

# Untersuchungen über die vertikale Wanderung von Herbiziden im Boden unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten einer Grundwasserverunreinigung

Von Hans-Otfried Leh, Biologische Bundesanstalt, Institut für nichtparasitäre Pflanzenkrankheiten, Berlin-Dahlem

[Nachrichtenbl. Deutsch. Pflanzenschutzd. (Braunschweig) 20. 1968, 99–106]

Die in oder auf den Boden gelangenden Herbizidwirkstoffe unterliegen im Boden einer Reihe von Einflüssen unterschiedlicher Natur, die alle auf eine mehr oder weniger schnelle Inaktivierung des jeweiligen Wirkstoffs hinauslaufen. Im Zusammenhang mit der Frage nach der Persistenz der Herbizidwirkstoffe sind die verschiedenen Faktoren – Auswaschung, chemische und physikalische Inaktivierung (Sorption, Verdampfung, photochemische Prozesse), Abbau durch Mikroorganismen, Einflüsse von Umweltfaktoren (Temperatur, Bodenfeuchtigkeit) – vielfach untersucht worden, indessen wurde der Frage nach einer möglichen Verunreinigung des Grundwassers durch Herbizidwirkstoffe bisher kaum Beachtung geschenkt.

Unsere Versuche, über die hier berichtet werden soll, beschäftigen sich mit dem Verhalten solcher Herbizide, die zur totalen Unkrautbekämpfung bzw. im Vorsaat-

oder Voraufverfahren angewandt werden, da bei dieser Art der Anwendung die Gefahr einer Grundwasserverunreinigung am ehesten gegeben ist. Entsprechende Untersuchungen über das Verhalten von Insektiziden im Boden wurden von Beran und Guth (1965) angestellt; auf ihre Ergebnisse kann hier nicht näher eingegangen werden.

## 1. Ermittlung der vertikalen Verteilung von Herbiziden in verschiedenen Böden unter dem Einfluß verschieden hoher Niederschlagsmengen

### 1.1. Methodik

Wir arbeiteten mit Zylindern aus Polyvinylchlorid (PVC) (Höhe 25 cm, lichte Weite 12,5 cm), die an einem Ende mit engmaschiger Kunststoffgaze versehen waren. In diese Zylinder wurde der Boden in lufttrockenem Zustand in einer

**Tabelle 1.** Übersicht über die verwendeten Herbizide und Böden

#### a) Herbizide

Kurz- oder Gruppenname	Chemische Bezeichnung	Löslichkeit* in Wasser (°C)	Angewandte Konzentration		Grenzwerte des Biotests (Hafer) in ppm, bezogen auf lufttrockenen Boden
			mg/Säule	kg/ha	
Amitrol	3-Amino-1H-1,2,4-triazol	28 g/100 ml (25)	98,4	80	0,5 – 15
NaTA (TCA)	Trichloressigsäure (Na-Salz)	120 g/100 ml (25)	61,5	50	0,25–17
Dalapon	2,2-Dichlorpropionsäure (Na-Salz)	57 g/100 ml (20) 90 g/100 ml (25)	61,5	50	0,25– 8,0
Monolinuron	3-(4-Chlor-phenyl)-1-methoxy-1-methyl-harnstoff	580 ppm	14,76	12	0,1 – 5,0
Linuron	3-(3,4-Dichlor-phenyl)-1-methoxy-1-methyl-harnstoff	75 ppm (25)	14,76	12	0,1 – 2,5
Pyrazon (PCA)	1-Phenyl-4-amino-5-chlor-pyridazon (6)	0,03% (20)	9,84	8	0,1 – 5,0
Prometryn	2,4-bis(Isopropylamino)-6-methylthio-1,3,5-triazin	48 ppm (20)	26,4	20	0,1 – 10
Simazin	2,4-bis(Athylamino)-6-chlor-1,3,5-triazin	5 ppm (20–22)	12,3	10	0,1 – 2,5

#### b) Böden

Versuchsteil I		Versuchsteil II	
Bodenart	Humusgehalt (Glühverlust)	Bodenart	Humusgehalt (Glühverlust)
Humusarmer Untergrund (Dahlem)	0,6	Humusarmer Untergrund (Dahlem)	0,6
Schwacher humoser, schwach lehmiger Sand (Dahlem)	1,5	Schwach humoser Lößlehm (Darmstadt)	2,45
Stark humoser Sand (Dahlem)	7,0	Stark humoser Sand (Husum)	8,1

\* nach Woodford und Evans (1965)

**Tabelle 2.** Verteilung von NaTA, Dalapon und Amitrol in 20 cm hohen Bodensäulen (*schwach lehmiger Sand*) nach Einwirkung von 1000 ml Wasser = 80 mm Niederschlag (in Prozenten der aufgegebenen Menge)

