

# **Afspoeling van amitrol, atrazin en glyfosaat vanaf een betonklinkerverharding**

**Veldproeven en modelsimulaties**

**W.H.J. Beltman**

**H.J.J. Wieggers**

**M.L. de Rooy\***

**A.M. Matser**

**\* Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling**

**Alterra-rapport 319**

**Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001**

## REFERAAT

Beltman, W.H.J., H.J.J. Wieggers, M.L. de Rooy en A.M. Matser 2001. *Afspoeling van amitrol, atrazin en glyfosaat vanaf een betonklinkerverharding: veldproeven en modelsimulaties*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 319.72 blz. 14 fig.; 16 tab.; 14 ref.

In vier veldproeven op 100 m<sup>2</sup> betonklinker bestrating is de afspoeling van amitrol, atrazin en glyfosaat naar het regenwaterriool gemeten. De totaal afgespoelde hoeveelheid is 6 tot 44 % van de dosering. Het grootste deel spoelde af met de eerste millimeters neerslag. Infiltratie naar de ondergrond en de oplosbaarheid van de herbiciden bleken de belangrijkste afspoelingsbepalende processen. Adsorptie van de gebruikte middelen aan het steenoppervlak had nauwelijks invloed op de afspoeling. Door toevoegen van de processen infiltratie en opname van herbicide in de steen aan het model kon de afspoeling beter worden gesimuleerd.

Trefwoorden: afspoeling, amitrol, atrazin, bestrijdingsmiddelen, glyfosaat, verhardingen

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 43,00 (€20) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 319. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,  
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.  
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

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 Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

# Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrond en probleemstelling	9
1.2 Doelstelling	10
1.3 Onderzoeksopzet	11
1.4 Leeswijzer	11
2 Opzet veldproeven	13
2.1 Keuze herbiciden	13
2.2 Veldproeven	13
2.2.1 Beschrijving van het proefveld	13
2.2.2 Toediening herbiciden	15
2.2.3 Uitvoering en monsternamen	16
2.3 Laboratorium bepalingen	17
2.3.1 Behandelingen betonklinkers en grond	17
2.3.2 Extractie van betonklinkers	18
2.3.3 Extractie van grondmonsters	19
2.3.4 Chemische analyses	19
3 Resultaten veldproeven	21
3.1 Waterbalans	21
3.2 Afspoeling van bromide	23
3.3 Afspoeling van amitrol, atrazin, glyfosaat	26
3.4 Massabalansen van amitrol, atrazin en glyfosaat	29
4 Discussie veldproeven	33
4.1 Water	33
4.2 Middelen algemeen	35
4.3 Bromide en amitrol	36
4.4 Atrazin	36
4.5 Glyfosaat	37
5 Simulatie van de veldproeven	39
5.1 Inleiding	39
5.2 Korte beschrijving PROVO	39
5.3 Simulaties	41
5.3.1 Invoergegevens	41
5.3.2 Kalibratie met metingen proef 1	42
5.3.3 Resultaten simulaties	44
5.4 Discussie	50
6 Algemene discussie	51
6.1 Verloop van de afspoeling	51
6.2 Berekening, infiltratie en afspoeling	52

6.3 Adsorptie en absorptie	53
6.4 Modellering	53
7 Conclusies en aanbevelingen	55
Literatuur	57
<b><i>Bijlagen</i></b>	
1 Analyse resultaten monsters afgespoeld water van de veldproeven	59
2 Grafieken van de afspoeling van bromide, amitrol, atrazin en glyfosaat in proef 2 en proef 3	63
3 Gehalten vocht, bromide, amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA in grondmonsters gestoken onder bestrating voor en na proef 3 en proef 4	65
4 Cumulatief afgespoeld water en daaruit berekende infiltratie	69

## **Woord vooraf**

Dit onderzoek werd uitgevoerd binnen een gezamenlijk project van RIZA en Alterra. Het Alterra-deel is onderdeel van het DWK programma 343 'Beheersing en bestrijding van onkruiden' van het Ministerie van LNV. Door middel van veldproeven en modelsimulaties zijn de processen geïdentificeerd die het belangrijkste zijn voor de mate van afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen.

Het onderzoek is op Alterra uitgevoerd in de periode van mei 2000 tot en met maart 2001. Het eindrapport is door Alterra opgesteld met bijdragen van RIZA. De veldproeven binnen het onderzoek hebben plaatsgevonden in augustus en september 2000. Johan Smelt (Alterra) heeft nuttige adviezen gegeven voor het uitvoeren van de berekening in de veldproeven. Rob Smidt (Alterra) assisteerde bij het berekenen van de doseringen en bij het uitvoeren van de bespuiting met de herbiciden. Plant Research International (Wageningen UR) stelde zijn terrein ter beschikking voor de veldproeven.



## **Samenvatting**

### ***Achtergrond en doel***

Om straten, trottoirs, parkeerplaatsen en andere verhardingen vrij te houden van onkruiden gebruiken overheden, bedrijven en particulieren onkruidbestrijdingsmiddelen (herbiciden). Met een regenbui kunnen deze middelen rechtstreeks of via het riool afspoelen naar het oppervlaktewater. Daar terecht gekomen vormen ze een risico voor de planten en dieren in het water en kunnen problemen ontstaan bij de winning van drinkwater uit oppervlaktewater.

De verontreiniging van het oppervlaktewater door het gebruik van onkruidbestrijdingsmiddelen op verhardingen is tot nu toe slechts globaal geschat en incidenteel gemeten. Voor de toelatingsbeoordeling van deze stoffen en de voortgangsrapportages over emissies en integraal waterbeheer is er behoefte aan betrouwbare gegevens over de afspoeling van deze stoffen naar oppervlaktewater.

Doel van dit onderzoek is de afspoeling van onkruidbestrijdingsmiddelen vanaf een verharding te meten en de belangrijkste factoren te identificeren die van invloed zijn op de afspoeling. De resultaten van de metingen zijn gebruikt om de modelmatige beschrijving van de afspoeling te verbeteren en uit te breiden. Hiermee kunnen betere schattingsmethoden worden ontwikkeld voor de afspoeling van onkruidbestrijdingsmiddelen vanaf verhardingen.

### ***Uitvoering en resultaten***

Voor dit onderzoek zijn vier proeven gedaan waarbij de afspoeling van de onkruidbestrijdingsmiddelen amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA, een omzettingsproduct van glyfosaat, zijn gemeten. Deze stoffen zijn samen met de tracer bromide gespoten op een parkeerplaats van 100 m<sup>2</sup> bestraat met betonklinkers. Daarna is de parkeerplaats beregend. Bij de eerste 2 proeven is hiermee een kwartier na de bespuiting gestart. Bij de laatste twee proeven is drie uur gewacht alvorens te gaan beregenen.

In de proeven spoelde ongeveer de helft (45-61%) van de neerslag af en infiltreerde de rest in de ondergrond. Van de hoeveelheid opgebrachte bromide (tracer) spoelde 6-23% af. Voor amitrol en glyfosaat was dit ongeveer hetzelfde. De afgespoelde hoeveelheid atrazin was ongeveer het dubbele met 18-44% van de verspoten hoeveelheid.

### ***Conclusies en aanbevelingen***

Infiltratie van regenwater door de bestrating naar de ondergrond leidt ertoe dat een groot deel van de verspoten hoeveelheden herbiciden niet afspoelen. De analyse van bodemonsters voor en na de laatste twee proeven bevestigen dit. De gehalten in de bodem direct onder de bestrating waren toegenomen.

Een sterk adsorberend herbicide als glyfosaat spoelt in vergelijkbare hoeveelheden af als een minder adsorberende stof als amitrol. De afspoeling van het slecht oplosbare herbicide atrazin is hoger dan van de andere middelen, waarschijnlijk doordat de concentratie in het eerste water tegen de grens van de oplosbaarheid aan zit. Waar de andere (goed oplosbare) stoffen met de eerste neerslag voor een groot deel naar de ondergrond worden getransporteerd, blijft atrazin liggen en is beschikbaar voor afspoeling.

Met de bestaande modelbeschrijvingen kan het afspoelgedrag van amitrol en glyfosaat goed worden gesimuleerd. Het model PROVO onderschat de afspoeling van atrazin in vergelijking met de metingen. Dit hangt vermoedelijk samen met de lage oplosbaarheid van atrazin. Voor scenarioberekeningen is het nodig dat onderscheid kan worden gemaakt naar het type bestrating.

In het afspoelende regenwater van de eerste regenbui na de toepassing van een onkruidbestrijdingsmiddel op verhardingen worden de hoogste concentraties aangetroffen. Een langere wachttijd tussen de toepassing van het bestrijdingsmiddel en de eerste bui, 3 uur in plaats van 15 minuten, leidt niet tot lagere concentraties in het afspoelende regenwater of een kleinere totaal vracht.

Uit het onderzoek blijkt dat de infiltratie in de bodem direct na aanvang van de regenbui cruciaal is voor de mate waarin een herbicide af kan spoelen. Bij een vochtige bestrating en ondergrond infiltreert er minder water in de ondergrond en spoelt er meer water en herbicide af. In dit onderzoek spoelt onder deze omstandigheden 20-25% van de goed oplosbare herbiciden af. De afspoeling van de slecht oplosbare stof atrazin is substantieel groter. De adsorptie van herbiciden aan de bestrating heeft in dit onderzoek maar een beperkte invloed op de mate van afspoeling.

Voor het verbeteren van de emissieschattingen is het nodig om rekening te houden met de oplosbaarheid van de herbiciden. Goed oplosbare herbiciden spoelen in gelijke mate af naar het oppervlaktewater, maar slecht oplosbare middelen zullen verschillen.

Er is nader onderzoek nodig naar infiltratieprocessen in bestratingen gedurende de eerste vijf tot tien minuten in een bui. Dit onderzoek geeft tenslotte aanleiding voor verkennend onderzoek naar de emissie van herbiciden via ondergrondse routes naar grondwater en oppervlaktewater (bijvoorbeeld via drains).



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en probleemstelling

Om straten, trottoirs, parkeerplaatsen en andere verhardingen vrij te houden van onkruiden gebruiken overheden, bedrijven en particulieren onkruidbestrijdingsmiddelen (herbiciden). Met een regenbui kunnen deze middelen rechtstreeks of via het riool afspoelen naar het oppervlaktewater. Daar terecht gekomen vormen ze een risico voor de planten en dieren in het water en kunnen problemen ontstaan bij de winning van drinkwater uit oppervlaktewater.

Waterschap Zuiderzeeland (voorheen Heemraadschap Fleverwaard) monitorde afspoelend regenwater en ontvangend oppervlaktewater in de periode 1994-2000. Het waterschap trof enkele maanden na de toepassing op verhardingen nog herbiciden aan in afspoelende neerslag in concentraties tot 750 µg/L (Dekker et al., 2000). Ook AMPA (aminomethylfosfonzuur) werd regelmatig aangetroffen. AMPA is een omzettingsprodukt van glyfosaat dat een probleem vormt bij de bereiding van drinkwater uit oppervlaktewater.

Afspoeling vanaf verhardingen is mogelijk een van de belangrijkste routes voor emissie van herbiciden naar oppervlaktewater. Merkelbach et al. (1999) schatte dat de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen voor 75% bijdraagt aan de totale bestrijdingsmiddelenemissie vanuit de Bommelerwaard naar de Afgedamde Maas in 1995.

Uit proeven op laboratoriumschaal van Shepherd en Heather (1999) blijkt dat: (i) de eerste millimeters afgespoelde neerslag hoge concentraties herbiciden bevatten (circa 30% van de totaal toegediende hoeveelheid (w/w) in de eerste millimeter), (ii) de verharding na de initiële piek herbicide blijft naleveren (na 15 mm afgespoelde neerslag), en (iii) de afspoeling afhankelijk is van het type verharding (asfalt of beton) en herbicide. Shepherd en Heather concluderen dat zowel de sorptie-eigenschappen als de oplosbaarheid van het herbicide een rol spelen. Middelen met een lage sorptiecoëfficiënt die goed oplosbaar zijn spoelen meer af dan andere middelen. Zij konden geen directe relatie met deze middeleigenschappen afleiden. Vijf van zijn zes middelen waren slecht oplosbaar (< 37 mg/L).

Op basis van Shepherd en Heathers bevindingen is het duidelijk dat in afspoelingsproeven de afspoeling van de eerste millimeters in detail moeten worden bestudeerd, dat nalevering van lage concentraties gemeten moet worden en dat geprobeerd moet worden te kwantificeren hoeveel massa er achterblijft in de verharding.

Gezien de bevindingen van Shepherd zijn de praktijkcijfers van Zuiderzeeland waarschijnlijk een onderschatting van de werkelijk afgespoelde vracht: men heeft nooit in de initiële piek gemeten (C. Dekker, 2001, pers. mededeling).

Voor het toelaten van de toepassing van herbiciden op verhardingen is het nodig om te weten welke piekconcentraties in het oppervlaktewater kunnen optreden, om de ecotoxicologische risico's voor oppervlaktewater te kunnen toetsen. Verder is het voor emissieschattingen nodig om betrouwbaar inzicht te krijgen in de totaal afspoelende hoeveelheid herbicide. Op dit moment ontbreken geschikte meetgegevens, en is er ook geen modelinstrument beschikbaar dat de afspoeling vanaf verhardingen goed in beeld brengt. In de toelating worden nu scenario's van Kraaij en Verstappen (1997) gebruikt (Linders et al., 1998). Hierin spoelt de hele dosering af met een eerste regenbui van 7 mm. In de scenario's wordt rekening gehouden met verdunning als gevolg van afvoer van water van niet behandelde oppervlakken en met een verdunning in het volume van het ontvangende oppervlaktewater. Er wordt geen rekening gehouden met sorptie (adsorptie en desorptie) van herbiciden aan verharde oppervlakken. De scenario's voor toelating houden geen rekening met processen op de verharding; de worst case van 100% afspoeling is het uitgangspunt. Voor het verbeteren van toelatingsscenario's is het nodig om inzicht te krijgen in de processen die de afspoeling bepalen, om de afspoeling vanaf de verharding zelf in de scenario's beter te kunnen schatten.

Crum en Merkelbach (1998) berekenden middelspecifieke emissiefactoren voor afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen. Hun uitgangspunt is irreversibele adsorptie van een herbicide aan het verharde oppervlak, volgens een berekeningsmethode gegeven door Kraaij en Verstappen (1997). Hierbij wordt verondersteld dat verhard oppervlak 0,5% organische stof bevat, waaraan het herbicide adsorbeert. De emissiefactoren variëren van 0,2 tot 80%. Voor de herbiciden gebruikt in hun studie zijn ze 58% voor amitrol, 59% voor atrazin en 5% voor glyfosaat. Het gebruik van deze methode om adsorptie te beschrijven is niet onderbouwd door metingen, maar gebaseerd op waarnemingen waarbij verhardingen na de eerste afspoeling nog herbicide naleveren. Voor het verbeteren van emissiefactoren is het nodig om inzicht te krijgen in de processen die verantwoordelijk zijn voor de nalevering vanaf het verharde oppervlak, zodat in emissieberekeningen een betere schatting kan worden gemaakt van de totale afspoeling vanaf een verhard oppervlak.

Beltman (2001) ontwikkelde een model voor de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen, namelijk PROVO (Pesticide RunOff vanaf Verharde Oppervlakken). De eerste versie van PROVO kan de metingen in proefopstellingen van Shepherd en Heather (1999) en de metingen afkomstig van monitoring (Dekker et al., 2000) niet adequaat simuleren. Zowel de piekconcentratie in de eerste afspoeling na toediening van het herbicide als de totale afspoeling worden niet goed gesimuleerd. De procesveronderstellingen in PROVO blijken nog te beperkt.

## **1.2 Doelstelling**

Het doel van dit onderzoek is het verbeteren van schattingsmethoden voor afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen, middels experimenteel en modelmatig onderzoek voor Nederlandse omstandigheden. Veldproeven zijn uitgevoerd om (1)

experimenteel vast te stellen of de emissiepatronen die zijn waargenomen op laboratoriumschaal ook op veldschaal worden teruggevonden, en (2) het model PROVO te verbeteren, o.a. middels een verbeterde procesbeschrijving voor sorptie. Het verbeterd model is bedoeld om later te kunnen gebruiken voor het aanpassen van afspoelingsscenario's van Kraaij en Verstappen (1997).

### **1.3 Onderzoeksopzet**

Eerdere onderzoeken (zie par. 1.1) wijzen erop dat (i) een groot deel van de toegediende massa afspoelt met de eerste millimeters, (ii) na de initiële concentratiepiek het oppervlak een periode van nalevering vertoont, en (iii) de verdeling van de afspoeling van herbiciden in de tijd kan worden gekwantificeerd aan de hand van de fysisch-chemische eigenschappen van een herbicide. In een veldproef is daarom een verharding bespoten met een aantal herbiciden die verschillen in fysisch-chemische eigenschappen. Vervolgens is het proefveld beregend en werd het afspoelende water opgevangen en geanalyseerd. Na afloop van de beregeningsproef zijn enkele stenen uit de verharding gehaald om de achtergebleven massa herbicide te bepalen. Er is op twee manieren beregend: in het eerste geval startte de beregening direct na het bespuiten (worst case scenario), in het tweede geval werd 3 uur gewacht na de bespuiting zodat het water uit de spuitoplossing zeker volledig van de verharding was verdampt (realistic worst case). Met deze korte tijd tussen bespuiten en beregenen is het niet waarschijnlijk dat veel herbicide wordt omgezet of afgebroken. Ook de vervluchtiging van het herbicide is waarschijnlijk niet erg groot. Daarom zijn de verdwynprocessen omzetting (hydrolyse en fotochemische, chemische of microbiële afbraak) en vervluchtiging vanaf verhardingen (nat en droog) niet onderzocht. Verder werd bij de start van de proef verondersteld dat infiltratie van regenwater naar de ondergrond beperkt zou zijn (10-20%). Daarom zijn er in eerste instantie geen pogingen ondernomen die waterstroom te onderzoeken.

De proeven geven inzicht in de wijze waarop de afspoeling in de praktijk plaats vindt voor een aantal in fysisch-chemische eigenschappen verschillende herbiciden. Gebruik makend van de waarnemingen en data is PROVO uitgebreid en verbeterd. De proeven zijn gesimuleerd om te toetsen of het aangepaste model de gemeten afspoeling kan verklaren.

Het onderzoek beperkt zich tot de herbicidenafspoeling vanaf de verharding tot in de regenwaterput. Het transport van de herbiciden via riool en rioolwaterzuiveringsinstallaties naar het oppervlaktewater is niet onderzocht.

### **1.4 Leeswijzer**

De opzet van de veldproeven en eraan verwante bepalingen zijn beschreven in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van de proeven gegeven, welke vervolgens worden bediscussieerd in hoofdstuk 4. Daarna beschrijft hoofdstuk 5 kort

het model voor de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen en geeft een overzicht van de resultaten van de simulaties van de veldproeven. In hoofdstuk 6 volgt een algemene discussie naar aanleiding van de veldexperimenten en modelsimulaties. De vergaarde kennis opgedaan in het onderzoek leidt tot de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 7.

## 2 Opzet veldproeven

### 2.1 Keuze herbiciden

Om een beter inzicht te krijgen in de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen zijn veldproeven uitgevoerd en in het laboratorium enkele aanvullende bepalingen gedaan. De veldproeven zijn gericht op het inschatten van de massa herbiciden die afspoelt en op de verdeling ervan in de tijd. De aanvullende bepalingen in het laboratorium moeten informatie geven over de hoeveelheid herbicide die achterblijft op de verhardingen.

