

32/446 (167) 2^{er}

**Preferent transport van water en opgeloste stoffen in een waterafstotende
duinzandgrond bij Ouddorp (ZH)**

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

**W. Hamminga
L.W. Dekker**

Rapport 167

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1992

0 3 FEB. 1993

18n 571548

REFERAAT

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.; 35 fig.; 16 tab.

In een waterafstotende duinzandgrond in Ouddorp (ZH) is het gedrag van water en opgeloste stoffen onderzocht. In november 1987 is bromide en borium toegediend. Door de aanwezigheid van preferente stroombanen varieerde het vochtgehalte van de grond in de periode van onderzoek van plek tot plek. Grotere hoeveelheden bromide en borium werden aangetroffen in de preferente banen. Ook in het grondwater varieerden de concentraties bromide en borium zeer sterk. Voor het verkrijgen van een goed gemiddelde blijkt een groot aantal plekken voor grond- en grondwaterbemonsteringen noodzakelijk.

Trefwoorden: vochtgehalte, dichtheid van de grond, variabiliteit, preferente stroombanen, bromideconcentratie, boriumconcentratie, tracer.

ISSN 0927-4499

©1992 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied, Postbus 125, 6700 AC Wageningen. Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu, en de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" 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 en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Project 359

INHOUD	Blz.
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	11
2 LIGGING EN BODEMOPBOUW VAN HET PROEFVELD	13
3 KEUZE VAN TRACER EN WIJZE VAN TOEDIENING	17
4 BEMONSTERING VAN DE GROND EN HET GRONDWATER	19
5 BEPALING VAN DE BROMIDE- EN BORIUMCONCENTRATIE	23
6 BODEMFYSISCH BEPALINGEN	25
7 WATERAFSTOTENDHEID VAN DE GRONDMONSTERS UIT HET PROEFVELD	27
8 METEOGEGEVENS EN GRONDWATERSTAND	29
8.1 Neerslag en verdamping	29
8.2 Verloop grondwaterstand	30
9 DE DICHTHEID VAN DE GROND	33
9.1 De dichtheid van de bemonsterde grondlagen	33
9.2 De variatie van de dichtheid bij de bemonsteringen	33
10 HET VOCHTGEHALTE VAN DE GROND	37
10.1 Veranderingen in het vochtgehalte bij de bemonsteringen	37
10.2 Variatie van het vochtgehalte	37
11 BROMIDE IN DE GRONDMONSTERS	43
11.1 De teruggevonden bromide in het profiel	43
11.2 Transport van bromide door de bodem	45
11.3 Variatie van de bromideconcentratie	51
12 BORIUM IN DE GRONDMONSTERS	53
12.1 De teruggevonden borium in het profiel	53
12.2 Transport van borium door de bodem	60
12.3 Variatie van de boriumconcentratie	61
13 BROMIDE EN BORIUM IN HET GRONDWATER	63
13.1 Mogelijkheden van grondwaterbemonstering in de diverse buizen	63
13.2 Het verloop van de gemiddelde bromide- en boriumconcentratie in het grondwater	65
13.3 Variatie van de bromide- en boriumconcentratie in het grondwater	67
14 CONCLUSIES	69
LITERATUUR	71

Figuren

1	Ligging van het proefveld bij Ouddorp op Goeree	13
2	Bodemprofiel van het proefveld	14
3	Overzicht van de besproeiing met de spuitboom en de plaats van de grondwaterstandsbuizen	17
4	Het toedienen van de tracer met de spuitboom	18
5	Hoogtelijnenkaart van het proefveld	19
6	De ligging van de bemonsteringsstroken binnen het proefveld	20
7	Locatie van de grondwaterstandsbuizen en de plekken van grondbemonstering	20
8	Het inbrengen van de grondkolomcilinder en gebruik van de loopplanken	22
9	Bemonstering van de grondkolom	22
10	Waterretentiekaracteristieken van vijf bodemlagen uit het proefveld	25
11	Doorlatendheidskaracteristieken van drie bodemlagen uit het proefveld	26
12	Bepaling van de mate van waterafstotendheid met de waterdruppeltest	27
13	De relatieve frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van de zandmonsters in negen lagen van het proefveld	28
14	De hoeveelheid neerslag per dag op het proefveld	29
15	Maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met de gegevens over een periode van dertig jaar	30
16	De potentiële verdamping, de neerslag en het grondwaterstandsverloop gedurende de periode van onderzoek	31
17	Verloop van de dichtheid van de grond bij de bemonsteringen tussen november 1987 en mei 1988	34
18	Het vochtgehalte in het bodemprofiel op de bemonsteringsdagen vergeleken met de situatie op de dag van tracertoediening	38-39
19	Bromide in de laag van 0-69 cm elf dagen na tracertoediening	43
20	Verband tussen de hoeveelheid bromide in de laag van 0-69 cm en het aantal mm vocht in de laag van 0-13 cm, elf dagen na tracertoediening	44
21	Het verloop van de hoeveelheid bromide in het profiel bij elf grondkolombemonsteringen	46-47
22	Het verloop van de hoeveelheid bromide in de verschillende lagen van het profiel	48-49
23	Ruimtelijke weergave van de hoeveelheid bromide in het profiel bij een toename van de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening	50
24	Borium in de laag van 0-69 cm elf dagen na tracertoediening	53
25	Verband tussen de hoeveelheid borium in de laag van 0-69 cm en het aantal mm vocht in de laag van 0-13 cm, elf dagen na tracertoediening	54
26	Het verband tussen de hoeveelheid bromide en borium in de laag van 0-69 cm, elf dagen na tracertoediening	54
27	Het verloop van de hoeveelheid borium in het profiel bij elf grondkolombemonsteringen	56-57
28	Het verloop van de hoeveelheid borium in de verschillende lagen van het profiel weergegeven met de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening	58-59
29	Ruimtelijke weergave van de hoeveelheid borium in het profiel bij een toename van de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening	60
30	Grondwaterstandsverloop tijdens de periode van onderzoek en de diepte	

	van het geperforeerde deel van de grondwaterstandsbuizen	63
31	Verloop van de gemiddelde bromideconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten	64
32	Verloop van de gemiddelde boriumconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten	64
33	Verloop van de gemiddelde bromide- en boriumconcentratie in het grondwater gemeten in de buizen geplaatst tot 135 en 165 cm diepte, van 200 tot 411 dagen na tracertoediening	65
34	Verloop van de gemiddelde bromideconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, tot 200 dagen na tracertoediening	66
35	Verloop van de gemiddelde boriumconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, gemeten tot 200 dagen na tracertoediening	66

TABELLEN

1	De bodemopbouw van het proefveld	14
2	Minimale, gemiddelde en maximale dichtheid van de grond (g/cm^3) van twaalf dieptelagen in het proefveld Ouddorp	33
3	Gemiddelde dichtheid van de grond (g/cm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp	34
4	Standaardafwijking van de dichtheid van de grond (g/cm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp	35
5	Variatiecoëfficiënt van de dichtheid van de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp	35
6	Gemiddeld bodemvochtgehalte (vol.%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	37
7	Standaardafwijking van het bodemvochtgehalte (vol.%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	40
8	Variatiecoëfficiënt van het bodemvochtgehalte (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	41
9	Bromide in de laag van 0-69 cm diepte op de verschillende bemonsteringstijdstippen	44
10	Gemiddelde bromideconcentratie in de grond (mg/dm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	50
11	Standaardafwijking van de bromideconcentratie in de grond (mg/dm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	51
12	Variatiecoëfficiënt van de bromideconcentratie in de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	51
13	Borium in de laag van 0-69 cm diepte op de verschillende bemonsteringstijdstippen	55
14	Gemiddelde boriumconcentratie in de grond (mg/dm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	61
15	Standaardafwijking van de boriumconcentratie in de grond (mg/dm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	61
16	Variatiecoëfficiënt van de boriumconcentratie in de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen	62

SAMENVATTING

In de omgeving van Ouddorp (ZH) is het gedrag van water en opgeloste stoffen onderzocht in een waterafstotende duinzandgrond in grasland. In november 1987 is een samengestelde tracer van bromide en borium toegediend op een proefveld van ruim honderd vierkante meter. Na de tracertoediening zijn twaalf grondbemonsteringen uitgevoerd op telkens twintig plekken. De grondmonsters zijn genomen met een grondkolomcilinder tot een diepte van 93 cm. Aan de monsters is de mate van waterafstotendheid, de dichtheid van de grond, het bodemvochtgehalte en de bromide- en boriumconcentratie bepaald. In een groot aantal grondwaterstandsbuizen, die reikten tot vijf verschillende diepten, zijn wekelijks grondwatermonsters genomen voor de bepaling van de bromide- en boriumconcentratie.

Uit het onderzoek naar de mate van waterafstotendheid van de monsters, waarbij per dieptelaag steeds 240 monsters zijn onderzocht, blijkt dat de bemonsterde zandgrond maximaal tot 53 cm diepte waterafstotend is. Plaatselijk komt al op 37 cm diepte goed bevochtigbaar zand voor. Vooral de humushoudende bovengrond van 0-13 cm en het daaronder liggende humusarme zand tot 29 cm diepte zijn op vele plaatsen in de onderzochte proefplek zeer sterk tot extreem waterafstotend.

De gemiddelde dichtheid van de grond neemt in het onderzochte duinzandprofiel toe tot een diepte van 77 cm. In de zodelaag bedraagt de gemiddelde dichtheid van de grond $0,78 \text{ g/cm}^3$ en in de laag van 69-77 cm diepte $1,63 \text{ g/cm}^3$. Dieper in het profiel is de dichtheid van de grond vaak weer geringer door de aanwezigheid van venige laagjes. Vooral in de bemonsterde lagen tussen 13 en 69 cm is de variatie in dichtheid van de grond zowel van plek tot plek als van bemonstering tot bemonstering zeer gering. De gemiddelde standaardafwijking bedraagt hierbij slechts $0,03 \text{ g/cm}^3$ en de gemiddelde variatiecoëfficiënt zelfs minder dan 2 procent.

Door de aanwezigheid van preferente stroombanen varieerde het vochtgehalte van de grond in de periode van onderzoek van plek tot plek. De standaardafwijking bedroeg in sommige lagen soms ruim 9 vol.%. De variatiecoëfficiënt haalde regelmatig de 40 en bedroeg maximaal zelfs 72 procent.

Bij de eerste bemonstering na de tracertoediening werd in de laag van 0-69 cm in de grondkolommen gemiddeld $84,1 \text{ mg/dm}^2$, ofwel 99,3% van de toegediende hoeveelheid bromide teruggevonden. De variatie tussen de grondkolommen was echter zeer groot; de minste hoeveelheid bedroeg 34 mg/dm^2 en de grootste hoeveelheid 148 mg/dm^2 , terwijl een standaardafwijking van zelfs 32 mg/dm^2 voorkwam. Grottere hoeveelheden bromide werden aangetroffen in kolommen waarbij in de laag van 0-13 cm diepte hogere vochtgehalten voorkwamen, als gevolg van preferente banen. Bij de derde bemonstering, zeventien dagen na de tracertoediening kwam al bromide in het verzadigde deel van het profiel voor. In deze zeventien dagen was in totaal 88 mm neerslag gevallen en steeg de grondwaterstand van 120 naar 68 cm - mv. Bij de zevende bemonstering, 81 dagen na de tracertoediening, stond het grondwater op 53 cm - mv en kwam nagenoeg alle bromide in het verzadigde deel van het profiel voor. Tegen de verwachting in blijkt

dat ook in het verzadigde deel van het profiel een zeer grote variatie in de bromideconcentratie voorkomt. Uit de negende bemonstering blijkt dat na het dalen van het grondwater naar 85 cm - mv de gemiddelde hoeveelheid bromide tussen 61 en 85 cm diepte weliswaar is afgenomen, maar dat de variatie nog uitermate groot is. Bij de drie laatste bemonsteringen is de bromide praktisch geheel uit het bemonsterde profiel verdwenen.

Bij de eerste bemonstering na de tracertoediening werd in de laag van 0-69 cm in de grondkolommen gemiddeld $31,0 \text{ mg/dm}^2$, ofwel 72% van de hoeveelheid borium teruggevonden. De variatie was hierbij zeer groot met een standaardafwijking van 15 mg/dm^2 en een variatiecoëfficiënt van 49%. Dat het percentage teruggevonden borium lager is dan dat van bromide is mogelijk het gevolg van adsorptie van borium aan ijzer- en aluminium-oxyden in de grond. Evenals dit het geval is bij bromide hangt ook de hoeveelheid borium in de grondkolommen duidelijk samen met de hoeveelheid vocht in de bovenste dertien centimeter. Bij de zevende bemonstering kwam nagenoeg alle borium in het verzadigde deel van het profiel voor. Bij deze bemonstering en ook bij de twee bemonsteringen daarna, toen inmiddels de grondwaterstand weer gedaald was, kwam een zeer grote variatie in de boriumconcentratie voor. Bij de elfde en twaalfde bemonstering is de borium nagenoeg uit het bemonsterde profiel verdwenen.

In de periode van 14 tot 60 dagen na de tracertoediening kwam de hoogste concentratie bromide en borium in het bovenste deel van het grondwater voor en de laagste concentratie in het diepere grondwater. In tegenstelling hiermee kwamen 100 dagen na tracertoediening juist in het diepere grondwater de hoogste en in het ondiepere grondwater de laagste concentratie bromide en borium voor. In het diepere grondwater werd overigens nog tot meer dan vierhonderd dagen na de toediening bromide en borium in het grondwater aangetroffen. Op alle bemonsteringsdagen komt van plaats tot plaats een grote variatie in de bromide- en boriumconcentratie in het grondwater voor. Uit alle metingen aan het grondwater is duidelijk gebleken dat voor het verkrijgen van een goed gemiddelde een groot aantal meetpunten nodig is, omdat op ieder moment vlak naast elkaar zowel hoge als lage concentraties kunnen voorkomen.

1 INLEIDING

De laatste jaren is gebleken dat de meeste zandbovengronden in Nederland in droge toestand moeilijk zijn te bevochtigen (Dekker, 1988). Ze zijn in geringe of ernstige mate waterafstotend. Veel regenwater verdwijnt in zowel hellende als vlakliggende gebieden met waterafstotende zandgronden via zogenoemde preferente stroombanen in de grond (Dekker e.a., 1991). Deze preferente stroming is het gevolg van instabiele vochtfronten. Hierbij wordt plaatselijk het horizontale vochtfront doorbroken en ontstaan verticale natte banen in de droge ondergrond.

Bij onderzoek naar transport van water en opgeloste stoffen via de onverzadigde zone naar het grondwater worden vaak simulatiemodellen gebruikt. De meeste van deze modellen zijn gebaseerd op de veronderstelling dat de bodem homogeen is. De stroming van water in de onverzadigde zone wordt beschouwd als een uniform proces, waarbij het water verticaal infiltreert en het vochtfront evenwijdig is aan het bodemoppervlak. Recent onderzoek heeft aangetoond dat deze modellen en concepten vaak onvoldoende het fysisch gedrag van water en opgeloste stoffen in waterafstotende zandgronden kunnen voorspellen (Bronswijk e.a., 1990; Van Dam e.a., 1990). Bij verschillende veldexperimenten in zandgronden bleek dat de aan het oppervlak als tracer toegediende bromide veel sneller het grondwater bereikte dan de bestaande modellen aangaven (Hendrickx e.a., 1988; Van Ommen e.a., 1989). Deze experimenten demonstreerden duidelijk de sterke afname van de verblijftijd van een deel van de opgeloste stof in de bodem en dus van de reistijd naar het grondwater, als gevolg van preferente stroming. Hierdoor is het risico voor grondwater-verontreiniging door meststoffen, insecticiden en pesticiden bij deze gronden dan ook groter dan men op grond van homogene infiltratie zou aannemen.

In dit rapport wordt een onderzoek beschreven naar het gedrag van water en opgeloste stoffen in een waterafstotende duinzandgrond in grasland in de omgeving van Ouddorp. In november 1987 zijn bromide en borium als tracer toegediend op een proefveld van 30 meter bij 3,7 meter. De variaties op korte afstand en het verloop in de tijd van het vochtgehalte en de bromide- en boriumconcentratie worden voor een groot aantal dieptelagen beschreven. Deze gegevens zullen bij een verdere uitwerking van de onderzoeksresultaten worden gebruikt voor het valideren en verfijnen van modellen die het transport van water en opgeloste stoffen beschrijven (Ritsema e.a., 1993).

In de hoofdstukken 2 en 3 worden de ligging en bodemopbouw van het proefveld en de wijze van de bromide- en boriumtoediening besproken. De bemonsterings- en bepalingstechnieken worden uiteengezet in de hoofdstukken 4 t/m 6. De resultaten van de mate van waterafstotendheid van de grondmonsters worden gegeven in hoofdstuk 7. De neerslag en verdamping en het verloop van de grondwaterstand komen aan de orde in hoofdstuk 8. De dichtheid en het vochtgehalte van de grond bij de bemonsteringen worden toegelicht in de hoofdstukken 9 en 10. In de hoofdstukken 11 t/m 13 worden tenslotte de resultaten van het verloop van de hoeveelheid bromide en borium in de grond en in het grondwater besproken.

2 LIGGING EN BODEMOPBOUW VAN HET PROEFVELD

Het proefveld ligt bij Ouddorp (ZH) in een duinzandgebied bestaande uit vlakvaaggronden (Stichting voor Bodemkartering, 1967). Zoals op de bodemkaart 1 : 50 000 is aangegeven is een groot deel van het gebied afgegraven (Zn21 ↓). Dit is gedaan omdat humusarme duinzandgronden slechts een beperkte hoeveelheid beschikbaar vocht in de wortelzone hebben en ook de capillaire opstijging vanuit het grondwater beperkt is. Voor een goede groei van de meeste gewassen is daarom een hogere grondwaterstand nodig. Men heeft eertijds door het uitmijnen van de duinzandpercelen onder meer gunstige grondwaterstanden voor de vochtvoorziening gecreëerd. Bij het uitmijnen werd meestal een zandlaag van 20 à 30 cm direct onder de humeuze bovengrond uitgegraven en rondom het perceel op wallen gebracht. Hierdoor werd ook windschade aan de gewassen sterk verminderd.



Fig. 1 Ligging van het proefveld bij Ouddorp op Goeree

Het bemonsterde perceel is in tegenstelling tot de meeste omliggende percelen niet uitgegraven of uitgemijnd (fig. 1). Uniek is ook dat dit perceel nooit met ploeg of spade is bewerkt, waardoor een natuurlijk bodemprofiel voorkomt. De begroeiing bestaat uit een natuurlijke grasvegetatie met onder meer zuring. Het bovenste deel van het profiel



Fig. 2 Bodemprofiel van het proefveld

Tabel 1 De bodemopbouw van het proefveld

Horizont	Diepte (cm - mv)	Omschrijving bodemmateriaal
A1.1	0- 5	Zeer donkerbruin (10YR3/3), kalkloos, weinig, zeer kleiarm, matig fijn zand
A1.2	5- 9	Zeer donkerbruin (10YR3/2), kalkloos, humeus (6 à 8% org. stof), zeer kleiarm, matig fijn zand
C1.1	9- 32	Geelbruin (10YR4,5/3), kalkloos, humusarm, zeer kleiarm, matig fijn zand
C1.2	32- 48	Geelbruin (10YR5,5/3), kalkloos, humusarm, zeer kleiarm, matig fijn zand
C1.3g	48- 75	Licht olijfbuin (2,5Y5/3), kalkloos, humusarm, zeer kleiarm, matig fijn zand, matig tot sterk roestig
C2.1g	75- 110	Lichtgrijs (5Y6/1,5), kalkrijk, humusarm, zeer kleiarm, matig fijn zand, zwakke roest
C2.2g	110- 114	Lichtgrijs (5Y6/1,5), kalkrijk, matig fijn zand met weinig bandje
C2.3g	114- 128	Donkergrijs (5Y4,5/1), matig fijn zand met schelpgruis en koffiegrul (verslagen veen)
G1	128->190	Blauwgroen (5GY4/1), matig fijn zand met schelpen en koffiegrul

bestaat uit kalkloos matig fijn ($M_{50} = 160-180 \mu m$) duinzand en gaat op 75 cm diepte over in kalkrijk matig fijn ($M_{50} = \text{ca. } 185 \mu m$) zeezand. Het bovenste deel van de grond is extreem waterafstotend, terwijl dieper in het profiel de waterafstotendheid sterk afneemt (hoofdstuk 7). De grond in het perceel heeft grondwatertrap VI, met een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) tussen 40 en 80 cm diepte en een gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) van meer dan 120 cm diepte.

De bovenste 5 cm van het profiel bestaat uit een viltige zode. Daaronder komt tot ca. 9 cm diepte humeus zand voor, dieper overgaand in geel humusarm zand met minder dan 3% lutum (fig. 2). De intensiteit van de beworteling van het gras neemt met de diepte af en op 45 cm diepte komt nog slechts een ijle grasbeworteling voor. De wortels van de zuring zijn echter aangetroffen tot meer dan 100 cm diepte. Tussen 90 en 120 cm diepte komt plaatselijk weinig materiaal voor. Een voor dit perceel representatief bodemprofiel is beschreven in tabel 1.

3 KEUZE VAN TRACER EN WIJZE VAN TOEDIENING

Voor het bestuderen van het transport van water en opgeloste stoffen in de bodem is gebruik gemaakt van een samengestelde tracer bestaande uit bromide en borium. De bromide werd als inerte tracer gebruikt omdat het bromide ion een gebiedsvreemd ion is dat geen adsorptie vertoont aan de bodemmatrix waardoor het geschikt is voor de bestudering van bodemfysische transportverschijnselen (Grassia, 1988; Hendrickx e.a., 1988; Butters e.a., 1989; Van Ommen e.a., 1988; Van Dam e.a., 1990). Borium, dat eveneens een gebiedsvreemd ion is, werd als tracer toegediend omdat dit adsorbeert aan de ijzer- en aluminiumoxyden in de bodem (Sims en Bingham, 1967, 1968; McPhail e.a., 1972). Door adsorptie aan bovengenoemde oxyden zou borium een lagere transportsnelheid hebben dan bromide. De toediening van beide stoffen vond plaats door middel van een oplossing van KBr en H_3BO_3 in gedemineraliseerd water.

Op 6 november 1987 werd onder gunstige weersomstandigheden (geen neerslag en weinig wind) de traceroplossing op het proefveld gespoten. Het proefveld heeft een lengte van 30 meter en een breedte van 3,70 meter (fig. 3).

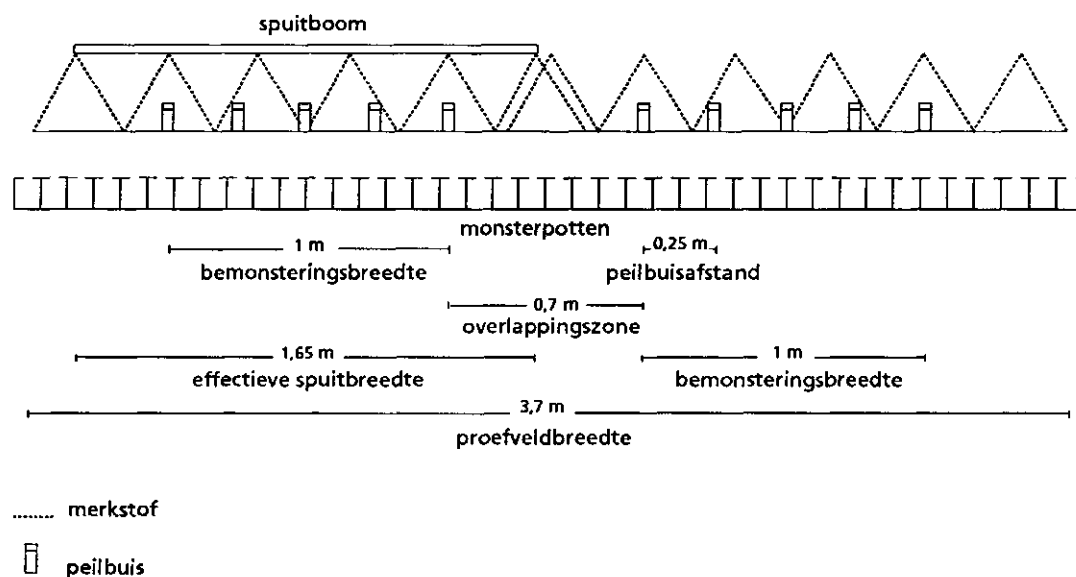


Fig. 3 Overzicht van de besproeiing met de spuitboom en de plaats van de grondwaterstandsbuizen

De bespuiting vond plaats met behulp van een spuitboom met 6 Teejet spuitdoppen (Porskamp en Sonneveld, 1983) bij een loopsnelheid van ongeveer 23 cm/s, terwijl de spuitboom tussen 25 en 30 cm hoogte werd gehouden. De gasdruk in de tank met de spuitoplossing was gedurende het spuiten 3 atm. (Hamminga, 1990). Het proefveld is in twee stroken naast elkaar besproeid, waarbij de effectieve spuitbreedte 1,65 meter bedroeg (fig. 4).



