutrient leaching to ground- and surface waters in clay soil areas*. Submitted to European Journal of Agronomy.
- Domhof, J. en G.A. van Soesbergen, 1982. *De grondkolom-cilinder*. Cultuurtechnisch Tijdschrift 22(3): 187-190.
- Hamminga, W. en L.W. Dekker, 1992. *Preferent transport van water en opgeloste stoffen in een waterafstotende duinzandgrond bij Ouddorp (ZH)*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 167. 73 blz.
- Hamminga, W. and J. Harmsen, in prep. *Bromide measurement technique for field tracer experiments*. In prep.
- Hendrickx, J.H.M., C.J. Ritsema, O.H. Boersma, L.W. Dekker, W. Hamminga and J.W.H. van der Kolk, 1991. *Motor-driven portable soil core sampler for volumetric sampling*. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:1792-1795.
- K.N.M.I., 1991. *Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.
- K.N.M.I., 1992^a. *Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.
- K.N.M.I., 1992^b. *Normalen van de neerslag voor het tijdvak 1961-1990 (voorlopige waarden)*. Supplement bij het maandoverzicht Neerslag & verdamping in Nederland. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.
- K.N.M.I., 1993. *Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.
- Porskamp, H.A.J. en P. Sonneveld, 1983. *Vloeistofverdeling van spuitdoppen sterk afhankelijk van spuithoogte*. Boerderij/Akkerbouw-68:22-23.

Ritsema, C.J., L.W. Dekker, O.H. Boersma and W. Hamminga, 1991. *Het gebruik van de grondkolomcilinder bij onderzoek naar het transport van water en opgeloste stoffen in de bodem*. H₂O 8: 218-222.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks*. Vernieuwde uitgave 1994. Technisch Document 18, DLO-Staring Centrum Wageningen. 66 pag.

Niet-gepubliceerde bronnen

Hamminga, W. en P. Bouter, 1990. *Een HPLC-methode voor de bepaling van bromide in watermonsters*. Interne Mededeling 72, DLO-Staring Centrum, Wageningen, 13 blz.

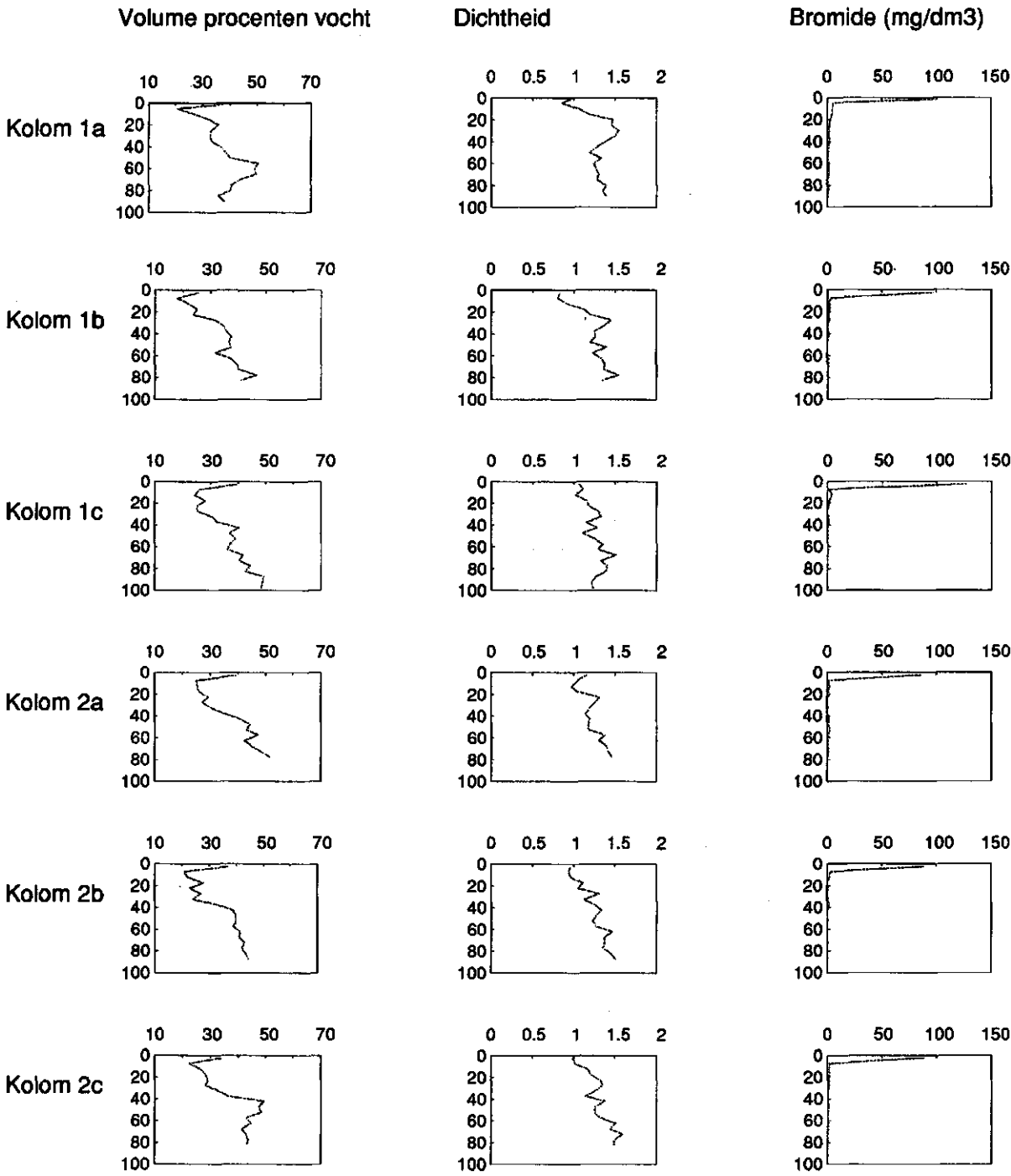
Harmsen, J., 1982. *De analyse van nitriet, nitraat en bromide in water met behulp van vloeistofchromatografie*. Nota 1367, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

Harmsen, J., 1986. *Optimalisatie van kolomkeus, eluenssamenstelling en detectie bij ionchromatografie van anorganische anionen*. Nota 1699, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 46 blz.