Bodentiefe in cm	NaTA	Dalapon	Amitrol
0- 2	4,7	1,1	9,5
2- 4	3,3	1,1	4,8
4- 6	3,3	1,1	2,3
6- 8	3,3	1,8	2,3
8-10	3,3	2,4	2,3
10-12	3,3	3,6	4,8
12-14	3,3	4,5	9,5
14-16	3,3	> 4,5	9,5
16-18	1,6	≥ 4,5	9,5
18-20	-	≥ 4,5	9,5
Nachweisbare Menge in Prozenten der aufgegebenen Menge	etwa 30	> 30	etwa 65

**Tabelle 3.** Verteilung von NaTA bzw. Aminotriazol in 20 cm hohen Bodensäulen (*stark humoser Sand*) nach Einwirkung von 1000 ml Wasser = 80 mm Niederschlag (in Prozenten der aufgegebenen Menge)

Bodentiefe in cm	NaTA	Amitrol
0- 2	4,2	9,5
2- 4	1,5	4,8
4- 6	2,0	4,8
6- 8	2,9	4,8
8-10	4,4	> 10
10-12	4,7	> 10
12-14	9,4	≥ 10
14-16	> 10	≥ 10
16-18	> 10	7,1
18-20	> 10	7,1
Nachweisbare Menge in Prozenten der aufgegebenen Menge	> 60	> 80

Schichthöhe von 20 cm in möglichst dichter Packung eingefüllt (eingerüttelt). Die Zylinder wurden auf Metallgestellen nebeneinander angeordnet, wobei ihr unterer Rand auf der oberen Öffnung von Trichtern aus Kunststoff ruhte. Die Bodensäulen wurden nun an der Oberfläche mit jeweils 100 ml einer Lösung bzw. Suspension des zu untersuchenden Herbizids behandelt. Die Anwendungsmengen lagen an der oberen Grenze der praxisüblichen Aufwandmengen. Nach der Aufgabe des Herbizids wurden mittels einer kleinen Gießkanne

(mit Brause) bestimmte Mengen Wasser auf die Säule gegeben und auf diese Weise verschieden hohe Niederschlagsmengen simuliert. Nach restlosem Ablauf der überschüssigen Wassermenge (i. allg. nach 24 Stunden) wurden die Bodensäulen in 10 je 2 cm hohe Scheiben zerlegt und die einzelnen Proben getrennt in Schalen aus inertem Kunststoff übertragen.

Eine Übersicht über die in den Versuchen verwendeten Herbizide und Böden vermittelt Tab. 1.

**Tabelle 4.** Auswaschung von NaTA, Dalapon bzw. Amitrol aus verschiedenen Böden (in Prozenten der aufgegebenen Menge)

Aufgegebene Wassermenge in ml	Niederschlagshöhe in mm	NaTA			Dalapon			Amitrol		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
500	40	0,6	12,5	17,0	nicht untersucht	0	1,1	0	0	0
600	48	1,0	> 35	28,3		0	6,6	0,7	.	.
700	56	10,1	> 45	38,6		0	6,7	14,9	.	.
800	64	> 33	> 54	43,8		8,3	6,8	> 29	.	.
900	72	> 56	> 62	48,2		22,9	6,9	> 43	.	.
1000	80	> 79	> 70	54,5		35,1	10,4	> 57	.	.
1100	88	> 82	> 76	58,1		35,3	10,5	> 71	.	.
1200	96	.	> 80	61,9		35,5	10,6	> 74	.	.
1300	104	.	> 84	64,8		35,9	10,6	> 76	.	.
1400	112	.	> 88	66,6		36,0	13,6	> 77	.	.
1500	120	> 83	> 92	67,3		36,3	14,8	> 78	0	0
:	:									
2000	160	> 84	> 98	71,6		40,0	17,1	> 79	3,2	5,7
:	:									
2500	200	> 87	> 99	76,4		41,1	18,2	> 79	6,8	11,9
:	:									
3000	240	> 90	> 99	79,5	42,0	22,0	> 79	10,3	15,5	

Spalte 1 = humusarmer Sand

Spalte 2 = schwach humoser Lehm

Spalte 3 = stark humoser Sand

Der Nachweis der Herbizide erfolgte mittels eines Biotests, d. h. in den gleichen Boden, der für die Füllung der Zylinder verwendet worden war, wurden definierte Mengen des auf sein Verhalten zu prüfenden Herbizids eingemischt. Die Bodenproben aus den Zylindern und die zugehörige Testreihe wurden gleichzeitig mit Hafer als Testpflanze eingesät und in einem Gewächshaus bei annähernd konstanter Temperatur (+ 20° C) nebeneinander aufgestellt. Nach einer Entwicklungszeit von etwa 4 Wochen wurden alle Pflanzen geerntet, ihre Frisch- und Trockengewichte bestimmt und durch entsprechende Vergleichsrechnungen die Herbizidmengen ermittelt, die in den einzelnen Schichten der Bodensäulen enthalten waren.