Fig. 4 Het toedienen van de tracer met de spuitboom

Om de hoeveelheid en de verdeling van de opgebrachte tracer te kunnen vaststellen werden aan beide uiteinden van het proefveld 40 potten van 1 liter op maaiveldhoogte ingegraven. Na het drogen van de potten werd 500 ml gedemineraliseerd water toegediend en konden de concentraties van bromide en borium worden gemeten. Gemiddeld is er 42,43 mg borium en 84,73 mg bromide per vierkante decimeter op het proefveld terecht gekomen. De variatiecoëfficiënt is hierbij respectievelijk 7,60 % en 5,99 %.

4 BEMONSTERING VAN DE GROND EN HET GRONDWATER

Vóór de tracertoeediening is de hoogteligging van het proefveld gemeten. Het proefveld heeft een gemiddelde hoogte van 2,10 m boven NAP, waarbij het laagste punt op 2,03 m en het hoogste punt op 2,20 m ligt. De hoogtelijnen van het proefveld zijn weergegeven in figuur 5.

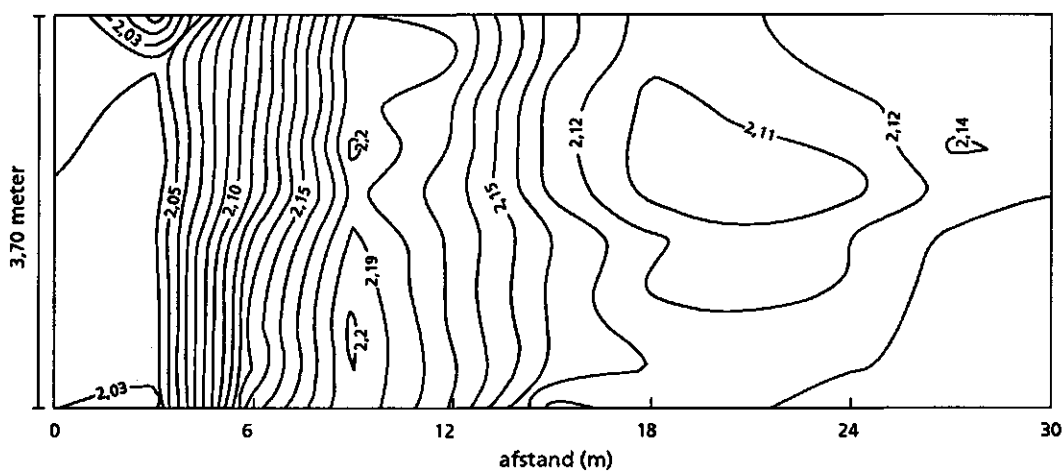


Fig. 5 Hoogtelijnenkaart van het proefveld

De grond en het grondwater werden steeds binnen de stroken van de effectieve spuitbreedte bemonsterd (fig. 3). Het proefveld is daarom opgedeeld in vijf lengtestroken waarbij in twee stroken wel en in drie stroken, de overlappingszone en de beide randen, geen monsters zijn genomen (fig. 6). Voorts zijn beide bemonsteringsstroken in de lengte opgedeeld in 60 stukken van een halve meter. Van deze 120 stukken zijn er 30 gebruikt voor het plaatsen van grondwaterstandsbuizen. Voor de keuze van de locatie is gebruik gemaakt van een lotingsprogramma. Op deze plekken zijn steeds 5 buizen op een afstand van 25 centimeter naast elkaar geplaatst (fig. 7). De buizen reikten tot een diepte van respectievelijk 75, 95, 115, 135 en 165 centimeter beneden maaiveld. De onderste 20 centimeters van de buizen waren voorzien van perforaties.

Op enkele meters afstand van het proefveld werden op 5 plaatsen eveneens 5 buizen geplaatst voor de bepaling van de achtergrondconcentraties van bromide en borium. Tevens bood dit de mogelijkheid om een eventueel wegstromen van de tracer uit het proefveld vast te stellen. De hoogten van de bovenkant van de buizen ten opzichte van maaiveld en NAP zijn ingemeten. De grondwaterstand in de buizen is op de dagen van

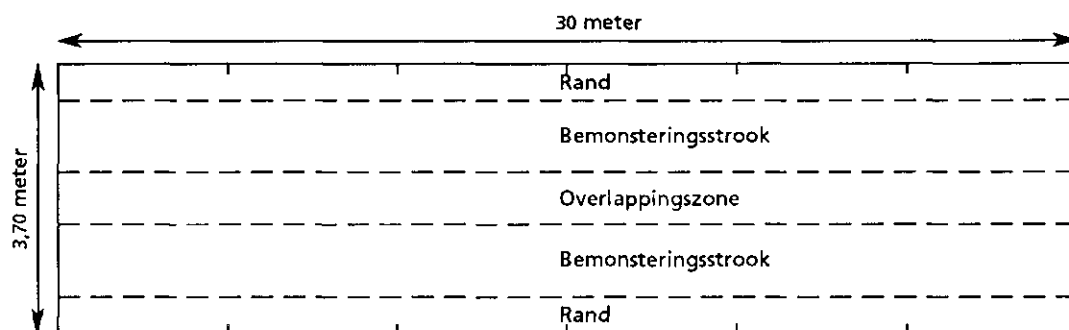


Fig. 6 De ligging van de bemonsteringsstroken binnen het proefveld

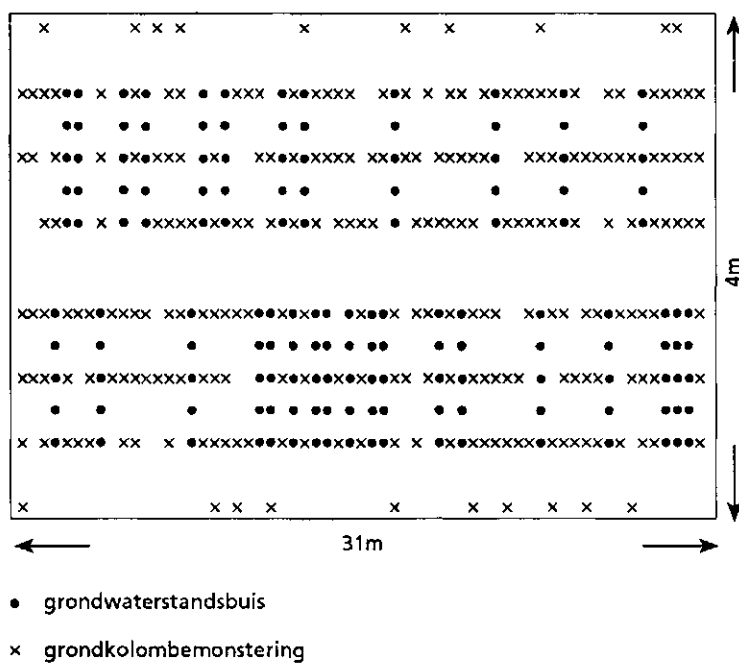


Fig. 7 Locatie van de grondwaterstandsbuizen en de plekken van grondbemonstering

de grond- en grondwaterbemonsteringen gemeten met een grondwaterklokje. Uit de buizen waarin voldoende water stond zijn gemiddeld eenmaal per week monsters genomen voor de bepaling van de concentratie van bromide en borium. De buizen zijn in de periode van 4 november 1987 tot 21 december 1988 in totaal 57 keer bemonsterd. De watermonsters zijn opgepompt door het aanbrengen van onderdruk in een vacuumbestendig vat volgens de 'zuigmethode' (Van den Toorn, 1981).

De grondmonsters zijn genomen met de grondkolomcilinder (Domhof en Van Soesbergen, 1982; Hendrickx e.a., 1991; Ritsema e.a., 1991). De cilinder heeft een lengte van 1,2 meter en een binnendiameter van 0,1 meter. Met behulp van een pneumatische hamer wordt de cilinder met een min of meer constante snelheid de grond ingedreven (fig. 8). Door bij de grond- en grondwaterbemonsteringen gebruik te maken van verhoogde loopplanken zoals die te zien zijn op figuur 8, konden de bemonsteringsstroken worden overbrugd en werd beïnvloeding van de metingen door betreding van het proefveld voorkomen. Binnen de bemonsteringsstroken zijn plekken geloot voor het nemen van grondkolommen op plaatsen waar geen grondwaterstandsbuizen zijn geplaatst. Per bemonstering zijn steeds 20 grondkolommen genomen. In totaal zijn 12 bemonsteringen uitgevoerd in de periode van 6 november 1987 tot 31 mei 1988. Aanvankelijk is bemonsterd na neerslagintervallen van ca. 30 mm, later na intervallen van ca. 50 mm.

Nadat de cilinder uit de grond is getrokken en horizontaal op een workmate is gelegd, wordt de afneembare zijde gedemonteerd. De grondkolom in de cilinder werd vanaf 5 centimeter diepte aaneensluitend bemonsterd met behulp van ringen met een inhoud van 205 cm³ (fig. 9). De bovenste 5 centimeter, de zode, werd apart bemonsterd en heeft een volume van 297 cm³. Zo werden de lagen 0-5 cm, 5-13 cm, 13-21 cm, 21-29 cm, 29-37 cm, 37-45 cm, 45-53 cm, 53-61 cm, 61-69 cm, 69-77 cm, 77-85 cm en 85-93 cm bemonsterd. De grond werd in het veld vanuit de ringen in monsterpotten gedaan en in het laboratorium gewogen, gedurende 3 dagen gedroogd bij een temperatuur van 60°C en nogmaals gewogen. Hierna konden dichtheid en vochtgehalte van de monsters worden berekend. Aan de gedroogde monsters werd de mate van waterafstotendheid bepaald met de 'waterdrop penetration time' (WDPT) test (Krammes and DeBano, 1965). Hierbij worden drie druppels gedemineraliseerd water op de luchtdroge monsters gebracht en vervolgens wordt de tijd gemeten waarin de druppels worden geabsorbeerd. Hierna zijn de grondmonsters gebruikt voor het bepalen van de bromide- en boriumconcentratie.

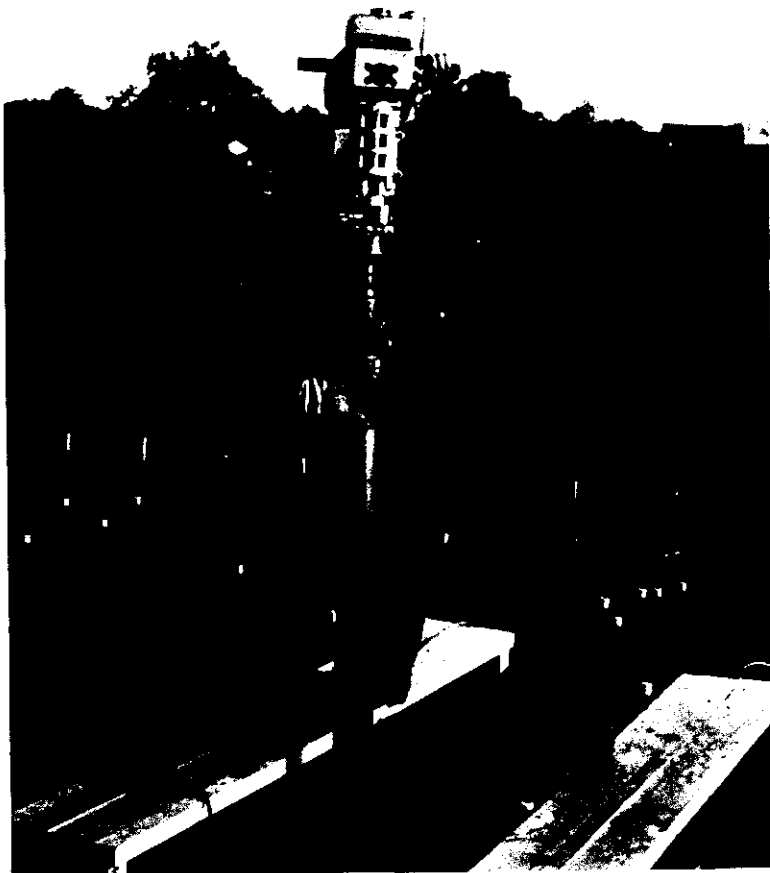


Fig. 8 Het inbrengen van de grondkolomcilinder en gebruik van de loopplanken

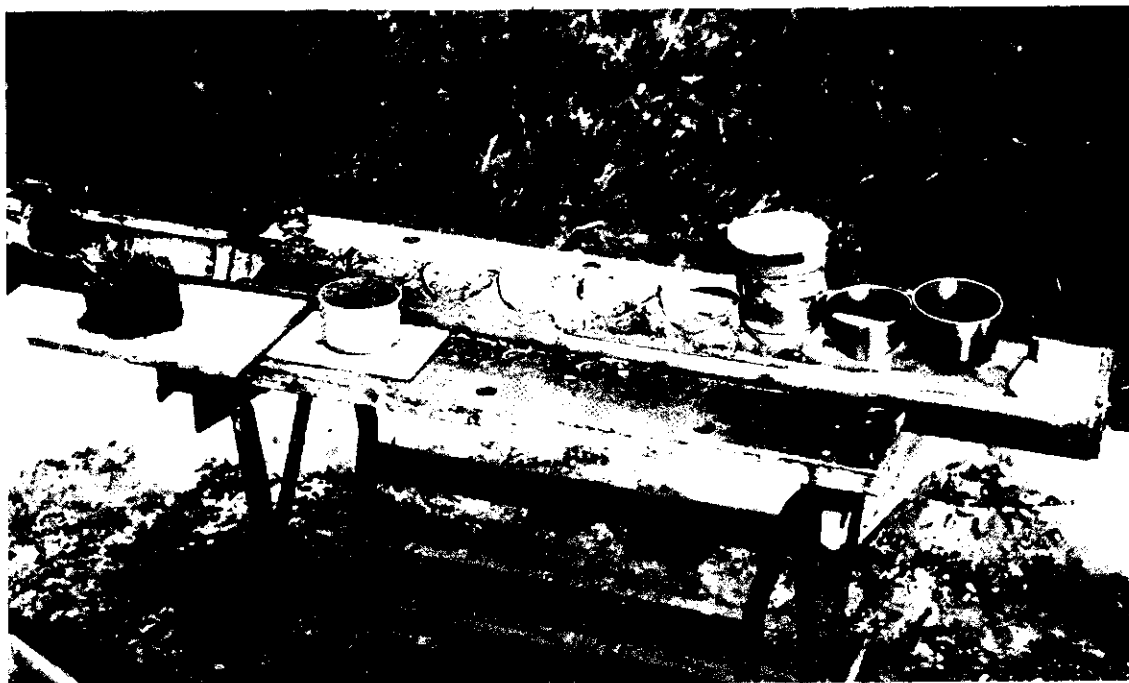


Fig. 9 Bemonstering van de grondkolom

5 BEPALING VAN DE BROMIDE- EN BORIUMCONCENTRATIE

Om bromide en borium op te lossen zijn de grondmonsters geschud met gedemineraliseerd water. Aan de zodemonsters werd 400 ml toegevoegd en aan de overige monsters 200 ml. De grondwatermonsters en de extracten van de grondmonsters zijn voor de bepalingen gefiltreerd over een vouwfilter, om vervuiling van de meetapparatuur zoveel mogelijk te voorkomen.

Voor de bromidebepaling is van alle monsters een deel gefiltreerd door een 0,45 µm membraanfilter. Om storende a-polaire stoffen in de oplossing te verwijderen werden de monsters door een Baker 10 SPE extractiesysteem met een octadecyl (C18) vulling geleid. Voor de analyse werd de HPLC-methode (High Performance Liquid Chromatography) toegepast. Hierbij wordt het geïnjecteerde monster met behulp van een hogedrukpomp via een vloeibare fase (eluens) door een Ionospher-A scheidingskolom geperst. Het eluens is een fosfaatbuffer bestaande uit 0,1 M K_2SO_4 en 0,02 M KH_2PO_4 (Harmsen, 1982; 1986). De stoffen in het monster worden gescheiden, waarna de bromide kan worden gedetecteerd met een spectrofotometer bij een golflengte van 210 nm (Hamminga en Bouter, 1990). De detectielimieten voor bromide liggen bij deze methode tussen 0,7 en 120 mg.l⁻¹.

De boriumconcentraties zijn bepaald in het andere deel van de grondwatermonsters en van de extracten van de grondmonsters. De analyse van borium gaat uit van het principe van atomaire emissie waarbij gebruik gemaakt wordt van de inductief gekoppeld plasma/atomaire emissie spectrofotometer (ICP/AES), zoals onder andere is beschreven door Hamminga (1985). Door energietoevoer wordt het boriumatoom in aangeslagen toestand gebracht. Bij het terugvallen van het atoom naar de begintoestand wordt licht uitgezonden van een specifieke golflengte van 249,77 nm. De hoeveelheid energie die tijdens deze emissie vrijkomt, wordt gemeten met een monochromator en is een maat voor de boriumconcentratie in de oplossing (Hamminga e.a., 1990). Met gedemineraliseerd water als matrix ligt het meetbereik van deze methode voor borium tussen 0 en 1000 mg.l⁻¹.

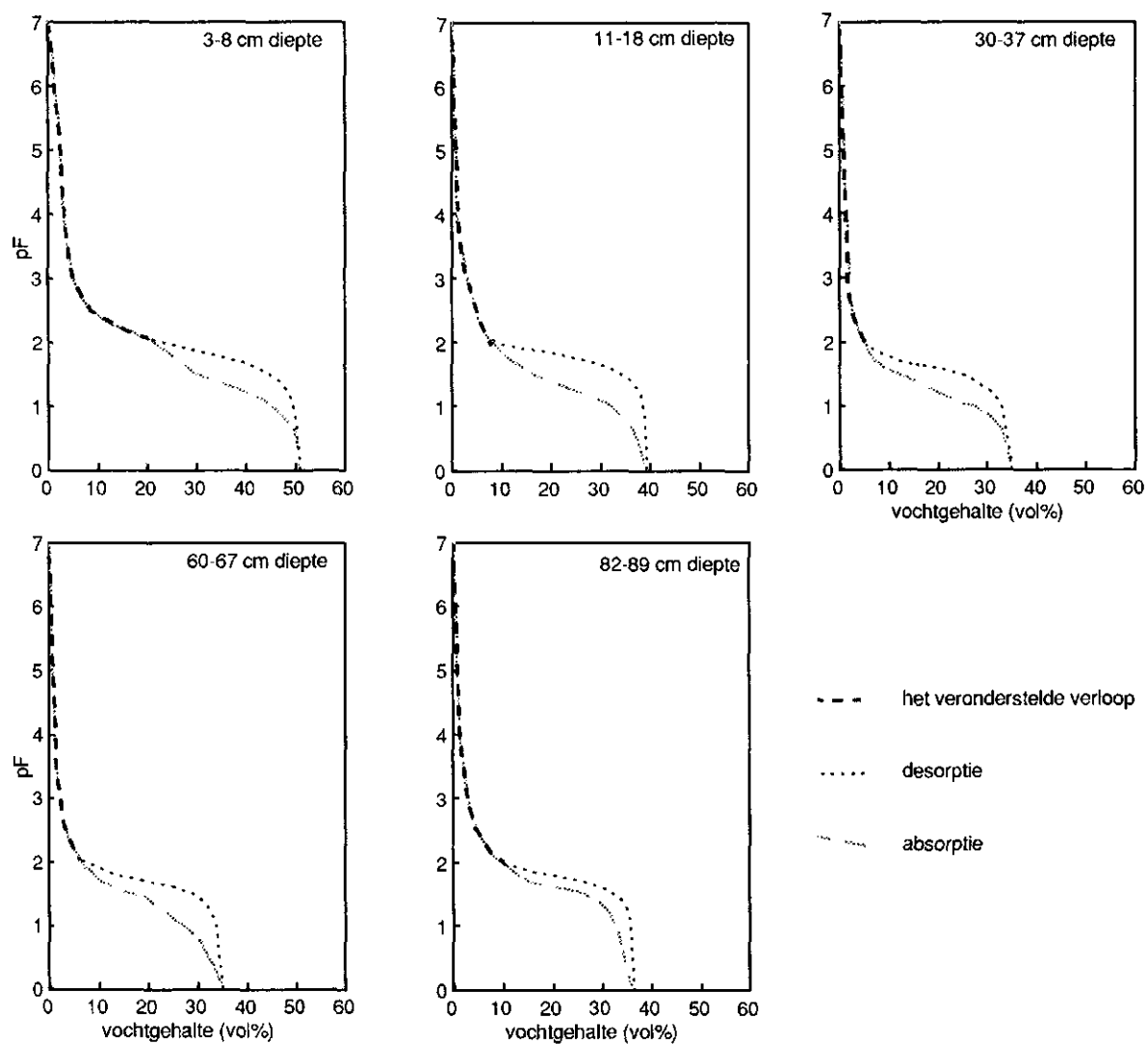


Fig. 10 Waterretentiekarakteristieken van vijf bodemlagen uit het proefveld

6 BODEMFYSISCH BEPALINGEN

De bodemfysische karakteristieken pF en $k(\theta)$ van de bodemhorizonten zijn van essentieel belang voor simulatiemodellen die het transport van water en opgeloste stoffen in de bodem beschrijven. De waterretentiekarakteristiek, ofwel pF -curve, is van vijf bodemlagen in drievoud gemeten volgens de 'hangende waterkolom' methode (Veerman en Stolte, 1991). Voor deze bepaling zijn monsters genomen in stalen ringen met een inhoud van 300 cm^3 uit de lagen van 11-18, 30-37, 60-67 en 82-89 cm beneden maaiveld en met een inhoud van 100 cm^3 uit de laag van 3-8 cm. De desorptie is bepaald van verzadiging tot een drukhoogte van -100 cm ($pF\ 2,0$). Vanaf dit punt is de absorptie bepaald tot het monster weer geheel verzadigd was. In figuur 10 zijn van de vijf bodemlagen de waterretentiekarakteristieken gegeven. Het is een weergave van de gemiddelden van de bepalingen in triplo, waarvan overigens de afzonderlijke meetpunten niet ver uiteen liggen. In de figuur is te zien dat er in alle lagen duidelijk sprake is van hysteresis. Deze hysteresis is het sterkst in de laag van 11-18 cm diepte en het geringst in de laag van 82-89 cm diepte. Zo komt bijvoorbeeld in de laag van 11-18 cm bij $pF\ 1,5$ bij desorptie een volumetrisch vochtgehalte voor van 37,5 % en bij absorptie van 16%. Het niet gemeten, maar veronderstelde verloop van het vochtgehalte tussen $pF\ 2,0$ en $pF\ 7,0$, is in de curven van figuur 10 eveneens aangegeven.

Van de lagen 0-20, 10-30, 25-45, 55-75 en 75-95 cm - mv werd de verzadigde doorlatendheid bepaald. Hiertoe zijn in drievoud monsters genomen in metalen cilinders met een hoogte en diameter van 20 cm. De gemeten gemiddelde verzadigde doorlatendheid van de grondkolommen was in volgorde van toenemende diepte 118, 307, 407, 498 en 233 cm per dag. De standaardafwijking bedroeg hierbij respectievelijk 22, 31, 55, 43 en 53 cm per dag. Na het bepalen van de verzadigde doorlatendheid is aan dezelfde grondkolommen de onverzadigde doorlatendheid bepaald in het traject van verzadiging tot -12 cm met de 'korsten' methode (Stokkermans en Vos, 1987).

In het verdere onverzadigde traject is de doorlatendheid gemeten met de 'verdamplingsmethode' zoals die o.a. is beschreven door Veerman en Stolte (1991). Hiervoor zijn uit een aantal van de grondkolommen 8 cm hoge ringmonsters genomen met een inhoud van 667 cm^3 . In figuur 11 zijn van de bodemlagen 0-8 cm, 30-38 cm en 80-88 cm de doorlatendheidskarakteristieken weergegeven.