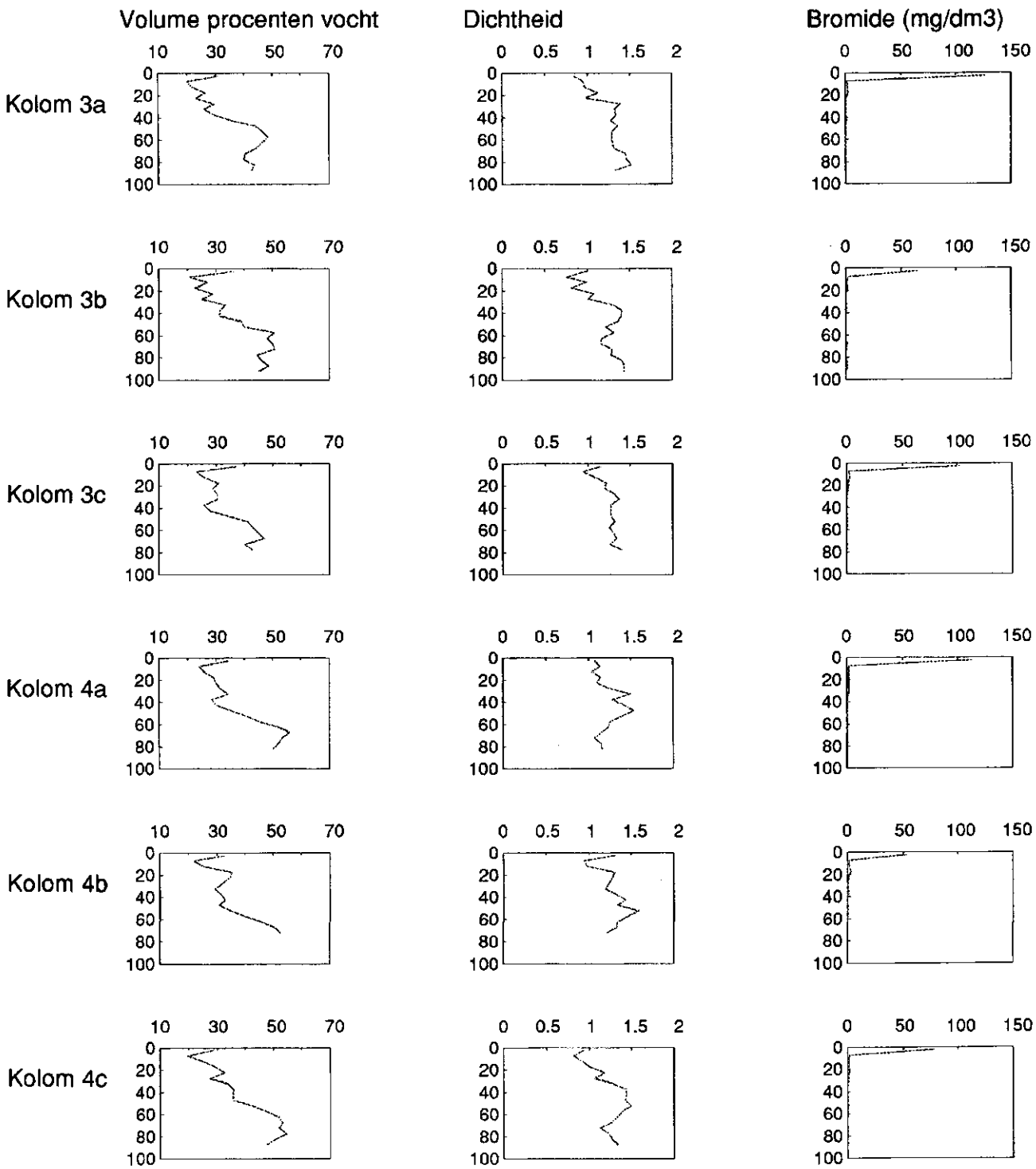
Toorn, A. van den, 1981. *Het nemen van grondwatermonsters*. Nota 1242, Instituut voor Cultuurtechniek en waterhuishouding, Wageningen, 8 blz.

Aanhangsel Vochtgehalte, dichtheid en bromideconcentraties van de individuele kolommen bij 6 bemonsteringen