Es erwies sich als notwendig, nach diesem Biotestverfahren zu arbeiten, da für die meisten Herbizide zwar recht genaue chemische Nachweismethoden vorliegen, man aber auf erhebliche Schwierigkeiten stößt, wenn es darum geht, die gesuchten Wirkstoffe quantitativ aus dem Boden zu extrahieren. Da uns die für die Erarbeitung brauchbarer Extraktionsmethoden erforderliche Zeit nicht zur Verfügung stand, entschieden wir uns für das Biotestverfahren. Die Genauigkeit der Bestimmung ist hierbei zwar geringer als bei chemischen Methoden, sie erschien uns aber für diese Untersuchungen als ausreichend, zumal auch von anderen Autoren dem Biotest häufig der Vorzug gegeben wird.

Wie sich an Hand von Versuchsreihen mit bekannten Herbizidgehalten des Bodens erwies, gestattet das Biotestverfahren, wenn Hafer als Versuchspflanze verwendet wird, die Bestimmung der jeweils anwesenden Herbizidmengen mit einer Fehlergrenze von maximal  $\pm 5\%$  innerhalb der in Tab. 1 angegebenen Konzentrationsbereiche.

## 1.2. Ergebnisse

Einige der im Versuchsteil I erhaltenen Ergebnisse sind in den Tab. 2 und 3 zusammengestellt. Es ergab sich zunächst die für uns überraschende Tatsache, daß die verwendeten Herbizide bis zu einer Tiefe von 20 cm in die Bodensäulen eingedrungen waren und daß darüber hinaus ein erheblicher Teil der aufgetragenen Menge nicht mehr nachweisbar, also offenbar bereits ausgewaschen worden war. Es zeigte sich weiterhin, daß die unterschiedlichen Humusgehalte der Böden einen erheblichen Einfluß auf die Verteilung der Herbizide und insbesondere auf das Ausmaß der Auswaschung ausübten.

Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse erschienen uns indessen nicht genau genug. Von anderen Autoren ist mehrfach festgestellt worden, daß die phytotoxische Wirkung von Herbiziden in Abhängigkeit vom Humusgehalt des Bodens bzw. von seinem Lehm- oder Tongehalt unterschiedlich stark ausgeprägt ist (vgl. u.a. Upchurch und Mason 1962; Sheets et al. 1962). Dies wird darauf zurückgeführt, daß ein mehr oder weniger großer Teil des Wirkstoffs an organische Verbindungen des Bodens bzw. an Tonminerale adsorbiert und dadurch physiologisch inaktiviert wird. Durch den Biotest werden die adsorbierten Wirkstoffmengen in den entsprechenden Böden somit nicht erfaßt (Cogins und Crafts 1959, Adams 1966).

Tabelle 5. Auswaschung von Monolinuron aus verschiedenen Böden

Aufgegebene Wassermenge in ml	Niederschlagshöhe in mm	Humusarmer Sand		Schwach humoser Lehm		Stark humoser Sand	
		1	2	1	2	1	2
.	.						
500	40	92,3	0	94,6	0	> 100	0
600	48	> 100	0	> 100	0	.	.
700	56	23,8	6,2	97,6	0	.	.
800	64	8,2	22,8	89,1	0,4	.	.
900	72	6,8	40,8	75,3	1,4	.	.
1000	80	10,5	54,5	68,5	2,8	.	.
1100	88	42,3	57,5	50,3	5,1	.	.
1200	96	60,5	59,2	56,1	7,1	> 100	.
1300	104	67,5	60,6	45,1	9,8	99,4	0
1400	112	70,9	61,8	41,6	12,9	91,7	< 0,3
1500	120	77,7	62,7	49,7	15,3	97,6	0,3
1600	128	97,8	62,7	44,4	18,1	94,0	0,5
1700	136	92,0	<b>63,0</b>	43,8	20,9	78,2	1,4
1800	144	96,8	.	45,5	23,6	> 100	1,4
1900	152	> 100	.	50,8	25,9	88,3	1,9
2000	160	98,4	.	61,6	27,6	83,7	2,6
.	.						
2500	200	> 100	.	79,9	31,6	85,1	<b>5,4</b>
.	.						
3000	240	> 100	.	76,7	36,4	> 100	.