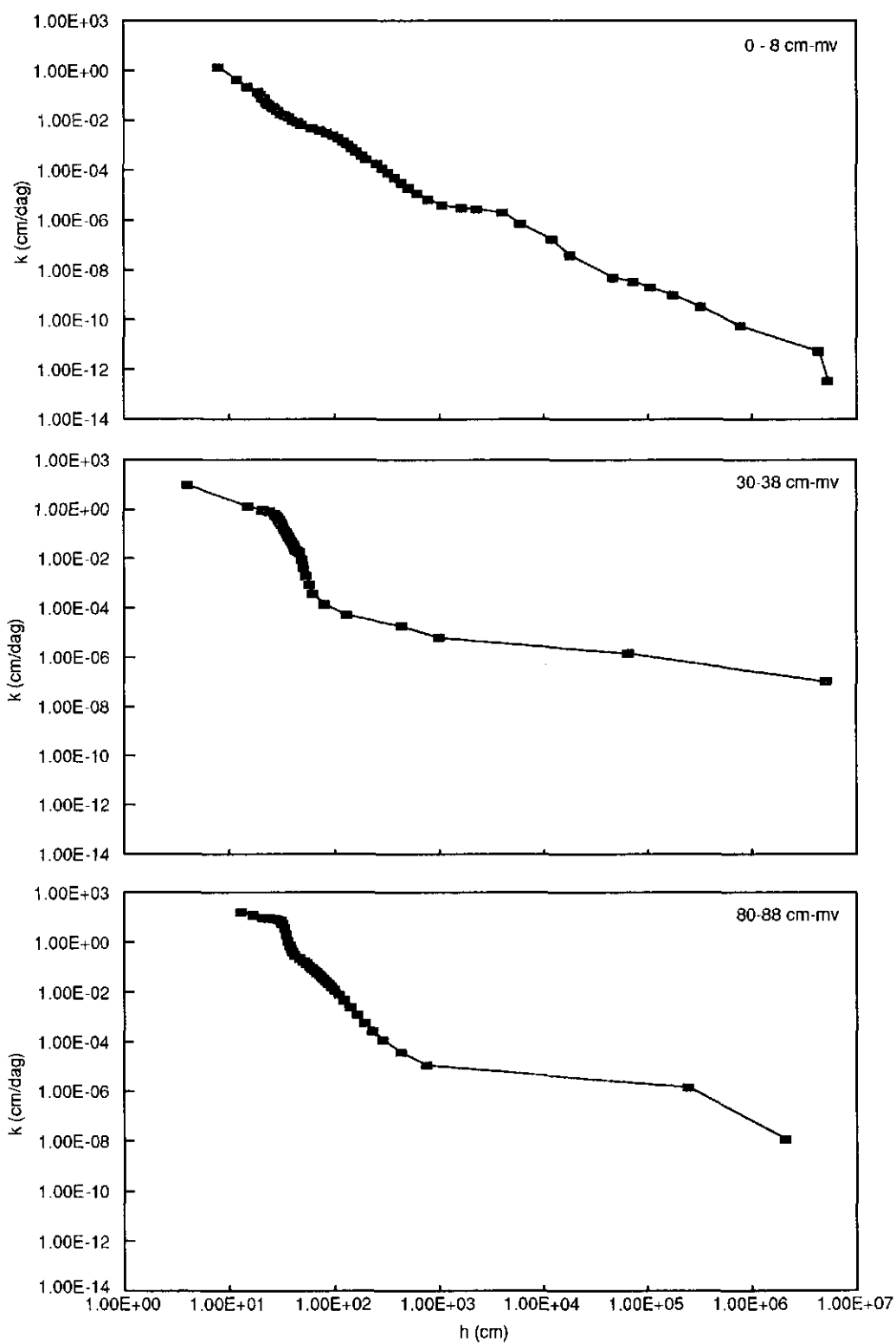


Fig. II Doorlatendheidskarakteristieken van drie bodemlagen uit het proefveld

7 WATERAFSTOTENDHEID VAN DE GRONDMONSTERS UIT HET PROEFVELD

Alle uit het proefveld genomen grondmonsters zijn na droging bepaald op de mate van waterafstotendheid met de waterdruppeltest. Hierbij worden met een pipet drie druppels gedemineraliseerd water op het vlakgemaakte zandmonster aangebracht (fig. 12). Vervolgens wordt de tijd gemeten waarin de druppels door het zand worden opgenomen. Bij goed te bevochtigen gronden verdwijnen de druppels meteen, bij waterafstotende gronden blijven de bolvormige druppels langere tijd op het oppervlak staan. Gronden worden goed bevochtigbaar genoemd als de druppels in minder dan vijf seconden worden opgenomen. Als de druppels langer dan vijf seconden blijven staan is de grond waterafstotend: bij 5-60 s matig, bij 60-600 s sterk, bij 600-3600 s zeer sterk en bij meer dan 3600 s (1 uur) extreem waterafstotend (Dekker and Jungerius, 1990).



Fig. 12 Bepaling van de mate van waterafstotendheid met de waterdruppeltest

De grondmonsters uit de lagen 0-5 en 5-13 cm diepte zijn vrijwel allemaal extreem waterafstotend (fig. 13). Ook in de lagen van 13-37 cm diepte zijn de meeste monsters extreem waterafstotend. Vooral in de laag van 37-45 cm komt een zeer grote spreiding in de mate van waterafstotendheid voor. Vanaf 53 cm diepte zijn alle grondmonsters goed bevochtigbaar. De diepte van de waterafstotende lagen is hierbij ongeveer gelijk aan de diepte van de beworteling van het gras.

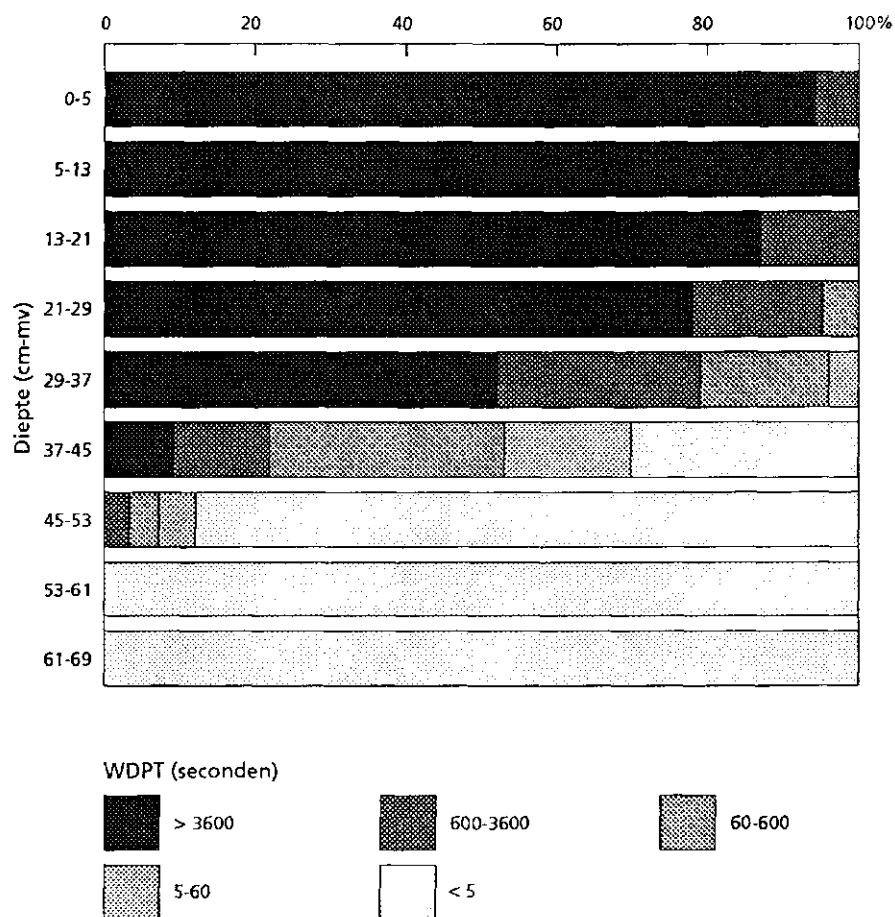


Fig. 13 De relatieve frequentieverdeling van de mate van waterafstotendheid van de zandmonsters in negen lagen van het proefveld. Van iedere laag zijn 240 monsters bepaald.

8 METEOGEGEVENS EN GRONDWATERSTAND

8.1 Neerslag en verdamping

Voor de meting van de neerslag zijn drie regenmeters bij het proefveld geplaatst. Bij ieder veldbezoek werden de regenmeters afgelezen en geleegd. Met de gegevens van het nabijgelegen meteorologisch waarnemingsstation Ouddorp zijn de hoeveelheden neerslag op het proefveld omgerekend naar dagwaarden. Voor de periode van 6 november 1987 (dag van tracertoediening = dag 0) tot 9 december 1988 (dag 399) staan deze waarden weergegeven in figuur 14.

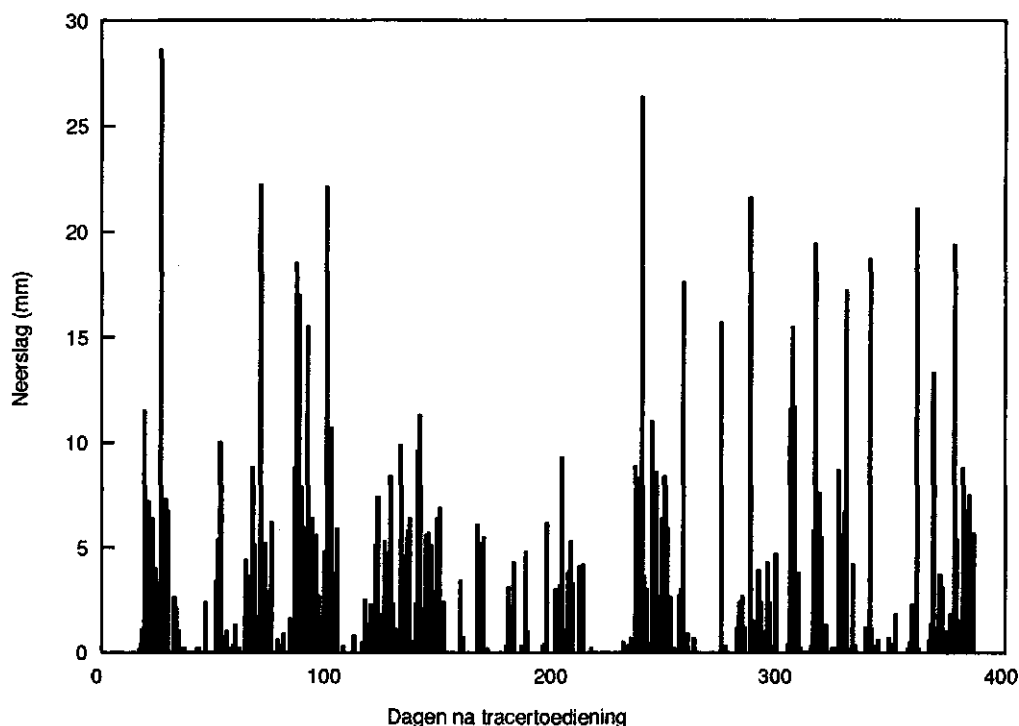


Fig. 14 De hoeveelheid neerslag per dag op het proefveld

In figuur 15 is het maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort in de periode van onderzoek vergeleken met het langjarig gemiddelde van de periode 1951-1980, waarbij gebruik is gemaakt van de neerslaggegevens van het station Ouddorp en de verdampingsgegevens van het station Vlissingen (KNMI, 1987, 1988).

Voor de berekening van de verdamping is de open waterverdamping met een factor 0,8 vermenigvuldigd. Het neerslagoverschot in de maanden september en oktober 1987 is ongeveer gelijk aan het langjarig gemiddelde. Met uitzondering van de maand december steeg het neerslagoverschot in de maanden november 1987 tot en met maart 1988 duidelijk boven het langjarig gemiddelde uit. In januari 1988 bedroeg het neerslagoverschot zelfs meer dan het dubbele van de normale waarde.

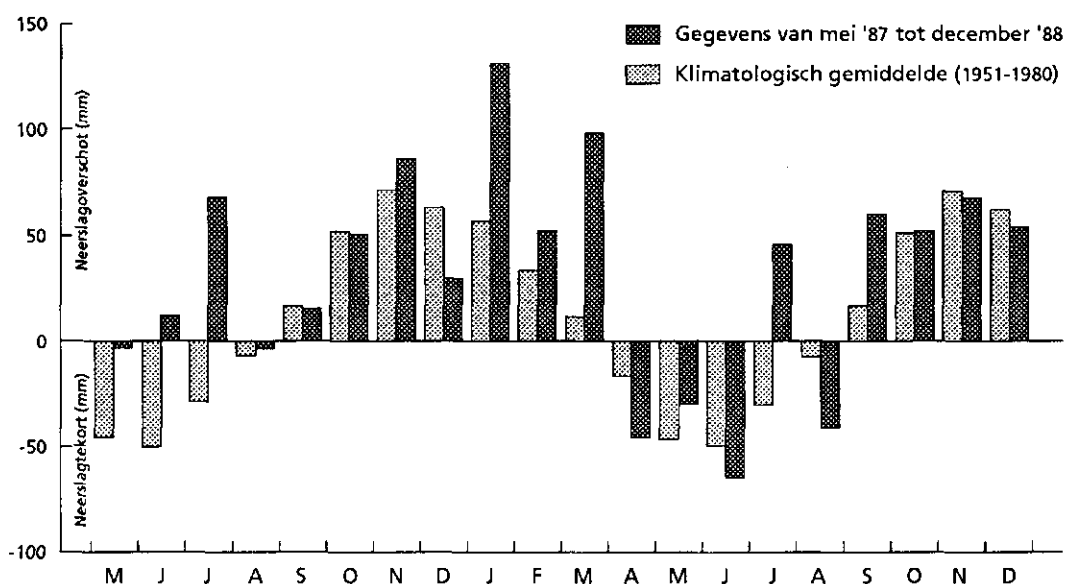


Fig. 15 *Maandelijks neerslagoverschot en neerslagtekort uit de periode van onderzoek vergeleken met de gegevens over een periode van dertig jaar. Voor de neerslag zijn gegevens gebruikt van het weerstation Ouddorp en voor de verdamping van het weerstation Vlissingen.*

8.2 Verloop grondwaterstand

Het verloop van de gemiddelde grondwaterstand in de periode tussen 6 november 1987 en 9 december 1988 is weergegeven in figuur 16c. De hoogste grondwaterstand werd gemeten op 8 februari 1988 op een diepte van 47 cm, de laagste stand van 144 cm - mv werd bereikt op 12 september 1988. Tijdens de eerste 100 dagen na de tracertoediening is er een verband tussen de fluctuatie van de grondwaterstand en de neerslag (fig. 16b en c). In deze periode was de verdamping betrekkelijk laag en had daarom weinig of geen invloed op de grondwaterstand (fig. 16a). Vanaf half februari, vanaf dag 100, hebben de verdamping en de neerslag allebei een grote invloed op het grondwaterstandsverloop.

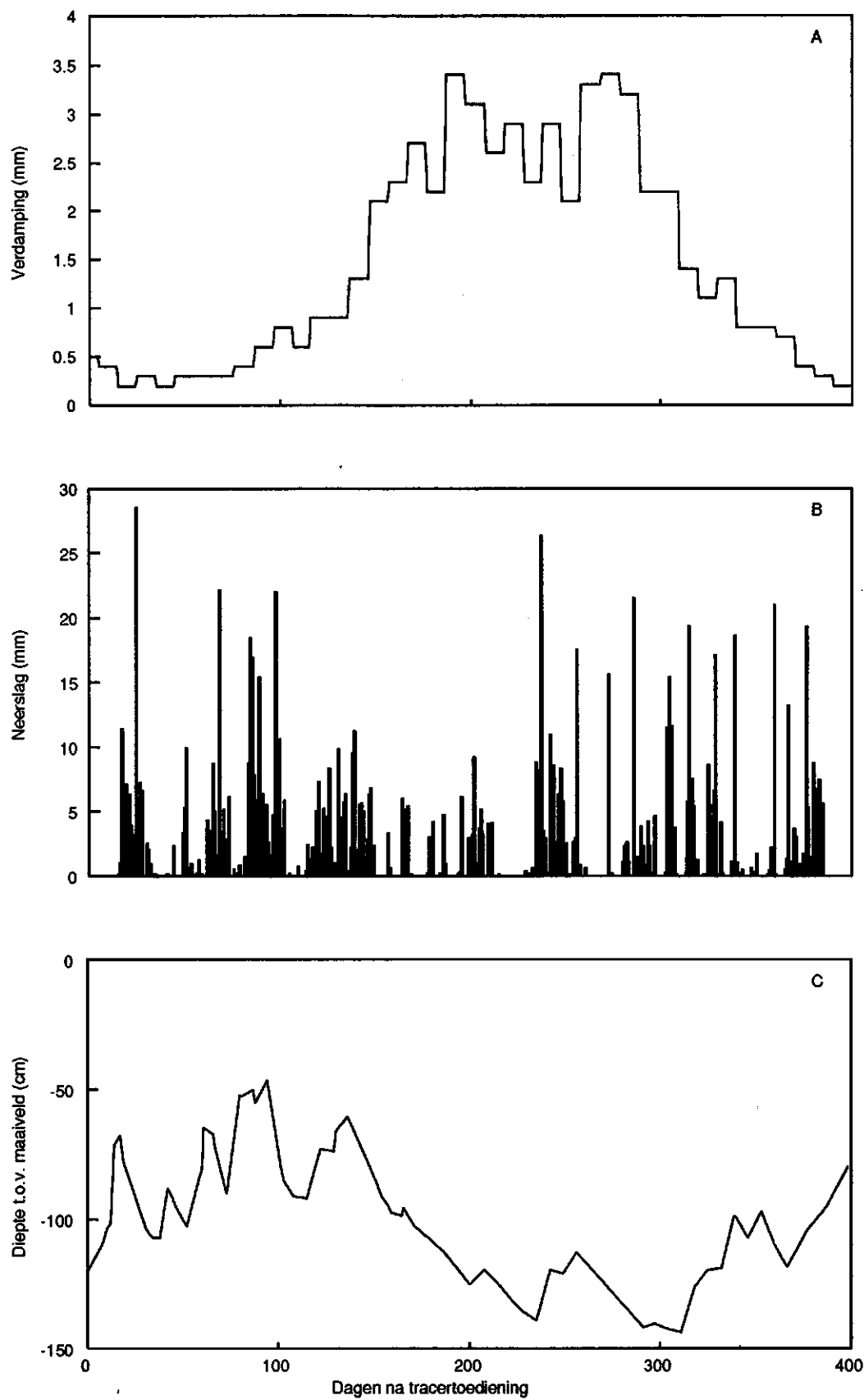


Fig. 16 De potentiële verdamping (a), de neerslag (b) en het grondwaterstandsverloop (c) gedurende de periode van onderzoek

9 DE DICHTHEID VAN DE GROND

9.1 De dichtheid van de bemonsterde grondlagen

De dichtheid van de grond hangt nauw samen met het gehalte aan organische stof. Een hoger organische-stofgehalte gaat gepaard met een lagere dichtheid van de grond. In het proefveld is de bovenste 5 cm humusrijk tot weinig, van 5-9 cm humeus tot humusrijk en dieper humusarm. Na 80 cm diepte komt plaatselijk een weinig laagje voor. De dichtheid van de grond is daarom gering in de twee bovenste en in de diepst bemonsterde lagen (tabel 2). In deze tabel zijn van de twaalf dieptelagen de gemiddelden, de laagst gemeten en de hoogst gemeten waarden van alle monsters van de twaalf bemonsteringen weergegeven. In de laag van 0-5 cm bedroeg de gemiddelde dichtheid 0,78 en kwam een spreiding voor van 0,37 tot 1,23 g/cm³. In de overgangslaag van humusrijk naar humusarm zand varieert de dichtheid tussen 1,24 en 1,57 g/cm³. Vanaf 13 cm diepte neemt de gemiddelde dichtheid geleidelijk toe van 1,53 tot 1,63 g/cm³ op een diepte van 77 cm. Hieronder is de spreiding in de dichtheid groot door het plaatselijk voorkomen van venige laagjes.

Tabel 2 Minimale, gemiddelde en maximale dichtheid van de grond (g/cm³) van twaalf dieptelagen in het proefveld Ouddorp

Diepte (cm - mv)	Minimaal	Gemiddeld	Maximaal
0- 5	0,37	0,78	1,23
5-13	1,24	1,42	1,57
13-21	1,41	1,53	1,63
21-29	1,48	1,56	1,64
29-37	1,42	1,55	1,71
37-45	1,43	1,55	1,66
45-53	1,45	1,57	1,70
53-61	1,45	1,59	1,70
61-69	1,54	1,62	1,69
69-77	1,55	1,63	1,73
77-85	1,53	1,60	1,72
85-93	0,86	1,46	1,77

Het verloop van de gemiddelde dichtheid van de grond in het profiel is weergegeven in figuur 17. Bovendien zijn hierin per dieptelaag de laagst en hoogst gemeten waarden aangegeven.

9.2 De variatie van de dichtheid bij de bemonsteringen

Zoals in tabel 3 is te zien lopen de gemiddelde waarden van de dichtheid van de grond bij de twaalf bemonsteringen niet ver uiteen. Zo varieert deze bijvoorbeeld in de eerste laag van 0,69 tot 0,84, in de laag van 45-53 cm van 1,53 tot 1,63 en in de laag van 77-85 cm van 1,54 tot 1,63 g/cm³. Gedurende de proefperiode bleef de dichtheid van de grond van alle dieptelagen min of meer constant.

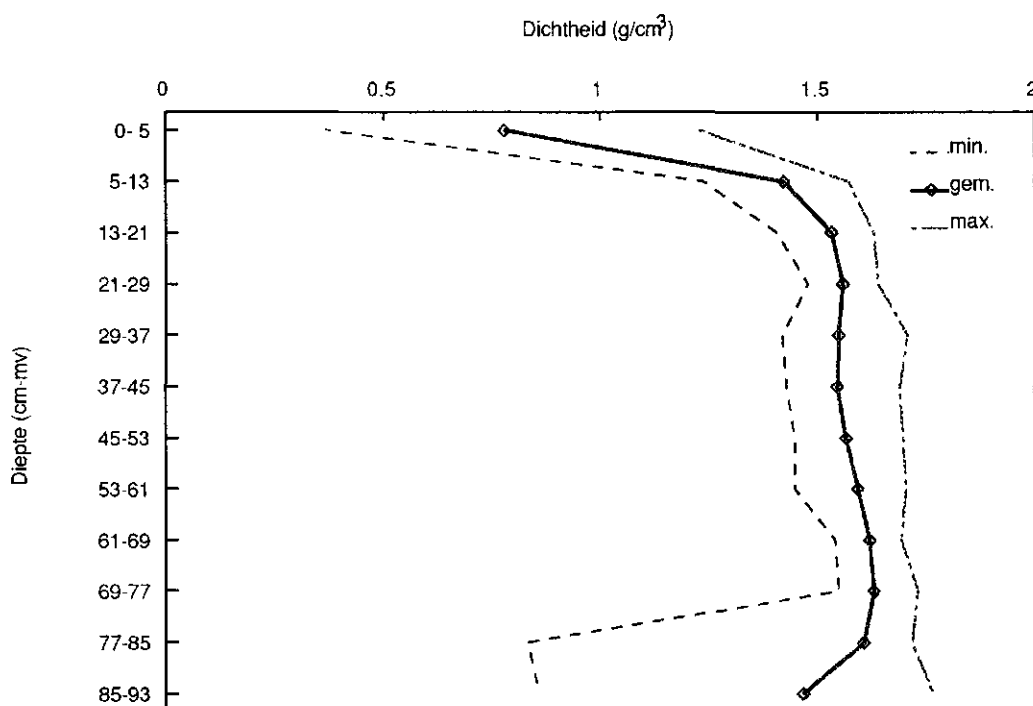


Fig. 17 De dichtheid van de grond als functie van de diepte bij de bemonsteringen tussen november 1987 en mei 1988

Tabel 3 Gemiddelde dichtheid van de grond (g/cm^3) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp

Diepte cm-mv	Bemonstering 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	gem. 1 - 12
0- 5	0,86	0,69	0,82	0,76	0,82	0,74	0,80	0,78	0,70	0,70	0,75	0,85	0,78
5-13	1,43	1,39	1,42	1,43	1,42	1,39	1,45	1,45	1,43	1,43	1,43	1,42	1,42
13-21	1,53	1,53	1,52	1,52	1,52	1,51	1,54	1,57	1,54	1,54	1,54	1,52	1,53
21-29	1,55	1,56	1,55	1,54	1,55	1,54	1,56	1,58	1,58	1,57	1,57	1,56	1,56
29-37	1,52	1,56	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,56	1,57	1,56	1,56	1,55	1,55
37-45	1,52	1,54	1,53	1,53	1,53	1,53	1,54	1,58	1,58	1,56	1,57	1,55	1,55
45-53	1,55	1,54	1,54	1,53	1,55	1,54	1,58	1,62	1,63	1,59	1,59	1,56	1,57
53-61	1,58	1,56	1,59	1,56	1,58	1,58	1,61	1,63	1,62	1,62	1,61	1,58	1,59
61-69	1,62	1,61	1,62	1,61	1,62	1,62	1,63	1,63	1,64	1,63	1,63	1,60	1,62
69-77	1,64	1,63	1,62	1,62	1,63	1,63	1,64	1,64	1,65	1,63	1,63	1,63	1,63
77-85	1,63	1,63	1,56	1,61	1,62	1,61	1,63	1,54	1,60	1,61	1,57	1,63	1,60
85-93	1,48	1,55	1,63	1,41	1,47	1,55	1,60	1,13	1,51	1,35	1,48	1,41	1,46

De standaardafwijking van de dichtheid van de grond is bij de verschillende bemonsteringen in de lagen tussen 13 en 69 cm diepte over het algemeen gering en varieert slechts tussen 0,02 en 0,06 g/cm^3 (tabel 4). In de twee bovenste lagen loopt de standaardafwijking uiteen van 0,04 tot 0,18 en in de lagen dieper dan 69 cm van 0,03 tot 0,99 g/cm^3 . Opvallend is dat bij de lagen tussen 13 en 69 cm de gemiddelde standaardafwijking berekend over de monsters van alle twaalf bemonsteringen steeds 0,03 g/cm^3 is (zie tabel 4).

