

Aus der Sektion Chemie der Karl-Marx-Universität Leipzig

Zur Ablagerung der industriellen Abprodukte

10. Mitteilung: Charakteristik verschiedener Gießereialtsande durch Pflanzversuche

Von Joachim Tauchnitz, Rolf Schnabel, Jürgen Rittig, Walter Pihan, Richard Mahrwald und Horst Hennig

Mit 15 Abbildungen und 18 Tabellen

(Eingegangen am 20. 7. 1979)

1. Einleitung

Das Beispiel der Deponie Schädegrube (Tauchnitz, Schnabel u. a. 1978; Tauchnitz u. a. 1980; Tauchnitz u. a. 1979; Tauchnitz, Schnabel u. a. 1980) zeigt, daß „reine Schadstoffdeponien“ Langzeitschadstellen in der Natur sind. Auf dieser Deponie wurde der Gießereialtsand GS 1 (Tab. 1, 2, 3, 4, 7) abgelagert.

Gefäßversuche mit Substratmischungen verschiedener Gießereialtsande sollen dazu beitragen, die Schadwirkung der Altsande auf Pflanzen zu charakterisieren und davon ausgehend Mischungsgrößen zu finden, bei denen eine optimale Kultivierung von Ablagerungsstandorten solcher Abprodukte möglich ist.

2. Material

Als Testpflanzen fanden für die Mischungen *Avena sativa* ssp. *sativa* L. und für die Übersichtungsversuche *Avena sativa* ssp. *sativa* L., *Beta vulgaris* ssp. *rapacea* (Koch) Döll und die Gartenunkrautarten *Capsella bursa-pastoris* (L.) Med., *Stellaria media* (L.) Cyr., *Urtica urens* L. und *Senecio vulgaris* L. Verwendung. Während für *Avena sativa* L. jeweils 50 und für *Beta vulgaris* (Koch) Döll je 30 Samen ausgesät wurden, erfolgte die Aussaat der Unkrautarten nicht quantitativ.

In den Tabellen 1 bis 7 werden die verwendeten Bodenmaterialien aufgeführt und z. T. charakterisiert.

Nicht tabellarisch aufgeführt wurden die Ergebnisse der massenspektrometrischen Untersuchungen. Diese sind nur als Hinweise für das Vorhandensein von Stoffgruppen auf der Quarzmatrix zu verwenden. Die Gießereialtsande, bei denen „Ölbinder“ verwendet wurden, zeigen in den Massenspektren Peaks bei MZ: 55, 56, 57, 69, 71, 95, 97. Genannte Massenzahlen sind charakteristisch für Alkane; untergeordnet treten die MZ: 51, 77, 79, 91 (Hinweis auf Aromaten) auf. Der Sand GS 1 wurde von Tauchnitz (1980 a) charakterisiert; durch massenspektrometrische Untersuchungen werden beim GS 7 ähnliche Ergebnisse erhalten wie bei GS 1. Formmaskensand wurde von Richter (1976) untersucht. Die Massenspektren von GS 4 und GS 5 geben Hinweise auf Alkane und in geringerem Umfang auf Aromaten. Folgende MZ treten auf: 41, 42, 43, 51, 55, 57, 69, 71, 91 (MZ: Massenzahl).

Einen summarischen Ausdruck für die Belastung der Altsande mit Kohlenwasserstoffen ist der Chloroformextrakt (Tab. 4). Diese Belastung ist bei den untersuchten Altsanden als sehr hoch zu bezeichnen.

Tabelle 1. Arten der verwendeten Gießereialtsande (GS)

GS	Herstellung	Gußart
1.	siehe Tauchnitz u. a. (1980)	SG
2.	ca. 96 % Quarksand, ca. 4 % Wasserglas, evtl. auch Zuckerzugabe (Bezeichnung: CO ₂ -Wasserglassand)	AL
3.	ca. 97 % Quarksand, ca. 2,5 % Corephenit HBZ, Rest: Härtemittel (Bezeichnung: Hot-box-Masse)	GG
4.	Quarksand: ca. 97 %, Plastareshin 222E (Phenolharz ca. 2,5 %, Hexamethylentetramin ca. 0,4 %, Ca-Stearat ca. 0,1 %) (Bezeichnung: Formmaskensand)	GG
5.	Formmaskensand	Bronze
6.	ca. 96–97 % Quarksand, ca. 3 % Emulsionsbinder, ca. 0,6 % Dextrin (Bezeichnung: Ölsand)	SG
6'	ca. 96–97 % Quarksand, ca. 3 % Emulsionsbinder, ca. 0,6 % Dextrin (Bezeichnung: Ölsand)	GG
7.	Siehe GS 1	Bronze
8.	ca. 91 % Altsand, ca. 5,5 % Quarksand, ca. 2,5 % Bentonit, ca. 1 % Kohlenstaub (Bezeichnung: Einheitssand)	SG
9.	Ölsand	Bronze