Spalte 1 = Frischgewicht der Versuchspflanzen in % der Kontrolle

Spalte 2 = Ausgewaschene Herbizidmenge in % der aufgegebenen Menge

## 2. Ermittlung der Auswaschbarkeit von Herbiziden aus verschiedenen Böden unter dem Einfluß verschieden hoher Niederschlagsmengen

### 2.1. Methodik

Das oben beschriebene Verfahren wurde wie folgt abgewandelt: Nach dem Einfüllen des Bodens in die Zylinder wurde er zunächst mit Wasser gesättigt. Nach Aufgabe des (in 100 ml Wasser) gelösten bzw. suspendierten Herbizids wurde die Säule mit jeweils 100 ml Wasser fortlaufend eluiert und die unten abfließenden Lösungsmengen getrennt aufgefangen. – Das Verfahren ist der Säulenchromatographie vergleichbar, wenn man den Boden als Adsorbens, das Wasser als Elutionsmittel ansieht. – Die ablaufenden Flüssigkeitsmengen wurden in (mit Sand gefüllte) Schalen aus Kunststoff übertragen. Als Testpflanze diente wiederum Hafer, und die in den einzelnen Fraktionen enthaltenen Herbizidmengen wurden wiederum dadurch ermittelt, daß die erhaltenen Frisch- und Trockengewichte mit denen in Beziehung gesetzt werden, die an Hand einer Vergleichsreihe mit bekannten Herbizidgehalten (in Sand) gewonnen wurden. Bei diesem Verfahren konnte angenommen werden, daß die aus der Bodensäule eluierten Wirkstoffmengen annähernd quantitativ erfaßt werden, da in dem als Substrat für den Biotest verwendeten Sand eine Adsorption nicht oder nur in einem zu vernachlässigenden Ausmaß stattfindet.

## 2.2. Ergebnisse

### 2.2.1. Herbizide mit hoher Wasserlöslichkeit

Der Verlauf der Auswaschung von NaTA, Dalapon und Amitrol aus drei Böden mit verschiedenen Humusgehalten ist der Tab. 4 zu entnehmen.

Die Beweglichkeit von NaTA war in allen drei Böden sehr hoch, die unterschiedlichen Humusgehalte beeinflussten die vertikale Wanderung des Wirkstoffs nur unwesentlich. Demgegenüber ergaben sich mit Dalapon und Amitrol erhebliche Unterschiede in der Auswaschbarkeit in Abhängigkeit von der Art des Bodens bzw. von seinem Humusgehalt.

### 2.2.2. Herbizide mit geringer Wasserlöslichkeit

#### 2.2.2.1. Monolinuron, Linuron, Pyrazon

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Tab. 5, 6 und 7 wiedergegeben. Es zeigt sich zunächst, daß die Auswaschung von Monolinuron aus humusarmem Sand entsprechend der größeren Wasserlöslichkeit schneller verläuft als die von Linuron. Bei Monolinuron wurde das Maximum der Auswaschung mit 1700 ml, bei Linuron mit 3000 ml erreicht. Aus dem Lehm Boden wurde das leichter lösliche Monolinuron allmählich ausgewaschen, Linuron dagegen vollständig zurückgehalten. Entspre-

**Tabelle 6.** Auswaschung von Linuron aus verschiedenen Böden

Aufgegebene Wassermenge in ml	Niederschlagshöhe in mm	Humusarmer Sand		Schwach humoser Lehm		Stark humoser Sand	
		1	2	1	2	1	2
.	.						
.	.						
500	40	> 100	0	> 100	0	> 100	0
600	48	> 100	0	.	.	.	.
700	56	75,6	2,4	.	.	.	.
800	64	15,2	7,1	.	.	.	.
900	72	14,7	11,9	.	.	.	.
1000	80	16,1	16,6	.	.	.	.
1100	88	18,3	21,3	.	.	.	.
1200	96	15,0	26,1	.	.	.	.
1300	104	13,0	31,8	.	.	.	.
1400	112	26,3	36,3	.	.	.	.
1500	120	52,9	39,6	.	.	.	.
1600	128	58,7	42,7	.	.	.	.
1700	136	53,2	46,0	.	.	.	.
1800	144	68,4	48,6	.	.	.	.
1900	152	69,0	51,2	.	.	.	.
2000	160	43,8	55,0	.	.	.	.
.	.						
.	.						
2500	200	69,6	67,5	.	.	.	.
.	.						
.	.						
3000	240	97,0	69,3	> 100	0	> 100	0

Spalte 1 = Frischgewicht der Testpflanzen in % der Kontrolle

Spalte 2 = Ausgewaschene Herbizidmenge in % der aufgegebenen Menge

chendes gilt für den humosen Sand, jedoch war hier die Sorption des Monolinurons wesentlich stärker ausgeprägt.

Der Vergleich des Verhaltens von Monolinuron und Linuron mit dem des Pyrazons (Tab. 7) zeigt, daß die Wasserlöslichkeit allein nicht als Maßstab für das Eindringvermögen eines Herbizids in den Boden dienen kann. Hinsichtlich seiner Wasserlöslichkeit steht Pyrazon (300 ppm) zwischen Monolinuron (580 ppm) und Linuron (75 ppm). Im Gegensatz dazu wurde Pyrazon aus dem humusarmen Sandboden schneller und in größerer Menge ausgewaschen als Monolinuron. Die Auswaschung aus Lehmboden setzte bei Pyrazon später ein als bei Monolinuron, die im Effluat nachweisbare Gesamtmenge war aber bei Pyrazon relativ höher. Allerdings war die maximale Auswaschung von Monolinuron mit 3000 ml Wasser offenbar noch nicht erreicht. Die Auswaschung von Pyrazon aus humosem Sandboden betrug < 1 % der aufgegebenen Menge und war praktisch zu vernachlässigen.