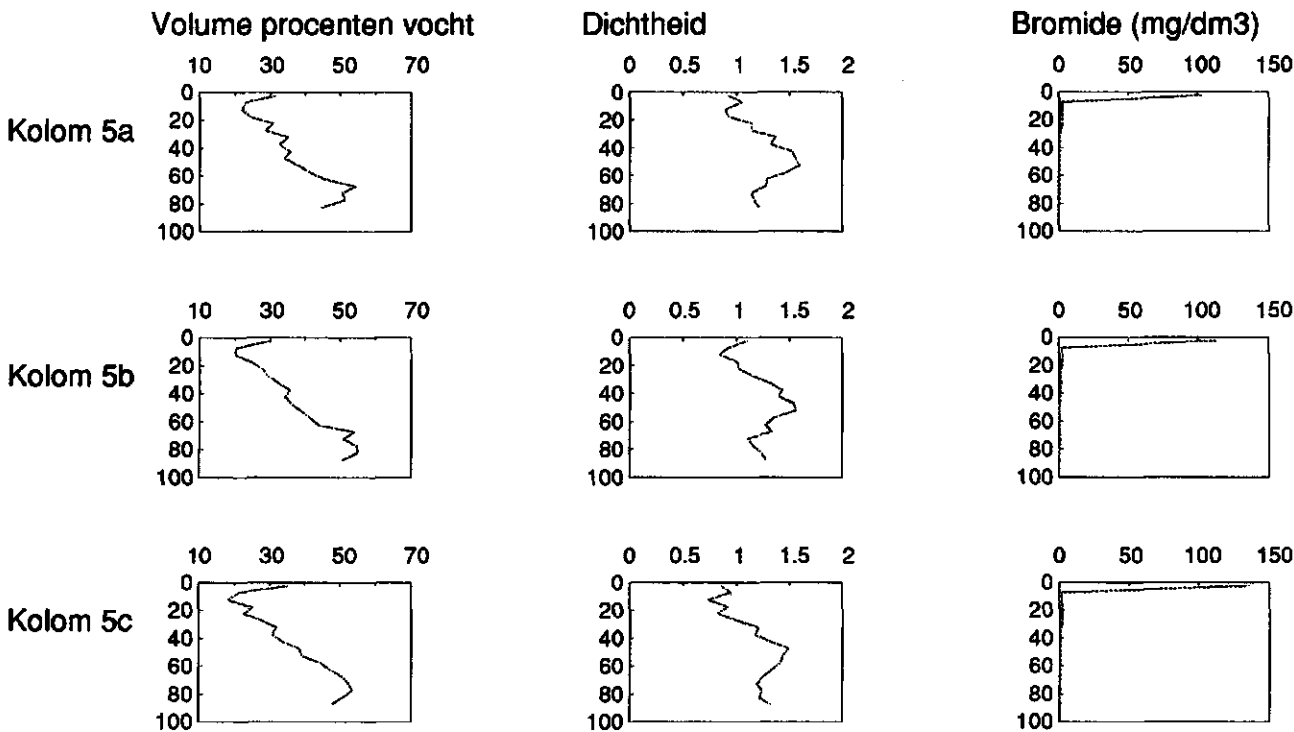
Eerste bemonstering De Vlierd 26-9-91



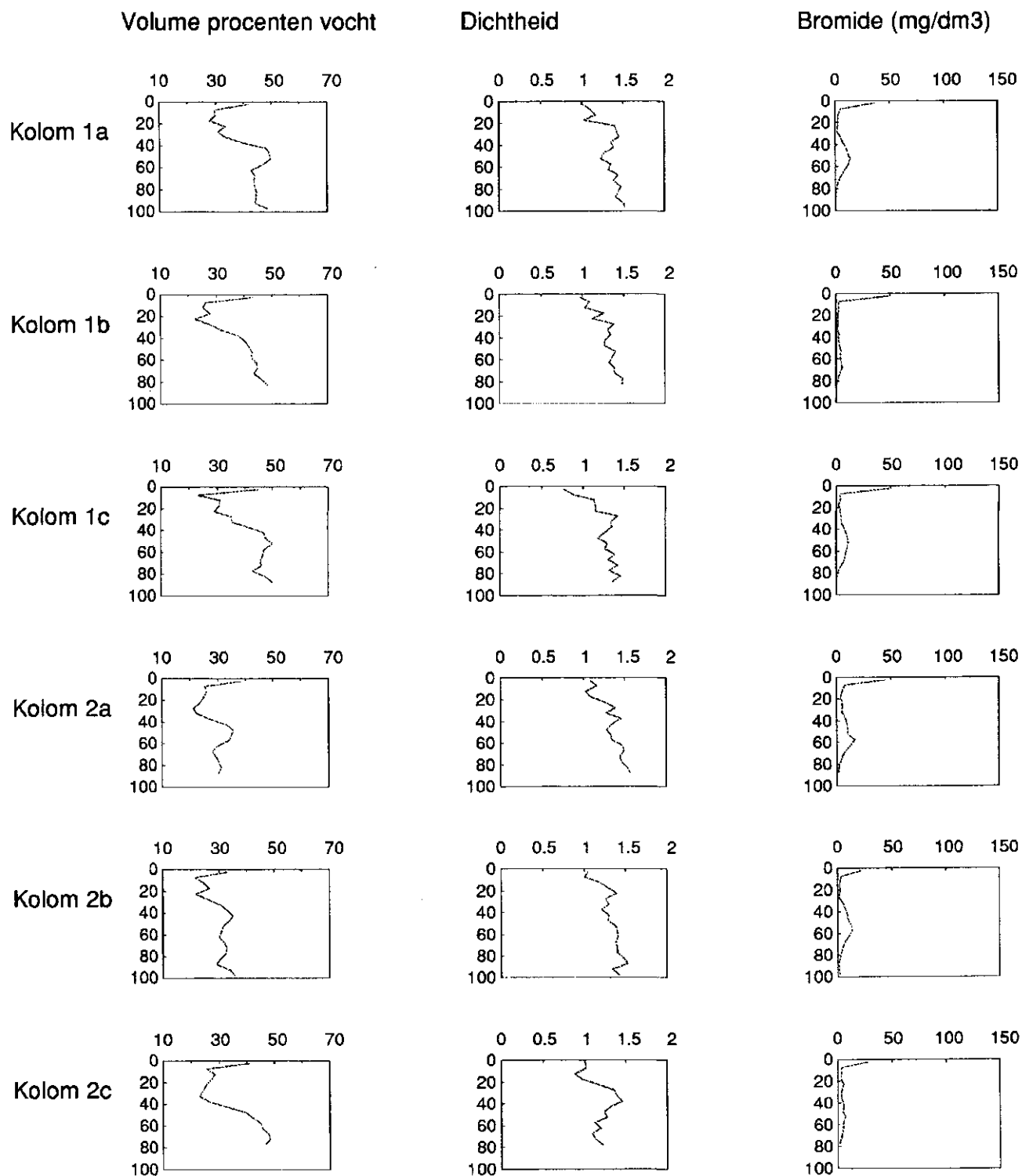
Eerste bemonstering De Vlierd 26-9-91



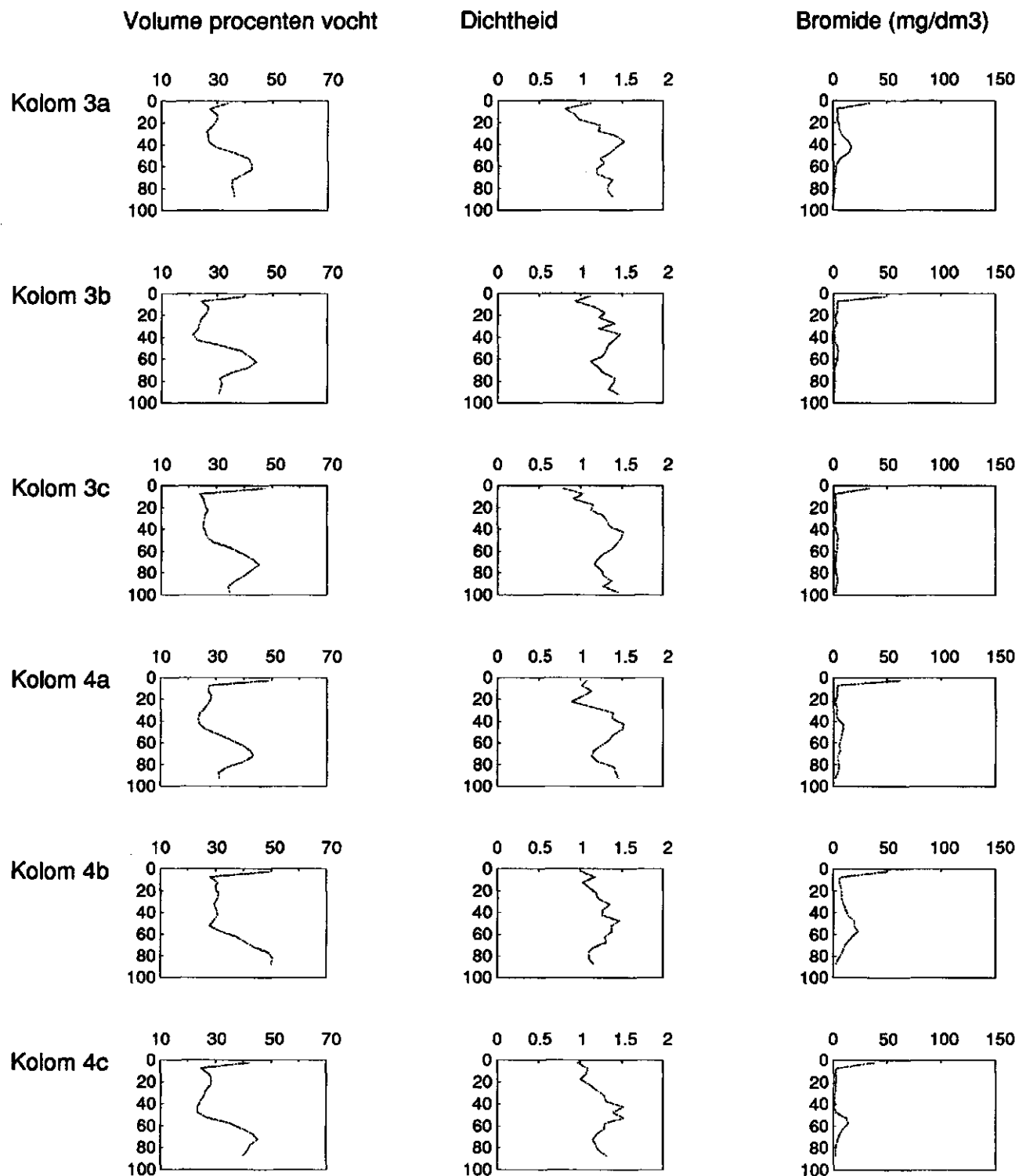