Voor de proeven zijn drie herbiciden geselecteerd die op verhardingen worden of werden toegepast en verschillen in de eigenschappen oplosbaarheid (atrazin versus amitrol) en adsorptiecoëfficiënt (amitrol versus glyfosaat), zoals weergegeven in tabel 1. In eerste instantie stond atrazin niet op het programma (het herbicide is niet meer toegelaten in Nederland). Omdat het er naar uitzag dat de analyse van amitrol veel problemen op zou leveren, is atrazin toegevoegd. Toen amitrol goed te analyseren bleek, is atrazin toch meegenomen vanwege de verschillen in eigenschappen. Bromide is gebruikt als tracer om het lot van het afspoelende water te volgen.

Tabel 1 Adsorptiecoëfficiënten ( $K_{om}$ ) en oplosbaarheden van bromide, amitrol, atrazin en glyfosaat

	$K_{om}$ (L/kg)	Oplosbaarheid (g/L)
Kaliumbromide	0	678
Atrazin	70	0,033
Amitrol	75	360
Glyfosaat	3200	12

Na iedere proef zijn er drie klinkers uit de verharding gehaald. Voor en na de derde en vierde proef zijn er ook grondmonsters genomen van onder de bestrating. In par. 2.3 staat beschreven hoe de middelen zijn geëxtraheerd uit de stenen en uit de grond. Par. 2.4 beschrijft de analysemethoden van bromide, amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA.

### 2.2 Veldproeven

#### 2.2.1 Beschrijving van het proefveld

Het proefveld moet aan een aantal eisen voldoen. Ten eerste moet het verharde oppervlak representatief zijn voor de verhardingen in Nederland waarop herbiciden toegepast worden. Ten tweede moet er afvloeiing plaats kunnen vinden, dus moet het oppervlak schuin aflopen. Ten derde moet het veld een verzamelpunt bevatten waarin het afstromende water kan worden opgevangen, bijvoorbeeld een put. Een laatste eis is dat de verharding zo groot is dat randeffecten te verwaarlozen zijn.

Op het terrein van Plant Research International in Wageningen is een parkeerplaats gevonden die aan de genoemde eisen voldoet. Op die parkeerplaats, bestraat met betonklinkers, is een veld uitgezet van circa 10 m x 10 m (102,3 m<sup>2</sup>) waar alle veldproeven uitgevoerd zijn. De parkeerplaats is aangelegd in 1972 en in 1999 herbestraat met de oude klinkers (beperkt aangevuld met nieuwe klinkers). De bestrating wordt regelmatig bereden en er is weinig onkruidgroei. Voorafgaand aan de eerste proef is het veld grondig schoon geveegd en is het onkruid verwijderd.

Het proefveld (zie foto 1) is afgebakend door plastic vuilniszakken gevuld met zand. Deze afbakening zorgde ervoor dat tijdens het beregenen het water dat buiten het veld viel, ook buiten het veld bleef.

Om het neerslagpatroon van een regenbui zo goed mogelijk te simuleren is gebruik gemaakt van een beregeningsinstallatie uit de tuinbouw. De beregeningsinstallatie bestaat uit vier PVC-buizen met een lengte van 10 m waarin per buis 5 zgn. “Dan sproeiers type 8966” zijn geplaatst. Deze sproeiers hebben een maximale waterafgifte van 2 L/min en een maximale sproeidiameter van 9 m. De sproeiers zijn op een afstand van 2,5 m van elkaar op de buis geplaatst en de afstand tussen de buizen onderling bedraagt 2,5 m. De hoogte van de buizen ten opzichte van het maaiveld is circa 25 cm. Om de hoeveelheid neerslag binnen het proefveld te monitoren zijn diagonaal over het veld 8 regenmeters geplaatst. Binnen het proefveld ligt één rioolafvoerput. Deze ligt op het laagste punt, in een hoek van het uitgezette veld. In deze afvoerput wordt het afstromende water opgevangen en via een dompelpomp naar jerrycans van 25 liter gepompt.



Foto 1 Overzicht van het proefveld

## 2.2.2 Toediening herbiciden

De toediening van de herbiciden heeft plaatsgevonden met behulp van een hand-spuitboom (zie foto 2) uitgevoerd met zes “TeeJet SS 11002” spuitdoppen. De zes doppen geven samen een spuitbaanbreedte van 1,98 m. Het veld is bespoten in vijf banen. Om doseringsverschillen te voorkomen is het veld tweemaal bespoten waarbij de looprichtingen loodrecht op elkaar stonden (zie foto 2). De dosering op het proefveld is gecontroleerd met aluminium bakjes die geplaatst zijn voor de bespuiting. Ter voorkoming van doseringsverschillen en randeffecten is één meter extra gespoten aan het begin en aan het eind van het elke spuitbaan. Deze extra meter buiten het proefveld is tijdens het spuiten bedekt met plasticfolie, die na de toediening verwijderd werd. Contaminatie van het proefveld wordt hierdoor vermeden. De werkelijke dosering op het proefveld is berekend uit het verspoten volume en de concentraties gemeten in de spuitoplossing. De dosering is gecorrigeerd voor de 1-m-zone die buiten het proefveld is bespoten. De controle van de dosering met de aluminium bakjes gaf aan dat de spreiding in de dosering binnen een bespuiting tot een factor twee was. Bij proef 1 en 2 is eerst met de kaliumbromideoplossing gespoten en daarna met een mengsel van de drie herbiciden. Bij proef 3 en 4 is een mengsel van alle vier de stoffen gespoten.



Foto 2 Toediening herbiciden

De toegepaste producten zijn kaliumbromide (20 g/L), Brabant amitrol (250 g/L), Gesaprim (atrazin, 500 g/L) en Roundup Pro (glyfosaat, 360 g/L). De beoogde doseringen komen globaal overeen met de voor verhardingen geadviseerde dosering (1e kolom in tabel 2). De herbiciden waren in oplossing in het geformuleerde product.

Tabel 2 Doseringen van bromide, amitrol, atrazin en glyfosaat

	Advies (kg/ha)	Proefveld van 102.3 m <sup>2</sup> (g)			
		proef 1	proef 2	proef 3	proef 4
Bromide	7,52	122,8	94,5	86,9	89,7
Amitrol	2,75	33,5	36,0	29,8	37,2
Atrazin	0,9	9,69	7,61	15,9	18,0
Glyfosaat	2,23	19,2	20,9	29,3	26,5

### 2.2.3 Uitvoering en monstername

In vier veldproeven is de afspoeling van de herbiciden onderzocht. Bij de eerste twee proeven werd vanaf een kwartier (tijd nodig voor de opbouw van de regeninstallatie) na de toediening van de herbiciden beregend. Dit is de worst case voor afspoeling na de bespuiting voor wat betreft de regenval. In de laatste twee proeven werd drie uur na toediening gestart met beregenen. Dit is een realistische worst case voor afspoeling; de spuitvloeistof is dan verdampt. Gedurende de proeven is beregend met constante neerslagintensiteit van circa 10 mm/h (zie tabel 3). Dit is een voor Nederland realistische neerslagintensiteit voor perioden tot 15 min (Buishand et al., 1991). Een dergelijke intensiteit is niet realistisch voor perioden langer dan 1 h.

Tabel 3 Berekening in de vier proeven

	1	2	3	4
Neerslagintensiteit (mm/uur)	10,6	10,0	11,4	11,0
Duur beregening (min)	207	172	160	123

De vier proeven zijn uitgevoerd op 10, 16, 31 augustus en 7 september 2000. Alleen bij proef 4 is op de dag voor de proef 3,4 mm neerslag gemeten bij het op circa 1,5 km afstand gelegen weerstation Haarweg Wageningen (Wageningen UR, Omgevingswetenschappen, 2000). Bij elke proef viel er op drie en op twee dagen voor de proef geen neerslag of is minder dan 1 mm op een dag gemeten. Op 16 augustus, de dag van het tweede experiment, is 4 mm neerslag gemeten bij het weerstation. Dat was na afloop van het experiment.

Tussen proef 1 en 2 viel minder dan 1 mm neerslag. Tussen proef 2 en 3 viel er 38 mm neerslag en tussen proef 3 en 4 viel er 17 mm neerslag. In proef 1 is 7,5 mm meer beregend dan in de andere proeven.

De eerste proef is uitgevoerd totdat er 2150 liter afgespoeld water (21,0 mm neerslag) via de rioolput in de jerrycans verzameld was. Tijdens de overige proeven is beregend totdat 1400 liter afgespoeld water (13,7 mm neerslag) verzameld was.

Het afspoelende water kwam in de put terecht, waarna een pomp (hard polyethen en RVS) het overpompde in PVC jerrycans. Van de eerste 200 liter afgespoeld water is per 25-liter-jerrycan één monster genomen (één monster per 0,25 mm afgespoeld water), daarna is van elke 100 liter afgespoeld water één mengmonster genomen (één monster per mm afgespoeld water). In totaal geeft dit



20 watermonsters (8 uit 25 L en 12 uit 100 L) per proef. Alleen tijdens de eerste proef is na 900 liter afgespoeld water overgegaan op bemonstering per 250 liter.

Gedurende de beregening is te zien dat het dat het water loodrecht op de goot over het oppervlak naar de goot stroomt (zie foto 3), waar het zich verzamelt en door de goot naar de put stroomt. Op het veld stroomt het water preferent via het visgraatpatroon van voegen tussen de klinkers omlaag naar de goot. Het deel van het veld dat het dichtst bij de goot ligt is natter dan het deel van het veld dat ver van de goot ligt.



Foto 3 Beregening van het proefveld

Bij de eerste en tweede proef bleek er veel meer water in de bodem te infiltreren dan vooraf was voorzien. Daarom zijn bij de derde en vierde proef vóór en na de beregening monsters genomen van de bodem onder de stenen. Per monster is 50 gram grond 20 minuten geschud met water. Het mengsel is vervolgens gefiltreerd over een vouwfilter en geanalyseerd.

## 2.3 Laboratorium bepalingen

### 2.3.1 Behandelingen betonklinkers en grond

Extracties zijn uitgevoerd om te bepalen of 100% van de massa van het herbicide dat in steen of in grond zit kan worden teruggevonden met de gebruikte extractie en analyse methoden.

In sorptieproeven wordt bepaald wat er reversibel wordt gebonden. Sorptieproeven met steenmateriaal zijn niet uitgevoerd wegens tijdgebrek. In dit uitzonderlijke geval is water als extractievloeistof gebruikt waardoor de extractie gelijk wordt aan een sorptieproef (normaliter wordt een ander oplosmiddel gebruikt voor de extractie). Er is wel een kanttekening: als niet 100% van het herbicide wordt geëxtraheerd is nog niet bepaald of het achtergebleven deel van het herbicide reversibel of irreversibel gebonden is. In het geval de binding reversibel is, is er sprake van sorptie. Als de binding niet reversibel is, dan is de extractie-efficiëntie kleiner dan 100% (bepaald door de gebruikte extractie- en analysemethode).

In het veld speelt de toegankelijkheid van de steen een rol. Daarom is de extractie van stenen uitgevoerd met twee varianten: met brokken steen en met steengruis.

### 2.3.2 Extractie van betonklinkers

De extractie-efficiëntie van bromide en de herbiciden uit betonklinker moest worden bepaald om te verifiëren of de gehalten die in betonklinker worden gemeten representatief zijn voor de aanwezige gehalten.

Na proef 2 zijn betonklinkers uit het proefveld genomen en in brokjes gezaagd. De brokjes werden schoon gespoeld door ze in een RVS-bak te leggen en er meer dan 3 uur water over te laten stromen. Regelmatig werd de bak volledig geleegd, zodat er volledige verversing van het water was. Voor deze proeven zijn klinkers uit het proefveld gebruikt omdat er een beperkt aantal vervangende stenen voor het proefveld beschikbaar was. Idealiter zouden schone stenen uit een ander deel van de parkeerplaats zijn genomen. Door ook blanco's mee te nemen in de serie is het effect van de veldbelasting gecontroleerd. De helft van de brokjes werden nog fijner gemaakt (zo fijn mogelijk) met een steenvergruizer. Er werd een extractie-efficiëntie-experiment uitgevoerd met de brokjes en met het fijnere materiaal. Aan de brokjes en aan het fijne materiaal werd een oplossing toegevoegd met een concentratie van 25,41 µg/ml voor bromide, 10,38 µg/ml voor amitrol, 5,94 µg/ml voor atrazin, 12,42 µg/ml voor glyfosaat en 40 ng/ml voor AMPA. Het experiment werd in triplo uitgevoerd. Tevens werden er blancobrokjes en blanco fijn materiaal geëxtraheerd; aan deze monsters werd HPLC-water toegevoegd. Er werd gedurende 1 uur zo goed mogelijk 'geschud'. Na de extractie werd het water afgetapt, daarna opgeslagen bij 5 °C tot de analyse werd uitgevoerd. De resultaten zijn gegeven in tabel 4.

Tabel 4 Extractie-efficiëntie van brokken steen en steengruis (n=3). Gemeten concentratie van de middelen in de oplossing uitgedrukt als percentage van de concentratie van de doseeroplossing.

	Bromide	Amitrol	Atrazin	Glyfosaat	AMPA
Brokken	98,4 ± 0,3	93,9 ± 0,1	98,0 ± 1,0	32,8 ± 4,6	103,3 ± 3,8
Gruis	97,4 ± 0,8	93,9 ± 0,2	98,7 ± 1,7	5,2 ± 2,2	66,7 ± 28,9

Na iedere proef zijn een aantal betonklinkers uit het proefveld genomen om te bepalen hoeveel van de bromide en herbicide doseringen in de bestrating was achtergebleven.

De stenen waren 2 maanden opgeslagen in de koude kamer (5 °C) en werden eerst schoongemaakt met een borstel. Vervolgens werd de massa van de gehele steen bepaald. Daarna zijn de stenen met een hamer en moker in kleinere brokstukken geslagen die in een steenvergruizer tot kleinere stukjes werden vergruisd. Al het materiaal is in een plastic zak verzameld en tot het tijdstip van extractie in de diepvries bewaard.

In een centrifugebuis werd ca. 50 gram steengruis afgewogen en 50 ml HPLC-water toegevoegd. Er werd gedurende 1 uur geschud op een schudapparaat (175 bewegingen per minuut). Hierna werden de buizen 10 minuten bij 2000

omwentelingen gecentrifugeerd. De waterlaag werd afgetapt en opgeslagen in de koelkast tot analyse. De centrifugebuizen werden gedurende drie dagen in de stoof bij 105 °C geplaatst om te bepalen hoeveel water er in de bemonsterde stenen zat. Alle monsters werden rechtstreeks geanalyseerd.

### **2.3.3 Extractie van grondmonsters**

Bij de vierde proef zijn vooraf grondmonsters van de bovenste laag (0-10 cm) onder de steen genomen. Van de monsters werd een mengmonster gemaakt door de inhoud van de potten in een zak te brengen en de grond in deze zak goed te mengen. 50 g grond werd afgewogen in een centrifug buis (90 ml) en er werd met een glazen 1-ml-spuit 0,5 ml van de spuitoplossing aan de grond toegevoegd. De concentratie voor atrazin, bromide, amitrol, glyfosaat en AMPA in de spuitoplossing bedroeg resp. 2,62 g/L, 13,75 g/L, 5,38 g/L, 1,781 g/L en 0,040 g/L. Na doseren werd de grond met oplossing zo goed mogelijk met elkaar gemengd door de buis scheef te houden en tegen de buis te tikken en tegelijk de buis te draaien. Na het doseren en mengen werden de buizen met grond 1 uur in de koelkast geplaatst. De extractie werd uitgevoerd door 50 ml HPLC-water aan de grond toe te voegen en 1 uur te schudden op het schudapparaat (175 bewegingen per minuut). De buizen met grond werden op de labtafel geplaatst en omdat er geen goede scheiding van de waterlaag en de grondlaag zichtbaar was werden de buizen in de centrifuge geplaatst en werd er 10 minuten bij 2000 omwentelingen per minuut gecentrifugeerd. Na het centrifugeren werd de waterlaag afgetapt. Het waterextract werd opgeslagen in de koelkast om eventuele afbraak van stoffen te minimaliseren. Het water werd zo snel mogelijk geanalyseerd.

Al het water van de eerste extractie werd zoveel mogelijk afgetapt en bewaard in een buis, daarna werd er nogmaals geëxtraheerd met 50 ml HPLC-water omdat de eerste extractie mogelijk niet uitputtend was. Het water van beide extracties werd bij elkaar gevoegd en geanalyseerd.

De extractie-efficiëntie van de middelen vanuit de grond is bepaald. De efficiëntie was 97,5 ( $\pm 1,9$ ) % voor bromide, 88,9 ( $\pm 2,1$ ) % voor amitrol en 92,2 ( $\pm 1,3$ ) % voor atrazin. De extractie-efficiëntie van glyfosaat en AMPA waren respectievelijk 22,9 ( $\pm 7,7$ ) % en 174 ( $\pm 96$ ) %.

Het vochtgehalte van de grond werd bepaald door grond af te wegen in een aluminiumbakje en gedurende een nacht bij 105 °C in een stoof te drogen.

### **2.3.4 Chemische analyses**

Alle analyses van bromide, amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA zijn op Alterra uitgevoerd.

Bromide en amitrol werden met behulp van een vloeistofchromatografisch systeem (HPLC) bestaande uit één HPLC-pomp (flow 1,5 ml/min), een Hypersil ODS analytische kolom en een UV-detector (210 nm) gemeten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een fosfaatbuffer met counter-ion (0,85 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  + 0,72 g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  + 4 ml tetrabutylammonium-diwaterstoffosfaatoplossing).

Voor de analyse van atrazin werd een HPLC-systeem gebruikt. De analytische kolom was een stalen HPLC-kolom met een lengte van 12,5 cm en een inwendige diameter van 0,46 mm, gevuld met Lichrosorb-5-RP-18 materiaal voorzien van een voorkolom gevuld met C18 materiaal (beide van Merck). Een 100- $\mu\text{l}$ -monster werd op de analytische kolom voorzien van voorkolom geïnjecteerd. Als loopvloeistof werd een mengsel van methanol en HPLC-water (60/40; v/v) gebruikt; de stroomsnelheid bedroeg 1 ml/min. De temperatuur van de kolommen bedroeg 40 °C. De detectie vond plaats bij een golflengte van 220 nm. De retentietijd voor atrazin was ca. 4,31 min.

Glyfosaat en AMPA werden gemeten op een HPLC-systeem uitgerust met een on-line SPE-extractie-eenheid (Prospect). Dit systeem maakt gebruik van HyShere-glyfosaat SPE cartridges en een C40-glyfosaat/AMPA-kolom. Detectie vond plaats met behulp van een fluorescentiedetector (excitatiegolflengte 265 nm, emissiegolflengte 300 nm). Als mobiele fase werd acetonitril/0,2% fosforzuur (75/25 v/v%) gebruikt (1,5 ml/min). Voordat glyfosaat en AMPA werden gemeten werd eerst handmatig een derivatiseringsreactie uitgevoerd. Tijdens deze reactie wordt fluoranylmethyl-chloofomate (FMOC) gebonden aan glyfosaat en AMPA.

### 3 Resultaten veldproeven

De vier veldproeven worden vergeleken op hun waterbalans, op de afspoeling van bromide in de tijd, de afspoeling van de herbiciden in de tijd en op de massabalansen over de hele periode van de experimenten. Per onderdeel zijn de resultaten van de laboratorium bepalingen aan stenen en grond toegevoegd.

#### 3.1 Waterbalans

Voor het opstellen van de waterbalansen van de vier veldproeven zijn bepaald:

- de beregende en opgevangen hoeveelheden neerslag (meting);
- de potentiële opname van water door de bestrating (schatting);
- voor proef 3 en proef 4: de opname van water door de onderliggende grond (schatting uit de toename in vochtgehalten van de grond).

In tabel 5 is per proef de hoeveelheid beregende neerslag gegeven en de hoeveelheid neerslag die afstroomde naar de rioolput.