GS: Gießereialtsand GG: Grauguß SG: Stahlguß AL: Leichtmetall

Weiterhin fanden bei der Versuchsdurchführung EDTA und die Ionenaustauscher Wofatit KPS-technisch (sowohl in der H⁺- als auch in der K⁺-Form) und Wofatit SPK p. a. (OH⁻-Form) des VEB Farbenfabrik Wolfen Anwendung. Beide Austauscher haben Polystyrol als Basis. Die aktiven Gruppen sind – SO₃H bei KPS und [– N (CH₃)₂ C₂H₄ OH] OH bei SBK.

Als Düngemittel für die Versuche zur Charakteristik der verschiedenen Gießereialtsande wurde Wopil-Nährsalz des VEB Chemiekombinat Bitterfeld verwendet. Es enthält 15 % N (1/2 NO₃-N, 1/2 NH₃-N), 15 % Phosphat (100 % wasserlöslich), 24 % K₂O, 0,4 % CaO, 2,4 % MgO und als Spurenelemente Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo, Co.

3. Methodik

Die den Mischungsverhältnissen M_0 zugeordneten Werte (Keimung und Sproßwachstum) wurden aus Gefäßversuchen ermittelt. Dazu wurden die Gießereialtsande in den jeweils angegebenen Mischungsverhältnissen M_0 (wasserfreies Material) mit verschiedenen Substraten vermischt, so daß homogene Mischungen entstanden. Diese wurden in Mitscherlich-Gefäße gefüllt und nach der Aussaat bei 20 ± 3 °C und etwa gleichbleibendem Wassergehalt (etwa 90 % MWK) im Gewächshaus stehen gelassen.

Bei Übersichtungen der Sande mit Kompost wurde analog verfahren. Der Gießereialtsand wurde in ein Mitscherlich-Gefäß gegeben, seine Oberfläche geglättet und anschließend eine gleichmäßige Schicht Kompost aufgetragen (Schichtstärke: etwa 5 cm). Alle Versuche wurden 3fach angesetzt und die erhaltenen Werte arithmetisch gemittelt. Als Kontrolle bzw. Standard diente ein Versuch mit $M_0 = 0$. In diesem Fall gilt $s = 1$.

Die Ermittlung der Relativwerte und die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Kurven erfolgten nach Tauchnitz und Schnabel (in Vorbereitung). Diese sind infolge des gleichen verwendeten Standards direkt miteinander vergleichbar.

Tabelle 2. Agrochemische Parameter der verwendeten Bodenmaterialien

Sand	T	H	pH(KCl)	Ca-Bedarf	P	K	Mg	Sg	MWK	C _t	N _t
	1	2		3	4	4	4	5	5	5	5
GS 1	0,3	0,3	4,0	20	0,2	2	3,9	0,14	26	6,38	0,041
GS 2	5,3	0,1	9,8	0,0	0,2	5	3,3	—	23	—	—
GS 3	1,2	0,1	8,6	0,0	0,2	2	3,4	—	33	—	—
GS 4	1,2	0,1	7,7	0,0	0,2	2	3,6	—	37	—	—
GS 5	4,3	0,1	7,9	0,0	6,5	18	5,7	—	37	—	—
GS 6	2,2	2,0	7,5	0,0	1,3	33	4,5	—	25	—	—
GS 7	3,7	0,1	7,8	0,0	6,3	18	5,5	—	38	—	—
GS 8	3,4	0,1	9,7	0,0	1,1	9	3,5	—	23	—	—
Bauschutt	4,3	0,1	7,2	0,0	1,2	36	14,4	0,55	26	—	0,020
Kompost	27,2	0,6	6,9	—	77,5	195,0	33,5	0,22	65	10,32	0,438
Brikettabrieb	—	—	5,66	—	—	—	—	—	—	—	—
Koksstaub	—	—	7,86	—	—	—	—	—	—	—	—
Ton	—	—	5,86	—	—	—	—	—	—	—	—
Braunkohlenfilterasche	—	—	7,2	—	—	—	—	—	—	—	—
Auelehm	—	—	5,71	—	—	—	—	—	—	—	—

1: $\frac{\text{mval Ba}^{++}}{100 \text{ g Boden}}$ 2: $\frac{\text{mval}}{100 \text{ g Boden}}$ 3: $\frac{\text{dt}}{\text{ha}}$ 4: $\frac{\text{mg}}{100 \text{ g Boden}}$