Eerste bemonstering De Vlierd 26-9-91



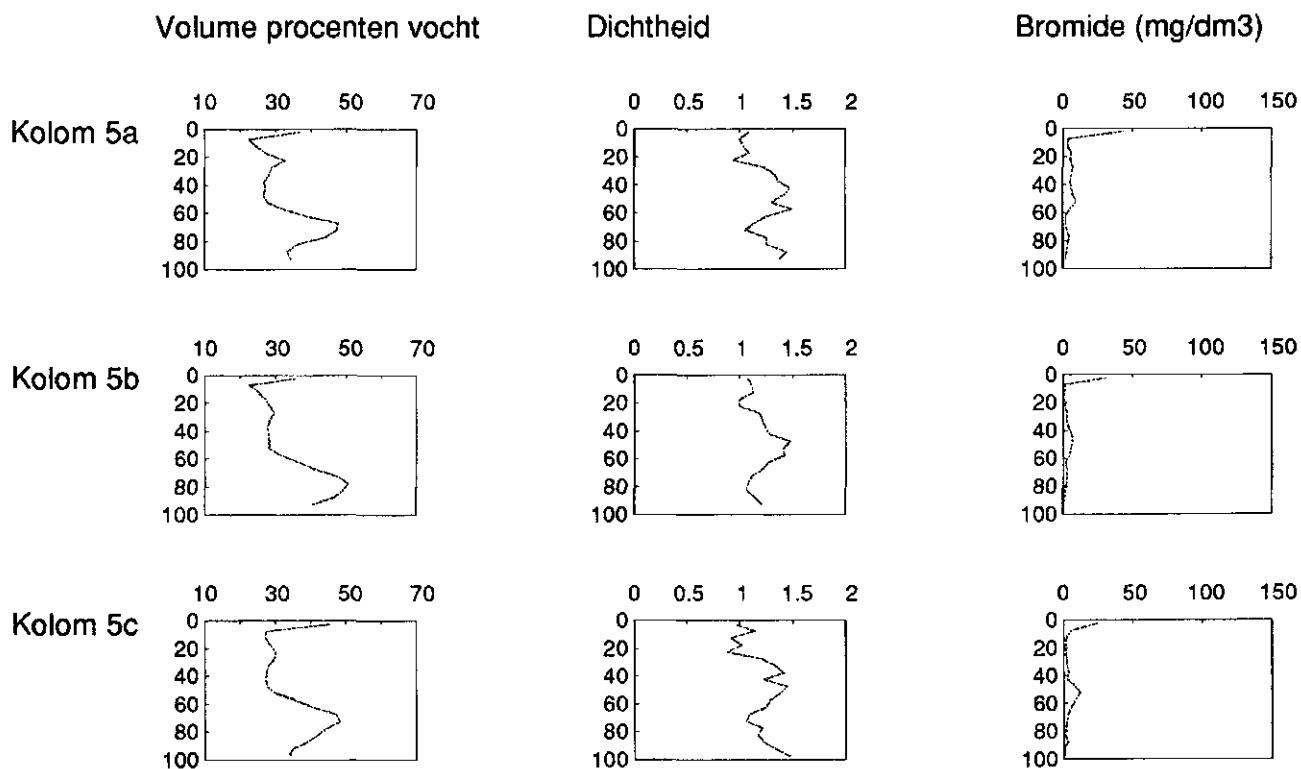
Tweede bemonstering de Vlierd 2-10-91



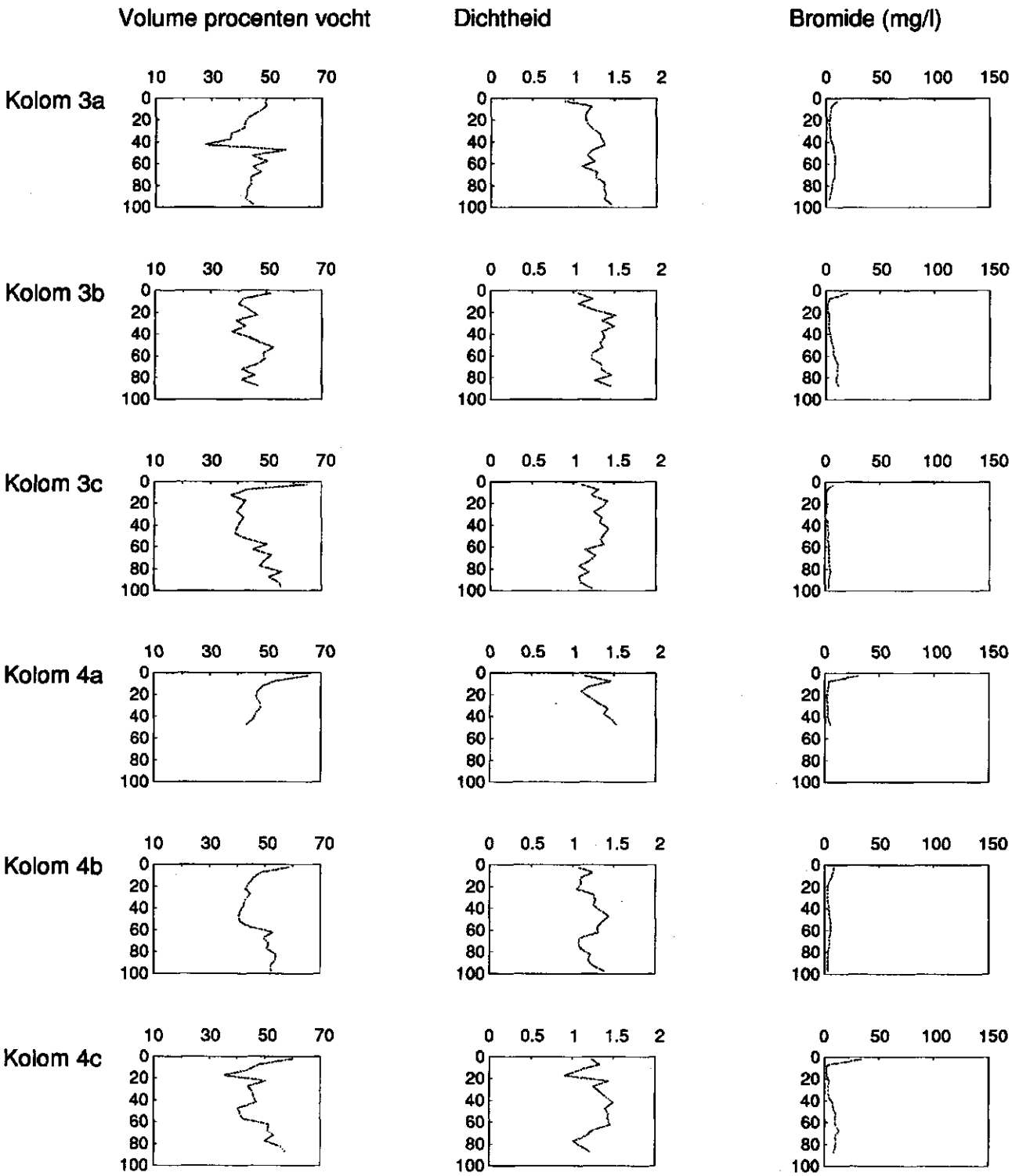
Tweede bemonstering de Vlierd 2-10-91