In de eerste proef is beregend tot 21 mm afspoeling, terwijl bij de andere proeven tot 13,7 mm afspoeling is beregend. Op de vier dagen dat de veldproeven zijn uitgevoerd viel voor en tijdens het experiment geen natuurlijke neerslag. Bij aanvang van de proeven was de parkeerplaats visueel steeds droog. De berekeningstijden in tabel 5 laten zien dat in proef 4 er circa 2 uur nodig was om 13,7 mm neerslag te laten afspoelen, terwijl in de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> proef meer dan 2,5 uur nodig was om dezelfde hoeveelheid neerslag te laten afspoelen. Het percentage van de neerslag dat afspoelt naar de put ligt tussen 45% voor proef 3 en 61% voor proef 4.

Tabel 5 Beregende neerslag en naar rioolput afgevoerde neerslag (mm) in de vier veldproeven

	1	2	3	4
Neerslagintensiteit (mm/h)	10,6	10,0	11,4	11,0
Berekeningstijd (min)	207	172	160	123
Water op proefveld (mm)	36,6	28,7	30,4	22,6
Water afgevoerd naar put (mm)	21,0	13,7	13,7	13,7
Water afgevoerd naar put (%)	57,4	47,7	45,1	60,6

Het verschil tussen de hoeveelheid water op het proefveld en de hoeveelheid afgevoerd is opgenomen door de stenen, geïnfiltreerd naar de ondergrond en verdampt.

De gewichtstoename bij verzadigen van droge brokken steen met water was 5,8%. Het proefveld van 102,3 m<sup>2</sup> bestond uit 4227 stenen (11 cm x 22 cm, 4 kg). Als 1/10 van de steen wordt bevochtigd in de veldsituatie is de opname van water 327 liter, op

het hele veld komt dit overeen met 1 mm neerslag. Dit is de maximale opname. In de veldsituatie drogen de stenen waarschijnlijk niet zover op als in de droogstoof.

Rond de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> proef is ook de grond onder de stenen bemonsterd. Tabel 6 geeft de vochtgehalten in de laag van 0 tot 0,3 m onder de bestrating (zie ook bijlage 3). De berekening gedurende de proef leidde tot een nattere ondergrond. In proef 4 was de grond bij aanvang van de proef natter dan bij proef 3. In proef 3 nam de hoeveelheid water in de grond meer toe dan in de 4<sup>e</sup> proef. Waarschijnlijk heeft de natte periode in de week voorafgaand aan het vierde proef geleid tot hogere vochtgehalten van de grond, en daardoor tot verhoogde afspoeling. Het lijkt zeer aannemelijk dat tijdens het beregenen de stenen en grond verzadigd raken met water en dat vervolgens de infiltratie afneemt en de oppervlakkige afspoeling toeneemt. Bij de proeven bleek dat de tijd die nodig was om 1 mm af te spoelen korter werd gedurende het verloop van de proef. De geringere infiltratie in proef 4 leidde ertoe dat een groter aandeel van de neerslag afspoelde naar de put. In het lab is gemeten hoeveel water kan worden opgenomen door een steen.

*Tabel 6 Vochtgehalten (percentage op drogegrondbasis) in lagen grond op 0 tot 0,1 m en 0,1 tot 0,3 m onder bestrating voor en na beregning in proef 3 en proef 4*

	Voor (gew.%)	Na (gew.%)	Opname neerslag (mm)
Proef 3			
0 – 0,1 m	6,4 ± 2,4	13,2 ± 0,6	10,2
0,1 – 0,3 m	10,2 ± 3,1	14,7 ± 0,8	13,5
Proef 4			
0 – 0,1 m	7,5 ± 0,9	10,9 ± 0,8	5,1
0,1 – 0,3 m	12,5 ± 1,6	14,7 ± 0,6	7,2

De toename van de hoeveelheid water in de lagen is geschat uitgaande van een bulkdichtheid van de grond van 1500 kg/m<sup>3</sup>. Dit zijn grove schattingen, want de variatie in de metingen van de vochtgehalten was groot. Bij de monsternamen na de proeven was de grond erg nat. Tijdens het inslaan van de gutsboor is mogelijk nog water naar beneden gezakt (onder 0,3 m).

Tabel 7 Waterbalans van de vier veldproeven in mm

	1	2	3	4
Op proefveld (mm)	36,6	28,7	30,4	22,6
Afgevoerd naar put (mm)	21,0	13,7	13,7	13,7
In straatstenen (mm)	1,0	1,0	1,0	1,0
In ondergrond (mm)	n.b.	n.b.	23,7	12,3
Balans (mm)	-	-	-8,0	-4,4

**n.b. = niet bepaald**

In tabel 7 zijn de posten van de waterbalans samengevat. Voor proef 3 en proef 4 zijn alle posten geschat en gesommeerd. Het verschil tussen de beregende hoeveelheid en de hoeveelheid afgevoerd naar de put is teruggevonden in de ondergrond. Voor beide proeven is er een tekort in de waterbalans. De hoeveelheid water aanwezig in de stenen is een grove schatting. De metingen van de vochtgehalten in de ondergrond vertonen een grote spreiding (zie tabel 6). In tabel 6 is ook te zien dat in beide proeven de toename in vochtgehalten in de laag van 0 tot 0,1 m groter is dan in de laag van 0,1 tot 0,3 m. Dus in de laag direct onder de verharding is de toename het grootst. In proef 4 is bij aanvang van de berekening de ondergrond natter dan in proef 3, en ook de opname van water daardoor kleiner. In proef 1 is meer beregend dan in de andere proeven. Door verzadiging van de ondergrond is bij de laatste millimeters berekening waarschijnlijk meer water afgespoeld. In de waterbalans is de afvoer daardoor relatief wat hoger ten opzichte van de andere drie proeven.

### 3.2 Afspoeling van bromide

De afspoeling van de tracer bromide is gevolgd om een referentiekader te krijgen binnen de proeven voor de afspoeling van herbiciden. In figuur 1 is het concentratieverloop van bromide in het afgevoerde water weergegeven. De cumulatieve afspoeling komt overeen met de hoeveelheid neerslag die via afspoeling is afgevoerd naar de put. In het eerste 2 mm afvoerd water zijn de concentraties het hoogst. Na 12 mm afspoeling is de concentratie bromide afgenomen tot 1,0 mg/L in proef 1, 2 en 3 en tot 2,4 mg/L in proef 4.

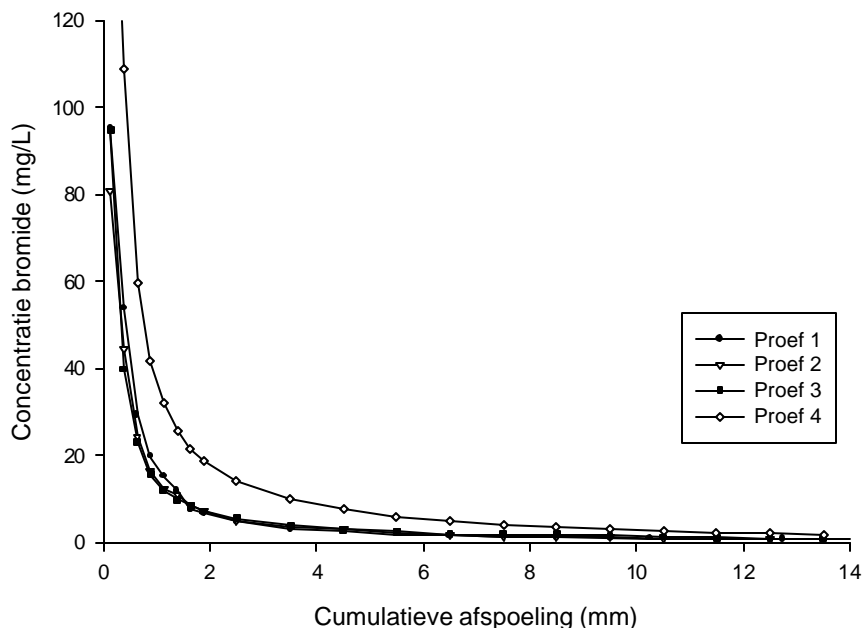


Fig. 1 Bromideconcentratie (mg/L) in het afgespoelde water in de vier veldproeven. Voor proef 4 is het punt 0,122 mm cumulatieve afspoeling met concentratie 260 mg/L niet getoond in deze grafiek.

In tabel 8 is de gedoseerde en afgespoelde massa bromide van de vier proeven gegeven. De afgespoelde massa in proef 1 is gegeven voor de eerste 14 mm cumulatieve afspoeling om de vier proeven beter te kunnen vergelijken. Het percentage van de massa bromide die afspoelt varieert van 6,4% tot 9,2% voor de eerste drie proeven en is 22,7% bij de vierde proef. De grotere afspoeling voor de vierde proef is al zichtbaar in de eerste millimeters. De concentraties gemeten in proef 4 zijn circa een factor 3 groter dan de concentraties in de eerste millimeters in de eerste drie proeven (zie figuur 1 en bijlage 1). De afspoeling van water in proef 4 is groter dan in de andere drie proeven (zie tabel 5). Vergelijking van proef 4 met proef 1, 2 en 3 bij 14 mm afspoeling laat zien dat bij 10 tot 15% meer afspoeling van water, de afspoeling van bromide bijna driemaal zo groot is.

Tabel 8 Gedoseerde en afgespoelde massa bromide (g) vanaf 102,3 m<sup>3</sup> betonklinkerverarding in 13,7 mm cumulatieve afspoeling in vier veldproeven

	1	2	3	4
Dosering op proefveld (g)	122,8	94,5	86,9	89,7
Afgespoeld in water naar put (g)	7,9	7,5	8,0	20,4
Afspoeling (%)	6,4	7,9	9,2	22,7

De massa bromide gemeten in de betonklinkers na de proef is gegeven in tabel 9. Proef 2 ontbreekt omdat de monsters verloren zijn gegaan bij het toepassen van een andere extractiemethode. Aan het eind van de proef zit er nog 25 tot 30% van de bromidedosering in de stenen. Mogelijk dat bij en na de dosering bromide dieper in de steen dringt en gedurende de beregening niet meer afspoelt met het water. Er zijn geen stenen bemonsterd voor aanvang van de proeven, dus hoeveel bromide er bij



aanvang van de drie laatste proeven nog in de stenen zat is niet bekend. Een steen van buiten het proefveld bevatte geen bromide, dus de massa bromide die is aangetroffen is afkomstig van de bespuitingen.

Tabel 9 Massa bromide in betonklinkers na afloop van de proeven 1, 3 en 4, omgerekend naar massa op 102,3 m<sup>2</sup> proefveld (n = 3)

Proef	Bromide op 102,3 m <sup>2</sup> (g)
1	23,4 ± 2,7
3	23,3 ± 3,2
4	25,7 ± 1,6

Voor en na de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> proef is de grond onder de stenen bemonsterd (zie tabel 10). Het deel van de bromidedosering dat niet afspoelt en niet in de stenen zit infiltreert met het water naar de ondergrond. In beide proeven is een duidelijke toename te zien van de gehalten in ondergelegen grond. De steen- en grondmonsters zijn genomen op drie plaatsen in het proefveld. Vanwege dit geringe aantal monsters geven de berekende massa's in steen en in grond alleen een indicatie van de orde grootte.

Tabel 10 Bromidegehalten (mg/kg droge grond) in lagen grond op 0 tot 0,1 m en 0,1 tot 0,3 m onder bestrating voor en na berekening in proef 3 en proef 4

	Voor (mg/kg d.s.)	Na (mg/kg d.s.)	Toename op 102,3 m <sup>2</sup> (g)
Proef 3			
0 – 0,1 m	0,95 ± 0,60	3,92 ± 2,20	45,6
0,1 – 0,3 m	1,61 ± 0,95	3,05 ± 1,06	44,2
Proef 4			
0 – 0,1 m	0,48 ± 0,04	2,50 ± 1,02	31,0
0,1 – 0,3 m	1,74 ± 0,67	2,22 ± 0,15	14,7

In tabel 11 zijn de gegevens voor de massabalansen samengevat. De totale hoeveelheid bromide wordt overschat, terwijl er ook nog bromide zal zijn verdwenen naar beneden 0,3 m. De gehalten in de straatstenen en in de grondmonsters vertonen een grote spreiding (zie tabel 9 en tabel 10). De grote spreiding wordt mede veroorzaakt doordat er een beperkt aantal van drie monsters kon worden genomen. Vergelijking van de massabalansen van proef 3 en 4 laat zien dat de grotere afspoeling in proef 4 leidt tot minder infiltratie van bromide naar de ondergrond.

Tabel 11 Massabalans van bromide in de vier veldproeven in g voor 102,3 m<sup>2</sup> betonklinkerverharding

	1	2	3	4
Op proefveld (g)	122,8	94,5	86,9	89,7
Afgevoerd naar put (g)	7,9	7,5	8,0	20,4
In straatstenen (g)	23,9	n.b.	23,3	25,7
In ondergrond (g)	n.b.	n.b.	89,8	45,7
Balans (g)	-	-	-34,2	-2,1

**n.b. = niet bepaald**

### 3.3 Afspoeling van amitrol, atrazin, glyfosaat

De afspoeling van amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA is bepaald aan de hand van de concentraties in het afgespoelde water. In figuur 2 is het concentratieverloop van amitrol, glyfosaat en atrazin in het afgevoerde water weergegeven voor proef 1. De AMPA concentraties zijn niet weergegeven in de figuren omdat ze veel lager zijn. Ze zijn wel in tabelvorm weergegeven in bijlage 1. De cumulatieve afspoeling komt overeen met de hoeveelheid neerslag die via afspoeling is afgevoerd. Uit de figuren blijkt, dat in het eerste 2 mm afgevoerde water de hoogste concentraties zijn aangetroffen. Het concentratieverloop van amitrol en glyfosaat komen vrijwel overeen met dat van bromide. Atrazin heeft een iets vertraagd afspoelingpatroon ten opzichte van bromide.

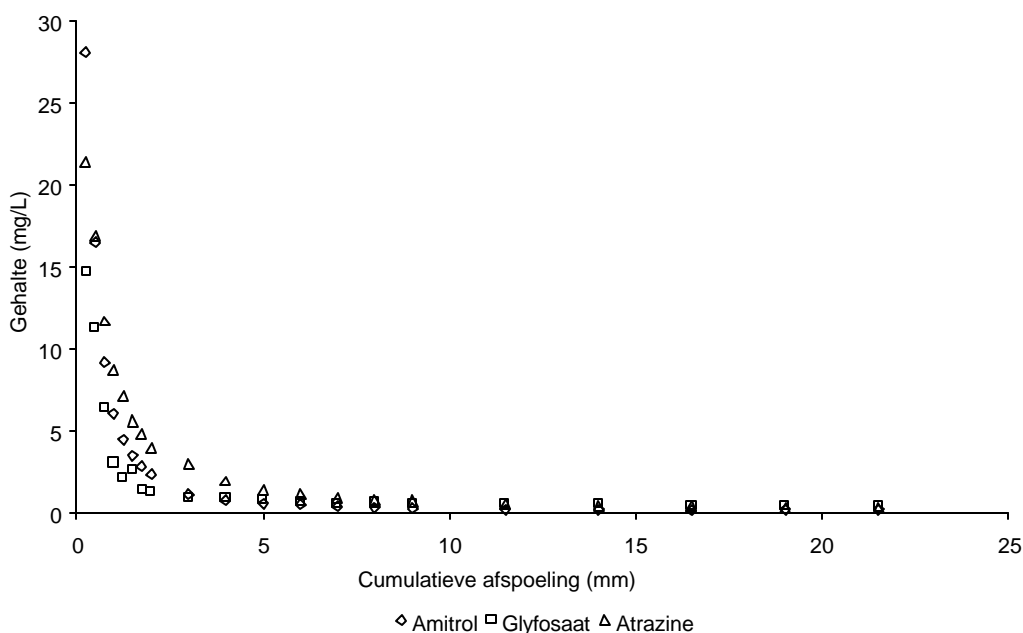


Fig. 2: Amitrol-, glyfosaat- en atrazingehalten in het afgespoelde water in proef 1

Figuur 3 geeft het relatieve verloop weer van het totale hoeveelheid afgespoelde middel ten opzichte van de totale hoeveelheid opgebrachte middel bij proef 1. Dit is berekend uit de concentratie in de spuitoplossing en de totale hoeveelheid middel in het afgevoerde water.

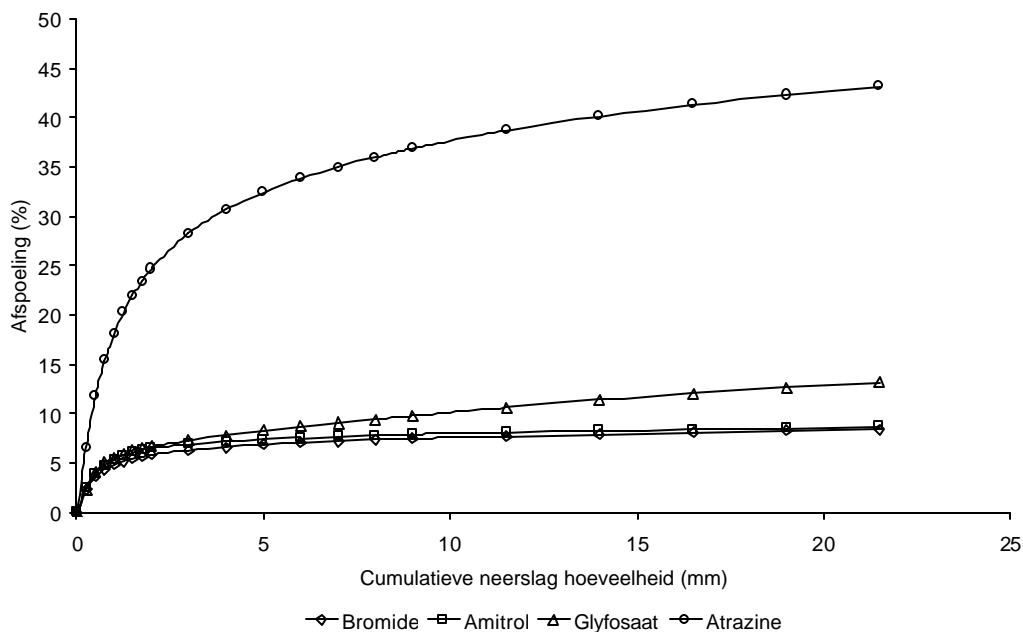


Fig. 3: Cumulatieve afspoeling van bromide, amitrol, glyfosaat en atrazin (%) in proef 1

De concentratiepatronen en cumulatief afgespoelde massa's van proef 2 en 3 zijn vergelijkbaar met die van proef 1. Zie bijlage 2 voor de figuren.

De afspoeling in proef 4 wijkt af van de afspoeling in de eerste drie proeven. In figuur 4 is het concentratieverloop van amitrol, glyfosaat en atrazin in het afgevoerde water weergegeven voor proef 4. De cumulatieve neerslaghoeveelheid komt overeen met de hoeveelheid water die via afspoeling is afgevoerd.