#### 2.2.2.2. Prometryn, Simazin

Auch bei diesen beiden Herbiziden (Tab. 8 und 9) ergab sich ein anderes Verhalten, als es auf Grund der Löslichkeitsverhältnisse zu erwarten war. Zwar verlief die Auswaschung von Prometryn aus dem humusarmen Sandboden schneller als die von Simazin, die im Effluat nachweisbaren Gesamtmengen waren jedoch mit 58 %

bei Simazin bzw. 67 % der auf die Säulen aufgetragenen Menge bei Prometryn wenig unterschiedlich.

Die Auswaschung aus dem Lehmboden verlief sogar den Löslichkeitsverhältnissen weitgehend entgegengesetzt, während die aus humosem Sandboden fast vollständig den Erwartungen entsprach, zumal das Maximum der Auswaschung bei Prometryn mit 4500 ml Wasser offenbar noch nicht ganz erreicht war.

### 3. Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Betrachtet man die Ergebnisse in ihrer Gesamtheit, so ergibt sich, daß die vertikale Wanderung von Herbiziden im Boden im wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt wird:

- Von der Wasserlöslichkeit des Wirkstoffs, d. h. die Einwaschung ist der Wasserlöslichkeit direkt proportional.
- Von der Adsorptionskraft des Bodens, d. h. die Einwaschung des Wirkstoffs ist der Adsorptionskraft umgekehrt proportional. Die Adsorptionskraft des Bodens ist in erster Linie von seinem Gehalt an organischen Substanzen (Humusgehalt) abhängig; daneben kann aber auch der Adsorption durch Tonminerale eine erhebliche Bedeutung zukommen, sofern solche in größerer Menge im Boden vorhanden sind.

Tabelle 7. Auswaschung von Pyrazon aus verschiedenen Böden

Aufgegebene Wassermenge in ml	Nieder-schlagshöhe in mm	Humusarmer Sand		Schwach humoser Lehm		Stark humoser Sand	
		1	2	1	2	1	2
.	.						
500	40	> 100	0	> 100	0	> 100	0
600	48	94,7	0	.	.	.	.
700	56	79,5	2,1	.	.	.	.
800	64	11,8	21,7	.	.	.	.
900	72	7,6	57,3	.	.	.	.
1000	80	28,3	65,8	> 100	0	.	.
1100	88	44,9	71,5	87,8	0,7	.	.
1200	96	41,6	78,3	75,9	2,1	.	.
1300	104	61,5	82,5	66,5	5,0	> 100	0
1400	112	55,7	86,4	67,3	8,2	82,0	0,7
1500	120	87,8	87,5	72,9	10,7	> 100	0,7
1600	128	86,4	<b>88,6</b>	69,5	13,9	> 100	0,7
1700	136	> 100	.	49,9	19,2	95,6	<b>0,9</b>
1800	144	.	.	56,8	23,5	> 100	.
1900	152	.	.	64,8	27,4	.	.
2000	160	.	.	74,8	30,2	.	.
.	.						
2500	200	.	.	68,2	44,1	.	.
.	.						
3000	240	> 100	.	94,7	<b>45,9</b>	> 100	.

Spalte 1 = Frischgewicht der Testpflanzen in % der Kontrolle

Spalte 2 = Ausgewaschene Herbizidmenge in % der aufgegebenen Menge

Vergleicht man das Verhalten der Herbizidwirkstoffe in den verschiedenen Böden jedoch allein unter dem Gesichtspunkt ihrer Wasserlöslichkeit, so zeigt es sich, daß dieser Faktor allein als Kriterium für das Eindringvermögen bzw. die Auswaschbarkeit eines Herbizids nicht ausreichend ist. Bei den Wirkstoffen mit hoher Wasserlöslichkeit (Dalapon, Natriumchloracetat, Amino-triazol) spielt dieser Faktor zwar die dominierende Rolle – vgl. auch Loustalot und Ferrer 1950, Ogle und Warren 1954, Holston und Loomis 1956, Wiese und Davis 1964 –, jedoch machte sich in unseren Versuchen der Einfluß des Humusgehaltes bereits deutlich bemerkbar. Eine Sorption an Tonmine-

ralien ist bei diesen Wirkstoffen dagegen ohne wesentlichen Einfluß (vgl. Tab. 4).

Bei den Wirkstoffen, die eine geringere Wasserlöslichkeit besitzen und daher den Boden in vertikaler Richtung langsamer durchwandern, überwiegt die Sorption durch die organischen Substanzen des Bodens bzw. durch die Tonminerale.