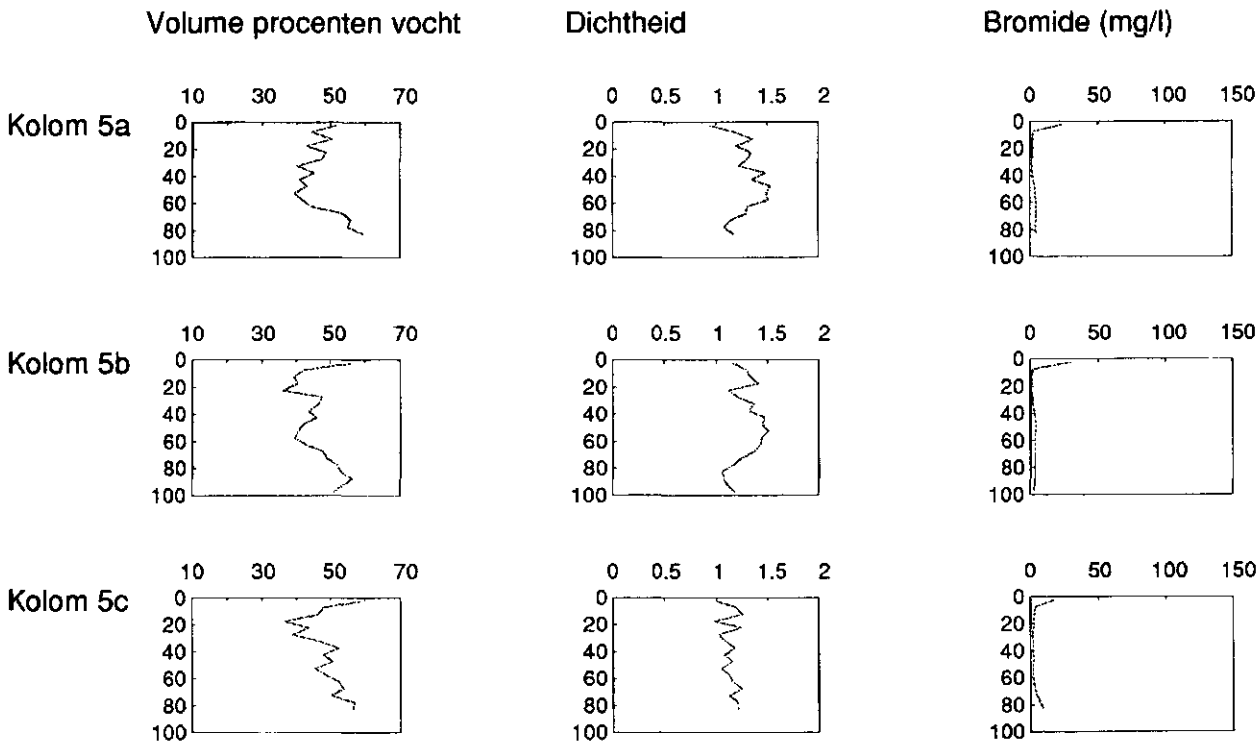
Tweede bemonstering de Vlierd 2-10-91



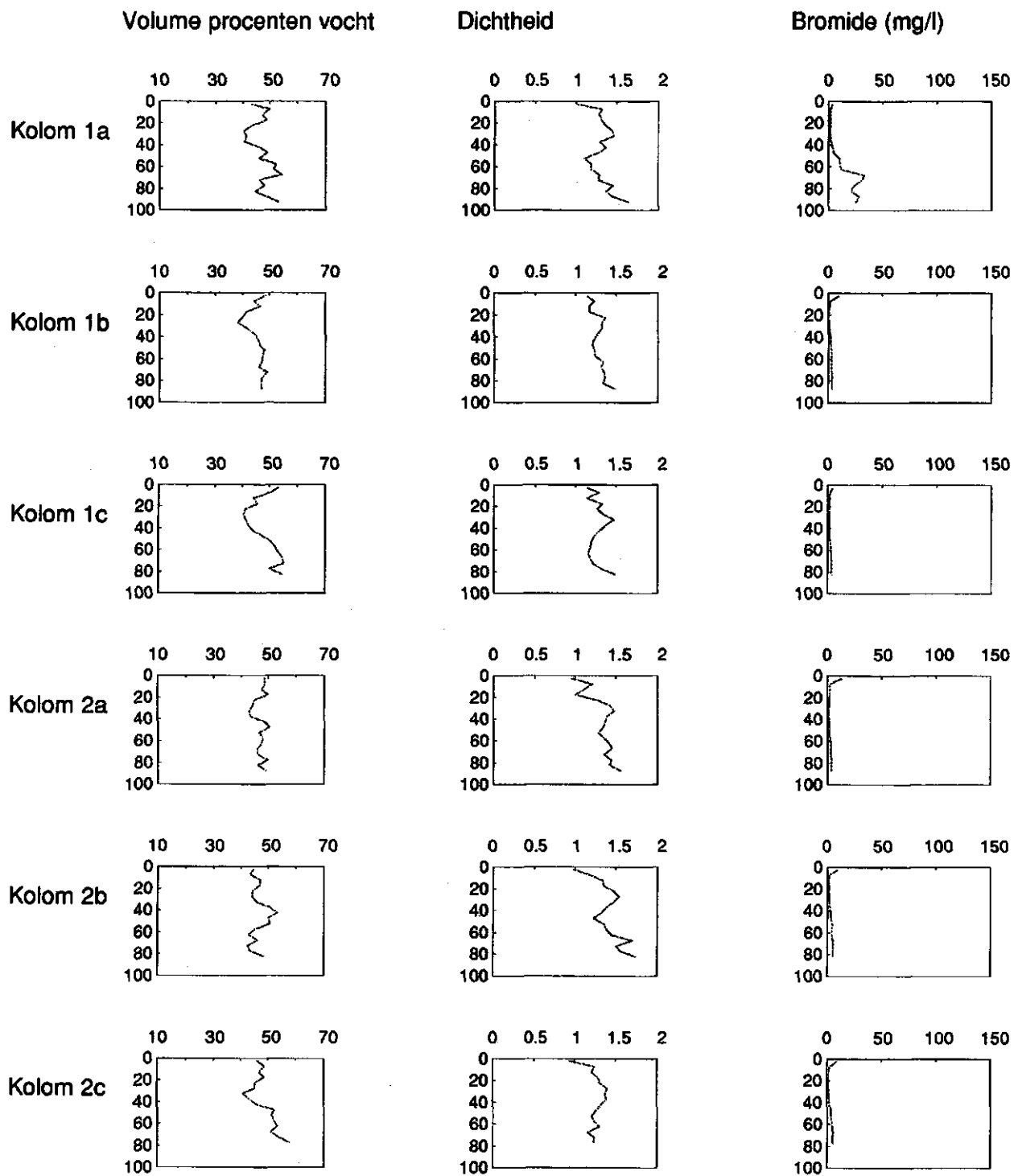
Derde bemonstering de Vlierd 11-11-91



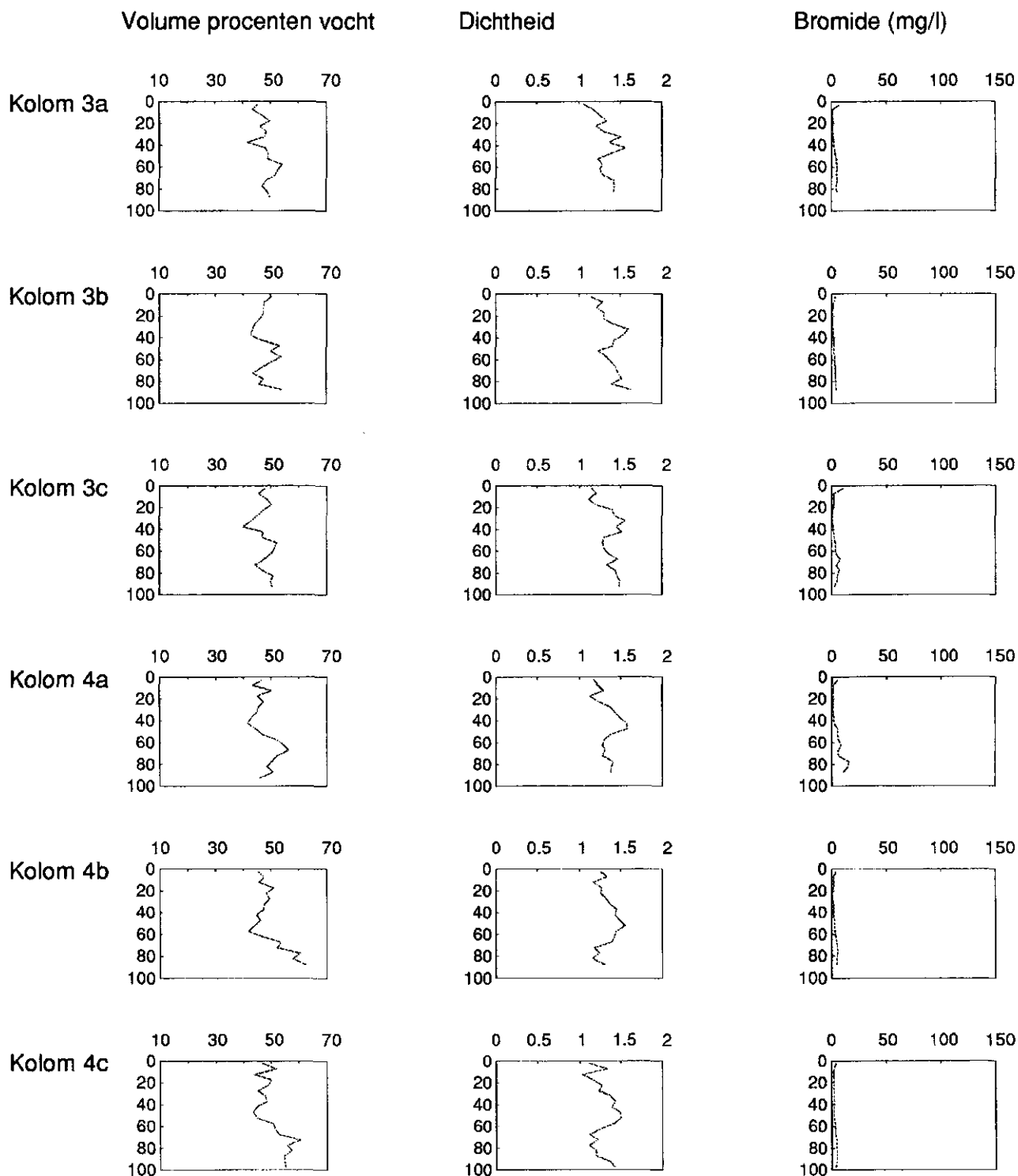