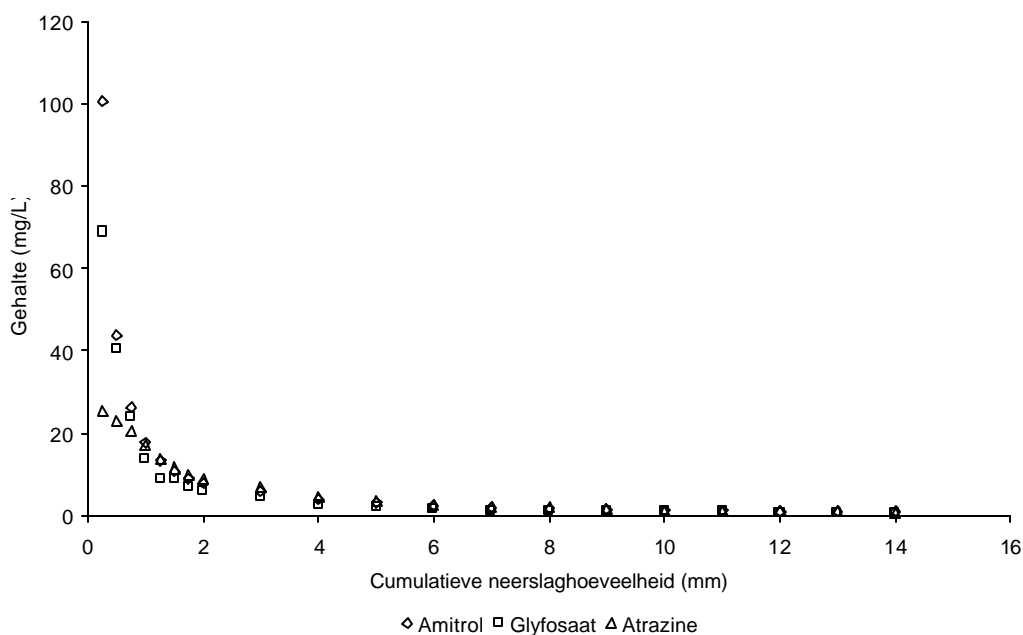


Fig. 4 Amitrol-, glyfosaat- en atrazingehalten (mg/L) in het afgespoelde water in proef 4

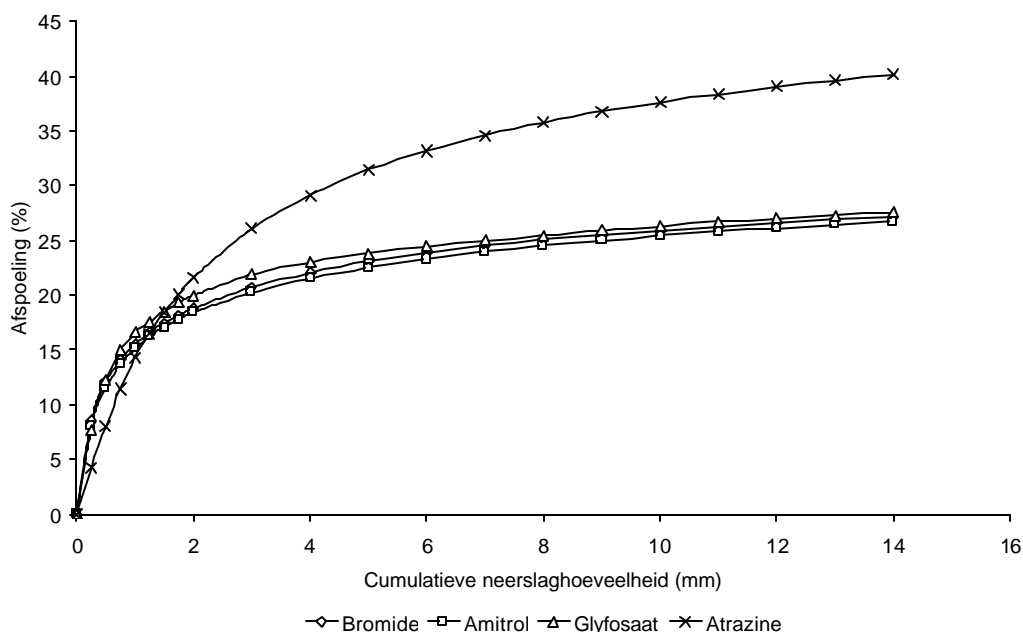


Fig. 5 Cumulatieve afspoeling van bromide, amitrol glyfosaat en atrazin (%) in proef 4

Figuur 5 geeft het relatieve verloop weer van het totale hoeveelheid afgespoelde middel ten opzichte van de totale hoeveelheid opgebrachte middel in proef 4. Dit wordt berekend aan de hand van de concentratie in de spuitoplossing en de totale hoeveelheid middel in het afgevoerde water. Voor de vierde proef geeft dit voor amitrol, atrazin en glyfosaat een afspoeling van respectievelijk 22%, 34% en 23%. Bromide geeft een afspoeling van 20%.

De gedoseerde en afgespoelde massa's van de vier proeven, met de daaruit berekende percentages afspoeling, zijn samengevat in tabel 12.

Tabel 12 Dosering en afgespoelde massa (g) van amitrol, atrazin en glyfosaat in de vier proeven

	1	2	3	4
<b>Amitrol</b>				
Op proefveld (g)	33,5	36,0	29,8	37,2
In afgevoerd water (g)	2,4	2,6	2,8	8,3
Afspoeling (%)	7,3	7,2	9,3	22,4
<b>Atrazin</b>				
Op proefveld (g)	6,7	7,6	15,9	18,0
In afgevoerd water (g)	3,5	3,3	2,8	6,1
Afspoeling (%)	36,2	43,8	17,8	33,6
<b>Glyfosaat</b>				
Op proefveld (g)	19,2	20,9	29,3	26,5
In afgevoerd water (g)	2,1	2,5	3,5	6,1
Afspoeling (%)	11,1	11,8	11,9	23,1

Het afspoelingspercentage van amitrol is in de eerste drie proeven vrijwel gelijk. In de vierde proef is de afspoeling van amitrol 2,5 tot 3 maal zo groot als in de eerste drie proeven. In de eerste drie proeven is de afspoelingspercentage van glyfosaat ongeveer gelijk, in de vierde proef is het dubbele afgespoeld. De afspoeling van atrazin wijkt af van de afspoeling van amitrol en glyfosaat. In de eerste twee proeven liggen de afspoelpercentages van atrazin bij elkaar, in de derde proef is de afspoeling gehalveerd. In de vierde proef is het afspoelpercentage in orde van grootte gelijk aan dat in de eerste twee proeven.

### 3.4 Massabalansen van amitrol, atrazin en glyfosaat

Naast de afspoeling is gemeten hoeveel van een herbicide achterblijft in de bestrating en is in proef 3 en proef 4 gemeten hoeveel massa er aan het eind van de proef aanwezig is in de laag van 0 tot 0,3 m grond onder de bestrating.

Tabel 13 toont de gehalten van de herbiciden in de betonklinkers na de proeven 1, 3 en 4. De resultaten van proef 2 zijn niet getoond omdat daarvoor een afwijkende extractieprocedure gevolgd is die niet uitputtend was en daardoor lagere gehalten aantoonde. De massa's die zijn berekend zijn laag. Voor amitrol en atrazin is de extractie- efficiëntie vanaf betonklinker groter dan 90% (zie par. 2.3.2). Voor glyfosaat is die veel lager, dus is het waarschijnlijk dat niet alle glyfosaat uit de klinkers is geëxtraheerd. Omdat de beoogde extractiemethode geen resultaat opleverde hebben de stenen 2 tot 3 maanden in de koeling gelegen totdat een extractiemethode was ontwikkeld die werkte. Amitrol en glyfosaat zijn in die periode mogelijk gedeeltelijk omgezet. De aanwezigheid van AMPA toont aan dat een (klein) deel van de glyfosaat is omgezet.

Tabel 13 Massa in betonklinkers na afloop van de proeven 1, 3 en 4, omgerekend naar massa op 102,3 m<sup>2</sup> proefveld (n = 3)

Proef	Amitrol (g)	Atrazin (g)	Glyfosaat (g)	AMPA (g)
1	2,2 ± 0,4	0,4 ± 0,0	0,02 ± 0,02	0,04 ± 0,04
3	0,4 ± 0,3	0,5 ± 0,1	0,07 ± 0,11	0,01 ± 0,01
4	1,5 ± 1,9	1,9 ± 0,7	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01

De resultaten van de grondanalyse zijn gegeven in tabel 14. De gehalten amitrol en atrazin in de ondergrond namen toe gedurende de proef. Het gehalte glyfosaat neemt niet toe volgens de metingen. De gehalten in grond zijn berekend met een bulkdichtheid van 1500 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 14 Gehalten amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA ( $n = 3$ ) in lagen grond op 0 tot 0,1 m en 0,1 tot 0,3 m onder bestrating voor en na beregning in proef 3 en proef 4

Laag (m)	Voor (mg/kg d.s.)	Na (mg/kg d.s.)	Toename op 102,3 m <sup>2</sup> (g)
Proef 3			
Amitrol			
0 – 0,1	< 0,01	0,81 ±0,47	12,4
0,1 – 0,3	< 0,01	0,04 ±0,07	0,9
Atrazin			
0 – 0,1	0,15 ±0,14	0,66 ±0,14	7,8
0,1 – 0,3	0,22 ±0,16	0,47 ±0,16	7,6
Glyfosaat			
0 – 0,1	< 0,01	< 0,01	0,0
0,1 – 0,3	< 0,01	< 0,01	0,0
AMPA			
0 – 0,1	0,02 ±0,02	0,03 ±0,01	0,2
0,1 – 0,3	< 0,01	< 0,01	0,0
Proef 4			
Amitrol			
0 – 0,1	0,10 ±0,08	0,68 ±0,36	8,9
0,1 – 0,3	0,19 ±0,10	0,18 ±1,15	-0,3
Atrazin			
0 – 0,1	0,03 ±0,02	0,31 ±0,16	4,3
0,1 – 0,3	0,24 ±0,18	0,32 ±0,10	2,4
Glyfosaat			
0 – 0,1	0,02 ±0,03	0,04 ±0,03	0,3
0,1 – 0,3	< 0,01	< 0,01	0,0
AMPA			
0 – 0,1	0,01 ±0,02	0,18 ±0,21	2,6
0,1 – 0,3	< 0,01	< 0,01	0,0

De resultaten weergegeven in de tabel 12 - 14 zijn gebruikt om de massabalansen te berekenen. De massabalansen van de vier proeven zijn gegeven in Tabel 15.

Tabel 15 Massabalans van amitrol, atrazin en glyfosaat in de vier veldproeven in g

	1	2	3	4
<b>Amitrol</b>				
Op proefveld	33,5	36,0	29,8	37,2
Afgevoerd naar put	2,4	2,6	2,8	8,3
In straatstenen	2,2	n.b.	0,4	1,5
In ondergrond	n.b.	n.b.	13,3	8,6
Balans	-	-	13,3	18,8
<b>Atrazin</b>				
Op proefveld	6,7	7,6	15,9	18,0
Afgevoerd naar put	3,5	3,3	2,8	6,1
In straatstenen	0,4	n.b.	0,5	1,9
In ondergrond	n.b.	n.b.	15,4	6,7
Balans	-	-	-2,8	3,3
<b>Glyfosaat</b>				
Op proefveld	19,2	20,9	29,3	26,5
Afgevoerd naar put	2,1	2,5	3,5	6,1
In straatstenen	0,02	nb	0,07	0,01
In ondergrond	n.b.	n.b.	0,0	0,3
Balans	-	-	25,7	20,1

**n.b. = niet bepaald**

De afspoeling van amitrol is vrijwel gelijk aan de afspoeling van bromide. Bij de eerste drie proeven spoelt 8,6 tot 11% van de gedoseerde massa naar de put. In het vierde proef spoelt 27% naar de put. Aan het eind van de proeven zijn lage gehalten gemeten in de bemonsterde stenen, leidend tot berekende massa's van 0,3 g tot 2,2 g in de stenen van het proefveld. Voor de derde proef is berekend dat circa de helft van de amitrol dosering infiltreert naar de grond onder de stenen. In de vierde proef is dat circa 15%. Meer afspoeling van neerslag leidt tot minder infiltratie van de amitrol naar de grond.

De afspoeling van atrazin is groter dan van amitrol (en van bromide), 21 tot 52% van de dosering spoelt af naar de put. De afspoeling in de tweede set proeven is kleiner dan in de eerste set proeven. De periode van drie uur tussen de dosering en de start van het beregenen leidt tot een kleinere afspoeling van atrazin. De afspoeling in de derde proef is circa de helft van de afspoeling in de andere drie proeven.

In de eerste drie proeven spoelt 13 tot 14% van de dosering glyfosaat af naar de put, in het vierde proef spoelt 28% af. De afspoeling van glyfosaat is groter dan van amitrol en bromide, maar kleiner dan de afspoeling van atrazin.

De massabalans voor AMPA is niet weergegeven omdat de extractie efficiency van AMPA uit betonklinkers en uit grond zeer variabel was (par. 2.3.2 en 2.3.3).

In elk van de vier proeven was de afspoeling in de eerste millimeters het grootst. In tabel 16 is aangeven welke percentages van de totaal afgespoelde massa afgespoelde in de eerste 0,5 en 2 mm, per proef en per herbicide. In de eerste proef is 21 mm neerslag afgespoeld, terwijl bij de andere proeven 13,7 mm neerslag is afgespoeld. Om de proeven goed te kunnen vergelijken is voor proef 1 de afgespoelde massa berekend ten opzichte van de massa afgespoeld na 13,7 mm afspoeling.

*Tabel 16 Cumulatieve afspoeling van bromide, amitrol, atrazin en glyfosaat in 0,5 en in 2 mm afgespoeld water in percentage van de totale afgespoelde massa in 13,7 mm afgespoelde neerslag in de vier veldproeven*

	0,5 mm				2 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Bromide	46	42	42	45	74	69	66	69
Amitrol	48	44	43	43	79	67	65	69
Atrazin	29	32	38	20	61	61	67	53
Glyfosaat	35	39	54	45	58	65	72	73

Het overzicht in de tabel laat zien dat de eerste afgespoelde 0,5 mm, 54% van het herbicide kan bevatten dat in totaal in 13,7 mm afspoelt (glyfosaat). De eerste 2 mm kan tot 79% van het afgespoelde herbicide bevatten (amitrol).



## 4 Discussie veldproeven

Achtereenvolgens worden behandeld: de afspoeling van het water, de afspoeling van bromide en herbiciden in het algemeen, en daarna de afspoeling van bromide en de herbiciden afzonderlijk.

### 4.1 Water

#### ***Soort regenbui***

Een gemiddelde neerslagintensiteit van 10 mm/uur is realistisch voor Nederland voor perioden tot 15 min. Voor perioden langer dan 1 uur komt dat gemiddeld eenmaal per jaar voor (Buishand et al., 1991). Zij bepaalden uit kwartierreeksen van drie weerstations voor de periode 1955-1979 dat gemiddeld eens per jaar er in een kwartier 8,5 mm neerslag valt, dus met een gemiddelde neerslagintensiteit van 34 mm/uur in dat kwartier. Daarnaast valt er gemiddeld tienmaal per jaar in een kwartier tijd 3 mm neerslag, dus met een intensiteit van 12 mm/uur. In de uitgevoerde veldproeven spoelt het grootste deel van de totaal afgespoelde massa af in de eerste 1 tot 2 mm afspoelend water (zie tabel 16). Dat komt overeen met 2 tot 4 mm neerslag. Bij een opgelegde neerslagintensiteit van 10 mm/uur is dat binnen 12 en 24 minuten. Dus de omstandigheden waarbij de proeven zijn uitgevoerd zijn representatief voor een bui die gemiddeld tienmaal per jaar voorkomt. Dit is dus qua neerslagsituatie niet de worst case, maar wel een realistische worst case.

#### ***Wijze van beregenen***

De neerslagintensiteit liep uiteen van 10,0 mm/uur in proef 2 tot 11,4 mm/uur in proef 3, ondanks de gecontroleerde wijze van beregenen. Gezien de spreiding in percentages afgespoeld water en de verdeling daarvan over de proeven, is niet te verwachten dat de spreiding in neerslag de resultaten significant heeft beïnvloed.

#### ***Soort bestrating***

Het proefveld is bestraat met betonklinkers. Van Dam en Schotkamp (1983) hebben de absorptie van water door verschillende bestratingstypen gemeten. Ze vonden achtereenvolgens: grijze betonklinkers en stoeptegels 0,5 mm in 10 minuten, koperslakkeien 0,85 mm in 15 minuten (0,7 mm in 5 minuten) en asfalt 0,07 mm in 15 minuten. Deze absorpties zijn lager dan de absorptie geschat voor de betonklinkers van de veldproeven (1 mm). De gebruikte schattingsmethode voor het proefveld is zeer grof. Hiermee is niet vast te stellen of de betonklinkers van het proefveld representatief zijn.

#### ***Infiltratie***

De percentages afgespoeld water zijn lager dan verwacht. Voor infiltratie van neerslag op verhardingen wordt meestal uitgegaan van 10 tot 30%. In de uitgevoerde proeven is de infiltratie 38 tot 54%, leidend tot afspoeling van 62% in proef 4 en 46% in proef 3. De lagere percentages uit de literatuur die in eerste instantie werden

verwacht, hebben betrekking op het ontwerp van rioleringen waarbij men wil weten hoeveel water er minimaal infiltreert en dus maximaal afspoelt. Burger (2000) vatte literatuur samen over de infiltratie door verharde oppervlakken. Voor betonklinkers vond hij een infiltratiesnelheid van 14 tot 34 mm/uur. Deze infiltratiesnelheden zijn groter dan de neerslagsnelheid in de proeven, die 10 tot 11,4 mm/uur was. De doorlaatbaarheid van de betonklinkerbestrating is niet beperkend voor de infiltratie. Volgens A.S. Beenen (RIONED, pers. mededeling, 2001) bepaalt de doorlaatbaarheid van de ondergrond de snelheid waarmee water infiltreert door een verharding. Door de onderschatting vooraf van het belang van infiltratie, is de proefopzet gericht op het monitoren van de afspoeling. Om toch een indicatie te krijgen van de water- en middelenstroom naar de ondergrond, zijn in de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> proef monsters genomen van de grond onder de verharding.

In de vierde proef was na 13 mm afspoeling de afspoelingsnelheid toegenomen ten opzichte van ervoor. De grond onder het straatdek was zeer nat. In deze toestand is mogelijk een steady state ontstaan waarin de doorlatendheid van de grond beperkend was voor de infiltratie. Die is dan dus kleiner dan de infiltratiesnelheid van het straatdek.

In proef 3 is meer water geïnfilteerd dan in proef 4. Bij proef 3 is ook meer van de bromide- en herbicidendoseringen geïnfilteerd dan in proef 4. Dit is mogelijk te verklaren doordat de infiltratiecapaciteit van een 'vochtig straatdek' veel kleiner is (Van de Ven, 1988), maar dat de wateropname door de stenen nog vergelijkbaar is met proef 3. De bromidegehalten van de stenen na proef 3 en 4 waren ongeveer gelijk. Er is niet gemeten of er voor aanvang van de proef bromide in de betonklinkers zat.

### ***Verdamping***

Bij de start van de berekening zal er enige verdamping optreden door de relatief warme stenen. Na enige tijd zijn de stenen afgekoeld, en neemt de verdamping sterk af. Gezien de cijfers voor infiltratie is de hoeveelheid verdamping waarschijnlijk te verwaarlozen.

### ***Vochttoestand van de bodem***

De vochttoestand van de ondergrond lijkt invloed te hebben op de mate van afspoeling van water. In drie van de vier proeven was de afspoeling van water vergelijkbaar. In de vierde proef met een relatief natte ondergrond was de afspoeling van water groter. In de praktijk zal de afspoeling van water en daarmee herbiciden afhangen van de vochttoestand van de ondergrond. Die wordt met name bepaald door de neerslag in de periode ervoor. Als in het voorjaar, wanneer herbiciden toegepast worden, de vochtgehalten in de ondergrond van bestratingen hoger zijn, dan is te verwachten dat de afspoeling van herbiciden groter is dan bij de proeven die in de zomer zijn uitgevoerd. De proeven zijn gedaan in de zomerperiode. Het is voorstelbaar dat in het voorjaar, wanneer herbiciden toegepast worden op jong onkruid, de vochtgehalten in de ondergrond hoger zijn en daarmee de afspoeling toeneemt.

## 4.2 Middelen algemeen

### ***Opgebrachte vracht***

Hoewel de spuitoplossing nauwkeurig is aangemaakt verschillen de opgebrachte vrachten. De volumes die verspoten zijn verschillen per proef. Bij de controle van de dosering (bemonstering van aluminium bakjes) bleek de spreiding van de dosering binnen een bespuiting tot een factor twee op te kunnen variëren. De totale dosering op het hele proefveld kan ook een factor twee verschillen (verspoten volume x concentratie in spuitoplossing).