Tabel 4 *Standaardafwijking van de dichtheid van de grond (g/cm³) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp*

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5	0,18	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,09	0,13	0,12	0,12	0,10	0,06	0,12
5-13	0,08	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05
13-21	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
21-29	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
29-37	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
37-45	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
45-53	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
53-61	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03
61-69	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,06	0,03
69-77	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,18	0,04
77-85	0,08	0,03	0,20	0,09	0,04	0,09	0,03	0,19	0,12	0,08	0,19	0,31	0,12
85-93	0,20	0,18		0,23	0,21	0,15		0,12	0,21	0,26		0,99	0,28

De variatiecoëfficiënt van de dichtheid van de grond is voor alle lagen van de twaalf bemonsteringen samengevat in tabel 5. In de bovenste en de diepste laag komen de hoogste variatiecoëfficiënten voor, tussen 21 en 69 cm diepte zijn ze zeer laag en liggen tussen 1,1 en 4,0 %.

Tabel 5 *Variatiecoëfficiënt van de dichtheid van de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen in het proefveld Ouddorp*

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5	21,0	17,1	14,1	17,1	14,6	15,0	11,6	16,9	15,6	17,3	12,6	7,2	15,0
5-13	5,4	4,5	3,3	4,1	4,4	3,8	2,8	3,2	3,0	3,9	3,7	3,8	3,8
13-21	2,8	2,5	1,9	2,0	2,2	2,1	2,4	1,7	1,9	1,6	2,5	2,7	2,2
21-29	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,3	1,8	1,9	1,2	1,3	1,5	2,1	1,7
29-37	2,3	1,9	1,5	1,6	3,2	1,7	1,8	2,1	2,5	1,7	1,8	2,3	2,0
37-45	2,2	1,4	1,6	1,7	1,5	1,8	1,1	2,1	1,7	2,2	2,2	1,7	1,8
45-53	2,2	1,9	1,0	2,2	2,1	1,2	2,5	1,4	1,4	1,9	1,6	1,9	1,8
53-61	1,9	2,4	1,7	2,1	2,4	1,2	1,4	1,9	1,3	1,9	1,2	2,4	1,8
61-69	2,1	1,8	1,0	1,9	1,6	1,5	1,6	1,4	1,4	1,6	1,4	4,0	1,8
69-77	1,9	2,1	1,7	1,8	1,8	1,3	1,8	2,3	1,4	1,4	1,5	10,8	2,5
77-85	5,0	1,8	13,1	5,3	2,7	5,8	1,9	12,6	7,7	4,8	12,4	19,3	7,7
85-93	13,6	11,3		16,7	14,3	9,4		10,2	14,0	19,7		70,7	20,0

10 HET VOCHTGEHALTE VAN DE GROND

10.1. Veranderingen in het vochtgehalte bij de bemonsteringen

De neerslag heeft een grote invloed op het vochtgehalte in de grond. In tijden van een neerslagoverschot zal het gemiddelde vochtgehalte toenemen en het grondwater stijgen als er geen sprake is van ontwatering. Wanneer de gewasverdamping gaat toenemen zal het vochtgehalte in de bodem weer afnemen. In figuur 18 is het gemiddelde vochtgehalte weergegeven van de verschillende dieptelagen in relatie tot het initiële vochtgehalte. Na 11 dagen is als gevolg van 37,1 mm neerslag een toename van het gemiddelde vochtgehalte te zien tot op een diepte van 53 cm. Na 87,8 mm neerslag, op de 17^e dag, is het vochtgehalte in het gehele bodemprofiel sterk toegenomen. De grondwaterstand is gestegen van 120 cm - mv, op de dag van tracertoeediening, tot 68 cm - mv. Tussen 12 januari 1988 en 26 januari 1988 (fig. 18e en 18f) neemt het vochtgehalte van de lagen tussen 37 en 69 cm sterk toe als gevolg van veel neerslag en daarmee een snelle stijging van het grondwater van 73 naar 53 cm. Op 8 februari 1988 bereikt het grondwater de hoogst gemeten stand van 47 cm - mv. Er is dan sinds het begin van de tracerproef 328,8 mm neerslag gevallen. Tot aan 15 maart (fig. 18i) blijft de verhoogde vochttoestand in het gehele profiel gehandhaafd, om daarna, als gevolg van een toenemende verdamping en minder neerslag (zie ook fig. 16) weer min of meer terug te gaan naar de uitgangstoestand (fig. 18k).

10.2. Variatie van het vochtgehalte

De laag van 0-5 cm bevat veel vocht door het aanwezige venige bodemmateriaal (tabel 6). Het gemiddelde vochtgehalte in deze eerste laag is 34,8 vol.% met als laagste 20,58 en als hoogste 42,70 vol.% vocht. Tussen 5 en 45 cm diepte is er een grote spreiding in het vochtgehalte te zien, welke varieert van 3,37 tot 28,12 vol.% vocht. Het gemiddelde

Tabel 6 Gemiddeld bodemvochtgehalte (vol.%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0-5	28,49	31,40	36,42	33,51	42,72	36,58	42,70	39,74	33,54	42,66	29,11	20,58	34,8
5-13	11,56	16,34	19,30	16,08	18,95	18,38	19,96	19,60	16,24	20,13	15,96	4,26	16,4
13-21	7,28	10,99	13,48	10,15	13,12	13,12	14,81	14,66	11,77	13,52	10,79	3,37	11,4
21-29	6,87	11,06	12,90	9,68	11,84	12,13	13,95	14,51	11,39	12,10	10,31	4,60	10,9
29-37	6,67	10,04	13,16	10,03	11,47	11,66	14,15	19,61	15,27	14,59	13,52	5,82	12,2
37-45	7,69	9,79	14,81	10,74	11,87	12,60	18,25	26,71	28,12	20,42	21,54	7,54	15,8
45-53	9,71	10,57	18,48	13,65	16,01	16,64	33,74	36,52	37,03	33,44	33,34	9,92	22,4
53-61	13,77	14,65	26,74	20,37	23,69	27,01	34,65	34,28	33,85	34,55	34,31	14,18	26,0
61-69	21,98	24,41	31,75	30,35	30,74	31,50	32,44	32,53	32,70	32,28	33,61	19,61	29,5
69-77	30,50	31,85	34,53	33,92	33,27	33,77	33,82	35,21	34,98	33,88	34,39	29,40	33,3
77-85	35,85	35,12	38,23	36,92	36,05	37,15	35,66	42,18	37,84	36,98	38,96	36,20	37,3
85-93	40,96	39,33	38,19	43,02	42,21	41,84	38,18	52,56	42,56	46,96		45,40	42,8

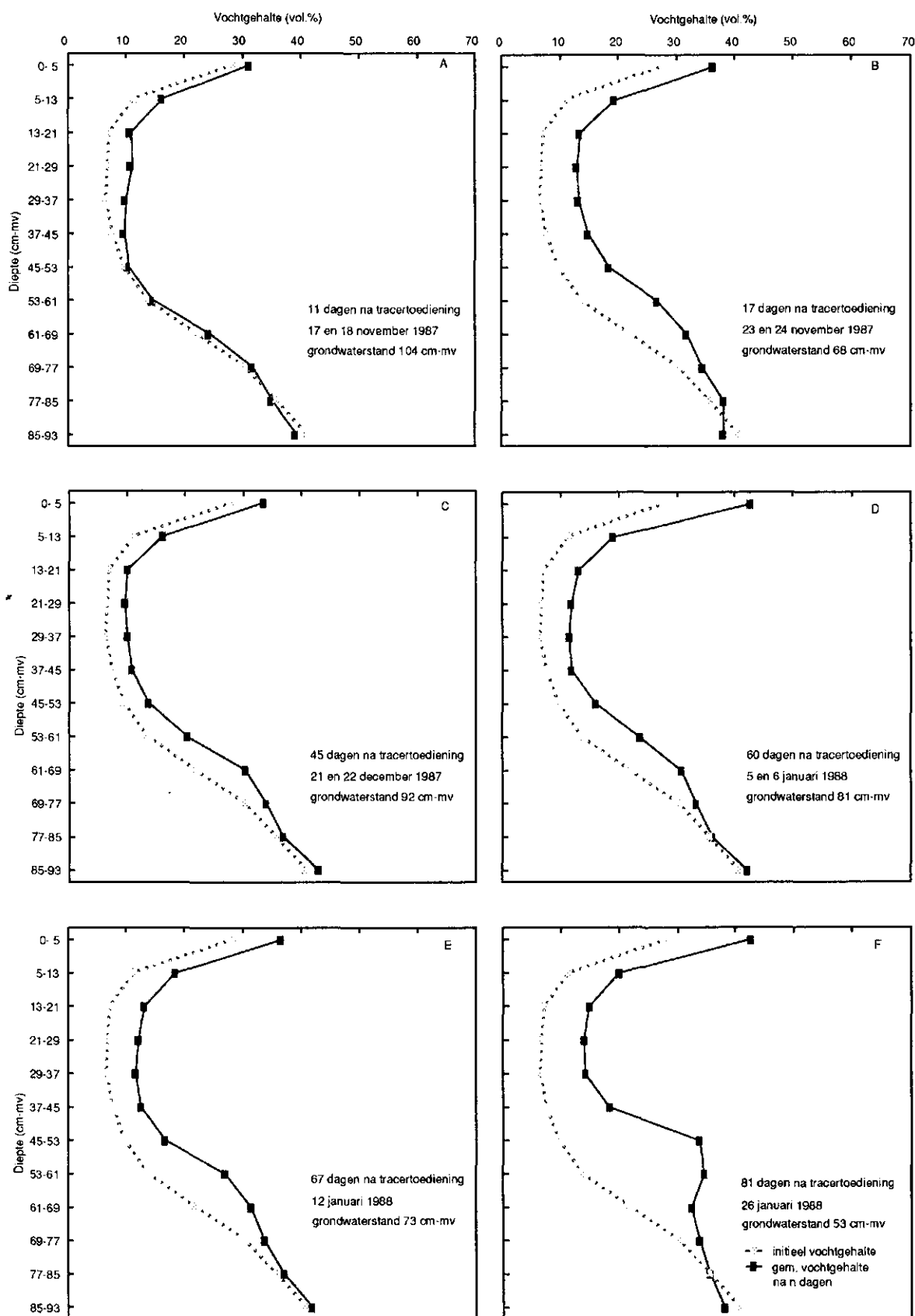


Fig. 18 Het vochtgehalte in het bodemprofiel op de bemonsteringsdagen vergeleken met de situatie op de dag van tracertoediening

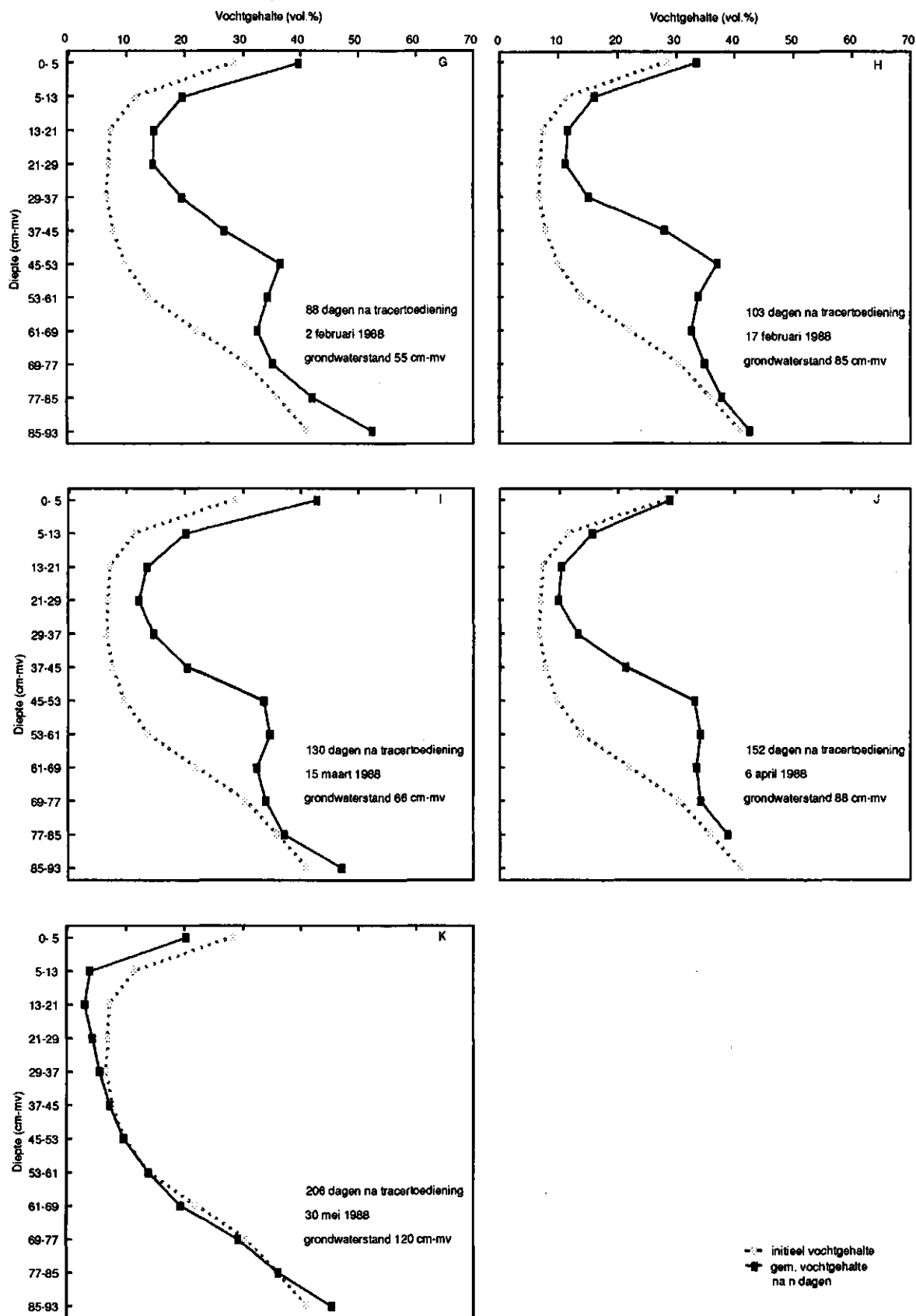


Fig. 18 (vervolg)

bodemvochtgehalte in de onderste lagen loopt op van 9,92 % in droge toestand tot 52,56 % in verzadigde situatie. Hierbij moet worden opgemerkt dat hieruit soms maar één of enkele monsters konden worden genomen.

Monsters uit de lagen van 77-85 en 85-93 cm diepte die weinig materiaal bevatten beïnvloeden hierbij sterk de gemiddelde waarde. Bij bemonstering 12 is het profiel sterk uitgedroogd door een toenemende verdamping, een afnemende neerslag en een dalende grondwaterstand.

Uitgezonderd de bovenste en de vier diepste lagen, zijn er relatief sterke veranderingen te zien in het vochtgehalte tussen 5 en 61 cm diepte, als gevolg van neerslag, verdamping en grondwaterstandfluctuaties. Deze sterke spreiding in het vochtgehalte komt goed tot uiting bij de standaardafwijkingen en de variatiecoëfficiënten van het bodemvochtgehalte in de tabellen 7 en 8. In de laag van 69-77 cm komt de minste spreiding voor, wat te zien is aan de standaardafwijking van 2,4 vol.% en een variatiecoëfficiënt van 7,2 %. Ook de bovenliggende laag van 61-69 cm heeft vergeleken met de andere lagen weinig spreiding in het bodemvochtgehalte gedurende de bemonsteringsperiode.

Tabel 7 Standaardafwijking van het bodemvochtgehalte (vol.%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering												gcm. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5	4,73	2,76	3,82	3,17	4,37	3,14	3,59	2,52	3,84	3,47	3,39	3,10	3,5
5-13	2,81	3,82	3,95	3,17	3,42	2,16	2,67	2,82	2,63	2,27	2,28	1,54	2,8
13-21	2,48	3,82	2,83	3,45	2,43	1,77	2,91	3,40	2,26	2,17	1,92	2,43	2,7
21-29	1,88	2,34	1,88	2,64	1,83	1,06	2,60	3,32	1,96	1,61	1,31	2,01	2,0
29-37	1,23	1,78	2,19	1,58	1,97	0,99	2,92	9,57	9,45	6,41	6,10	1,98	3,8
37-45	1,16	1,06	2,97	1,46	1,37	1,56	5,25	8,81	7,17	9,01	9,30	2,01	4,3
45-53	2,55	1,24	4,19	4,14	3,65	4,35	6,24	2,81	2,19	4,20	4,14	1,72	3,5
53-61	3,40	3,85	3,08	5,57	5,71	3,79	1,26	1,62	1,87	1,63	1,77	2,64	3,0
61-69	4,21	4,06	1,50	2,12	1,80	1,48	1,14	1,62	1,47	1,90	2,00	4,20	2,3
69-77	2,80	2,34	2,12	1,74	1,65	1,72	1,83	2,07	2,21	2,57	2,28	4,95	2,4
77-85	4,09	1,52	7,14	2,48	1,55	3,80	2,58	6,86	4,82	3,63	7,46	2,65	4,0
85-93	7,19	5,88		7,98	6,58	4,09		3,86	6,85	7,20		9,84	6,6

Van de monsters die genomen zijn uit de lagen tussen 5 en 61 cm diepte werd de laagste standaardafwijking, van 0,99 vol.% vocht, gevonden in de 6^e bemonstering op 29-37 cm - mv en de hoogste, van 9,57 vol.% vocht, in dezelfde laag bij de 8^e bemonstering (tabel 7). De laagste variatiecoëfficiënt van het bodemvochtgehalte met 3,6 % werd gevonden op 53-61 cm - mv bij bemonstering 7. In de 9^e bemonstering werd op 29-37 cm diepte een variatiecoëfficiënt gevonden van 61,8 %. De grootste variatiecoëfficiënt werd vastgesteld bij de twaalfde bemonstering in de laag van 13-21 cm en bedroeg 72,0%. Deze uiteenlopende cijfers laten zien hoe complex en onvoorspelbaar het vochtgehalteverloop in de bodem eigenlijk is.

Tabel 8 Variatiecoëfficiënt van het bodemvochtgehalte (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5	16,6	8,8	10,5	9,5	10,2	8,6	8,4	6,3	11,5	8,1	11,6	15,1	10,4
5-13	24,3	23,4	20,5	19,7	18,1	11,7	13,4	14,4	16,2	11,3	14,3	36,2	18,6
13-21	34,0	34,8	21,0	34,0	18,5	13,5	19,7	23,2	19,2	16,1	17,8	72,0	27,0
21-29	27,4	21,2	14,6	27,3	15,5	8,7	18,6	22,9	17,2	13,3	12,7	43,6	20,2
29-37	18,5	17,8	16,7	15,7	17,2	8,5	20,6	48,8	61,8	43,9	45,1	34,0	29,1
37-45	15,1	10,8	20,1	13,6	11,6	12,4	28,8	33,0	25,5	44,1	43,2	26,6	23,7
45-53	26,2	11,7	22,7	30,3	22,8	26,2	18,5	7,7	5,9	12,5	12,4	17,4	17,9
53-61	24,7	26,3	11,5	27,3	24,1	14,0	3,6	4,7	5,5	4,7	5,2	18,6	14,2
61-69	19,2	16,7	4,7	7,0	5,9	4,7	3,5	5,0	4,5	5,9	5,9	21,4	8,7
69-77	9,2	7,4	6,2	5,1	5,0	5,1	5,4	5,9	6,3	7,6	6,6	16,8	7,2
77-85	11,4	4,3	18,7	6,7	4,3	10,2	7,2	16,3	12,7	9,8	19,2	7,3	10,7
85-93	17,6	14,9		18,5	15,6	9,8		7,3	16,1	15,3		21,7	15,2

11 BROMIDE IN DE GRONDMONSTERS

11.1 De teruggevonden hoeveelheid bromide in het profiel

Op 6 november 1987 werd op het proefveld een gemiddelde hoeveelheid bromide toegediend van $84,7 \text{ mg/dm}^2$. De standaardafwijking bedroeg hierbij $5,1 \text{ mg/dm}^2$. Bij de tweede bemonstering op 17 november 1987 werd in de laag van 0-69 cm in de twintig grondkolommen gemiddeld $84,1 \text{ mg/dm}^2$ teruggevonden (ofwel 99,3%!). Hierbij kwam echter een zeer grote variatie voor met een standaardafwijking van $31,6 \text{ mg/dm}^2$. De grondkolom met de minste hoeveelheid bromide had 34 mg/dm^2 en de grondkolom met de grootste hoeveelheid had 148 mg/dm^2 . De bromide van de afzonderlijke grondkolommen is in volgorde van toenemende hoeveelheid weergegeven in figuur 19. Zoals in deze figuur is te zien werd bij tien grondkolommen minder en bij de andere tien meer dan de toegediende hoeveelheid teruggevonden.