Derde bemonstering de Vlierd 11-11-91



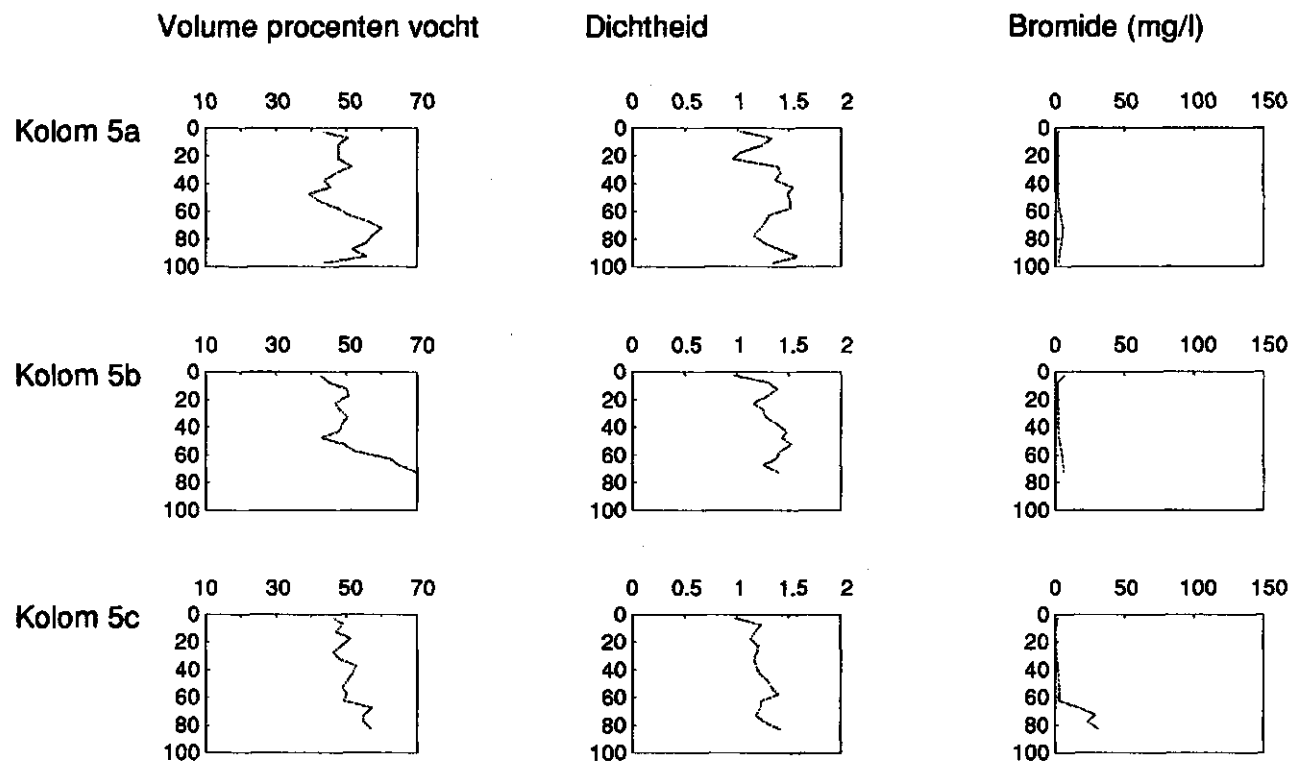
Vierde bemonstering De Vlierd 22-4-92



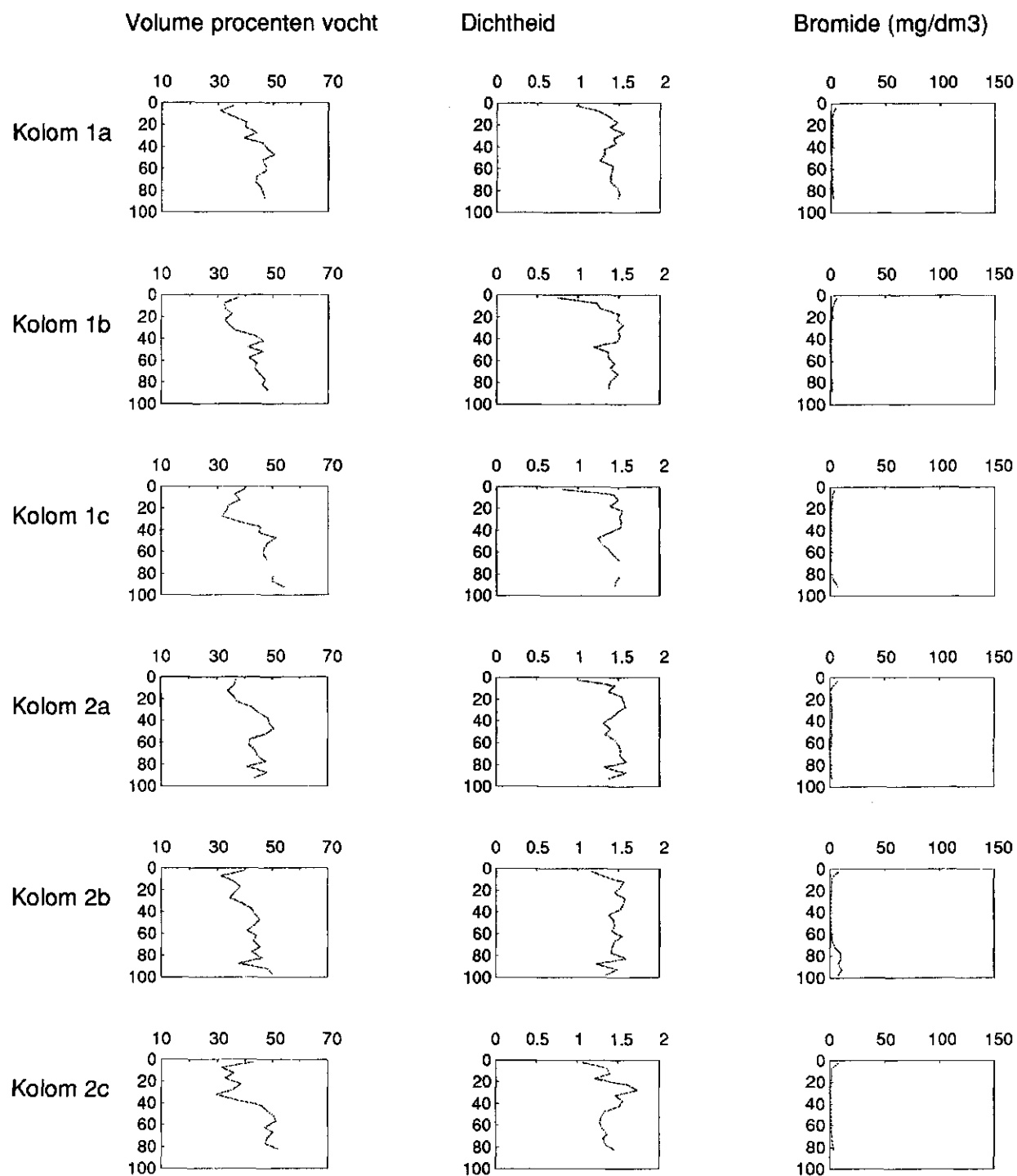
Vierde bemonstering De Vlierd 22-4-92



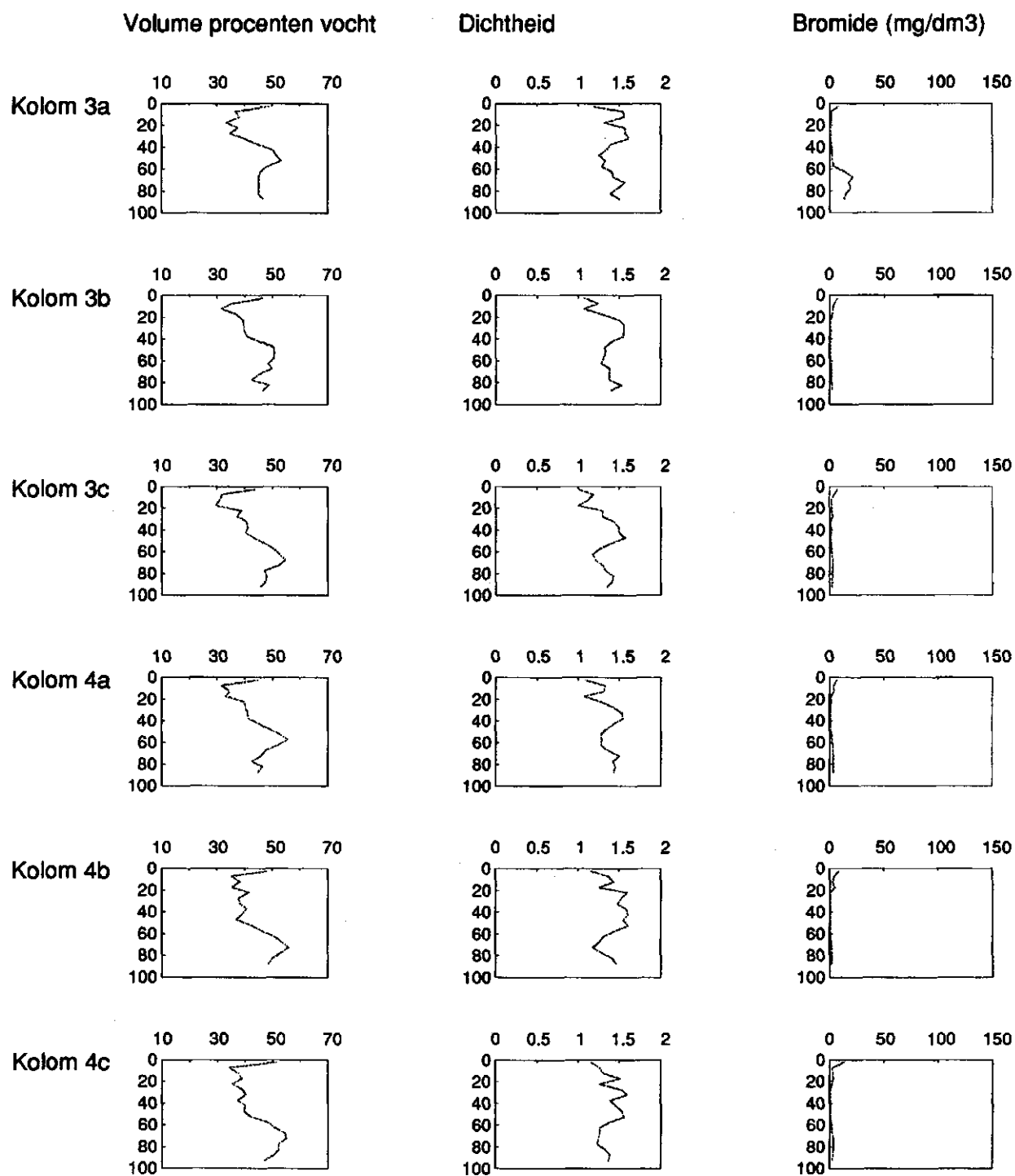