In de proeven 1 tot 3 zou voor bromide en amitrol van een geringe toename kunnen worden gesproken. Als het zo zou zijn dat de voorbelasting een rol speelt, dan is het een verwaarloosbare rol, omdat de percentages afspoeling minimaal toenemen. Uit de extracties blijkt dat bromide, amitrol en atrazin niet tot verwaarloosbaar zwak adsorberen aan steen. Van het volraken van 'adsorptiecapaciteit' kan dan ook geen sprake zijn.

Voorafgaand aan de 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> proef zijn geen straatstenen uit de bestrating gehaald om te verifiëren of de bestrating vrij was van bromide en herbiciden. Voor de initiële pieken kunnen achtergebleven resten slechts een marginale toename in de piekconcentraties hebben veroorzaakt. De concentraties in de initiële afspoeling zijn veel groter is dan de concentraties als gevolg van nalevering van voorgaande proeven. Het effect of de nalevering in de 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> proef is mogelijk wel dat het niveau hoger ligt dan bij een proef op een schoon veld. De niveauverschillen in de vier proeven zijn klein. De eerste proef geeft een ongestoord beeld van de nalevering van herbiciden vanaf een betonklinkerverharding.

### ***Worst case versus realistic case***

De worst case, zonder droge periode tussen de dosering en het aanvangen van de beregening, en de realistic case met een droge periode van drie uur verschillen niet. Uitgangspunt was dat voor de realistic-case-proeven een periode werd gewacht met beregenen om de spuitvloeistof te laten verdampen. Het verdampen van spuitvloeistof bleek zeer snel plaats te vinden, zodat al in het kwartier waarin de beregeningsinstallatie werd opgebouwd, ook bij de worst case proeven de spuitoplossing was verdampt.

Shepherd en Heather (1999) voerden afspoelingsproeven uit op een betonoppervlak van 0,54 m<sup>2</sup> geplaatst onder een helling van 10%. Na 15 mm neerslag was de afspoeling van atrazin circa 55% van de dosering, en van glyfosaat circa 45% van de dosering. Het betonoppervlak had geen voegen en kon daardoor geen water infiltreren, dus de niet afgespoelde massa bevond zich waarschijnlijk nog in het beton. Het verschil in afgespoelde fractie tussen atrazin en glyfosaat kan zowel veroorzaakt zijn door verschil in de adsorptie als wel door het verschil in oplosbaarheid. Shepherd en Heather (1999) vinden dat bij toename van het tijdsinterval tussen dosering en start van de beregening ook de cumulatieve afspoeling in 5 mm neerslag toeneemt. Alleen voor glyfosaat neemt de cumulatieve afspoeling af met het groter worden van het tijdsinterval. Glyfosaat heeft ook de

grootste oplosbaarheid. De vijf herbiciden waarvan de afspoeling toenam hebben een oplosbaarheid die lager of gelijk is aan 37 mg/L. J. Hollis (pers. mededeling, 2000) suggereert dat een deel van deze slecht oplosbare herbiciden als vaste deeltjes afspoelt met het water. De toename van de afspoeling tussen de eerste serie (direct beregend) en de tweede serie (na 3 uur beregend) zou veroorzaakt kunnen zijn door het verder uitdrogen van de vaste deeltjes, die daardoor meer hydrofoob worden en daardoor gemakkelijker met het water worden meegevoerd. Shepherd en Heather concludeerden dat zowel adsorptie aan verharding als de oplosbaarheid van de herbiciden van invloed zijn op de afspoeling. Het huidige onderzoek ondersteunt niet dat adsorptie van belang is, wel dat de oplosbaarheid van de herbiciden een belangrijke rol speelt in de mate van afspoeling.

### **4.3 Bromide en amitrol**

De massabalansen van bromide van de vier proeven laten zien dat van deze inerte stof 8 tot 25% van de dosering afspoelt. De grote infiltratie van water naar de ondergrond leidt ook tot transport van bromide naar de ondergrond. De mate van afspoeling van bromide is gevoelig voor de mate van afspoeling van neerslag; bij 10 tot 15% grotere afspoeling van neerslag nam de afspoeling van bromide met bijna een factor drie toe. Ook herbiciden worden met het infiltrerende water meegenomen naar de ondergrond. Vooraf werd verondersteld met de inerte tracer te kunnen bepalen hoeveel van een herbicide maximaal kan afspoelen, want als gevolg van adsorptie en verdwynprocessen spoelt er naar verwachting van een herbicide minder af.

Amitrol is een zwak adsorberend herbicide en een grote oplosbaarheid en lijkt dus in deze eigenschappen sterk op bromide. Dit herbicide gedraagt zich in de veldproeven ook bijna gelijk aan bromide. De afspoeling naar de put is minder dan 30% van de dosering.

### **4.4 Atrazin**

Het verschil in totale afspoeling tussen de proeven is te verklaren op basis van de geringe oplosbaarheid van atrazin ten opzichte van de andere stoffen. De oplosbaarheid van atrazin is 31 mg/L, meer dan een factor 100 kleiner dan de andere herbiciden. In figuren 2 en 4 is te zien dat de concentratie in de eerste monsters dicht onder de oplosbaarheid van de stof zit. In de eerste set proeven is de atrazindosering ongeveer de helft geweest van de dosering in de tweede set proeven. In die eerste set lijkt de oplosbaarheid nauwelijks beperkend te zijn geweest voor de afspoeling. In figuur A2 in bijlage 2 (proef 3) en figuur 4 (proef 4) vertoont de concentratiecurve van atrazin een knikje in de eerste millimeters cumulatieve neerslag. Hier lijkt de oplosbaarheid van de stof de afspoeling te hebben beperkt.

De atrazinafspoeling is groter dan de afspoeling van bromide en amitrol. Een mogelijke verklaring is als volgt. Bij het doseren komen de middelen met de

sputoplossing in het bovenste laagje van de stenen terecht. Het water verdampt. Bij start van de beregening gaan bromide, amitrol en glyfosaat meteen in oplossing en worden met dat eerste water verder de steen ingezogen. Atrazin lost op tot aan de oplosbaarheid. De rest blijft in vaste vorm en ligt nog grotendeels op het oppervlak. Na enige tijd zijn de stenen verzadigd met water en begint het water over het oppervlak te stromen. Als er vers schoon water over het oppervlak stroomt gaat de atrazin in oplossing en stroomt met het water mee over het oppervlak, of infiltreert tussen de stenen door naar de grond.

## **4.5 Glyfosaat**

De afspoeling van glyfosaat in de eerste drie proeven is circa 50% groter dan van bromide en amitrol. De oplosbaarheid van glyfosaat is groter dan die van bromide en amitrol. De sorptiecoëfficiënt is groter dan die van de drie andere stoffen. Mogelijk dat glyfosaat na toediening in de toplaag van de stenen adsorbeert. In dat geval is het niet te verwachten dat bij aanvang van waterstroming over het oppervlak een groot deel van het geadsorbeerde glyfosaat zou desorberen.

De extractie-efficiëntie van de stoffen voor stenen is bepaald door te schudden met water (zie par. 2.3.2). Omdat die is bepaald met water geeft dit meteen aan of adsorptie van de stoffen optreedt. Bromide, amitrol en atrazin komen voor meer dan 90% van de stenen af, dus de adsorptie treedt niet op of is gering. Deze stoffen adsorberen ook zwak aan grond. Stenen bevatten geen organische stof, dus het is niet te verwachten dat amitrol en atrazin zouden adsorberen aan stenen. Glyfosaat adsorbeert sterk aan grond, en vertoont daarbij geen duidelijke relatie met het organischestofgehalte van de grond (in tegenstelling tot de meeste bestrijdingsmiddelen). De resultaten van de extractie tonen dat glyfosaat adsorbeert aan betonklinkermateriaal, en dat bij een grotere beschikbaarheid van sorptieplekken (gruis) de sorptie toeneemt. Het is te verwachten dat de beschikbaarheid van sorptieplekken in de veldsituatie kleiner is en dat de adsorptie minder zal zijn dan 70% zoals bepaald met de brokjes steen. Het is daarom niet te verwachten dat de adsorptie aan betonklinkers in de veldproeven meer dan enkele procenten van de dosering is geweest.



## **5 Simulatie van de veldproeven**

### **5.1 Inleiding**

In dit onderzoek is het model gebruikt als 'meedenker'. Uit de veldproeven zijn een aantal processen geïdentificeerd als meest bepalend voor de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen. Door de modelformulering van een proces aan te passen of een proces toe te voegen en vervolgens de proeven te simuleren wordt getoetst of de afspoeling te verklaren is met de processen die zijn geïdentificeerd.

De veldproeven zijn gesimuleerd met PROVO (Pesticiden RunOff vanaf Verharde Oppervlakken), een analytisch model voor de afspoeling van herbiciden vanaf verharde oppervlakken (Beltman, 2001). PROVO is op Alterra ontwikkeld en aangepast met behulp van de resultaten van de in dit rapport beschreven veldproeven. In par. 5.2 worden PROVO en de onderliggende aannames kort beschreven.

In hoofdstuk 4 werd geconcludeerd dat de periode tussen de dosering van de herbiciden en de start van de berekening geen invloed heeft op de afspoeling waargenomen in de proeven. Bij de simulaties wordt daarom geen onderscheid meer gemaakt tussen de twee eerste en de twee laatste proeven. De resultaten van proef 1 zijn gebruikt om het model te parameteriseren. De parameterisatie en de resultaten van de simulaties zijn beschreven in par. 5.3.

### **5.2 Korte beschrijving PROVO**

De objecten en processen in het model zijn schematisch weergegeven in fig. 6. Een herbicide wordt gedoseerd op het verharde oppervlak. Bij de start van een regenbui wordt een deel van de dosering dat is opgelost in water geabsorbeerd door de verharding. Daarnaast adsorbeert het herbicide aan het oppervlak. De rest van de dosering zit in het waterlaagje dat op het oppervlak staat. Bij verdere aanvulling met neerslag stroomt een deel van het water naar het riool en het andere deel infiltreert naar de ondergrond tussen de voegen van de bestrating. Door de aanvulling met neerslag wordt de concentratie in het waterlaagje verdund. Het herbicide geabsorbeerd aan het oppervlak, desorbeert instantaan. Herbicide geabsorbeerd in de steen diffundeert tijdsafhankelijk terug naar de waterlaag op het oppervlak.

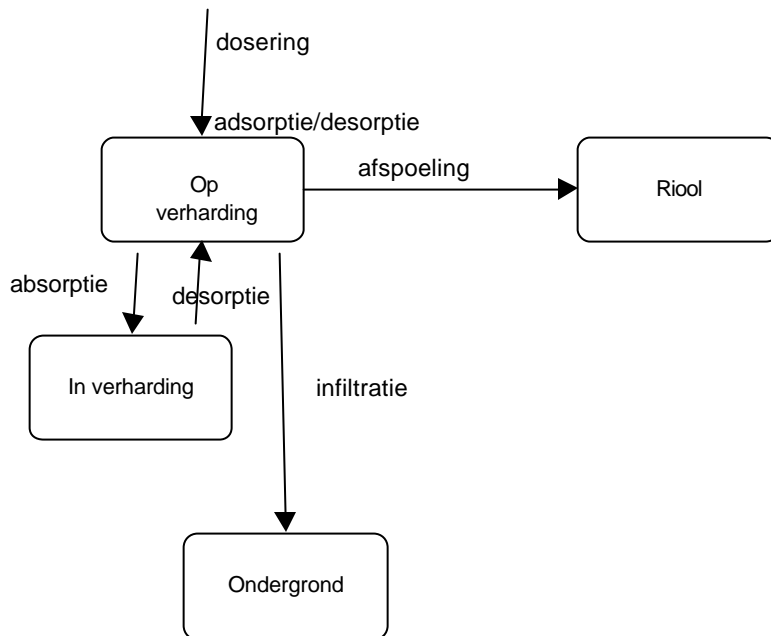


Fig 6 Processen die een rol spelen bij de afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen

De basis van het model is een exponentiële verdeling van reistijden van de stof in een waterlaagje op het oppervlak. De drijvende kracht is het verschil tussen neerslag en infiltratie. De neerslag is een constante flux. De infiltratie wordt berekend als functie van de tijd met de vergelijking van Philip (1957) voor grond die door Van de Ven (1988) werd toegepast voor bestrate oppervlakken. Van de Ven stelde nog enkele andere modellen voor. Er is voor Philip gekozen omdat hiermee op  $t = 0$ , de infiltratie ook 0 is, in tegenstelling tot de andere modellen. Juist de initiële periode moet goed worden gesimuleerd.

Bij de start van de simulatie is er een fractie  $F$  van de dosering geabsorbeerd in de steen. De teruglevering van het herbicide naar het oppervlak wordt beschreven met desorptiekinetiek. Adsorptie aan de verharding is gemodelleerd als evenwichtssorptie met een sorptiecoëfficiënt die de geabsorbeerde massa beschrijft per  $m^2$  verharding. De afbraak van het herbicide is gemodelleerd als een eerste-orde-afname. De massa die infiltreert wordt ook berekend met een eerste-orde-afname in de massabalans.

Alle invoerparameters van PROVO zijn gegeven in tabel 17.



Tabel 17 PROVO-parameters met hun beschrijving

Symbol	Dimensie	Beschrijving
H	m	hoogte van de waterlaag op het oppervlak
P	m h <sup>-1</sup>	neerslagflux
a	m h <sup>-1/2</sup>	parameter infiltratievergelijking van Philip
b	m h <sup>-1</sup>	parameter infiltratievergelijking van Philip
F	-	fractie van de dosering die absorbeert in verharding door bevochtiging van de verharding bij aanvang neerslag
k <sub>d</sub>	h <sup>-1</sup>	desorptiesnelheid
K	m <sup>2</sup> kg	adsorptiecoëfficiënt van het herbicide voor de verharding
k	h <sup>-1</sup>	eerste-orde-afbraaksnelheid
DOS	kg m <sup>2</sup>	dosering op het verharde oppervlak

## 5.3 Simulaties

### 5.3.1 Invoergegevens

De parameters voor de infiltratievergelijking van Philip zijn gefit met behulp van de beschikbare gegevens over het afgespoelde volume als functie van de tijd. De Philip-parameters a en b zijn gefit op de cumulatieve infiltratie. De cumulatieve infiltratie is berekend door de cumulatieve neerslag te verminderen met de cumulatieve afspoeling. Figuur 7 toont de gefitte curves.

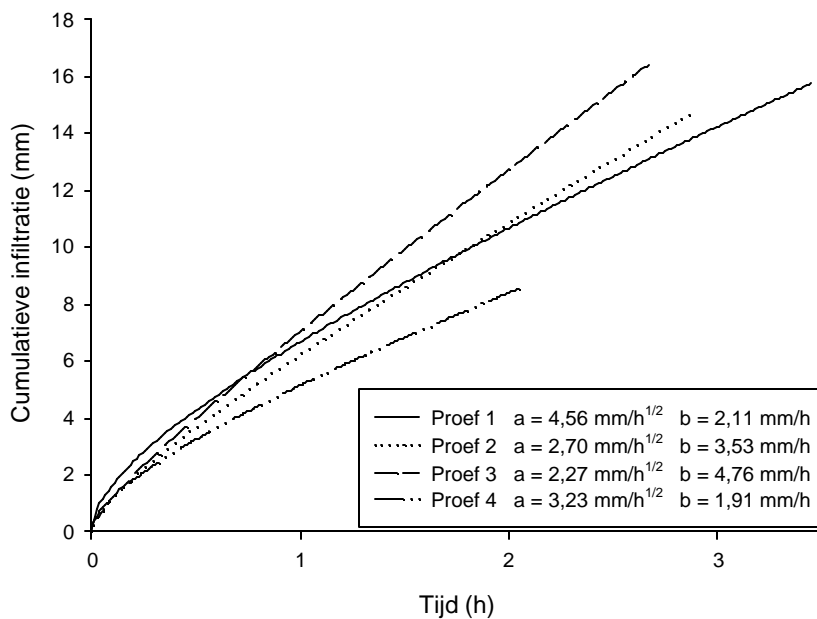


Fig.7 Cumulatieve infiltratie als functie van de tijd gefit met vergelijking van Philip ( $I_{cum} = a t^{1/2} + bt$ )

De metingen waarop is gefit zijn gegeven in bijlage 4. Voor proef 2 en proef 3 zijn respectievelijk maar vijf en drie metingen beschikbaar. In de beginfase wordt daardoor mogelijk de infiltratie onderschat. Figuur 7 toont dat de gefitte infiltratie voor proef 1 en proef 2 vrijwel gelijk is. In proef 3 is de gefitte infiltratie in het

tweede en derde uur groter dan in de andere proeven. In proef 4 is de gefitte infiltratie lager dan in de andere drie proeven over vrijwel de hele periode. De parameterwaarden van a en b liggen in de range van parameterwaarden van de vergelijking van Philip voor betonklinkerbestratingen samengevat door Van de Ven (1988).

### **5.3.2 Kalibratie met metingen proef 1**

De parameters hoogte van de waterlaag ( $H = 1,3$  mm), fractie geabsorbeerd ( $F = 0,72$ ) en desorptiesnelheid ( $k_d = 0,02$  h<sup>-1</sup>) voor het verharde oppervlak zijn gekalibreerd met de bromideconcentraties gemeten in proef 1 (fig. 8). De meest gevoelige parameter is de fractie geabsorbeerd. De combinatie van de waterhoogte en de fractie geabsorbeerd bepaalt de hoogte van de concentraties in de eerste millimeters afspoeling. Bij kleinere waarden van H of F wordt de initiële piek steiler en wordt de overgang naar nalevering van bromide scherper. De desorptiesnelheid  $k_d$  kon worden gekalibreerd op de helling van de curve die de nalevering van bromide geeft.

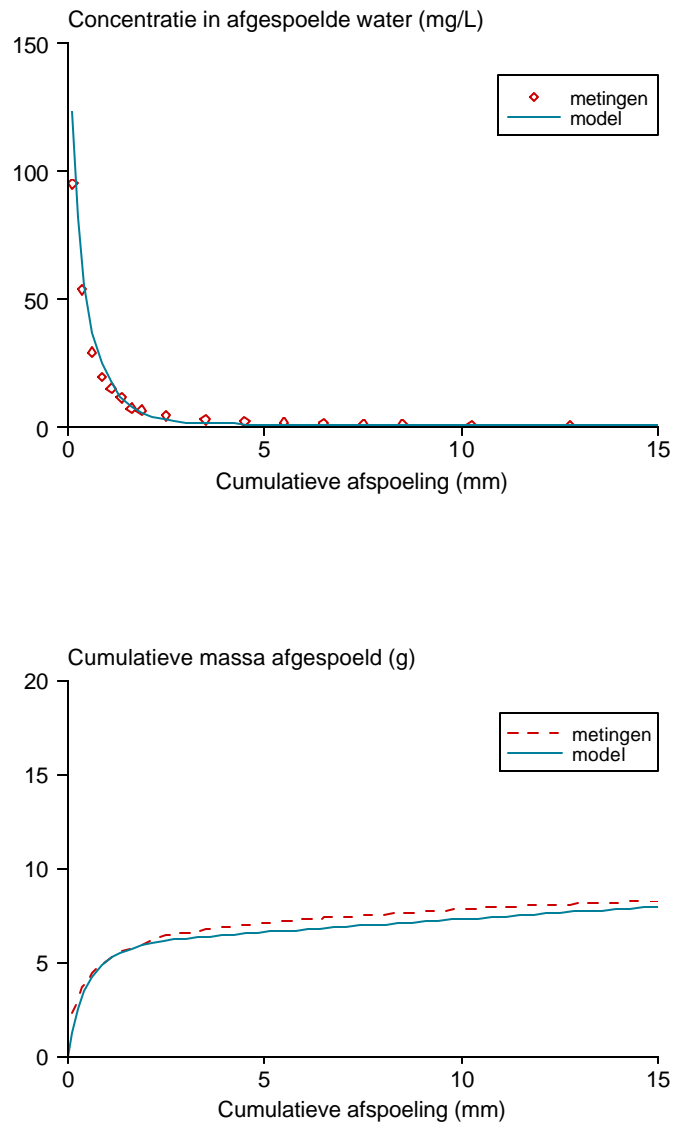


Fig. 8 Concentratie in afgespoelde water en cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor bromide in proef 1

De sorptiecoëfficiënt van glyfosaat aan de verharding (K) is gekalibreerd op de gemeten concentraties in proef 1. De extractiemetingen in par. 2.3.2 tonen dat alleen glyfosaat niet direct met water kan worden teruggeëxtraheerd van het betonklinkermateriaal. Dit wijst op adsorptie aan het materiaal. Aan gruis adsorbeert meer glyfosaat omdat de toegang tot de sorptieplekken beter is. In de veldsituatie is de toegang tot sorptieplekken beperkt. Uit de veldmetingen in de vier proeven is te zien dat glyfosaatafspoeling iets minder is dan van de andere stoffen. De gekalibreerde sorptiecoëfficiënt van glyfosaat is  $0,1 \text{ m}^2/\text{kg}$  (zie fig. 9).