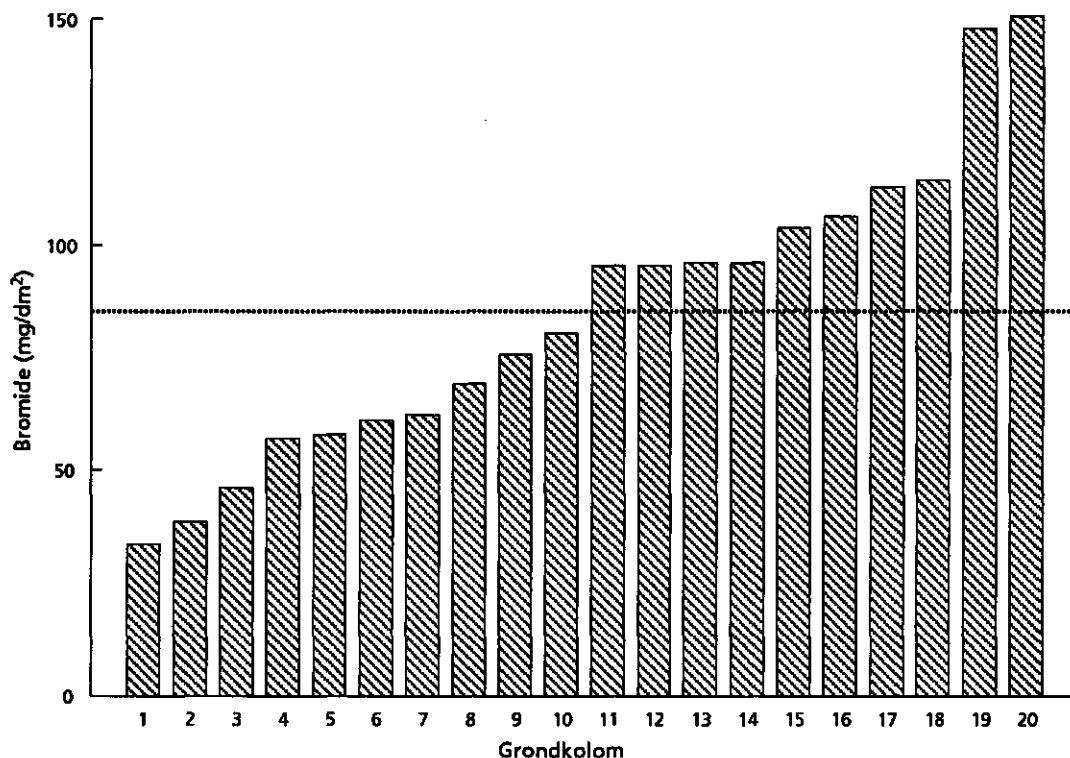


Fig. 19 Bromide in de laag van 0-69 cm elf dagen na tracertoediening. De stippellijn geeft de hoeveelheid toegediende bromide aan

De hoeveelheid bromide in de grondkolommen hangt duidelijk samen met de hoeveelheid vocht in de bovengrond (fig. 20). Bij negen van de tien kolommen, waarin minder dan de gemiddelde toegediende hoeveelheid bromide werd gemeten, bedroeg de hoeveelheid vocht in de laag van 0-13 cm minder dan 29 mm. Bij de tien grondkolommen waarin meer dan de gemiddelde toegediende hoeveelheid werd gemeten varieerde het vochtgehalte

van 29 tot 34 mm. Het hogere vochtgehalte houdt verband met het voorkomen van preferente stroombanen. De grote variatie in bromide is het gevolg van toestroming van water en daarin opgeloste bromide door de oppervlaktelaag naar deze nattere preferente stroombanen. Voor een uitvoerige beschrijving van dit proces wordt verwezen naar het artikel van Ritsema e.a. (1993).

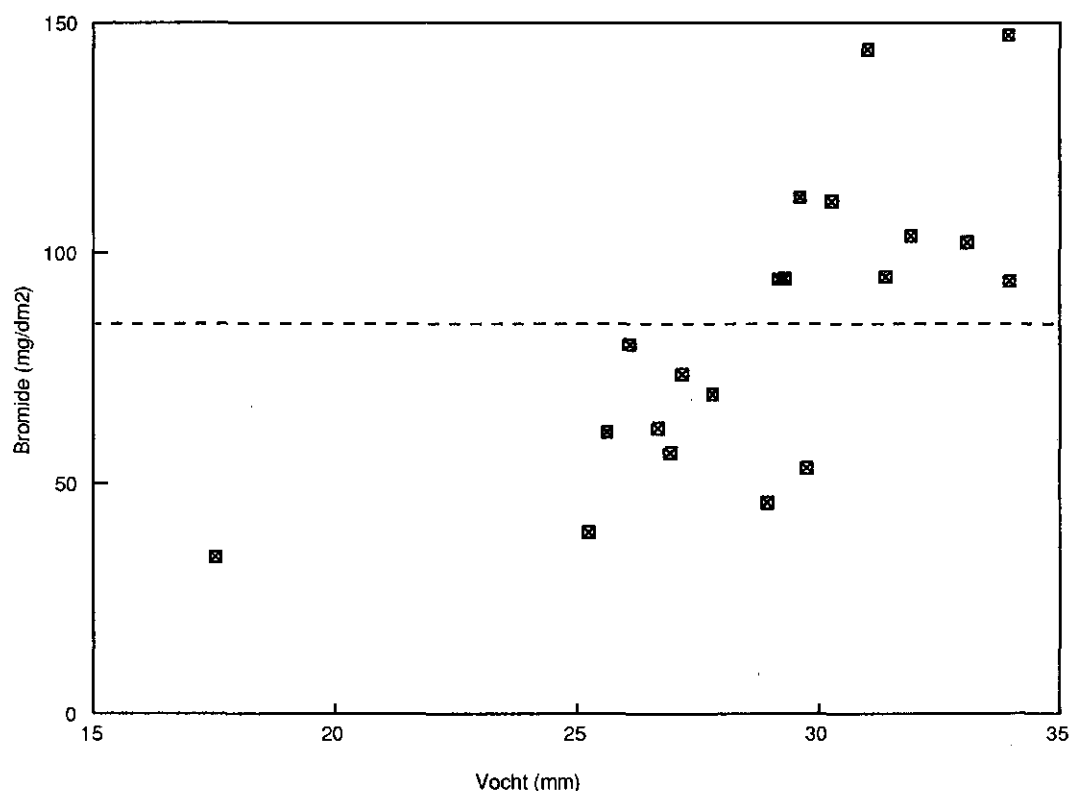


Fig. 20 Verband tussen de hoeveelheid bromide in de laag van 0-69 cm en het aantal mm vocht in de laag van 0-13 cm, elf dagen na tracertoediening. De stippellijn geeft de hoeveelheid toegediende bromide aan.

Tabel 9 Bromide in de laag van 0-69 cm diepte op de verschillende bemonsteringstijdstippen. De bromide is uitgedrukt in procenten van de toegediende hoeveelheid (84,7 mg/dm²).

Bemonstering	Dagen na toediening	Bromide (%)	Bemonstering	Dagen na toediening	Bromide (%)
2	11	99,3	8	88	17,9
3	17	93,2	9	103	15,5
4	45	59,2	10	130	7,4
5	60	40,2	11	152	5,3
6	67	22,3	12	206	4,3
7	81	15,9			

Tussen de tweede en de derde bemonstering is 51 mm neerslag gevallen en steeg de grondwaterstand van 104 naar 68 cm -mv. In de bovenste 69 cm van het profiel werd toen nog een gemiddelde hoeveelheid bromide van 78,9 mg/dm² aangetroffen. Bij deze

bemonstering kwam al bromide in het verzadigde deel van het profiel voor. Sinds de vorige bemonstering kan dus al een deel van de bromide via het grondwater zijn weggevoerd. Overigens werd in de laag van 0-69 cm nog 93,2 % van de toegediende hoeveelheid bromide teruggevonden (tabel 9). In tabel 9 is te zien dat bij de vierde bemonstering, na 45 dagen, nog 59,2 % van de toegediende hoeveelheid bromide in de bovenste 69 cm voorkwam. Na 130 dagen was deze hoeveelheid afgenomen tot slechts 7,4 %.

11.2 Transport van bromide door de bodem

De gemiddelde hoeveelheid bromide in het profiel met de maximale en minimale waarden zijn van de grondkolombemonsteringen weergegeven in figuur 21. Zoals in figuur 21 is te zien, is bij de vierde bemonstering de meeste bromide al uit de bovenste 45 cm verdwenen. Bij de zevende bemonstering stond het grondwater op 53 cm - mv en kwam nagenoeg alle bromide in het verzadigde deel van het profiel voor (fig. 21f). Dit betekent dus dat 81 dagen na de toediening bijna alle bromide in de grondwaterzone terecht is gekomen. Dit laatste is ook het geval bij de achtste bemonstering (fig. 21g). Tegen de verwachting in blijkt dat bij deze twee bemonsteringen ook in het verzadigde deel van het profiel een zeer grote variatie in de bromideconcentratie voorkomt. Uit de negende bemonstering blijkt dat na het dalen van de grondwaterstand de gemiddelde hoeveelheid bromide tussen 61 en 85 cm diepte wel is afgenomen, maar dat de variatie nog zeer groot is (fig. 21h). Bij de drie laatste bemonsteringen is de bromide praktisch geheel uit het bemonsterde profiel verdwenen (fig. 21i $\frac{1}{m}$ k).

In figuur 22 is het verloop van de bromide weergegeven in afhankelijkheid van de neerslag. In de periode tussen 6 november 1987 en 30 mei 1988 is er 556 mm neerslag gevallen. Hiermee werd bijna alle bromide tot onder de bemonsteringsdiepte getransporteerd. In de laag van 0-5 cm bleef gedurende alle grondkolombemonsteringen een kleine hoeveelheid bromide aanwezig (fig. 22a). De bromide werd zeer snel getransporteerd door de lagen tussen 5 en 45 cm diepte en is daaruit nagenoeg verdwenen als er 200 mm neerslag is gevallen (fig. 22b $\frac{1}{m}$ f). In de diepere lagen komt de bromide later aan, maar blijft ook langer aanwezig. In de lagen van 45-53 en 53-61 cm - mv worden de hoogste gemiddelde concentraties gemeten bij 88 mm neerslag (fig. 22g en h). De maximale gemiddelde hoeveelheden bromide voor de lagen 61-69 en 69-77 cm diepte werden gemeten na 121 mm (fig. 22i en j). In de laag van 77-85 cm diepte bereikte de bromidepiek z'n hoogste waarde na 190 mm neerslag en in de diepste laag bij 255 mm. Uit de twee diepste lagen zijn soms maar één of enkele monsters genomen.

Het transport van de bromide door de bodem is weergegeven in figuur 23. Bovendien is in deze figuur het verloop van de grondwaterstand weergegeven. De gemiddelde bromideconcentratie is ingedeeld in drie klassen: <1,5 , 1,5-7,5 en 7,5-30 mg/dm³. In deze figuur is te zien dat de bromide vooral bij de eerste 100 mm neerslag snel wordt verplaatst naar het grondwater. Daarna blijft nog vrij lang een hoge concentratie in de verzadigde zone aanwezig tot een hoeveelheid neerslag van 485 mm. Tevens is te zien dat in de oppervlaktelaag langdurig enige bromide aanwezig blijft.

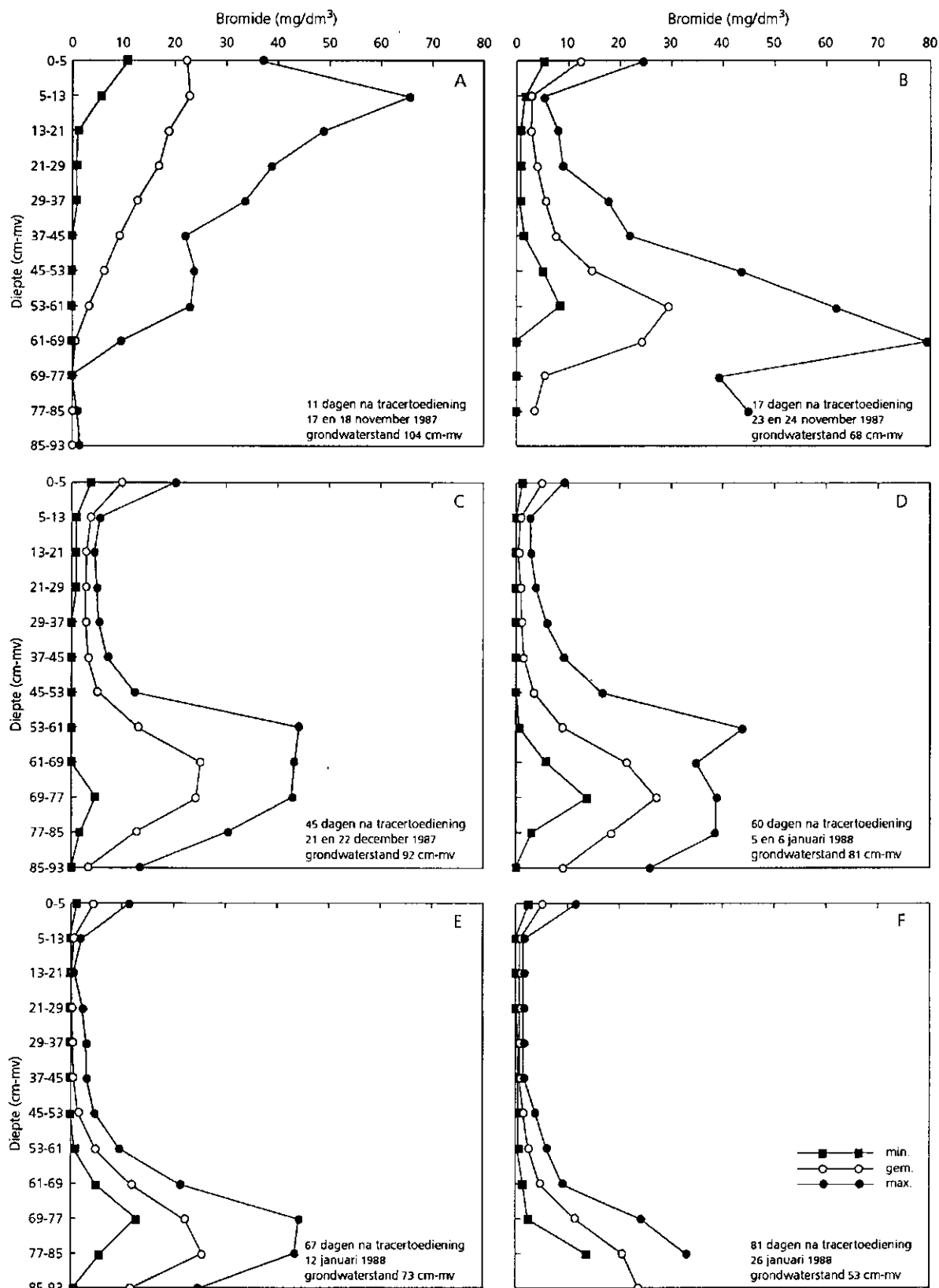


Fig. 21 Het verloop van de hoeveelheid bromide in het profiel bij elf grondkolombemonsteringen

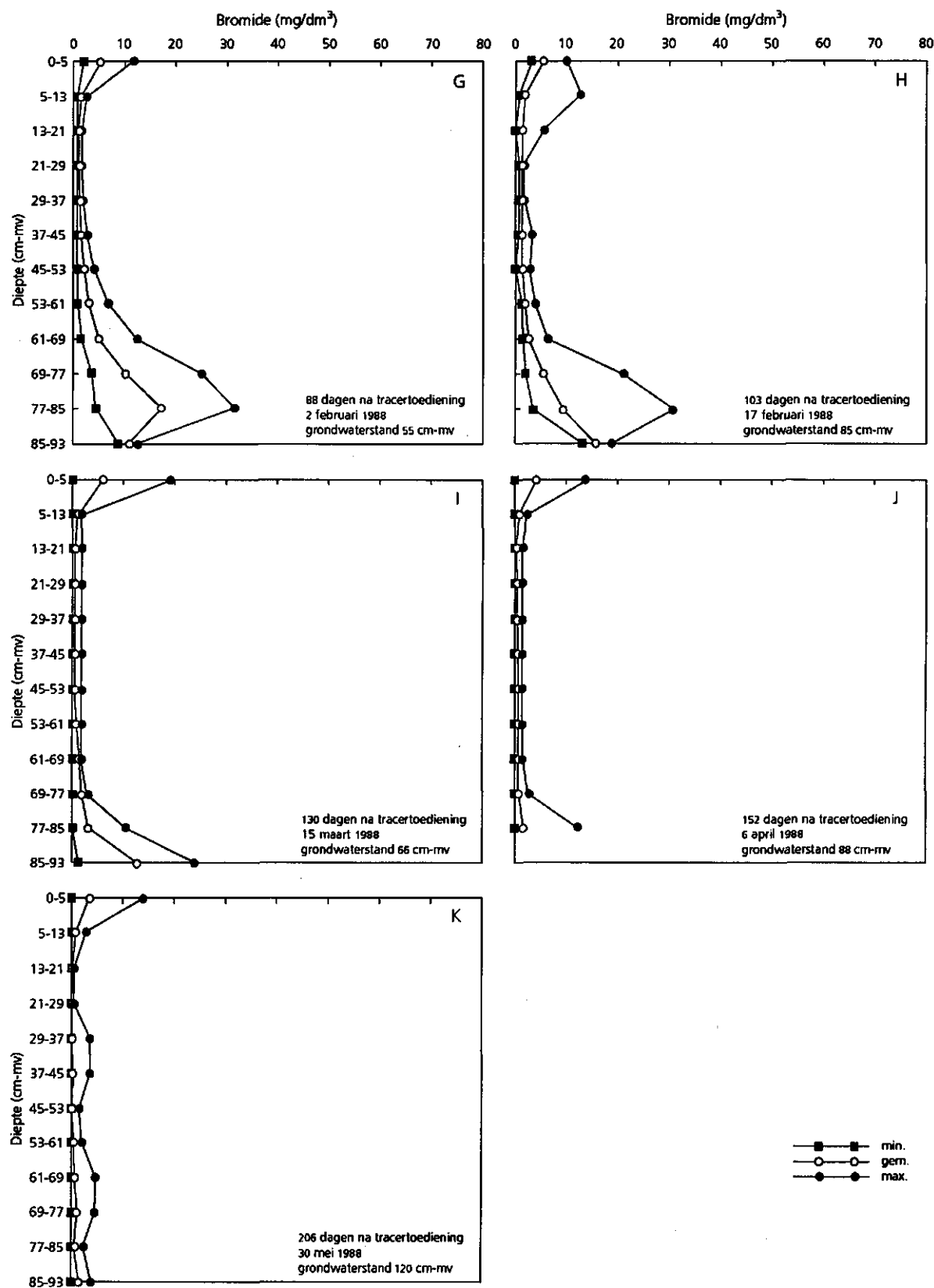


Fig. 21 (vervolg)

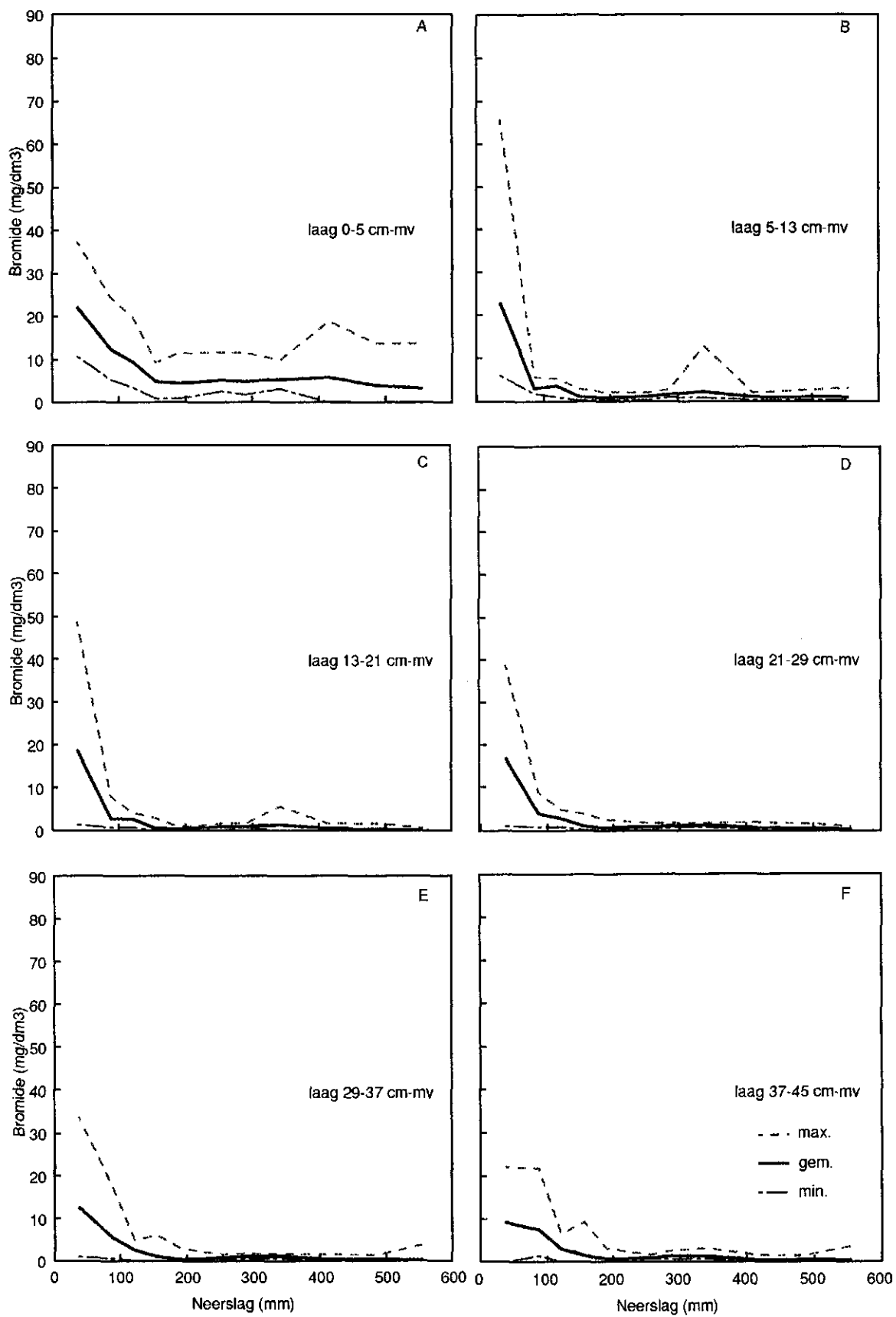


Fig. 22 *Het verloop van de hoeveelheid bromide in de verschillende lagen van het profiel weergegeven met de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening*

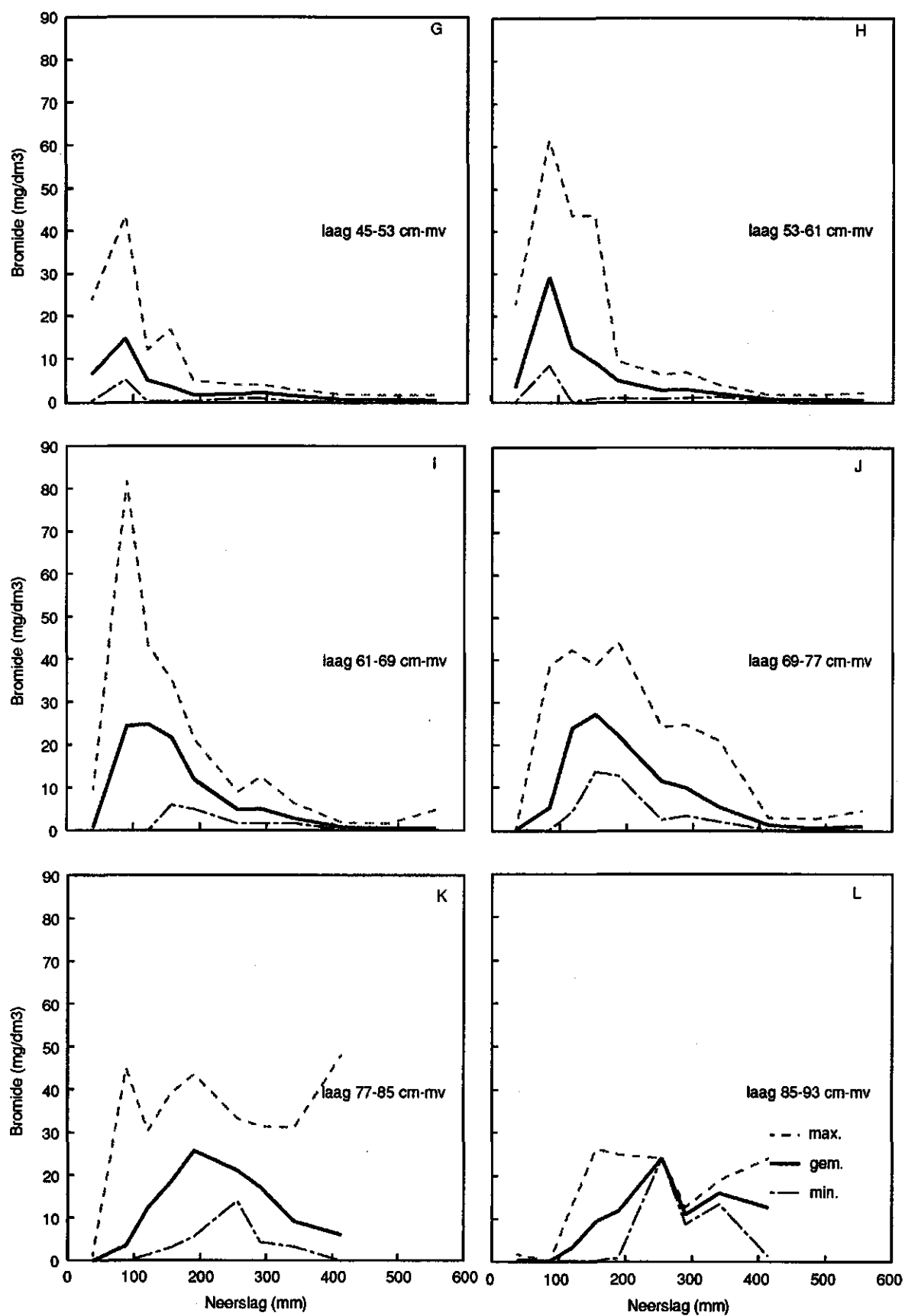


Fig. 22 (vervolg)