Vierde bemonstering De Vlierd 22-4-92



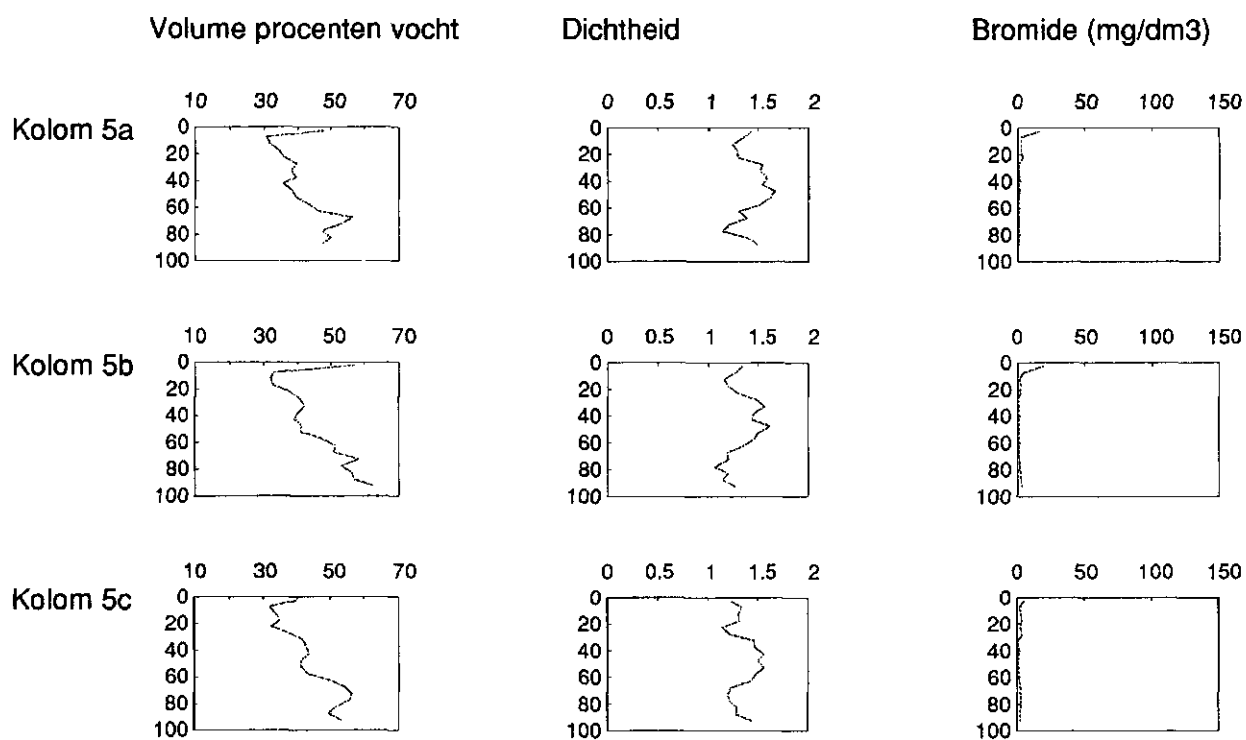
Vijfde bemonstering De Vlierd 26-8-92



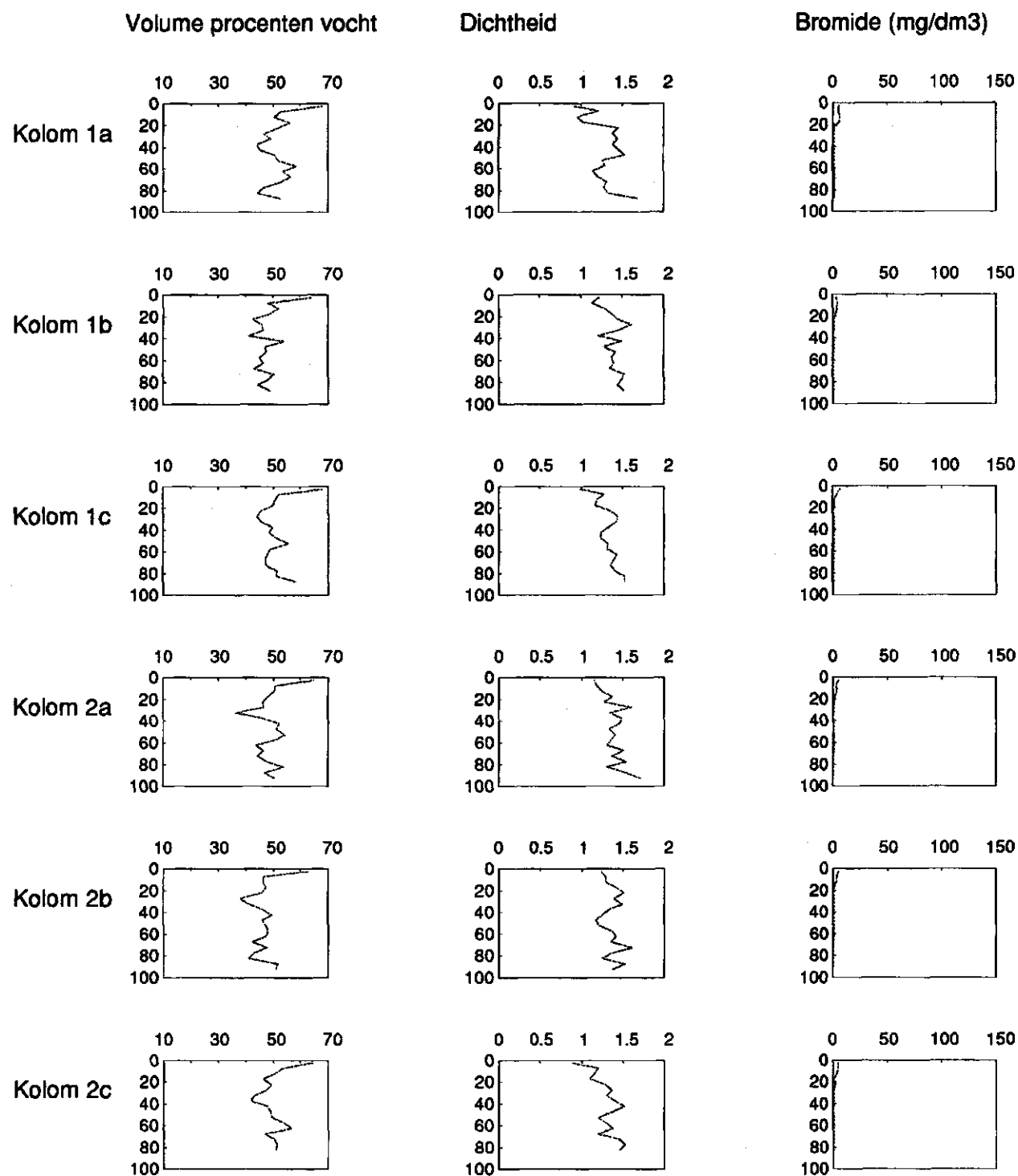
Vijfde bemonstering De Vlierd 26-8-92