Höhere Verluste durch Auswaschung aus sandigen oder humusarmen Böden im Vergleich zu humusreichen Böden oder solchen mit höherem Ton- bzw. Schluffgehalt fanden u. a. auch Ogle und Warren 1954, Hill et al. 1955, Sheets 1958, Upchurch 1958,

**Tabelle 8.** Auswaschung von Prometryn aus verschiedenen Böden

Aufgegebene Wassermenge in ml	Nieder-schlagshöhe in mm	Humusarmer Sand		Schwach humoser Lehm		Stark humoser Sand	
		1	2	1	2	1	2
.	.						
.	.						
.	.						
500	40	> 100	0	> 100	0	> 100	0
600	48	> 100	0	.	.	.	.
700	56	99,5	0	.	.	.	.
800	64	54,6	6,6	.	.	.	.
900	72	14,5	24,7	.	.	.	.
1000	80	29,7	35,0	> 100	.	.	.
1100	88	40,7	43,5	93,0	.	.	.
1200	96	35,9	52,6	99,5	.	.	.
1300	104	52,2	59,5	100,0	.	.	.
1400	112	62,1	62,4	> 100	.	.	.
1500	120	64,3	64,8	98,3	.	.	.
1600	128	75,3	65,7	99,3	.	.	.
1700	136	75,6	66,6	100,0	.	> 100	0
1800	144	80,4	<b>67,2</b>	> 100	.	82,4	< 0,4
1900	152	> 100	.	> 100	.	91,0	0,5
2000	160	100,0	.	> 100	.	95,2	0,6
2100	168	97,3	.	> 100	0	91,9	0,7
2200	176	> 100	.	89,6	< 0,2	90,3	1,0
2300	184	.	.	78,4	1,5	88,3	1,4
2400	192	.	.	86,3	1,8	90,5	1,5
2500	200	.	.	82,2	2,4	92,1	1,7
.	.						
.	.						
3000	240	.	.	90,7	3,0	92,5	2,3
.	.						
.	.						
3500	280	.	.	86,8	4,4	96,9	2,7
.	.						
.	.						
4000	320	.	.	83,3	5,7	88,8	4,0
.	.						
.	.						
4500	360	> 100	.	84,1	7,0	96,0	4,3

Spalte 1 = Frischgewicht der Testpflanzen in % der Kontrolle

Spalte 2 = Ausgewaschene Herbizidmenge in % der aufgegebenen Menge

Upchurch und Pierce 1958, Upchurch und Mason 1962, Rauser und Switzer 1962, Burnside et al. 1963b, Dubey und Freeman 1965. Zu entsprechenden Befunden kamen Beran und Guth (1965) in Versuchen mit verschiedenen Insektiziden.

Den organischen Substanzen des Bodens wird allgemein ein größerer Einfluß auf die Rückhaltung der Herbizidwirkstoffe zugeschrieben als den Tonmineralien (Rauser und Switzer 1962, Sheets et al. 1962, Upchurch und Mason 1962, Burschel 1964, Lambert et al. 1965, Hilton und Yuen 1966). Dies bestätigte sich auch in den vorliegenden Untersuchungen.

Obwohl aus unseren Ergebnissen hervorgeht, daß unter bestimmten Umständen ein hoher Prozentsatz der auf den Boden gebrachten Herbizide bis in eine Tiefe von 20 cm und wahrscheinlich noch wesentlich tiefer in den Boden eingewaschen werden kann, dürfte die Gefahr einer Verunreinigung des Grundwassers auf diesem Wege unter normalen Verhältnissen als gering anzusehen sein. Die Untersuchungen wurden unter Bedingungen durchgeführt, wie sie in der Praxis kaum jemals gegeben sind:

Die Versuche wurden an künstlich hergestellten Bodensäulen vorgenommen, die zwar dicht gepackt waren, aber dennoch nicht restlos den Verhältnissen in