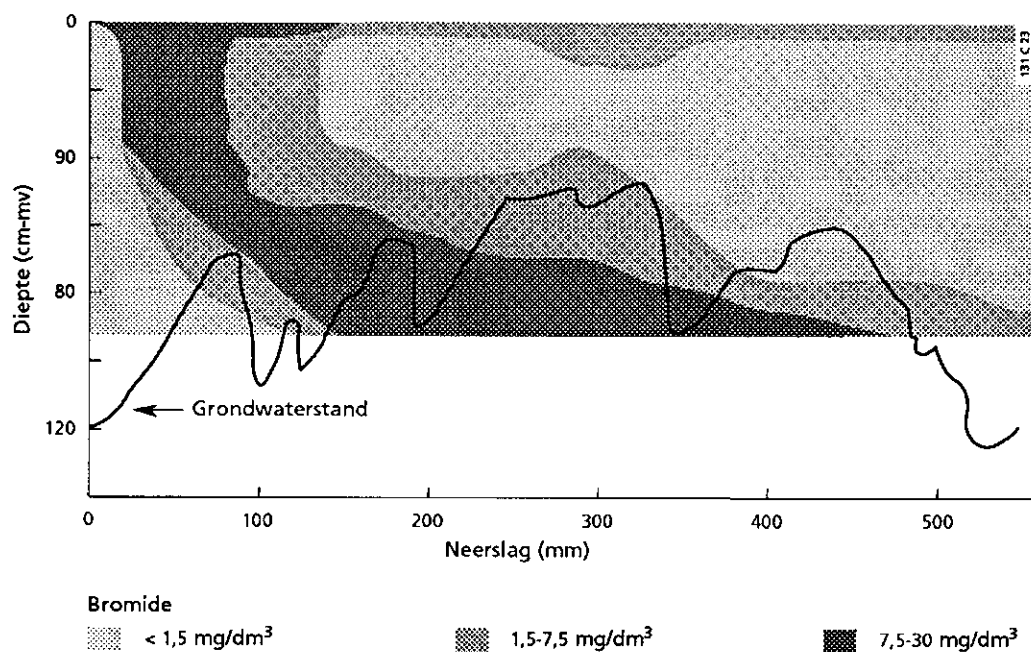


Fig. 23 Ruimtelijke weergave van de hoeveelheid bromide in het profiel bij een toename van de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening

Tabel 10 Gemiddelde bromideconcentratie in de grond (mg/dm³) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0- 5	0,00	22,23	12,32	9,56	4,98	4,52	5,25	5,06	5,42	5,81	4,09	3,32
5-13	0,00	22,86	2,87	3,42	0,87	0,63	0,92	1,46	2,08	0,80	0,68	0,70
13-21	0,00	18,79	2,73	2,72	0,52	0,31	0,84	0,84	1,29	0,45	0,33	0,14
21-29	0,00	16,91	3,85	2,58	0,93	0,39	0,83	0,96	1,14	0,43	0,35	0,06
29-37	0,00	12,71	5,50	2,54	1,20	0,48	0,86	1,12	1,23	0,44	0,36	0,28
37-45	0,00	9,37	7,50	3,09	1,56	0,77	0,93	1,48	1,31	0,44	0,40	0,34
45-53	0,00	6,38	14,73	4,87	3,51	1,46	1,72	2,11	1,31	0,49	0,46	0,14
53-61	0,00	3,33	29,43	12,71	9,13	4,91	2,66	2,89	1,85	0,48	0,42	0,23
61-69	0,00	0,71	24,41	24,76	21,71	11,75	4,83	4,98	2,78	0,72	0,48	0,50
69-77	0,00	0,00	5,43	24,15	27,39	22,29	11,74	10,14	5,52	1,24	0,51	1,02
77-85	0,00	0,06	3,57	12,40	18,51	25,72	20,97	17,25	9,28	6,17	1,40	0,59
85-93	0,00	0,13	0,00	3,13	9,14	11,60	24,05	10,82	15,82	12,42		1,59

11.3 Variatie van de bromideconcentratie

Zoals al eerder is aangegeven komen er grote verschillen voor in de gemiddelde bromideconcentratie in de grond. Voor de verschillende bemonsterde lagen is bij de twaalf bemonsteringen de gemiddelde gemeten hoeveelheid bromide weergegeven in tabel 10.

De standaardafwijking van de hoeveelheid bromide varieert tussen 0,19 en 22,61 mg/dm³ en is gemiddeld het hoogst in de lagen dieper dan 53 cm (tabel 11).

Tabel 11 *Standaardafwijking van de bromideconcentratie in de grond (mg/dm³) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen*

Diepte cm-mv	Bemonstering 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	gem. 1 - 12
0- 5		6,75	5,07	3,84	2,19	2,26	2,19	1,96	1,72	3,63	2,72	3,57	3,3
5-13		12,34	0,89	1,20	0,78	0,61	0,45	0,58	2,47	0,66	0,83	0,81	2,0
13-21		13,22	1,73	0,92	0,71	0,34	0,34	0,28	1,08	0,63	0,54	0,27	1,8
21-29		10,28	2,08	0,86	0,99	0,59	0,35	0,31	0,31	0,62	0,56	0,19	1,6
29-37		9,02	3,56	1,19	1,45	0,78	0,27	0,43	0,29	0,58	0,52	0,86	1,7
37-45		7,33	5,16	1,82	2,28	0,88	0,34	0,74	0,57	0,54	0,58	0,88	1,9
45-53		6,94	10,99	2,92	4,38	1,11	0,87	0,95	0,55	0,59	0,64	0,37	2,8
53-61		6,47	15,34	10,02	9,39	2,59	1,16	1,58	0,61	0,63	0,61	0,53	4,4
61-69		2,11	22,61	10,11	8,01	5,11	2,13	2,79	1,41	0,67	0,63	1,09	5,1
69-77			10,39	10,42	6,41	7,56	5,53	5,33	4,50	0,89	0,75	1,53	4,8
77-85		0,24	11,51	7,98	9,24	8,68	6,15	7,41	6,08	12,36	2,89	0,75	6,7
85-93		0,40		3,80	7,70	7,38		1,71	2,05	11,42		1,34	3,6

De variatiecoëfficiënt varieert tussen 13 en 436%, waarbij de hoogste waarden vooral voorkomen bij de laagste gemiddelde bromideconcentraties (tabel 12). Tussen 13 en 69 cm diepte ligt de variatiecoëfficiënt gemiddeld rond de 100%.

Tabel 12 *Variatiecoëfficiënt van de bromideconcentratie in de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen*

Diepte cm-mv	Bemonstering 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	gem. 1 - 12
0- 5		30	41	40	44	50	42	39	32	62	66	107	50
5-13		54	31	35	90	97	49	40	119	82	122	116	76
13-21		70	63	34	137	111	41	33	83	139	162	200	98
21-29		61	54	33	106	152	43	33	27	144	163	301	102
29-37		71	65	47	122	163	31	38	24	133	147	302	104
37-45		78	69	59	146	114	37	50	44	124	144	254	102
45-53		109	75	60	125	76	51	45	42	121	141	258	100
53-61		194	52	79	103	53	44	55	33	131	145	228	101
61-69		297	93	41	37	43	44	56	51	94	131	218	100
69-77			191	43	23	34	47	53	81	72	148	150	84
77-85		436	323	64	50	34	29	43	65	200	206	127	143
85-93		306		121	84	64		16	13	92		84	87

12 BORIUM IN DE GRONDMONSTERS

12.1 De teruggevonden borium in het profiel

Op 6 november 1987 werd op het proefveld een gemiddelde hoeveelheid borium toegediend van $42,43 \text{ mg/dm}^2$. De standaardafwijking bedroeg hierbij $3,2 \text{ mg/dm}^2$. Bij de tweede bemonstering werd in de laag van 0-69 cm in de twintig grondkolommen gemiddeld $31,0 \text{ mg/dm}^2$ teruggevonden (ofwel 72,4%). De variatie was hierbij zeer groot met een standaardafwijking van $15,3 \text{ mg/dm}^2$ en een variatiecoëfficiënt van 49%. De grondkolom met de minste hoeveelheid borium had $10,7 \text{ mg/dm}^2$ en de grondkolom met de grootste hoeveelheid had $60,4 \text{ mg/dm}^2$. De borium van de afzonderlijke grondkolommen is in figuur 24 weergegeven. De volgorde van de grondkolommen correspondeert met die van figuur 19 (par. 11.1), waarin de bromide in toenemende hoeveelheid is weergegeven. Zoals in figuur 24 is te zien werd bij vijftien van de twintig kolommen minder dan de toegediende hoeveelheid teruggevonden. Dat het percentage teruggevonden borium lager is dan dat van bromide is mogelijk het gevolg van adsorptie van borium aan ijzer- en aluminium-oxyden in de grond.

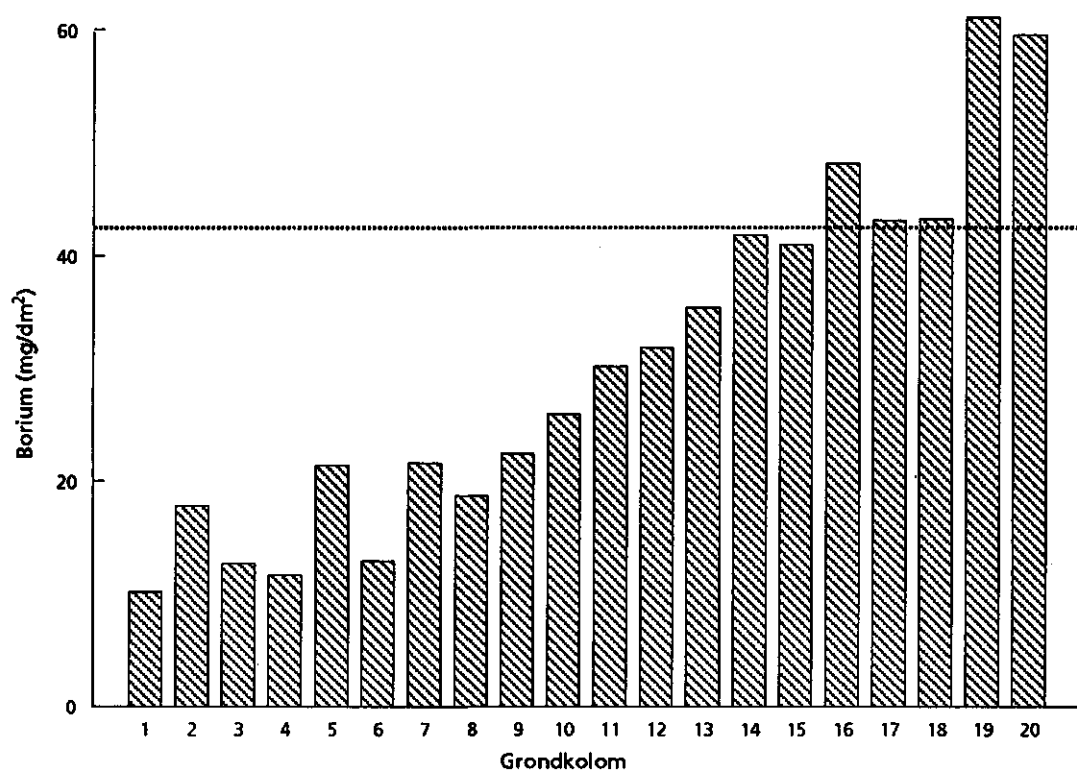


Fig. 24 Borium in de laag van 0-69 cm elf dagen na tracertoediening. De stippellijn geeft de hoeveelheid toegediende borium aan.

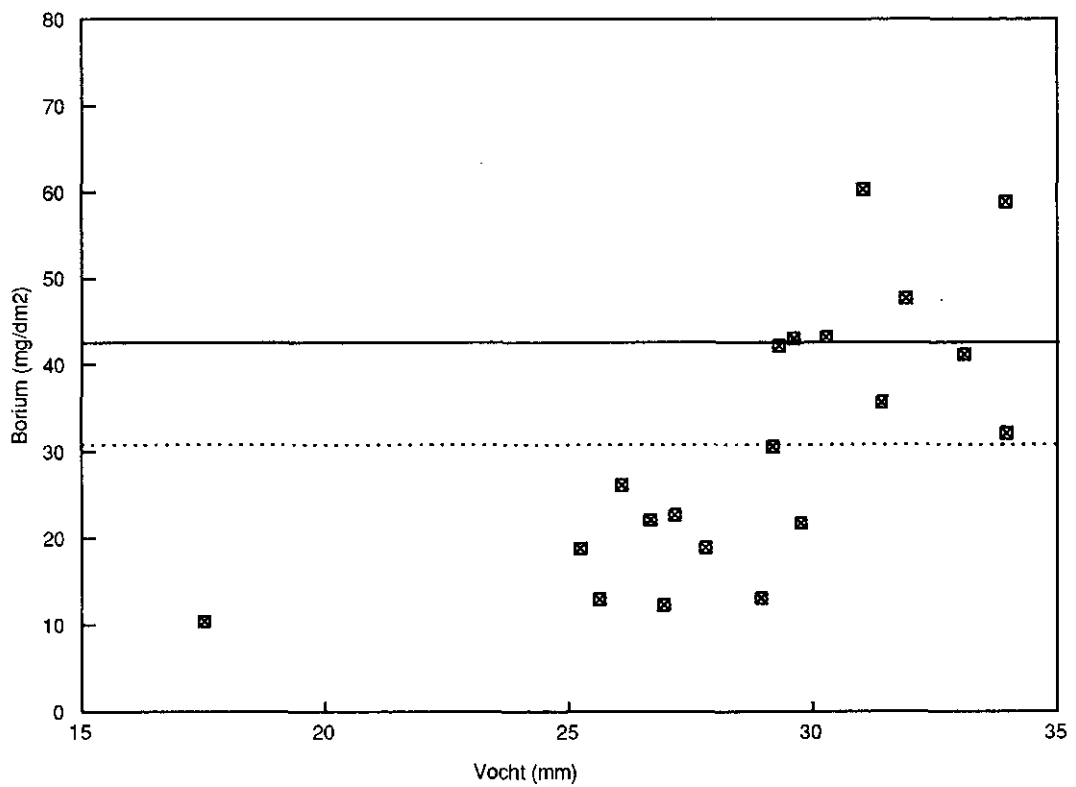


Fig. 25 Verband tussen de hoeveelheid borium in de laag van 0-69 cm en het aantal mm vocht in de laag van 0-13 cm, elf dagen na tracertoediening. De stippellijn geeft de gemiddelde hoeveelheid borium in de kolommen tot 69 cm weer en de doorgetrokken lijn de gemiddeld toegediende hoeveelheid borium.

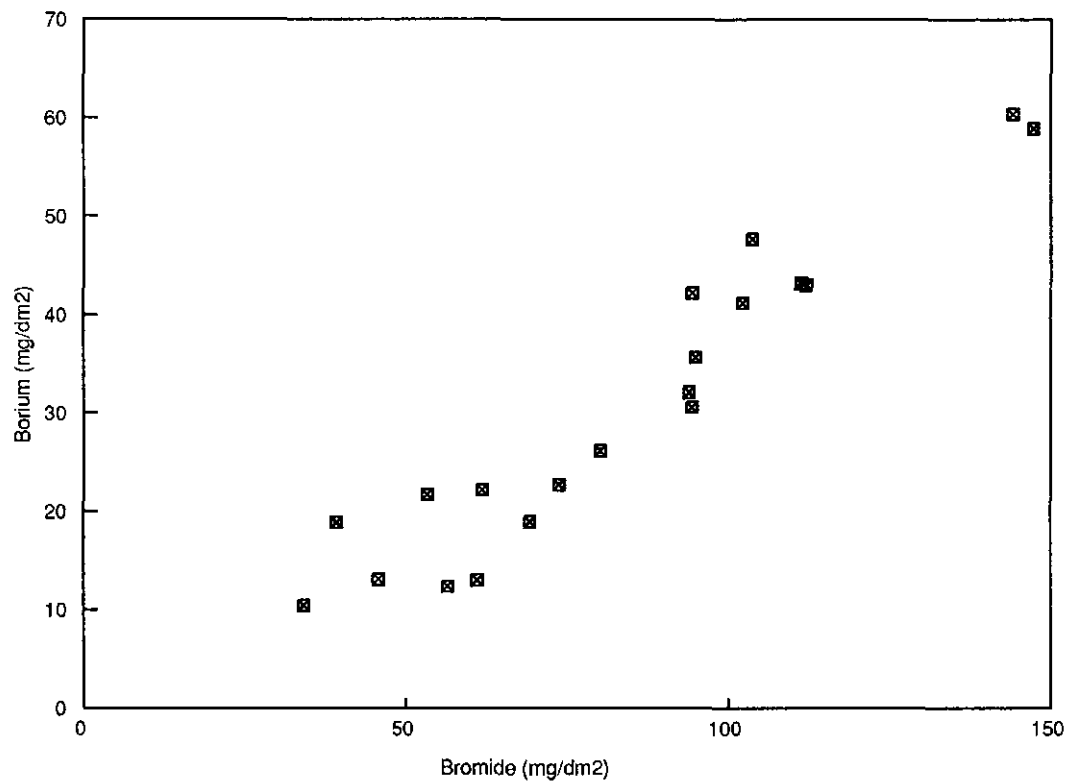


Fig. 26 Het verband tussen de hoeveelheid bromide en borium in de laag van 0-69 cm, elf dagen na tracertoediening

Evenals dit het geval is met bromide hangt ook de hoeveelheid borium in de grondkolommen duidelijk samen met de hoeveelheid vocht in de bovenste 13 cm (fig.25). Bij negen grondkolommen waarin minder dan de gemiddelde hoeveelheid borium werd aangetroffen kwam 25 tot 30 mm vocht in deze laag voor. Bij negen grondkolommen waarin meer dan de gemiddelde hoeveelheid borium werd aangetroffen, bedroeg het aantal mm vocht 29 tot 34. Duidelijk blijkt ook hier dat op plekken waar het vochtgehalte hoger is door preferente stroombanen meer van de borium door de oppervlaktelaag naar toe is verplaatst.

Ondanks dat een deel van de borium aan de bodemdeeltjes is geadsorbeerd, blijkt er toch een duidelijk verband te bestaan tussen de hoeveelheden gemeten borium en bromide in de grondkolommen van de tweede bemonstering (fig. 26). Beide concentratieverschillen houden dus kennelijk verband met het preferente watertransport.

Bij de derde bemonstering, 17 dagen na de tracertoediening, werd in de lagen tot 69 cm diepte nog 65,1% van de toegediende hoeveelheid borium teruggevonden. Na verloop van tijd loopt deze waarde terug tot 8,3% bij de negende bemonstering. Bij de laatste grondkolombemonstering, na 208 dagen, werd nog maar 0,8% van de toegediende hoeveelheid borium teruggevonden (tabel 13).

Tabel 13 *Borium in de laag van 0-69 cm diepte op de verschillende bemonsteringstijdstippen. De borium is uitgedrukt in procenten van de toegediende hoeveelheid (42,4 mg/dm³).*

Bemonstering	Dagen na toediening	Borium (%)	Bemonstering	Dagen na toediening	Borium (%)
2	11	72,4	8	88	10,4
3	17	65,1	9	103	8,3
4	45	41,4	10	130	2,8
5	60	34,5	11	152	1,2
6	67	24,9	12	206	0,8
7	81	14,9			

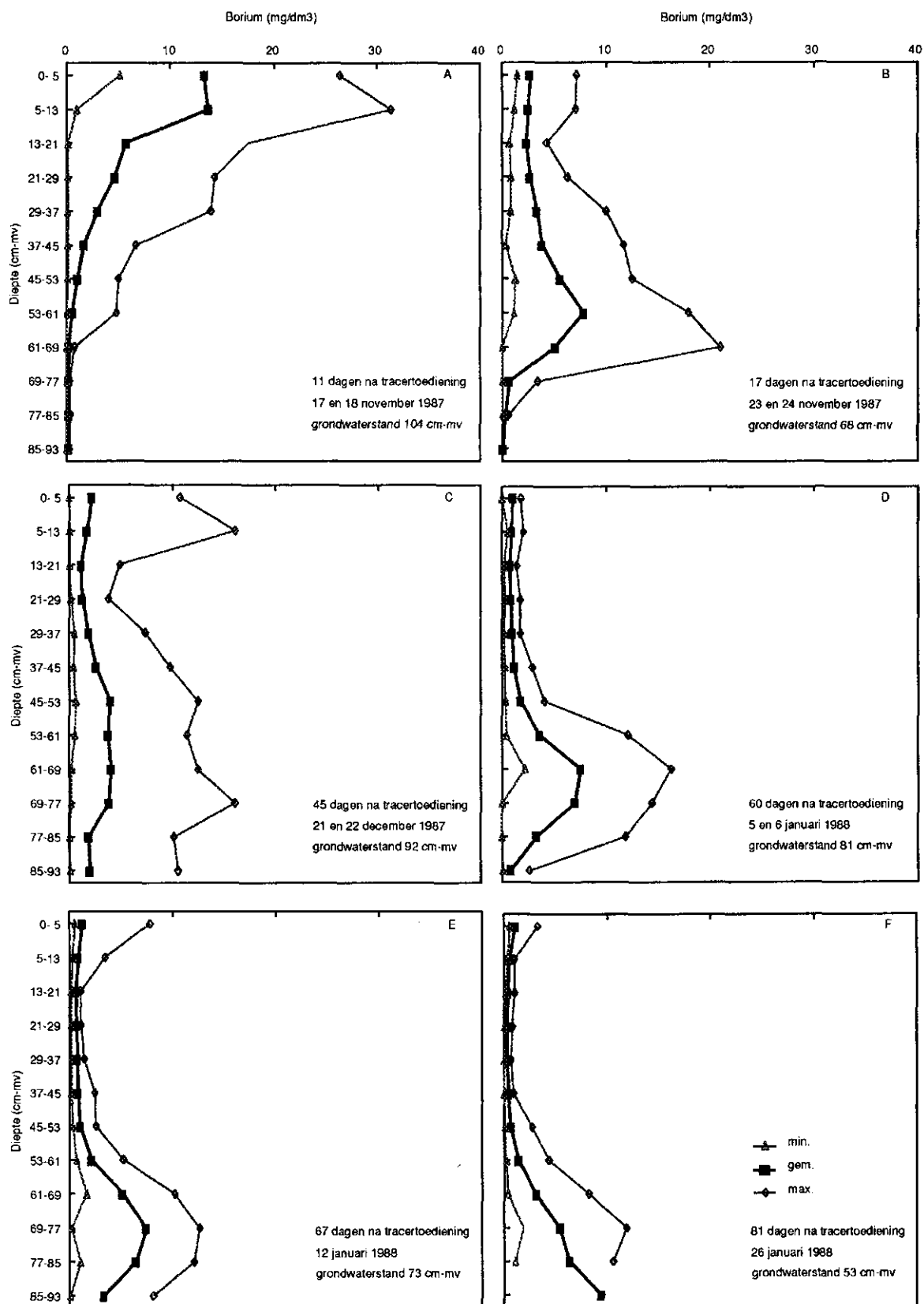


Fig. 27 Het verloop van de hoeveelheid borium in het profiel bij elf grondkolombemonsteringen