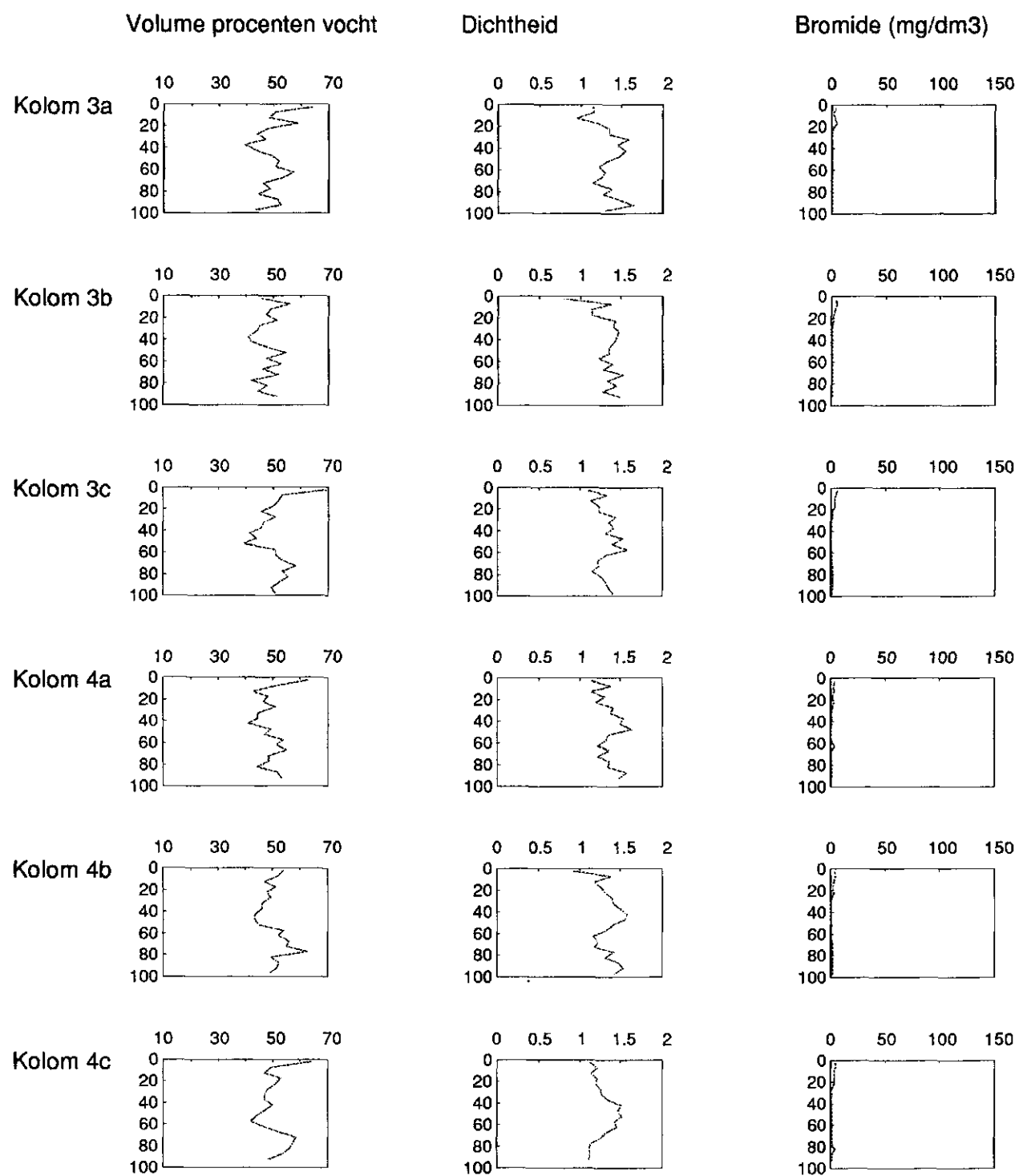
Vijfde bemonstering De Vlierd 26-8-92



Zesde bemonstering De Vlierd 20-4-93



Zesde bemonstering De Vlierd 20-4-93



Zesde bemonstering De Vlierd 20-4-93