**Tabelle 9.** Auswaschung von Simazin aus verschiedenen Böden

Aufgegebene Wassermenge in ml	Niederschlagshöhe in mm	Humusarmer Sand		Schwach humoser Lehm		Stark humoser Sand	
		1	2	1	2	1	2
.	.						
.	.						
500	40	> 100	0	> 100	0	> 100	0
600	48	> 100	0	.	.	.	.
700	56	74,9	0,3	.	.	.	.
800	64	54,0	1,1	.	.	.	.
900	72	22,9	3,4	.	.	.	.
1000	80	25,3	5,5	.	.	.	.
1100	88	15,5	8,2	.	.	.	.
1200	96	16,9	10,8	.	.	.	.
1300	104	13,7	14,3	.	.	.	.
1400	112	14,3	17,6	.	.	.	.
1500	120	10,5	23,9	.	.	.	.
1600	128	15,7	26,6	.	.	.	.
1700	136	14,6	29,7	.	.	.	.
1800	144	23,1	31,9	.	.	.	.
1900	152	24,0	34,0	> 100	0	.	.
2000	160	27,5	36,0	65,4	< 0,5	> 100	0
2100	168	26,7	38,0	69,6	0,9	85,2	< 0,2
2200	176	22,2	40,2	75,3	1,3	89,6	< 0,3
2300	184	29,3	42,1	69,8	1,7	80,4	< 0,5
2400	192	27,3	44,0	69,8	2,2	95,4	0,6
2500	200	36,8	45,4	70,5	2,6	81,7	0,8
.	.						
.	.						
3000	240	43,6	51,1	59,0	6,3	95,4	< 1,0
.	.						
.	.						
3500	280	52,4	55,4	45,8	12,4	91,8	1,5
.	.						
.	.						
4000	320	65,6	57,9	46,7	18,1	> 100	.
.	.						
.	.						
4500	360	100	.	44,5	24,4	> 100	.

Spalte 1 = Frischgewicht der Testpflanzen in % der Kontrolle

Spalte 2 = Ausgewaschene Herbizidmenge in % der aufgegebenen Menge

natürlich gelagerten Böden entsprechen. Die von uns angewandten Wirkstoffmengen lagen durchweg an der oberen Grenze der für die praktische Anwendung empfohlenen Mengen. Die Tiefe des Eindringens von Herbizidwirkstoffen in den Boden ist aber geringer, wenn niedrigere Aufwandmengen ausgebracht werden (vgl. auch Sheets 1958, Upchurch und Pierce 1958, Donaldson und Foy 1965, Dubey und Freeman 1965, Erickson 1965, Shahied und Andrews 1966).

Die angewandten Wassermengen entsprachen Niederschlagshöhen bis zu 240 mm, in den Versuchen mit Prometryn und Simazin solchen bis zu 360 mm. Diese Regenmengen werden unter unseren Verhältnissen dem Boden erst im Laufe mehrerer Monate zugeführt. Bei Wassermengen, die einer Niederschlagshöhe von 40 mm entsprachen, war nur bei Natriumtrichloracetat, dem leichtestlöslichen der untersuchten Herbizide, eine Einwaschung in mehr als 20 cm Bodentiefe festzustellen.

Bei höheren Niederschlagsmengen (bis 80 mm) innerhalb kurzer Zeit nach der Ausbringung kann es allerdings zu einer Einwaschung leicht wasserlöslicher, in humusarmen Böden auch zu einer solchen weniger wasserlöslicher Wirkstoffe in größere Tiefen kommen. In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen von Burnside et al. (1963b) interessant, die unter Freilandbedingungen in drei verschiedenen Böden eine Einwaschung von Monuron bis zu 45 cm, von Simazin und Atrazin bis zu 60 cm Bodentiefe innerhalb von 4 bzw. 16 Monaten nach der Ausbringung feststellten. Untersuchungen von Erickson (1965) ergaben, daß Monuron in Abhängigkeit von der Aufwandmenge 1, 2 bzw. 3 Jahre nach der Ausbringung in Bodentiefen zwischen 15 und 80 cm nachweisbar war. Es läßt sich demnach nicht völlig ausschließen, daß es bei einem Zusammentreffen ungünstiger Umstände (hoher Grundwasserstand, vor allem im Frühjahr oder in niederschlagsreichen Jahren, hohe Niederschläge nach der Ausbringung) gelegentlich zu einer Verunreinigung des Grundwassers mit Herbizidwirkstoffen kommen kann.

Eine größere Gefahr besteht jedoch offenbar darin, daß es infolge der Einwaschung von Herbiziden in tiefere Bodenschichten, in denen der mikrobiologische Abbau weitgehend entfällt, zu einer Akkumulation von Herbizidwirkstoffen kommt. Die möglichen Auswirkungen einer solchen Anreicherung sind bisher nicht näher untersucht worden.

### Zusammenfassung

In Modellversuchen mit künstlich hergestellten Bodensäulen und verschieden hohen, simulierten Niederschlagsmengen wurde gefunden, daß die Tiefe der Einwaschung von Herbiziden – Natriumtrichloracetat, Dalapon, Aminotriazol, Monolinuron, Linuron, Pyrazon, Prometryn, Simazin – in den Boden mit der Wasserlöslichkeit der Wirkstoffe zu- und mit der Adsorptionskraft des jeweiligen Bodens, die ihrerseits von seinem Gehalt an organischen Substanzen bzw. an Tonmineralien bestimmt wird, abnimmt.

Die Gefahr einer Verunreinigung des Grundwassers infolge Auswaschung von Herbizidwirkstoffen aus dem Boden dürfte unter praxisüblichen Verhältnissen und bei normalen Bodenbedingungen kaum gegeben sein.