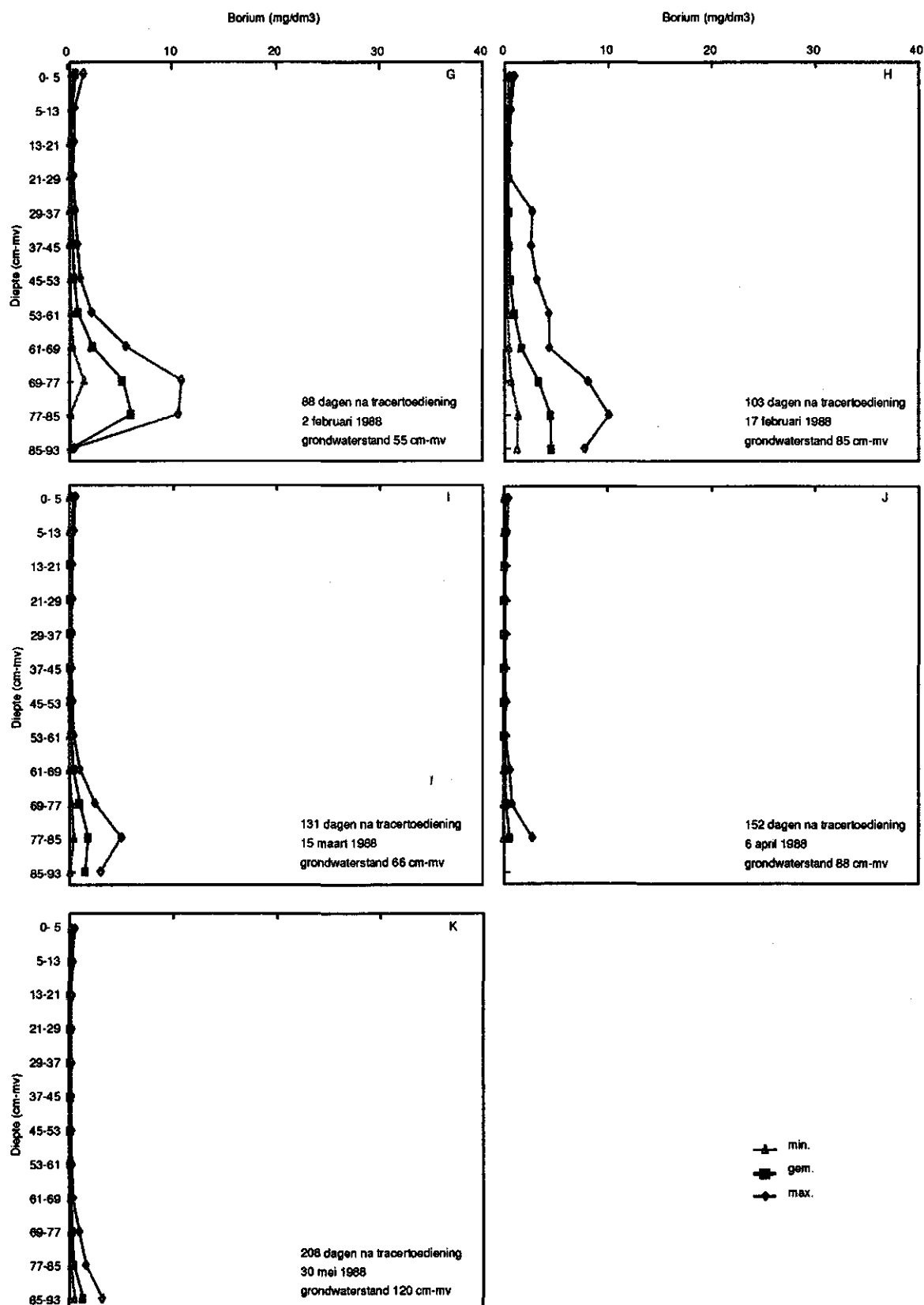


Fig. 27 (vervolg)

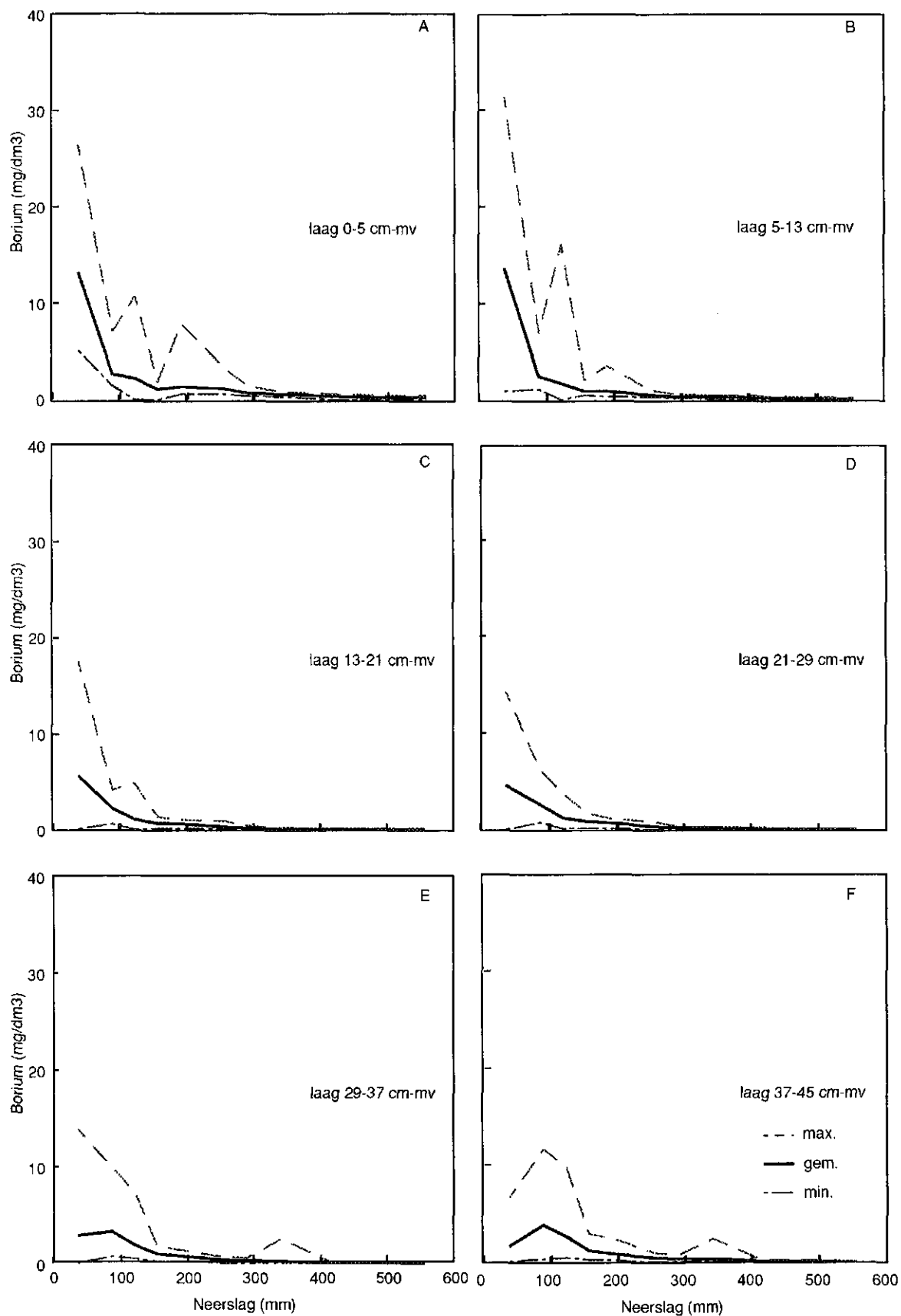


Fig. 28 *Het verloop van de hoeveelheid borium in de verschillende lagen van het profiel weergegeven met de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoediening*

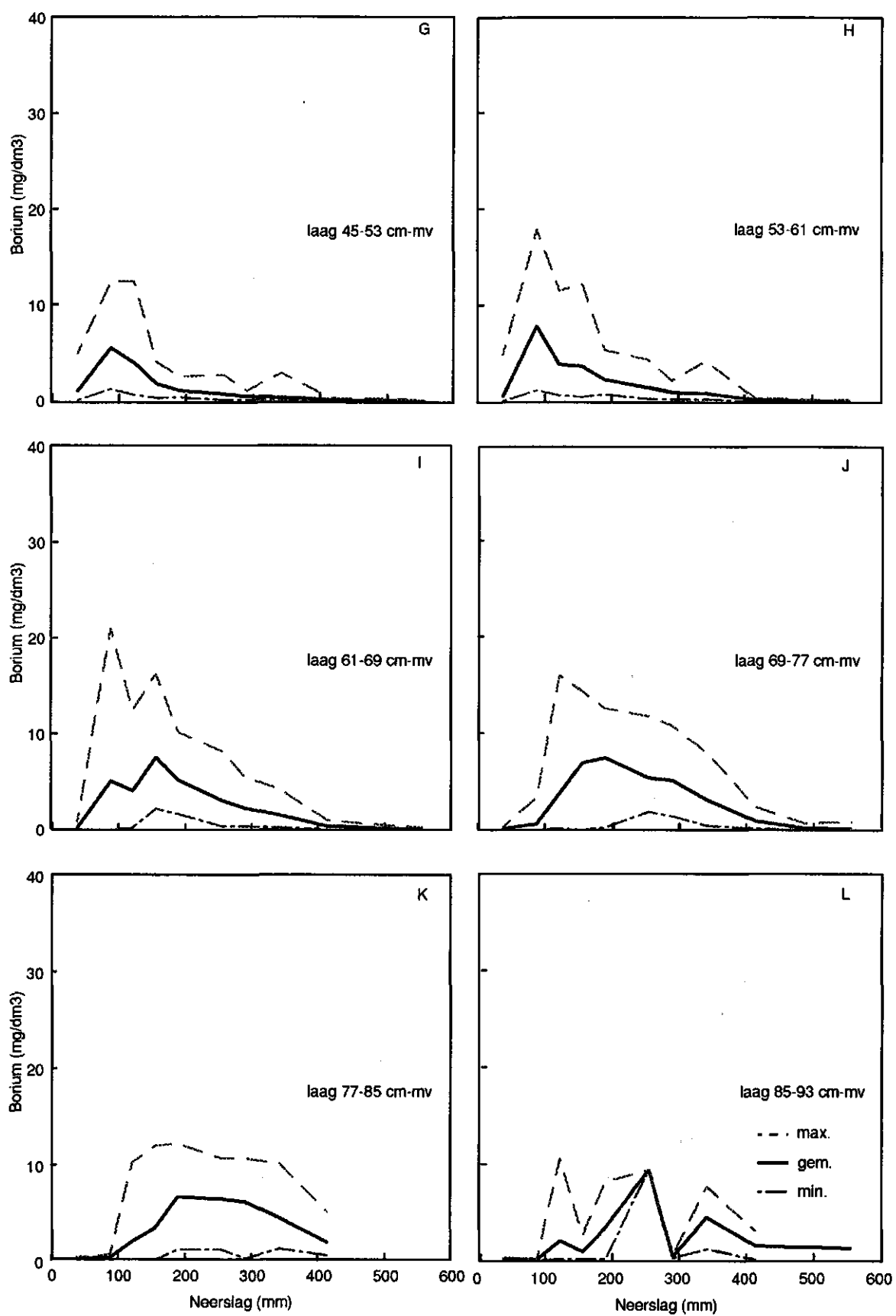


Fig. 28 (vervolg)

12.2 Transport van borium door de bodem

De gemiddelde hoeveelheid borium in het profiel met de maximale en de minimale waarden van de bemonstering zijn weergegeven in figuur 27. Zoals uit figuur 27d blijkt, is bij de vierde bemonstering de meeste borium al uit de bovenste 45 cm verdwenen. Bij de zevende bemonstering stond het grondwater op 53 cm - mv en kwam nagenoeg alle borium in het verzadigde deel van het profiel voor (fig. 27f). Dit betekent dus dat al na 81 dagen bijna alle borium zich in de grondwaterzone bevond. Dit geldt eveneens voor de achtste bemonstering (fig. 27g). Evenals dit bij de bromide het geval is komt ook in het verzadigde deel van het profiel een zeer grote variatie in de hoeveelheid borium voor. Na het dalen van de grondwaterstand komt een zeer grote variatie in de boriumconcentratie voor in de onverzadigde grond tussen 61 en 85 cm (fig. 27h). Bij de laatste twee bemonsteringen is de borium nagenoeg uit het bemonsterde profiel verdwenen (fig. 27j en k).

In figuur 28 is het verloop van de borium weergegeven in afhankelijkheid van de neerslag. In de periode tussen 6 november 1987 en 30 mei 1988 is 556 mm neerslag gevallen. Hiermee werd bijna alle borium tot onder de bemonsteringsdiepte verplaatst. Door de lagen tot 45 cm diepte werd de borium zeer snel verplaatst en is daaruit na 200 mm neerslag praktisch verdwenen (fig. 28a t/m f). In de diepere lagen blijft de borium langer aanwezig. De hoogste gemiddelde concentraties worden hierbij aangetroffen tussen 80 en 200 mm neerslag.

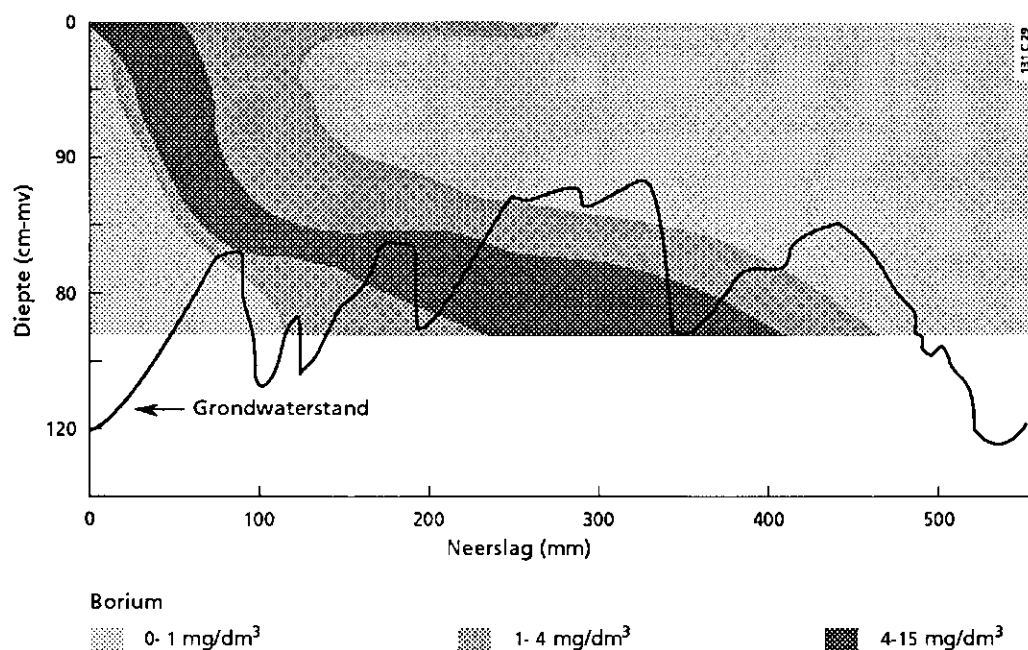


Fig. 29 *Ruimtelijke weergave van de hoeveelheid borium in het profiel bij een toename van de hoeveelheid neerslag sinds de tracertoeiening*

Het transport van de borium door de bodem is weergegeven in figuur 29. Tevens is hierin het verloop van de grondwaterstand weergegeven. De gemiddelde borium concentratie is ingedeeld in drie klassen: <1, 1-4 en 4-15 mg/dm³. Evenals het geval is bij de bromide blijkt de borium vooral bij de eerste 100 mm neerslag snel te zijn verplaatst naar het grondwater. Tot 400 mm neerslag komt nog een vrij hoge concentratie borium in de verzadigde zone voor. Daarna komt bijna geen borium meer in het bemonsterde profiel voor.

12.3 Variatie van de boriumconcentratie

Voor de verschillende bemonsterde lagen is bij de twaalf bemonsteringen de gemiddelde gemeten borium weergegeven in tabel 14. Zowel met de diepte als in de tijd komen grote verschillen voor in de gemiddelde boriumconcentratie.

Tabel 14 Gemiddelde boriumconcentratie in de grond (mg/dm³) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0- 5	0,00	13,24	2,65	2,18	1,06	1,33	1,10	0,63	0,57	0,34	0,18	0,23
5-13	0,00	13,63	2,47	1,71	0,94	0,89	0,53	0,36	0,35	0,22	0,12	0,08
13-21	0,00	5,72	2,31	1,19	0,76	0,67	0,37	0,25	0,21	0,11	0,04	0,03
21-29	0,00	4,62	2,64	1,25	0,85	0,74	0,35	0,25	0,20	0,11	0,04	0,03
29-37	0,00	2,91	3,26	1,92	0,99	0,78	0,36	0,27	0,29	0,08	0,03	0,02
37-45	0,00	1,63	3,80	2,63	1,18	0,84	0,39	0,34	0,31	0,07	0,03	0,02
45-53	0,00	0,99	5,54	3,99	1,78	1,11	0,70	0,51	0,41	0,12	0,05	0,01
53-61	0,00	0,47	7,78	3,79	3,61	2,20	1,44	0,87	0,79	0,19	0,05	0,03
61-69	0,00	0,15	5,07	4,09	7,52	5,17	3,08	2,25	1,51	0,38	0,16	0,07
69-77	0,00	0,09	0,61	3,84	6,95	7,47	5,43	5,18	3,20	0,97	0,21	0,17
77-85	0,00	0,10	0,25	1,90	3,31	6,47	6,34	6,04	4,36	1,80	0,56	0,31
85-93	0,00	0,10	0,05	2,00	0,86	3,38	9,39	0,35	4,41	1,52		1,25

Tabel 15 Standaardafwijking van de boriumconcentratie in de grond (mg/dm³) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5	5,23	1,17	2,39	0,35	1,53	0,56	0,26	0,14	0,13	0,14	0,08	0,08	1,0
5-13	7,76	1,28	3,35	0,36	0,63	0,16	0,10	0,08	0,10	0,09	0,05	0,05	1,2
13-21	5,21	1,00	1,00	0,37	0,25	0,19	0,10	0,05	0,08	0,04	0,04	0,04	0,7
21-29	4,09	1,30	0,81	0,34	0,31	0,18	0,11	0,06	0,07	0,04	0,03	0,03	0,6
29-37	3,50	2,04	1,65	0,46	0,40	0,17	0,15	0,53	0,07	0,04	0,03	0,03	0,8
37-45	1,89	2,36	2,48	0,65	0,51	0,21	0,22	0,48	0,06	0,04	0,03	0,03	0,7
45-53	1,60	2,74	3,94	1,01	0,60	0,54	0,30	0,59	0,08	0,06	0,03	0,03	1,0
53-61	1,06	4,53	2,92	2,66	1,29	1,05	0,58	0,99	0,13	0,06	0,04	0,04	1,3
61-69	0,15	6,26	3,51	3,26	2,69	2,07	1,51	1,30	0,32	0,17	0,06	0,06	1,8
69-77	0,06	0,87	3,85	3,34	2,88	2,61	2,63	2,12	0,68	0,21	0,17	0,17	1,6
77-85	0,07	0,17	2,53	2,88	3,08	2,71	2,63	2,16	1,53	0,77	0,31	0,31	1,6
85-93	0,07	0,00	2,88	0,78	3,36	0,00	0,14	2,42	1,47		0,97	0,97	1,1

De standaardafwijking van de hoeveelheid borium varieert in de bemonsterde lagen tussen 0,03 en 7,76 mg/dm³ (tabel 15).

De variatiecoëfficiënt varieert tussen 22 en 227%, waarbij de hoogste waarden vooral voorkomen bij de laagste boriumconcentraties (tabel 16).

Tabel 16 Variatiecoëfficiënt van de boriumconcentratie in de grond (%) van twaalf dieptelagen bij twaalf bemonsteringen

Diepte cm-mv	Bemonstering												gem. 1 - 12
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0- 5		40	44	109	32	115	51	41	24	37	81	36	55
5-13		57	52	196	38	71	30	29	22	44	76	63	62
13-21		91	43	84	48	38	51	39	22	70	100	132	65
21-29		89	49	65	40	42	51	44	32	69	117	124	65
29-37		120	62	86	46	51	47	56	183	81	150	198	98
37-45		116	62	94	55	61	54	63	158	82	137	147	93
45-53		162	49	99	57	54	77	60	146	65	119	194	98
53-61		227	58	77	74	59	73	67	125	73	112	137	98
61-69		102	123	86	43	52	67	67	86	84	107	92	83
69-77		63	142	100	48	39	48	51	66	71	100	98	75
77-85		67	68	133	87	48	43	44	49	85	139	97	78
85-93		67		144	91	99		40	55	97		78	84

13 BROMIDE EN BORIUM IN HET GRONDWATER

13.1 Mogelijkheden van grondwaterbemonstering in de diverse buizen

De grondwaterstand varieerde in de periode van onderzoek tussen 47 en 144 cm - mv. De grondwaterstandsbuizen waarvan de onderste 20 cm was geperforeerd reikten tot 75, 95, 115, 135 en 165 cm - mv. Zoals in figuur 30 is te zien kon uit de diepste grondwaterstandsbuizen altijd een monster worden genomen. In deze buizen is in de periode tussen 4 november 1987 en 21 december 1988 zevenenvijftig keer het grondwater bemonsterd. Uit de grondwaterstandsbuizen die tot 135, 115 en 95 cm diepte reikten, zijn in deze periode respectievelijk 27, 20 en 15 keer watermonsters genomen. Omdat uit de grondwaterstandsbuizen tot 75 cm diepte slechts enkele malen watermonsters konden worden genomen, wordt op de meetresultaten hiervan niet verder ingegaan.