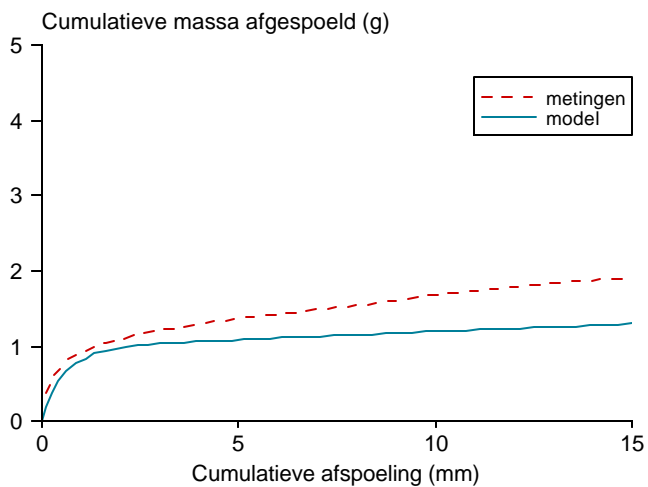
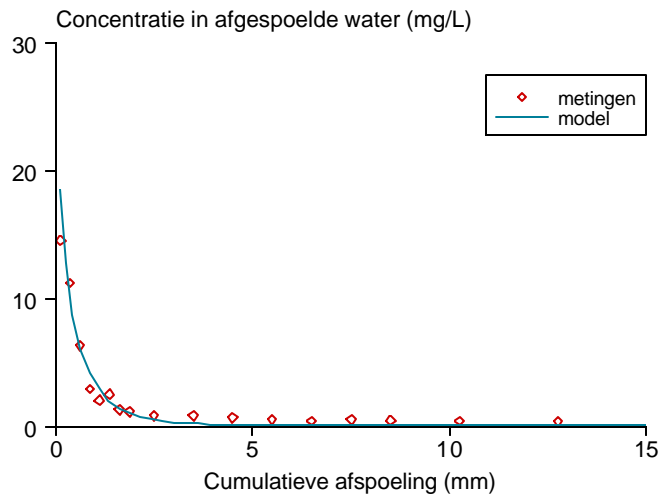


Fig. 9 Concentratie in het afgespoelde water en de cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor glyphosaat in proef 1

### 5.3.3 Resultaten simulaties

Om te testen of PROVO de afspoeling goed simuleert is het gekalibreerde model gebuikt om de afspoeling van atrazin in proef 1 en een selectie uit bromide, atrazin en glyphosaat in de proeven 2 t/m 4 te simuleren. Per proef zijn de bijbehorende neerslagflux en infiltratieparameters ingevoerd (zie hiervoor fig. 7). Bromide was als tracer meegenomen in de veldproeven. Omdat de afspoeling van bromide ook representatief is voor de afspoeling van zwak adsorberende / goed

oplosbare herbiciden worden de resultaten hier getoond. Amitrol is niet gesimuleerd omdat de relatieve concentraties ten opzicht van de dosering vrijwel gelijk zijn aan die van bromide in alle vier de proeven. De simulaties worden vergeleken met de metingen. In deze paragraaf worden alleen illustratieve resultaten getoond.

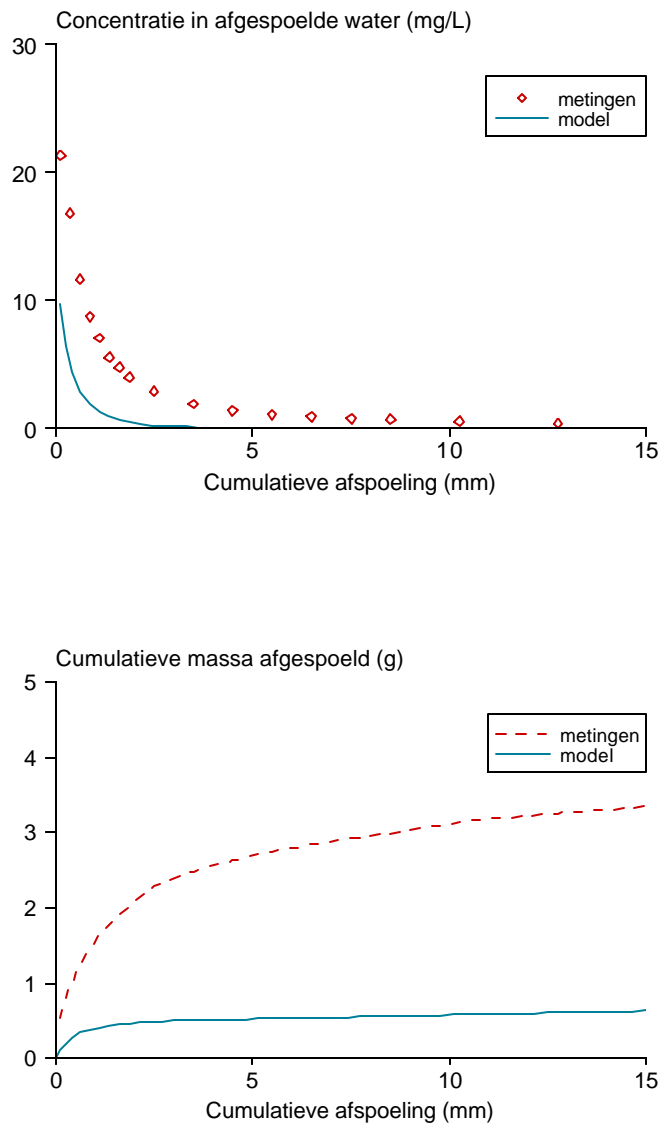


Fig. 10 Concentratie in het afgespoelde water en de cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor atrazin in proef 1

Eerst is getest of het op bromide en glyfosaat uit proef 1 gekalibreerde model de afspoeling van een ander herbicide goed verloopt. Figuur 10 toont de gesimuleerde en gemeten afspoeling van atrazin in proef 1. De gesimuleerde concentraties zijn

lager dan gemeten. De mogelijke effecten van slechte oplosbaarheid van atrazin op het verloop van de afspoeling zijn in par. 4.5 bediscussieerd. PROVO houdt geen rekening met de oplosbaarheid van een stof, en onderschat daarom de afspoeling van slecht oplosbare herbiciden.

Als tweede is getest of het voor proef 1 gekalibreerde model de afspoeling van bromide in een andere veldproef kan simuleren. De hydrologie is ingesteld met gefitte Philip parameters. Het resultaat is weergegeven fig. 11, die de gesimuleerde en gemeten bromide concentraties in proef 3 weergeeft. De gesimuleerde concentraties bromide in de eerste afgespoelde mm water zijn hoger dan de gemeten concentraties. De cumulatief afgespoelde massa wordt goed gesimuleerd.

Als derde is getest of het voor glyfosaat in proef 1 gekalibreerd model de afspoeling bij een andere hydrologie goed kan simuleren. Voor glyfosaat is de gesimuleerde concentratie in de eerste 0,25 mm lager dan gemeten (fig. 12). In de onderste grafiek is te zien dat daardoor de cumulatief afgespoelde massa over de hele periode wordt onderschat.

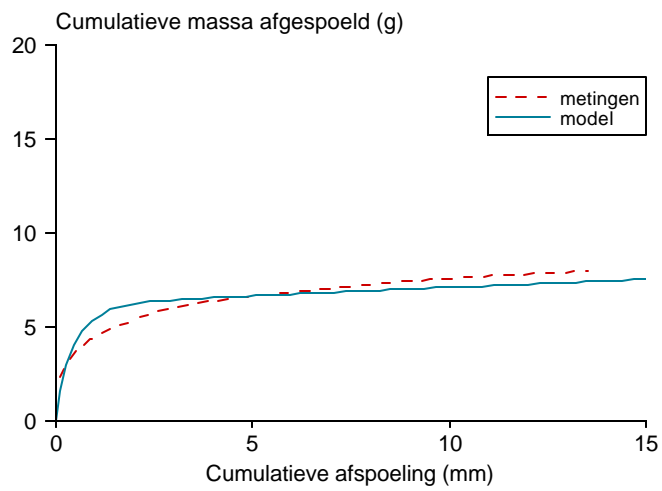
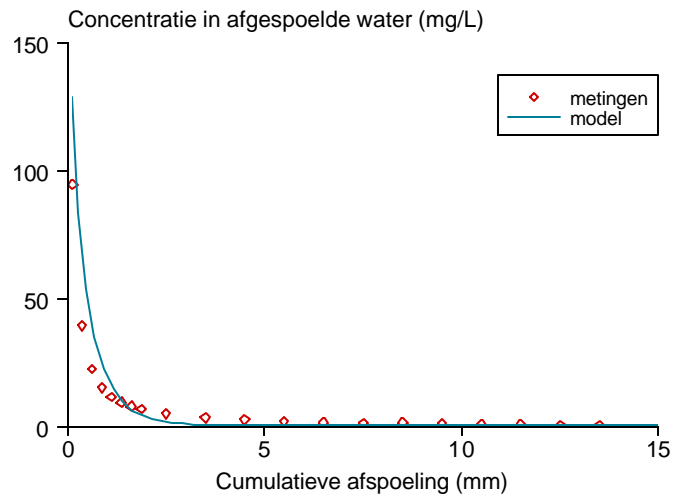


Fig. 11 Concentratie in het afgespoelde water en de cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor bromide in proef 3

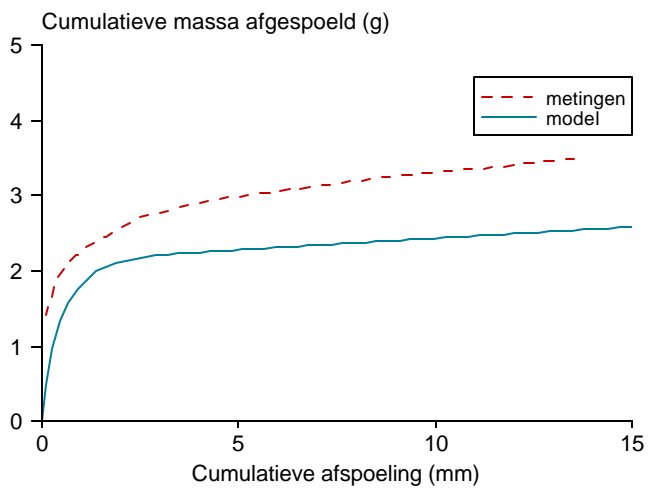
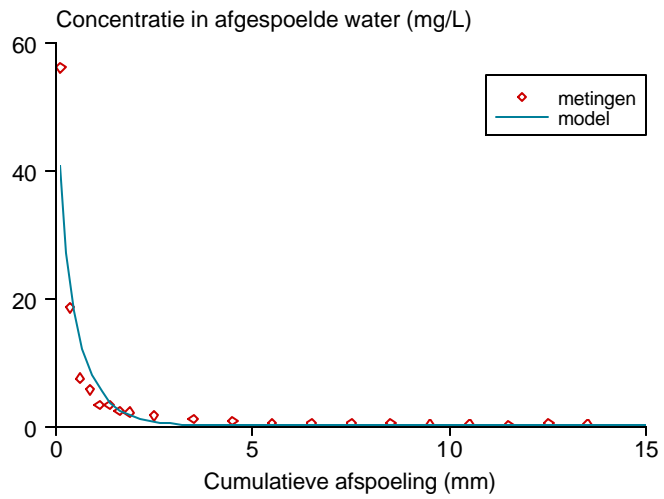


Fig. 12 Concentratie in het afgespoelde water en de cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor glyfosaat in proef 3



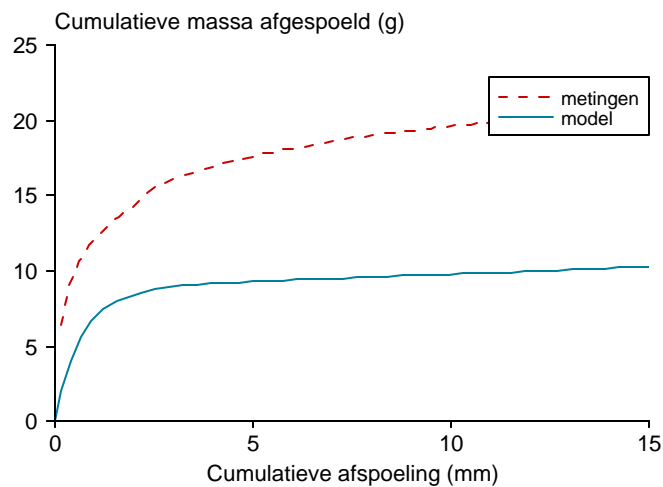
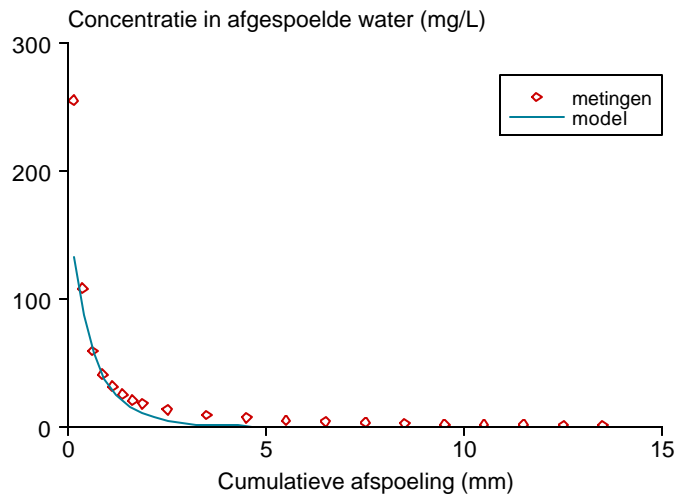


Fig. 13 Concentratie in het afgespoelde water en de cumulatieve afgespoelde massa als functie van de cumulatieve afspoeling voor bromide in proef 4

Als vierde is getest of de afspoeling bij een sterk afwijkende hydrologie goed kon worden gesimuleerd. Hiervoor is de afspoeling van bromide in proef 4 gesimuleerd (fig. 13). De infiltratie van bromide in proef 4 is veel kleiner dan in andere drie experimenten (zie fig. 1 in par. 3.2). PROVO simuleert wel een grotere cumulatieve afspoeling van bromide dan in proef 1 (let op, de dosering van bromide 103 g in proef 1 was en 75 g in proef 4)). De gesimuleerde afspoeling is meer dan een factor twee lager dan de gemeten afspoeling in proef 4.

## 5.4 Discussie

De gesimuleerde afspoeling in de beginfase is groter dan de gemeten, omdat het model geen rekening houdt met de oplosbaarheid van de stof. De sorptiecoëfficiënten hebben nauwelijks invloed op de afspoeling. De modelsimulaties illustreren dat de infiltratie belangrijkste factor is voor uitspoeling, dat de oplosbaarheid van slecht oplosbare herbiciden moet worden gemodelleerd, en dat de adsorptie van herbiciden aan verhardingen geen belangrijke rol speelt in de afspoeling.

PROVO beschrijft de infiltratie nog niet goed genoeg om afspoeling bij verschillende beginsituaties goed te simuleren. De vochttoestand van de bestrating bij aanvang moet worden toegevoegd als parameter en in proeven ook worden gemeten.

Mogelijk was de bestrating in proef 4 toch niet helemaal droog, waardoor de bevochtiging en daarbij behorende fractie absorptie (F) van bromide en de herbiciden minder was dan berekend met het gekalibreerde model.

## 6 Algemene discussie

### 6.1 Verloop van de afspoeling

Gedurende het onderzoek is het volgende beeld ontstaan van de processen die een rol spelen bij de afspoeling van herbiciden van verhardingen (zie Figuur 14).

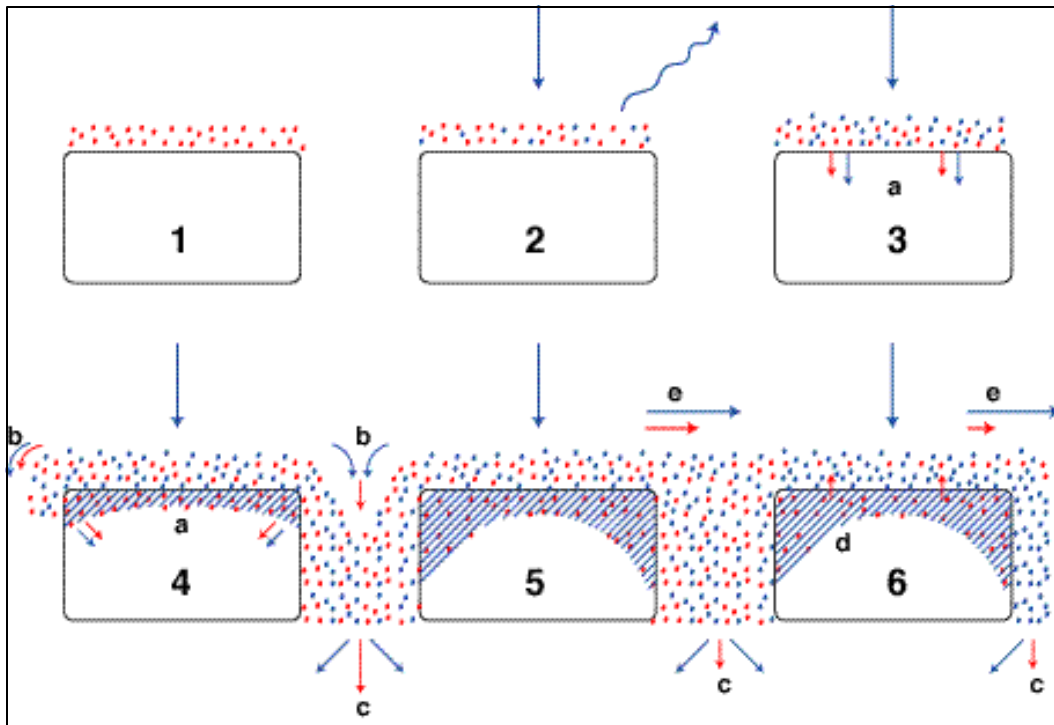


Fig. 14 Afspoelingsproces van een bestrating met voegen. Voor verklaring zie tekst.