### Summary

Studies on vertical move of herbicides in soil with special consideration of contamination of underground water

With artificial soil columns and various amounts of simulated water precipitation the depth that herbicides – sodiumtrichloroacetate, dalapon, aminotriazol, monolinuron, linuron, pyrazon, prometryne, simazine – penetrated into the soil increased with water solubility of the substances and de-

creased with the capacity of adsorption which on its part depends on the contents of organic substances and the contents of clay minerals in the soil.

Under usual conditions of herbicide application and in common soils there is no danger of contaminating the underground water by wash out of herbicides.

### Literatur

- Adams, R. S., jr.: Soxhlet extraction of simazine from soils. *Proc. Soil Sci. Soc. America* **30**. 1966, 689–693.
- Beran, F., und Guth, J. A.: Das Verhalten organischer insektizider Stoffe in verschiedenen Böden mit besonderer Berücksichtigung der Möglichkeit einer Grundwasserkontamination. *Pflanzenschutzberichte (Wien)* **33**. 1965, 65–117.
- Burnside, O. C., Wicks, G. A., and Fenster, C. R.: The effect of rainfall and soil type on the disappearance of 2,3,6-TBA. *Weeds* **11**. 1963a, 45–47.
- Burnside, O. C., Fenster, C. R., and Wicks, G. A.: Dissipation and leaching of monuron, simazine, and atrazine in Nebraska soils. *Weeds* **11**. 1963b, 209–212.
- Burschel, P.: Herbizide und Boden. *Zeitschr. Pflanzenkrankh. Sonderh.* **2**. 1964, 116–123.
- Coggins, C. W., jr., and Crafts, A. S.: Electrophoretic behaviour and the influence of clay colloids on the phytotoxicity of substituted ureas. *Weeds* **7**. 1959, 349–358.
- Donaldson, T. W., and Foy, C. L.: The phytotoxicity and persistence in soils of benzoic acid herbicides. *Weeds* **13**. 1965, 195–201.
- Dubey, H. D., and Freeman, J. F.: Leaching of linuron and diphenamid in soils. *Weeds* **13**. 1965, 360–362.
- Erickson, L. C.: The movement and phytotoxicity of monuron in Palouse silt loam soil. *Weeds* **13**. 1965, 100–102.
- Hill, G. D., McGahan, J. W., Baker, H. M., Finerty, D. W., and Bingeman, C. W.: The fate of substituted urea herbicides in agricultural soils. *Agron. J.* **47**. 1955, 93–103.
- Hilton, H. W., and Yuen, Q. H.: Adsorption and leaching of herbicides in Hawaiian sugarcane soils. *J. agric. Food Chem.* **14**. 1966, 86–90.
- Holston, J. T., jun., and Loomis, W. E.: Leaching and decomposition of 2,2-dichloropropionic acid in several Iowa soils. *Weeds* **4**. 1956, 205–217.
- Lambert, S. M., Porter, P. E., and Schieferstein, R. H.: Movement and sorption of chemicals applied to the soil. *Weeds* **13**. 1965, 185–190.
- Loustalot, A. J., and Ferrer, R.: Studies on the persistence and movement of sodium trichloroacetate in the soil. *Agron. J.* **42**. 1950, 323–327.
- Ogle, R. E., and Warren, G. F.: Fate and activity of herbicides in soils. *Weeds* **3**. 1954, 257–273.
- Rausser, W. E., and Switzer, C. M.: Factors contributing to the loss of amiben phytotoxicity in soils. *Weeds* **10**. 1962, 62–64.
- Shahied, S., and Andrews, H.: Leaching of trifluralin, linuron, prometryne and cotoran in soil columns. *Proc. South. Weed Conf.* **19**. 1966, 522–534.
- Sheets, T. J.: The comparative toxicities of four phenylurea herbicides in several soil types. *Weeds* **6**. 1958, 413–424.
- Sheets, T. J., Crafts, A. S., and Drever, H. R.: Influence of soil properties of the phytotoxicities of the s-triazine herbicides. *J. agric. Food Chem.* **10**. 1962, 458–462.
- Upchurch, R. P.: The influence of soil factors on the phytotoxicity and plant selectivity of diuron. *Weeds* **6**. 1958, 161–171.
- Upchurch, R. P., and Mason, D. D.: The influence of soil organic matter on the phytotoxicity of herbicides. *Weeds* **10**. 1962, 9–14.
- Upchurch, R. P., and Pierce, W. C.: The leaching of monuron from Lakeland sand soil. II. The effect of soil temperature, organic matter, soil moisture, and amount of herbicide. *Weeds* **6**. 1958, 24–33.
- Wiese, A. F., and Davis, R. G.: Herbicide movement in soil with various amounts of water. *Weeds* **12**. 1964, 101–103.
- Woodford, E. K., and Evans, S. A. [Edit.]: *Weed control handbook*. 4. ed. Oxford 1965.

Eingegangen am 30. März 1968.