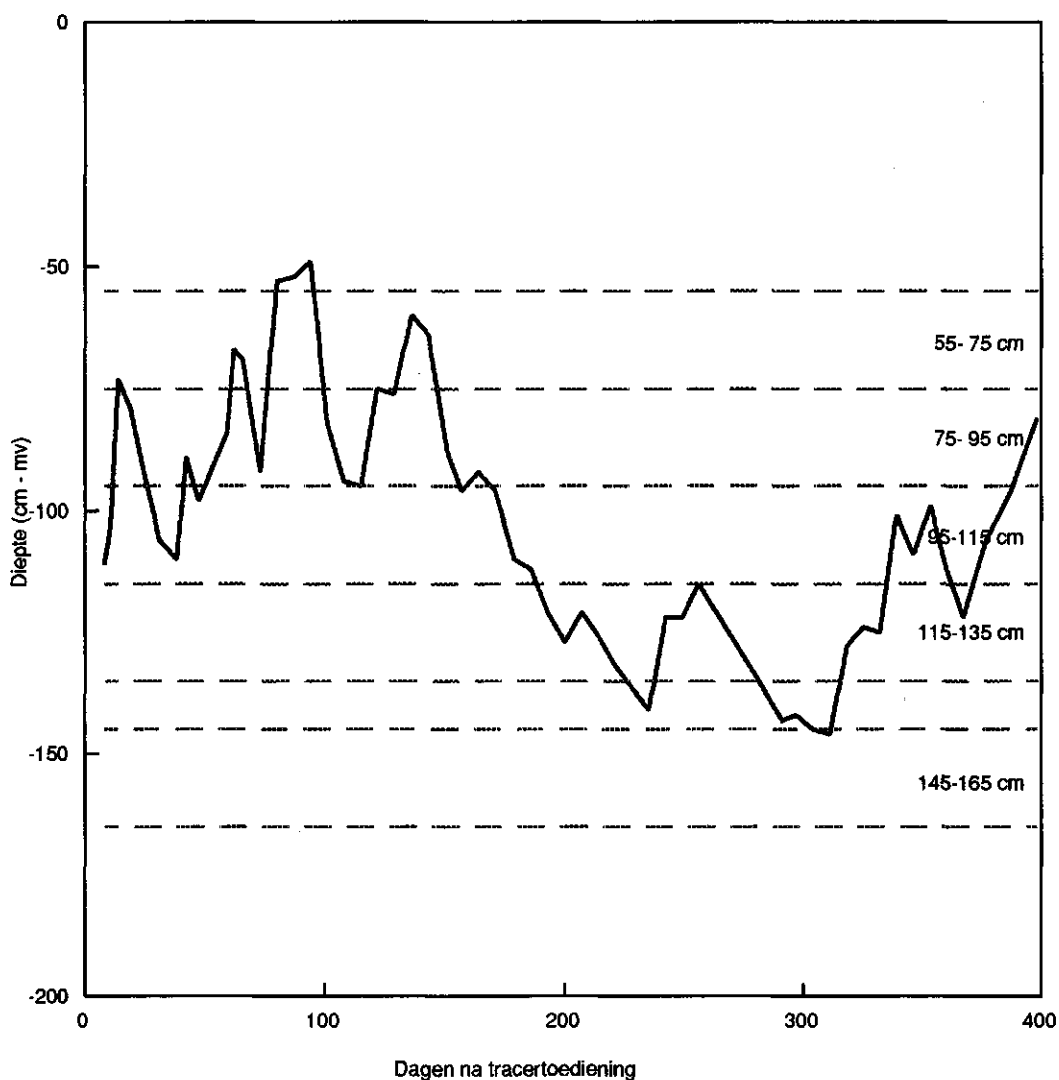


Fig. 30 Grondwaterstandsverloop tijdens de periode van onderzoek en de diepte van het geperforeerde deel van de grondwaterstandsbuizen

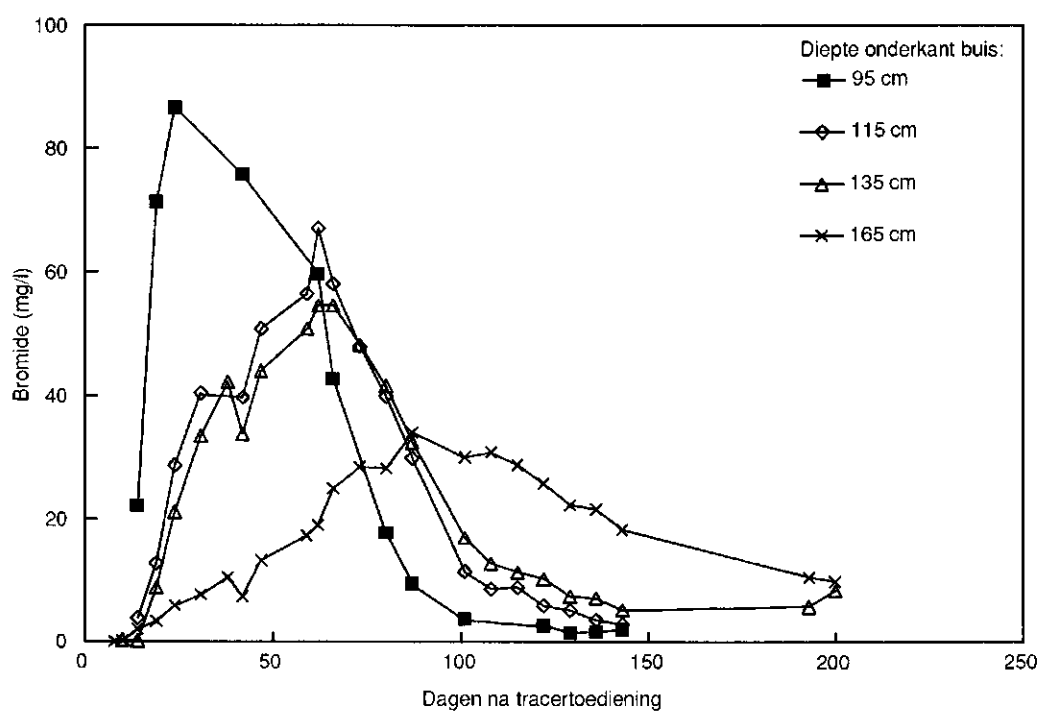


Fig. 31 Verloop van de gemiddelde bromideconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, tot 200 dagen na tracertoediening

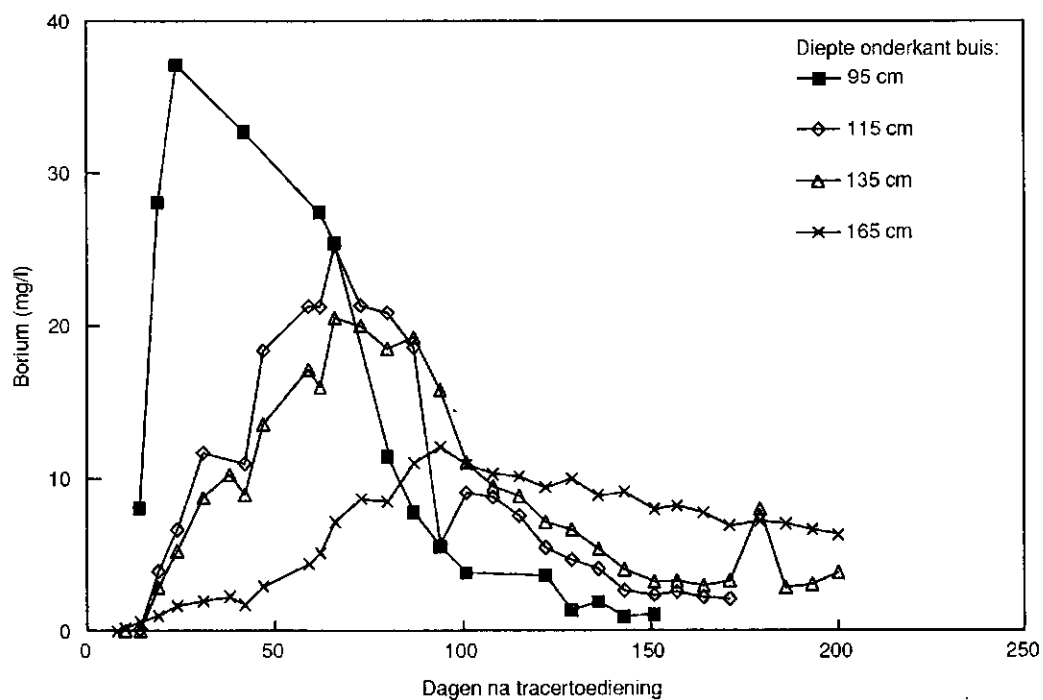


Fig. 32 Verloop van de gemiddelde boriumconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, tot 200 dagen na tracertoediening

13.2 Het verloop van de gemiddelde bromide- en boriumconcentratie in het grondwater

Zoals in de figuren 31 en 32 is te zien werden tussen ca. 14 en 60 dagen na de tracertoediening de hoogste concentratie bromide en borium gemeten in het grondwater van de buizen die reikten tot 95 cm - mv en de laagste concentraties in de buizen die reikten tot 165 cm - mv. De meeste bromide en borium was in deze periode dus duidelijk in het bovenste deel van het grondwater aanwezig. Na 100 dagen was in tegenstelling hiermee de meeste bromide en borium juist in de diepste buizen aanwezig en nam de hoeveelheid af naarmate de buizen minder diep in de grond zaten. Duidelijk blijkt hieruit dus dat de bromide en borium naar het diepere grondwater zijn verplaatst.

Zoals in figuur 33 is te zien werd in het grondwater uit de buizen tot 135 en 165 cm - mv nog bromide en borium gemeten tot meer dan vierhonderd dagen na de tracertoediening.

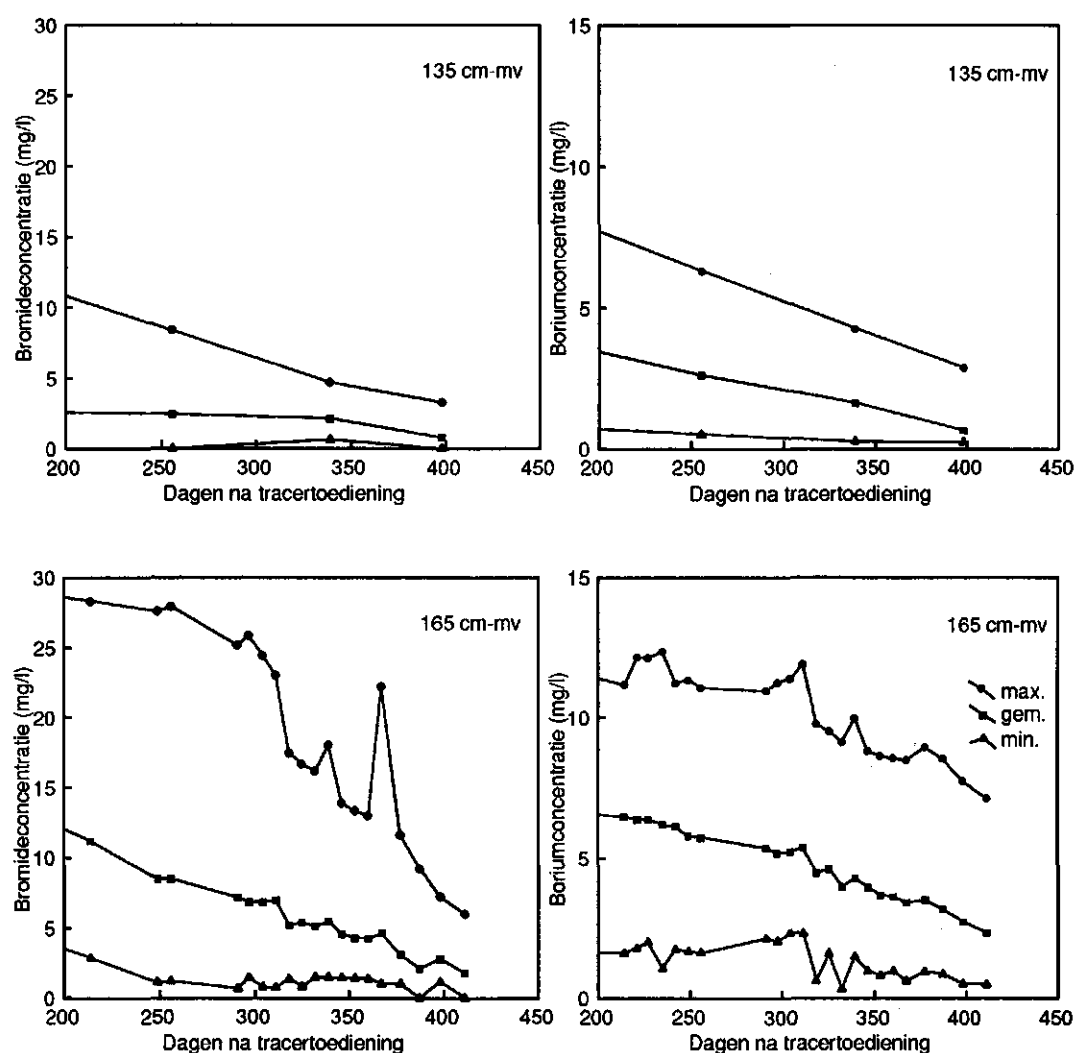


Fig. 33 Verloop van de gemiddelde bromide- en boriumconcentratie in het grondwater gemeten in de buizen geplaatst tot 135 en 165 cm diepte, van 200 tot 411 dagen na tracertoediening. Bovendien zijn de hoogste en de laagste gemeten concentraties weergegeven.

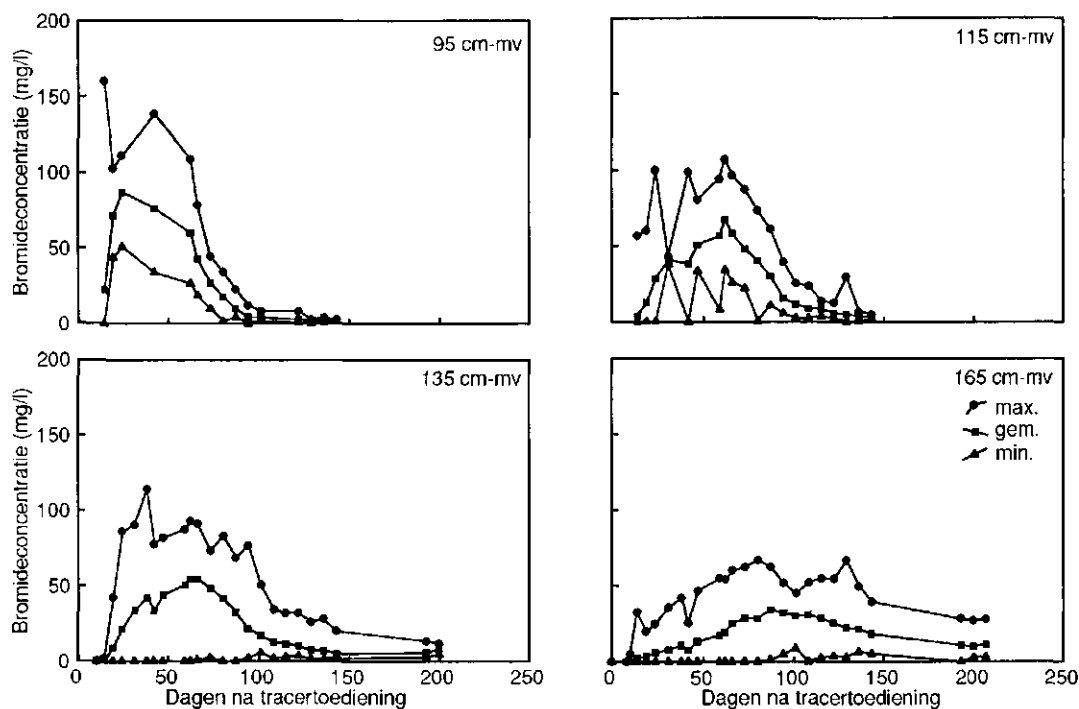


Fig. 34 Verloop van de gemiddelde bromideconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, tot 200 dagen na tracertoediening. Bovendien zijn de minimaal en maximaal gemeten waarden weergegeven.

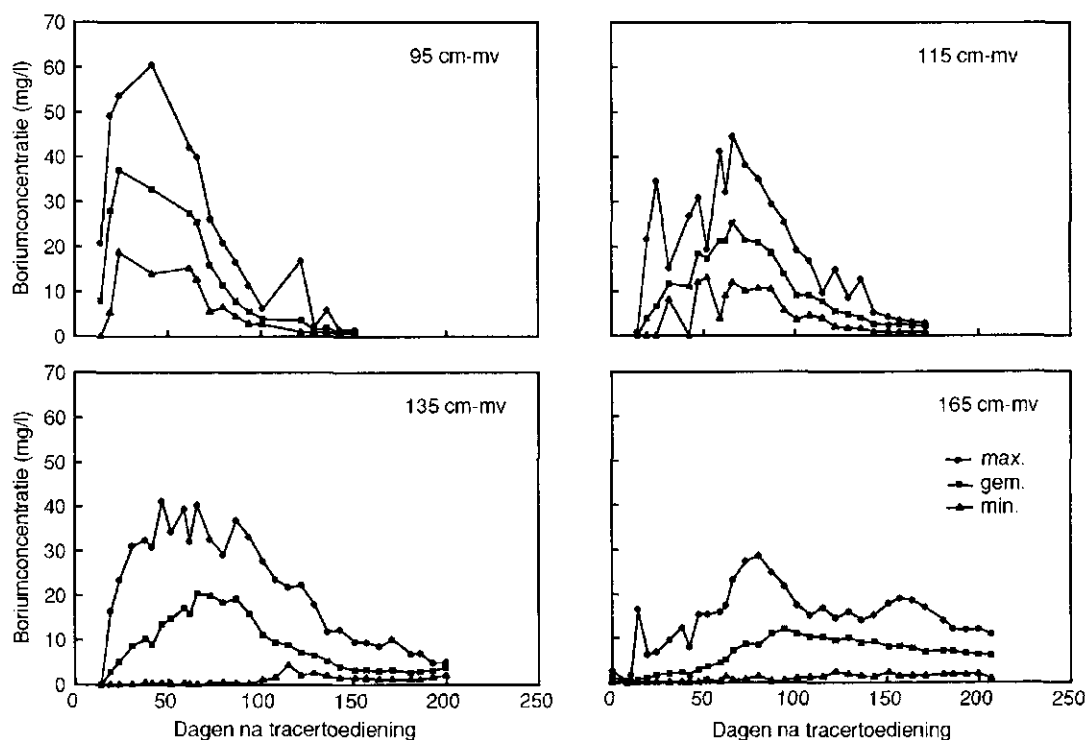


Fig. 35 Verloop van de gemiddelde boriumconcentratie in het grondwater gemeten in buizen, geplaatst op vier verschillende diepten, tot 200 dagen na tracertoediening. Bovendien zijn de minimaal en maximaal gemeten waarden weergegeven.

13.3 Variatie van de bromide- en boriumconcentratie in het grondwater

Zoals in figuur 34 is te zien komt er een grote variatie in de bromideconcentratie voor in het grondwater van plaats tot plaats op de verschillende bemonsteringsdagen. Zo komt bijvoorbeeld in het grondwater uit de buizen op 95 cm - mv als minimale waarde vaak maar de helft en als maximale waarde de dubbele hoeveelheid van de gemiddelde bromideconcentratie voor. In de twee diepste buizen wordt gedurende de hele bemonsteringsperiode in sommige buizen praktisch niets en in andere buizen tussen 50 en 100 mg bromide per liter grondwater gemeten.

Zoals in figuur 35 is te zien geeft de variatie in boriumconcentratie in het grondwater een vergelijkbaar beeld met dat van de bromide. Ook in de periode van 200-411 dagen na tracertoediening werd een relatief grote variatie in de concentraties bromide en borium gemeten. Uit al deze meetgegevens blijkt dus duidelijk dat dat voor het verkrijgen van een goed gemiddelde een groot aantal meetpunten nodig is, omdat op ieder moment vlak naast elkaar hoge en lage concentraties in het grondwater kunnen voorkomen.

14 CONCLUSIES

- De onderzochte zandgrond heeft een waterafstotende bovenlaag tot maximaal 53 cm diepte, plaatselijk komt echter al op 37 cm diepte goed bevochtigbaar zand voor.
- Ten gevolge van de waterafstotendheid komen in deze zandgrond preferente stroombanen voor, waardoor in de periode van onderzoek het vochtgehalte van de grond sterk varieerde van plek tot plek.
- Van de toegediende hoeveelheid tracer werd bij de eerste bemonstering na de tracertoediening tot op een diepte van 69 cm gemiddeld 99,3% bromide en 72,4% borium in de bemonsterde grondkolommen teruggevonden. De variatie in de bromide- en de boriumconcentratie tussen de grondkolommen was echter zeer groot. Deze grote variatie houdt duidelijk verband met het voorkomen van de preferente banen.
- Bij de eerste bemonstering na de tracertoediening werd een duidelijk verband gevonden tussen de hoeveelheid bromide en borium in de grondkolommen en de hoeveelheid vocht in de bovenste 13 cm. Hoe natter de bovenlaag des te groter was de totale hoeveelheid bromide en borium in de kolommen. Dit is een gevolg van laterale toestroming van water en daarin opgeloste stoffen door de oppervlaktelaag naar de preferente banen.
- Als gevolg van preferente stroming werd veertien dagen na de tracertoediening de eerste bromide en borium al in het grondwater aangetroffen. De grondwaterstand was op dat moment 85 cm - mv.
- Tegen de verwachting in is ook in het verzadigde deel van het profiel een zeer grote variatie in de bromide- en boriumconcentratie vastgesteld. Uit het onderzoek blijkt duidelijk dat ook hierbij voor het verkrijgen van een goed gemiddelde een groot aantal meetpunten nodig is, omdat op ieder moment vlak naast elkaar zowel hoge als lage concentraties kunnen voorkomen.

LITERATUUR

Bronswijk, J.J.B., L.W. Dekker en C.J. Ritsema, 1990. Preferent transport van water en opgeloste stoffen in de Nederlandse bodem: meer regel dan uitzondering? *H2O* 22: 594-597 en 619.

Butters, G.L., W.A. Jury and F.F. Ernst, 1989. Field scale transport of bromide in an unsaturated soil: 1. Experimental methodology and results. *Water Resources Research* 25: 1575-1581.

Dam, J.C. van, J.M.H. Hendrickx, H.C. van Ommen, M.H. Bannink, M.Th. van Genuchten and L.W. Dekker, 1990. Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *Journal of Hydrology* 120: 359-379.

Dekker, L.W., 1988. Verspreiding, oorzaken, gevolgen en verbeteringsmogelijkheden van waterafstotende gronden in Nederland. Rapport 2046, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Dekker, L.W. and P.D. Jungerius, 1990. Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena Supplement* 18, Dunes of the European Coasts, 173-183.

Dekker, L.W., W. Hamminga en R. Dijksma, 1991. Sluipwegen voor zakkend water. Hoe water in zand een snelle route verkiest. *Landbouwkundig Tijdschrift* 103 nr 10: 29-31.

Domhof, J. en G.A. van Soesbergen, 1982. De grondkolom-cilinder. *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 22(3):187-190.

Grassia, A., 1988. On the depth distribution of an applied tracer in groundwater field experiments. *Journal of Hydrology*. Vol. 27, 1: 26-34.

Hendrickx, J.H.M., L.W. Dekker, E.J. van Zuilen, and O.H. Boersma, 1988. Water and solute movement through a water repellent sand soil with grasscover. *Proceedings of the International conference and workshop on the validation of flow and transport models for the unsaturated zone*, Ruidoso, New Mexico, pp. 131-146.

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., 1987. Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.

K.N.M.I., 1988. Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Nederland.

Krammes, J.S. and L.F. DeBano, 1965. Soil wettability: a neglected factor in watershed

management. Water Resour. Res. 1: 283-286.

McPhail, M., A.L. Page, and F.T. Bingham, 1972. Adsorption interactions of monosilicic and boron acid on hydrous oxides of iron and aluminium. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 36, pp 510-514.

Ommen, H.C. van, M.Th. van Genuchten, W.H. van der Molen, R. Dijkma, and J. Hulshof, 1988. Experimental and theoretical analysis of solute transport from a diffuse source of pollution. In: H.C. van Ommen (ed), Transport from diffuse sources of contamination and its application to a coupled unsaturated-saturated system. LU, Wageningen. pp 58-96.

Ommen, H.C. van, R. Dijkma, J.M.H. Hendrickx, L.W. Dekker, J. Hulshof and M. van den Heuvel, 1989. Experimental assesment of preferential flow paths in a field soil. Journal of Hydrology 105: 253-262.

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 en 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.

Ritsema, C.J., L.W. Dekker, J.M.H. Hendrickx and W. Hamminga, 1993. A conceptual model for preferential flow and transport in a water-repellent sandy soil. Submitted for publication in Water Resources Research.

Sims, J.R., and F.T. Bingham, 1967. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides, and soil materials: I. Layer silicates. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 31: 728-732.

Sims, J.R., and F.T. Bingham, 1968. Retention of boron by silicates, sesquioxides, and soil materials: III. Iron- and aluminium-coated layer silicates and soil materials. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol.32: 369-373.

Stichting voor Bodemkartering, 1967. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000, toelichting bij kaartblad 36 Goedereede en 42 Oost Zierikzee. Wageningen, 70 blz.

Vonk, N., 1984. Ion chromatography with a high-capacity ion-exchanger and refractive index, ultraviolet and conductivity detection systems. European Spectroscopy News 53: 25-27.

Niet-gepubliceerde bronnen

Hamminga, W., 1985. Het inductief gekoppeld plasma/ atomaire emissie spectrofotometer (ICP/AES). De meting van natrium, kalium, calcium en magnesium. Nota 1621, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 30 blz.

Hamminga, W., 1990. Het gebruik van een spuitboom voor het toedienen van een merkstof bij de bestudering van transportprocessen in de bodem. Interne Mededeling 70, Staring Centrum, Wageningen, 14 blz.

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

Hamminga, W., P.J.A. Bakker en M.M.T. Heynen, 1990. Het ontwerpen van een programma met de inductief gekoppeld plasma/atomaire emissiespectrofotometer (ICP/AES). Interne Mededeling 37, Staring Centrum, Wageningen, 19 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.

Stokkermans, J.S.C. en E.C. Vos, 1987. Handleiding voor bemonstering in het veld en uitvoering van laboratoriumwerkzaamheden voor de bepaling van bodemfysische karakteristieken. Interne Mededeling 78, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen. 65 blz.

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

Veerman, G.J. en J. Stolte, 1991. Voorschriften bodemfysische bepalingsmethoden; versie 1.0. Interne Mededeling 120, Staring Centrum, Wageningen, 61 blz.