De fasen in het afspoelproces zijn achtereenvolgens:

1. De verharding is bespoten en de spuitvloeistof is verdampt. Het herbicide ligt in vaste vorm (althans: niet-opgelost) op de steen.
2. De regenbui begint. De eerste druppels water verdampen direct (de steen is nog relatief warm).
3. Het herbicide op de steen begint op te lossen (snelheid afhankelijk van de oplosbaarheid van de stof). Water met opgelost herbicide dringt de steen in (a). De grootte van a is afhankelijk van de beschikbaarheid van opgelost herbicide en de porositeit van de steen. Afhankelijk van het soort bui zal deze fase kort of lang duren: bij een hevige bui spoelt er eerder water van de steen af (= volgende fase), bij motregen zal dit lang duren en kan er veel herbicide de steen indringen.
4. De neerslagintensiteit is groter dan de opnamesnelheid van de steen, en het water spoelt van de steen af in de voeg (b). De grootte van b hangt af van de beschikbaarheid van opgelost herbicide, de doordringbaarheid van het voegmateriaal en het vochtgehalte van de voeg. Waar de voegen zijn

dichtgekit bestaat stroom b niet. Wanneer de voeg verzadigd is, hangt de grootte van b af van de uitstroom aan de onderkant van de voeg (c). Deze stroom is weer afhankelijk van de doorlaatbaarheid en verzadiging van de ondergrond.

5. De neerslagintensiteit is groter dan de steen en de voeg kunnen opnemen, en het water spoelt van de bestrating af (e). De grootte van e is een resultante van de neerslag minus a minus c. In de praktijk zal de steen op een gegeven moment verzadigd zijn, en kan a op nul worden gesteld (afspoeling is dan bepaald door neerslag minus infiltratie). De hoeveelheid herbicide in e hangt af van de beschikbaarheid ervan aan de oppervlakte van de steen.
6. Na enige tijd afspoelen is het oppervlak van de steen min of meer 'schoon', en begint het herbicide uit de steen naar boven te diffunderen (d). De grootte van d hangt af van de mate waarin het herbicide is geadsorbeerd aan de steen (kan het herbicide nog van de steen af?) en het concentratieverschil tussen het water op de steen en in de steen. Aangezien er minder herbicide beschikbaar is, is ook de flux in c kleiner geworden.

## **6.2 Berekening, infiltratie en afspoeling**

De proeven zijn uitgevoerd met een realistische neerslagintensiteit.

De experimenten van Shepherd en Heather (1999) waren een belangrijke bron voor het denken over afspoeling. De verhardingen van Shepherd waren uit een stuk, zonder voegen (er was dus geen infiltratie mogelijk). De infiltratie werd daardoor onderschat bij de opzet van het onderzoek. Op beton spoelde bij Shepherd en Heather 55% van de gedoseerde atrazin af in 15 mm water, afspoelend in circa 1 uur. Voor glyfosaat spoelde er 48% in dezelfde tijd en hoeveelheid water. Bij lagere afspoelsnelheden van het water spoelde er minder glyfosaat af. Het beton is na het experiment niet geanalyseerd op de middelen. Het is te verwachten dat de restanten van de dosering nog in het beton aanwezig waren.

Een groot deel van de gedoseerde massa herbiciden bleek te infiltreren. Hoewel er veel onderzoek is gedaan naar de afspoeling van water vanaf verharde oppervlakken, bleken de gevonden cijfers uit die onderzoeken niet te voldoen om afspoeling van herbiciden te schatten. Dit is verklaarbaar uit het doel waarvoor veel onderzoeken zijn uitgevoerd; om de riolering optimaal te dimensioneren. Bij een dergelijke doelstelling zoekt men naar de minimale hoeveelheid infiltrerend water bij langdurige buien. Voor het schatten van de afspoeling van herbiciden zijn juist de eerste minuten van de bui van groot belang vanwege die piekconcentraties die dan worden gevonden. In de initiële fase van een regenbui is de infiltratie het grootst, waarna deze afneemt tot er een constante infiltratie blijft bestaan. De veldproeven tonen aan dat infiltratie door het straatdek in grote mate de afspoeling van herbiciden bepaalt.

Bij het huidige onderzoek is na analyse van de resultaten van de eerste twee proeven getracht om meer informatie over het infiltrerende deel van de neerslag te weten te komen. De grondmonsters die daarvoor zijn genomen, lieten zien dat bij een hoge

vochtigheid van de ondergrond, de afspoeling van herbicide sterk toe neemt. De afspoeling van glyfosaat nam toe van 11 – 12% van de dosering tot 23% van de dosering. In veldsituaties zal er dus meer afspoelen bij een ondergrond die minder infiltratiecapaciteit heeft (door vochtigheid of de soort grond), maar ook bij een straatdek dat minder absorptiecapaciteit heeft dan betonklinkers. Shepherd deed onderzoek met beton en asfalt. Asfalt heeft een veel lagere absorptiecapaciteit dan beton. Van asfalt spoelde twee maal zoveel glyfosaat als van de beton. Bij de slecht oplosbare middelen (< 37 mg/L) als atrazin en diuron was het omgekeerde het geval, van beton spoelde twee maal zoveel massa af als van asfalt.

De veldproeven zijn uitgevoerd op betonklinkers. De infiltratie wordt mede bepaald door de totale oppervlakte van voegen op het stuk bestrating. Bij bestratingen met meer (sierbestrating van kleine klinkers) of minder (tegels) voegen zal ook de infiltratie meer of minder zijn. Bij minder voegoppervlak is dan te verwachten dat meer afspoeling van herbiciden optreedt.

### **6.3 Adsorptie en absorptie**

Is voor de initiële afspoeling de infiltratie verklarend, voor de nalevering gaan absorptieprocessen een rol spelen. De praktijkcijfers van het waterschap Zuiderzeeland laten zien dat nog lange tijd na een bespuiting herbiciden terug te vinden zijn in het afspoelende water. De absorptie van de middelen in de straatstenen leidt ertoe dat ze bij neerslag traag worden teruggeleverd aan over het oppervlak stromende water. Bij iedere regenbui kan dat opnieuw optreden. Adsorptie van met name glyfosaat aan het oppervlak zou kunnen optreden. Uit de veldproeven gecombineerd met de modelsimulaties lijkt dit proces een geringe rol te spelen.

### **6.4 Modelling**

PROVO is gebruikt als ‘meedenk-instrument’. De processen die zijn geïdentificeerd, zijn ingebouwd en vervolgens is gekeken of de veldexperimenten konden worden gesimuleerd.

Om het proces van een grote initiële infiltratie met afnemend naar constante infiltratie goed te modelleren is de vergelijking van Philip voor infiltratie in PROVO gebouwd. In de veldproeven zijn een beperkt aantal metingen gedaan aan de afspoeling van water als functie van de tijd. In proef 4 was de infiltratie veel kleiner dan in de andere drie proeven. Van proef 4 was een uitgebreidere set metingen beschikbaar. Ondanks daarop goed te fitten parameters van de vergelijking van Philip, is de afspoeling van bromide en de herbiciden onderschat met het gekalibreerde model. De ondergrond was bij aanvang van de vierde proef vochtiger dan bij aanvang van de derde proef. Mogelijk dat ook de stenen bij aanvang vochtiger waren zodat minder absorptie van de herbiciden kon optreden.

De afspoeling van atrazin was niet goed te simuleren met PROVO. In de veldproeven lijkt de oplosbaarheid van atrazin van belang te zijn. Uitbreiding van PROVO met neerslaan en oplossen van slecht oplosbare middelen als atrazin lijkt nodig om de afspoeling goed te kunnen simuleren.

Voor het opstellen van scenario's voor toelating en het ontwikkelen van schattingsmethoden voor afspoeling worden aannamen gedaan voor een bui en voor het ontvangende oppervlaktewater. Relevant daarin is welke fractie van een dosering van een herbicide met een bepaalde bui in het oppervlaktewater terechtkomt. De concentraties die gemeten zijn in veldproeven zijn illustratief voor pieken die in het veld kunnen worden aangetroffen. Voor scenario's is de afgespoelde fractie bij een bepaalde cumulatieve neerslag van meer belang. Uit de metingen blijkt dat het grootste deel van de afgespoelde fractie met de eerste 5 mm afspoeling komt en dat tot 60% van de massa die met 14 mm afspoelt zich bevindt in de eerste 2 mm afspoeling.

Het model is nog niet geschikt voor slecht oplosbare herbiciden, omdat er nog geen relatie is afgeleid tussen de oplosbaarheid van de stof en de mate van afspoeling.

Absorptie van de herbiciden in de steen bepaalt welk deel van de gespoten hoeveelheid er beschikbaar is voor afspoeling en infiltratie bij de start van afspoeling van water. De fractie van de dosering die absorbeerd ( $F$  in het model) is gecorreleerd met de opnamecapaciteit van water door de steen. De opnamecapaciteit is afhankelijk van het steentype. Omdat de proeven zijn uitgevoerd op één type steen is er met de verkregen gegevens nog geen relatie te leggen met initieel absorberende fractie.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

Doel van dit onderzoek is het verbeteren van schattingsmethoden voor afspoeling van herbiciden vanaf verhardingen. De veldproeven en modelsimulaties leiden tot de volgende conclusies en aanbevelingen:

1. De afspoelingspatronen zoals op laboratoriumschaal waargenomen door Shepherd en Heather worden op een betonklinkerverharding ook op veldschaal waargenomen. Dat wil zeggen een initiële hoge piek en nog lang naleverende staart. De eerste 5 mm afspoelende neerslag bevat het grootste deel van de totaal afspoelende massa herbicide.

Afspoeling vindt grotendeels plaats met de eerste bui na toediening. De piekconcentraties zullen dan optreden in het oppervlaktewater. Toelatingsscenario's moeten gericht zijn op de processen tijdens de eerste regenbui na toedieningen. Voor monitoring van afspoeling is het nodig om het eerst afspoelende water op te vangen. De straat blijft naleveren, dus ook met volgende buien zullen er herbiciden afspoelen, en kunnen ze nog lang na de toepassing worden aangetroffen in het oppervlaktewater.

2. De adsorptie van herbiciden aan de verharding heeft nauwelijks invloed op de afspoeling. De oplosbaarheid van de herbiciden beïnvloedt het afspoelingspatroon. De afspoeling van slecht oplosbare herbiciden is groter dan van goed oplosbare herbiciden.

Voor het schatten van de emissies is het nodig om rekening te houden met de oplosbaarheid van de herbiciden. Voor goed oplosbare herbiciden is er geen onderscheid in de fractie die afspoelt naar het oppervlaktewater. Voor toelating is het nodig om voor de afspoeling van slecht oplosbare herbiciden meer kennis te krijgen over de relatie tussen de oplosbaarheid van het herbicide en het afspoelingsgedrag ervan. Op basis van de huidige resultaten voor drie stoffen is het verschil in afspoeling tussen slecht en goed oplosbare stoffen ongeveer een factor 2. Bij het monitoren van op verhardingen toegepaste herbiciden in oppervlaktewater zal dat onderscheid waarschijnlijk in het niet vallen bij de variabiliteit in tijd en ruimte van toedieningsobject, toedieningstijdstippen, processen in het oppervlaktewater (adsorptie, omzetting etc).

3. Infiltratie door de bestrating naar de ondergrond is het belangrijkste proces dat de afspoeling van herbiciden bepaalt. De verhouding tussen enerzijds de afspoeling en anderzijds de infiltratie in de eerste millimeters van de eerste bui na toepassing van het herbicide bepaalt grotendeels welke fractie van de gedoseerde massa afspoelt naar het oppervlaktewater. Deze verhouding wordt onder andere bepaald door de infiltratiecapaciteit van de bestrating en het vochtgehalte van de ondergrond.

Voor het schatten van de emissies zijn de factoren die de infiltratie bepalen te specifiek om emissieschatting te differentiëren naar verharding. Voor de toelating moet in het scenario een worst case worden vastgelegd die wordt gevormd door een bestrating met een geringe infiltratiecapaciteit bij een natte ondergrond (zoals in proef 4 van dit onderzoek). Voor de monitoring van herbiciden in oppervlaktewater zijn deze gegevens te specifiek om relaties te leggen.

Nader onderzoek is nodig naar infiltratieprocessen in bestratingen in de eerste 5 tot 15 minuten in een bui, ook in relatie tot de ondergrond. Daarnaast is het zinvol onderzoek te doen naar de absorptie van water in en naar de infiltratie door verschillende typen verhardingen.

Dit onderzoek geeft aanleiding voor verkennend onderzoek naar de emissie van herbiciden via ondergrondse routes naar het oppervlaktewater en grondwater. Drains onder verhardingen kunnen ervoor zorgen dat middelen in korte tijd in het oppervlaktewater terecht komen. Onder de verharding zit zand, waardoor het water snel wordt afgevoerd. Dit zand bevat weinig organische stof, dus adsorptie van de middelen zal beperkt zijn.

4. De afgespoelde fracties van herbiciden in de uitgevoerde veldproeven waren maximaal 23% voor de goed oplosbare middelen amitrol en glyfosaat, en maximaal 44% voor het slecht oplosbare herbicide atrazin. Omdat de omstandigheden nog slechter kunnen zijn dan in de veldproeven kan de afspoeling in de praktijk groter zijn.

Voor emissieschattingen kunnen dit richtpercentages zijn om te differentiëren naar herbicide. Voor de toelating is het eerst nodig om een relatie met de oplosbaarheid van het herbicide in het scenario in te bouwen.

5. De periode tussen de toepassing van het herbicide en de eerste neerslag heeft geen invloed op de afspoeling van het herbicide.

Piekconcentraties in het oppervlaktewater kunnen worden verwacht bij de eerste bui na de toediening. Als het in het voorjaar lange tijd niet regent en de hele wijk wordt bespoten gedurende die periode, dan komt met de eerste bui de afspoeling van de hele wijk in een keer in het oppervlaktewater.

6. Het model PROVO is in beperkte mate geschikt voor scenarioberekeningen. De invloed van de oplosbaarheid op de afspoeling, relevant voor slecht oplosbare herbiciden, kan nog niet worden gekwantificeerd en er is nog geen relatie te leggen met het type bestrating.

Meer metingen zijn niet zinvol in deze fase. Een vervolgstap is om zo mechanistisch mogelijk model maken om te kijken of dit de kwalitatieve verschillen tussen atrazin en de andere middelen kan verklaren.



## Literatuur

Beltman, W.H.J., 2001. PROVO simulatie van Pesticide RunOff vanaf Verharde Oppervlakken. Alterra, rapport in voorbereiding.

Buishand, T.A., J.B.M. van Acker, H. van Lujtelaar, 1991. Analyse van kwartiersommen van de neerslag. H<sub>2</sub>O 24, 294-299.

Burger, M.B.M.M.P., 2000. Literatuurstudie naar verliesprocessen en afstromingpercentages in stedelijke gebieden. IBU Ingenieursbureau Utrecht, Utrecht.

Crum, S.J.H., R.C.M. Merkelbach, 1998. Emissie van bestrijdingsmiddelen in het stedelijk gebied: Een eerste inventarisatie. Interne Mededeling 545, SC-DLO, Wageningen.

Dam, C.H. van, J. Schotkamp, 1983. Infiltratie in bestratingen. RIJP rapport 1983-38 abw. Lelystad, 38 p.

Dekker, C., T. Brijder, K. Kroon, 2000. Chemische onkruidbestrijding op straatverharding, Onderzoek naar de gevolgen voor de oppervlaktewaterkwaliteit in de periode 1994 - 2000. Waterschap Zuiderzeeland, Lelystad, 16p.

Kraaij, H., G. Verstappen, 1997. Emissie naar oppervlaktewater van bestrijdingsmiddelen toegepast in het openbaar groen: Voorstel voor een risico-evaluatiemethode voor het gebruik van bestrijdingsmiddelen in de openbaar groensector. RIZA nota, september 1997.

Linders, J.B.H.J., D.T. Jager, 1998. Uniform System for the Evaluation of Substances (USES), version 2.0. RIVM, Bilthoven.

Merkelbach, R.C.M., S.J.H. Crum, J.W. Deneer, R. Kruijne, R.A. Smidt, P.C. Leendertse, 1999. Belasting van de Afgedamde Maas door bestrijdingsmiddelen en meststoffen. Alterra Research Instituut voor de Groen Ruimte, Rapport 676, 101 p.

Philip, J.R., 1957. The theory of infiltration: 4 Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. 84, 257-274.

Shepherd, A.J., A.I.J. Heather, 1999. Factors affecting the loss of six herbicides from hard surfaces. In: A.A.M. Del Re, C.D. Brown, E. Capri, G. Errera, S.P. Evans, M. Trevisan (Eds), XI Symposium Pesticide Chemistry, Human and environmental exposure to xenobiotics, September 11-15, 1999, Cremona, 777-784.

Ven, F.H.M. van de, 1988. Van neerslag tot rioolinloop in vlak gebied. Van Zee tot Land 57, Lelystad, Rijkswaterstaat, Directie Flevoland.

Ven, F.H.M. van de, A.J.M. Neelen, G.D. Geldof, 1992. Urban drainage. In: P.Smart & J.G. Herbertson (Eds), Drainage design. Blackie and Son, Glasgow, 118-150.

Wageningen UR Omgevingswetenschappen, 2001. Maandoverzicht weergegevens Station Wageningen "De Haarweg". Maandoverzichten augustus en september 2000.

## Bijlage 1      **Analyseresultaten monsters afgespoeld water van de veldproeven**

### Proef 1 10 augustus 2000

Monstercode	Volume (L)	Cumulatief volume (L)	Bromide (mg/L)	Amitrol (mg/L)	Atrazin (mg/L)	Glyfosaat (mg/L)	AMPA (mg/L)
1.1	25	25	95,24	28,10	21,38	14,66	0,068
1.2	25	50	53,91	16,51	16,85	11,30	0,044
1.3	25	75	29,45	9,17	11,69	6,40	0,040
1.4	25	100	19,85	6,07	8,74	3,04	0,038
1.5	25	125	15,34	4,47	7,08	2,13	0,024
1.6	25	150	11,85	3,52	5,60	2,63	0,025
1.7	25	175	7,61	2,80	4,79	1,41	0,016
1.8	25	200	6,77	2,31	4,00	1,25	0,014
1.9	100	300	4,86	1,13	2,94	0,95	0,011
1.10	100	400	3,17	0,75	1,93	0,93	0,009
1.11	100	500	2,52	0,57	1,43	0,77	0,007
1.12	100	600	1,93	0,47	1,13	0,67	0,005
1.13	100	700	1,67	0,41	0,94	0,52	0,004
1.14	100	800	1,47	0,34	0,82	0,63	0,006
1.15	100	900	1,22	0,29	0,72	0,55	0,004
1.16	250	1150	1,01	0,21	0,60	0,53	0,003
1.17	250	1400	0,84	0,18	0,46	0,51	0,003
1.18	250	1650	0,78	0,14	0,39	0,39	0,002
1.19	250	1900	0,73	0,17	0,33	0,39	0,003
1.20	250	2150	0,69	0,18	0,28	0,38	-

**Proef 2 16 augustus 2000**

Monstercode	Volume (L)	Cumulatief volume (L)	Bromide (mg/L)	Amitrol (mg/L)	Atrazin (mg/L)	Glyfosaat (mg/L)	AMPA (mg/L)
1.1	25	25	80,90	29,71	25,23	24,01	0,20
1.2	25	50	44,71	15,18	16,65	14,56	0,18
1.3	25	75	24,43	7,95	10,83	8,14	0,14
1.4	25	100	16,71	4,85	7,80	5,48	0,11
1.5	25	125	12,57	3,94	6,31	3,52	0,08
1.6	25	150	10,86	3,28	5,49	3,02	0,07
1.7	25	175	8,66	2,69	4,69	2,73	0,07
1.8	25	200	7,31	2,44	4,16	2,38	0,06
1.9	100	300	5,21	1,65	2,84	1,79	0,05
1.10	100	400	3,51	1,23	1,89	1,16	0,04
1.11	100	500	3,00	1,03	1,57	0,94	0,04
1.12	100	600	2,51	0,84	1,27	0,79	0,04
1.13	100	700	1,84	0,63	0,97	0,63	0,03
1.14	100	800	1,49	0,58	0,83	0,54	0,03
1.15	100	900	1,31	0,55	0,74	0,58	0,03
1.16	100	1000	1,14	0,52	0,69	0,50	0,03
1.17	100	1100	1,02	0,48	0,61	0,45	0,02
1.18	100	1200	0,91	0,45	0,54	0,42	0,02
1.19	100	1300	0,82	0,31	0,49	0,50	0,03
1.20	100	1400	0,76	0,29	0,46	0,38	0,03

**Proef 3 31 augustus 2000**

Monstercode	Volume (L)	Cumulatief volume (L)	Bromide (mg/L)	Amitrol (mg/L)	Atrazin (mg/L)	Glyfosaat (mg/L)	AMPA (mg/L)
1.1	25	25	94,96	34,73	26,33	56,23	0,65
1.2	25	50	39,91	12,64	16,78	18,71	0,30
1.3	25	75	22,98	7,43	10,09	7,70	0,13
1.4	25	100	15,74	5,02	6,79	5,99	0,12
1.5	25	125	12,00	3,85	5,14	3,59	0,08
1.6	25	150	9,98	3,20	4,16	3,55	0,08
1.7	25	175	8,47	2,72	3,40	2,64	0,07
1.8	25	200	7,32	2,23	2,87	2,40	0,06
1.9	100	300	5,60	1,86	2,13	1,93	0,06
1.10	100	400	4,05	1,55	1,54	1,36	0,04
1.11	100	500	3,03	1,14	1,06	1,07	0,04
1.12	100	600	2,40	0,81	0,81	0,73	0,03
1.13	100	700	1,99	0,69	0,66	0,65	0,03
1.14	100	800	1,92	0,64	0,62	0,66	0,03
1.15	100	900	2,02	0,73	0,63	0,73	0,03
1.16	100	1000	1,62	0,59	0,51	0,57	0,03
1.17	100	1100	1,36	0,57	0,44	0,46	0,02
1.18	100	1200	1,17	0,48	0,38	0,44	0,02
1.19	100	1300	0,98	0,35	0,34	0,67	0,03
1.20	100	1400	0,92	0,39	0,30	0,46	0,04

**Proef 4 7 september 2000**

Monstercode	Volume (L)	Cumulatief volume (L)	Bromide (mg/L)	Amitrol (mg/L)	Atrazin (mg/L)	Glyfosaat (mg/L)	AMPA (mg/L)
1.1	25	25	255,89	100,78	25,61	68,96	0,25
1.2	25	50	108,70	43,81	23,05	40,66	0,18
1.3	25	75	59,85	26,15	20,46	23,99	0,14
1.4	25	100	41,92	17,77	17,18	13,65	0,09
1.5	25	125	32,10	13,44	13,50	8,64	0,10
1.6	25	150	25,79	10,69	11,52	8,73	0,09
1.7	25	175	21,66	8,88	10,04	6,99	0,08
1.8	25	200	19,01	7,75	8,98	6,01	0,07
1.9	100	300	14,33	5,80	6,79	4,27	0,06
1.10	100	400	9,95	3,95	4,57	2,41	0,04
1.11	100	500	7,87	3,16	3,50	1,83	0,03
1.12	100	600	5,86	2,40	2,61	1,46	0,02
1.13	100	700	4,85	2,01	2,14	1,14	0,02
1.14	100	800	4,22	1,75	1,81	0,97	0,02
1.15	100	900	3,58	1,51	1,52	1,13	0,02
1.16	100	1000	2,99	1,28	1,24	0,87	0,01
1.17	100	1100	2,69	1,18	1,12	0,83	0,01
1.18	100	1200	2,40	1,05	0,99	0,72	0,01
1.19	100	1300	2,16	0,94	0,90	0,57	0,01
1.20	100	1400	1,97	0,88	0,82	0,64	0,02

## Bijlage 2 Grafieken van de afspoeling van bromide, amitrol, atrazin en glyfosaat in proef 2 en proef 3

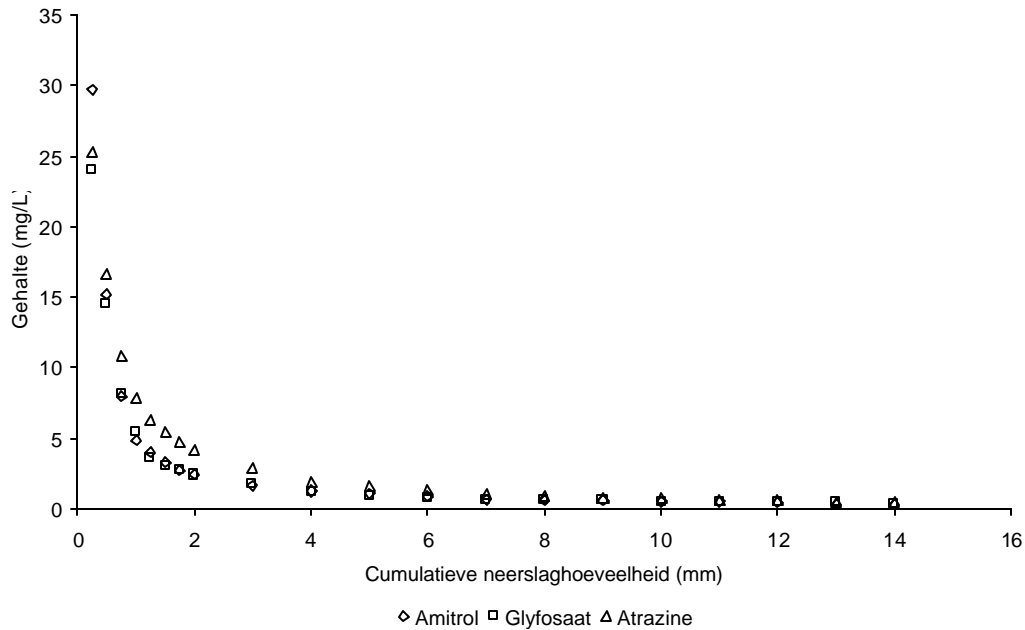


Fig. A1: Amitrol, glyfosaat en atrazin gehalte (mg/L) in het afgespoelde water in proef 2

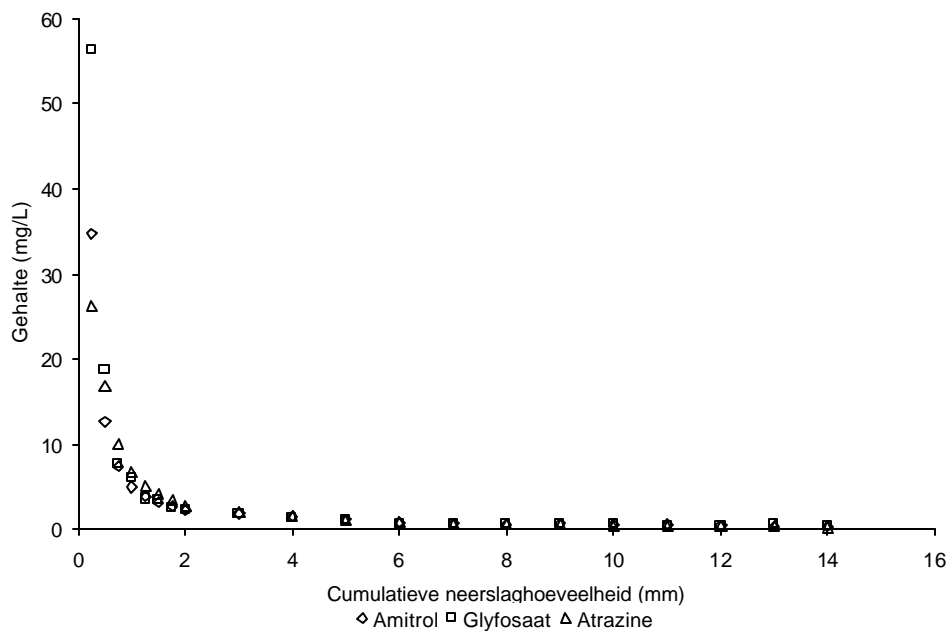


Fig. A2: Amitrol, glyfosaat en atrazin gehalte (mg/L) in het afgespoelde water in proef 3

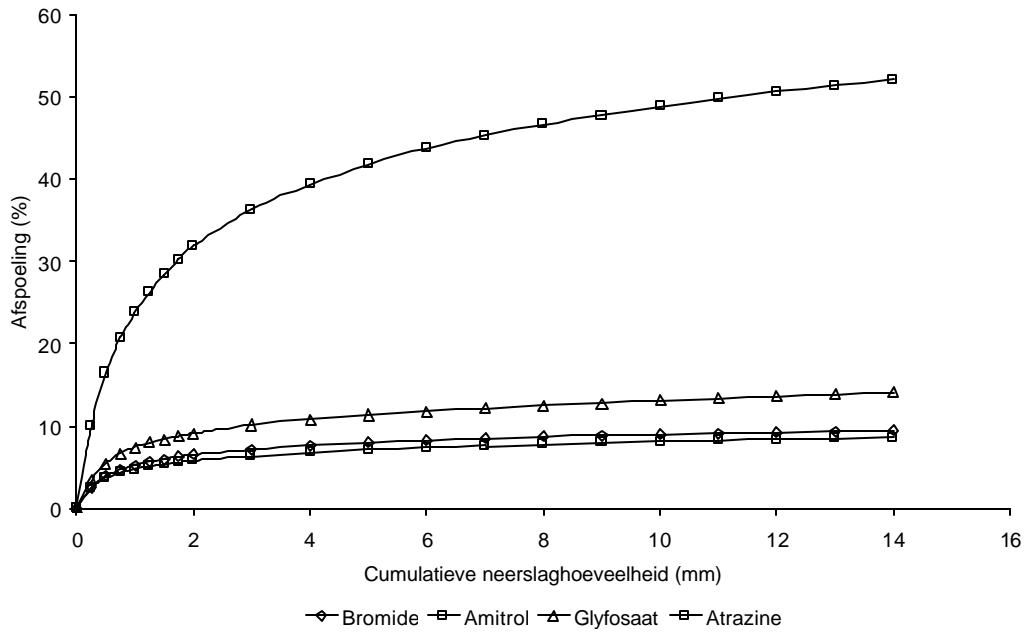


Fig. A3: Afspoeling bromide, amitrol glyfosaat en atrazin in % van de dosering in proef 2

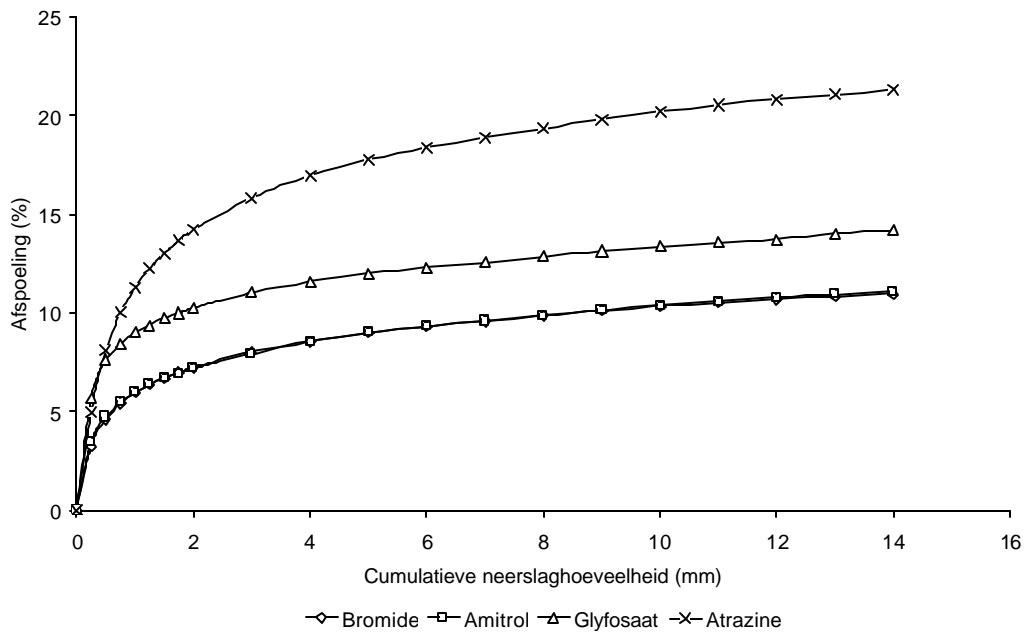


Fig. A4: Afspoeling bromide, amitrol glyfosaat en atrazin in % van de dosering in proef 3



### **Bijlage 3**

**Gehalten, vocht, bromide, amitrol, atrazin, glyfosaat en AMPA in grondmonsters gestoken onder bestrating voor en na proef 3 en proef 4**



<b>Proef 3 Gehalten vocht, bromide, atrazin, glyfosaat, AMPA in grondmonsters gestoken onder de bestrating voor en na de proef</b>										
		voor beregenen	voor beregenen	voor beregenen	voor beregenen	voor beregenen	voor beregenen	voor beregenen	na beregenen	na beregenen
monster	diepte	water gehalte	organische stof	Bromide gehalte	Amitrol gehalte	Glyfosaat gehalte	AMPA gehalte	Atrazine gehalte	water gehalte	organische stof
	(cm)	(%)	(%)	(mg/kg d.s.)	(mg/kg d.s.)	(mg/kg d.s.)	(mg/kg d.s.)	(mg/kg d.s.)	(%)	(%)
3	0-10	3,9	0,3	0,433	0	0,007	0,046	0,012	12,57	0,33
3	10-30	6,78	0,34	0,505	0	0,005	0,006	0,159	14,22	0,57
2	0-10	6,76	0,4	0,819	0	0,002	0,005	0,145	13,19	0,34
2	10-30	10,92	0,44	2,151	0	0,002	0,009	0,399	14,33	0,34
1	0-10	8,65	0,44	1,608	0	0,001	0,018	0,288	13,75	0,37
1	10-30	12,93	0,34	2,163	0	0,002	0,000	0,105	15,69	0,34
gemiddelde										
	0-10	6,44	0,380	0,953	0,000	0,003	0,023	0,148	13,170	0,347
	10-30	10,21	0,373	1,606	0,000	0,003	0,005	0,221	14,747	0,417
sd										
	0-10	2,39	0,072	0,599	0,000	0,003	0,021	0,138	0,590	0,021
	10-30	3,14	0,058	0,954	0,000	0,002	0,004	0,157	0,819	0,133

Proef 4 Gehalten vocht, bromide, atrazin, glyfosaat, AMPA in grondmonsters gestoken onder de bestrating voor en na de proef											
monster	diepte (cm)	voor beregenen water gehalte (%)	voor beregenen organische stof (%)	voor beregenen Bromide gehalte (mg/kg d.s.)	voor beregenen Amitrol gehalte (mg/kg d.s.)	voor beregenen AMPA gehalte (mg/kg d.s.)	voor beregenen Glyfosaat gehalte (mg/kg d.s.)	voor beregenen Atrazine gehalte (mg/kg d.s.)	na beregenen water gehalte (%)	na beregenen organische stof (%)	na beregenen Bromide gehalte (mg/kg d.s.)
3.1	0-10	6,44	0,35	0,447	0,188	0,000	0,000	0,013	8,66	0,3	2,935
3.1	10-30	10,75	0,48	0,966	0,196	0,000	0,000	0,041	13,15	0,48	1,681
3.1	30-40								13,28	2,18	0,556
3.2	0-10								11,35	0,41	2,799
3.2	10-30								16,13	0,4	2,434
3.2	30-40								12,62	1,14	0,689
2.1	0-10	7,79	0,49	0,465	0,033	0,000	0,000	0,025	10,85	0,5	1,470
2.1	10-30	13,22	0,53	2,082	0,277	0,000	0,000	0,395	14,97	0,4	2,324
2.1	30-40								17,49	0,45	0,612
2.1	40-50								12	1,99	0,243
2.2	0-10								11,65	0,5	1,236
2.2	10-30								15,58	0,53	2,391
2.2	30-40								16,42	0,71	0,717
1.1	0-10	8,21	0,44	0,526	0,074	0,035	0,047	0,059	11,1	0,37	1,940
1.1	10-30	13,67	0,45	2,165	0,083	0,000	0,000	0,270	17	0,48	3,030
1.1	30-40								10,8	0,73	0,910
1.2	0-10								11,95	0,51	4,627
1.2	10-30								11,07	0,74	1,468
1.2	30-40								15,7	3,66	0,400
3	gemiddelde per plek										
	0-10	6,440	0,350	0,447	0,188	0,000	0,000	0,013	10,005	0,355	2,867
	10-30	10,750	0,480	0,966	0,196	0,000	0,000	0,041	14,640	0,440	2,058
	30-40								12,950	1,660	0,622
	40-50										
	sd per plek										
	0-10								1,902	0,078	0,096
	10-30								2,107	0,057	0,533
	30-40								0,467	0,735	0,094
	40-50										
2	gemiddelde per plek										
	0-10	7,790	0,490	0,465	0,033	0,000	0,000	0,025	11,250	0,500	1,353
	10-30	13,220	0,530	2,082	0,277	0,000	0,000	0,395	15,275	0,465	2,358
	30-40								16,955	0,580	0,664
	40-50								12,000	1,990	0,243
	sd per plek										
	0-10								0,586	0,000	0,165
	10-30								0,431	0,092	0,047
	30-40								0,757	0,184	0,074
	40-50										
1	gemiddelde per plek										
	0-10	8,210	0,440	0,526	0,074	0,035	0,047	0,059	11,525	0,440	3,283
	10-30	13,670	0,450	2,165	0,083	0,000	0,000	0,270	14,035	0,610	2,249
	30-40								13,250	2,195	0,655
	40-50										
	sd per plek										
	0-10								0,601	0,099	1,900
	10-30								4,193	0,184	1,104
	30-40								3,465	2,072	0,360
	40-50										
	gemiddelde veld										
	0-10	7,480	0,427	0,479	0,098	0,012	0,016	0,032	10,927	0,432	2,501
	10-30	12,547	0,487	1,737	0,185	0,000	0,000	0,235	14,650	0,505	2,221
	30-40								14,385	1,478	0,647
	40-50										
	sd veld										
	0-10	0,925	0,071	0,041	0,080	0,020	0,027	0,024	0,810	0,073	1,016

## **Bijlage 4            Cumulatief afgespoeld water en daaruit berekende infiltratie**

Proef 1, gemeten cumulatieve afspoeling en cumulatieve infiltratie berekend uit cumulatieve neerslag minus cumulatieve afspoeling

Tijd (h)	Cumulatieve afspoeling (mm)	Cumulatieve infiltratie (mm)
0	0	0
0,133	0	1,41
0,217	0,25	2,05
0,27	0,50	2,33
0,45	1,25	3,52
0,70	2,25	5,17
0,80	3,00	5,48
1,30	5,25	8,53
1,40	6,00	8,84
1,45	6,25	9,12
1,57	7,00	9,64
3,45	21,50	15,07

Proef 2, gemeten cumulatieve afspoeling en cumulatieve infiltratie berekend uit cumulatieve neerslag minus cumulatieve afspoeling

Tijd (h)	Cumulatieve afspoeling (mm)	Cumulatieve infiltratie (mm)
0	0	0
0,117	0	1,17
0,25	0,25	2,25
0,33	0,50	2,83
2,87	14,00	14,67

Proef 3, gemeten cumulatieve afspoeling en cumulatieve infiltratie berekend uit cumulatieve neerslag minus cumulatieve afspoeling

Tijd (h)	Cumulatieve afspoeling (mm)	Cumulatieve infiltratie (mm)
0	0	0
0,117	0	1,33
2,67	14,00	16,40

Proef 4, gemeten cumulatieve afspoeling en cumulatieve infiltratie berekend uit cumulatieve neerslag minus cumulatieve afspoeling

Tijd (h)	Cumulatieve afspoeling (mm)	Cumulatieve infiltratie (mm)
0	0	0
0,100	0	1,10
0,183	0,25	1,76
0,23	0,50	2,06
0,27	0,75	2,19
2,05	14,00	8,55