5: ‰; —: nichtbestimmt

Sg: Salzgehalt;

MWK: maximale Wasserkapazität

Tabelle 3. Wäßrige Auszüge des Gießereialsandes

Sand	GP	wks (dest.)	wks (undest.)	KMnO ₄ - Verbrauch	GH	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	κ
	1	1	1	1	2		1	1	3
1	1092-9100	26-70	—	2140-4040	1,8-4,0	3,7-4,1	1830-2030	—	0,9 1,33
2	1,4	1,8	24,8	13900	13,6	6,4	540	248	1,31
4	0,2	n. n.	n. n.	7600	3,4	5,5	490	71	0,46
5	—	4,0	5,4	—	—	—	—	—	—
6	27,7	n. n.	15,2	5050	8,5	5,5	540	248	1,28
6'	3,1	3,9	6,3	11100	9,5	6,3	520	248	1,37
7	9,18	0,6	2,2	1250	12,3	4,5	591	177	1,48
8	n. n.	n. n.	n. n.	7600	2,8	5,2	567	248	1,62
9	23,2	8,1	7,6	3160	14,4	4,8	223	625	1,60

1: mg/kg Boden 2: °dH 3: mS · cm⁻¹

GH: Gesamthärte; GP: Gesamphenole; wks: wasserdampfllüchtige, kupplungsfähige Substanzen; κ: Leitfähigkeit; n. n.: nicht nachweisbar

Tabelle 4. Ausgewählte Inhaltsstoffe (direkt von den Altsanden extrahiert)

Sand	GP	wks	CHCl ₃ -lösliche Bestandteile
	1	1	2
1	125—951	3,8—56,9	—
2	1,2	n. n.	—
4	0,2	n. n.	0,392
5	0,98	10,8	1,574
6	0,6	n. n.	0,390
6'	n. n.	7,2	3,658
7	2,54	3,3	0,458
8	n. n.	n. n.	0,278
9	0,39	20,1	0,410
	1: mg/kg		2: g/kg

Tabelle 5. Ausgewählte Inhaltsstoffe der verwendeten Braunkohlenelektrofilterasche, des Tonmehles und des Wasserglasschlammes

		Tonmehl	Asche	Wasserglasschlamm (Aufschlämmung: Schlamm : Wasser = 1 : 4)
Glühverlust	‰	12,79	0,00	—
SiO ₂	‰	53,69	13,20	9,6
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	‰	27,2	—	—
Al ₂ O ₃	‰	—	8,15	—
Fe ₂ O ₃	‰	3,6	11,18	—
CaO	‰	0,7	31,12	—
MgO	‰	0,47	5,33	—
Na ₂ O	‰	0,17	—	24,1
K ₂ O	‰	1,7	—	—
Enslinwert		103	—	—
Plastizität nach Pfefferkorn		33,3	—	—
pH (H ₂ O)		—	9,8	12,5
freier Kalk	‰	—	6,4	—
hydrolysierbarer Kalk	‰	—	16,5	—
Inertstoffgehalt	‰	—	24,57	—
S [—]	‰	—	0,9	—
S (total)	‰	—	1,3	—
Abdampfrückstand	g/l	—	—	93,9
Schwebstoffe	g/l	—	—	48,9

Tabelle 6. Kornverteilung des verwendeten Tonmehles

Korngröße [mm]	Menge [‰]
> 3	—
2—3	0,6
1—2	2,36
0,5—1	27,04
0,06—0,5	35,90
< 0,06	34,00

Tabelle 7. Schwermetallionengehalte ausgewählter Altsande [%]

	GS 7	GS 5	GS 1
Ti	0,62	0,40	—
V	0,05	0,06	—
Cr	n. n.	n. n.	n. n.
Mn	n. n.	0,02	n. n.
Fe	3,32	4,00	2,91
Ni	n. n.	n. n.	—
Cu	n. n.	n. n.	—
Zn	0,005	0,007	n. n.
Pb	0,014	0,044	n. n.

Als allgemeine Gleichung gilt für die Kurven folgender Ausdruck:

$$s; g = a \cdot e^{-b (M_0 - c)^d}$$

s; g: rel. Wuchshöhe, Keimung,

a, b, c, d: Konstanten,

M₀: Mischungsverhältnis (wasserfreie Substrate).

Kontrollversuch und Standard sind jeweils ein Ansatz mit reinem Kompost, dessen agrochemische Kennziffern der Tab. 2 zu entnehmen sind.

4. Schadwirkung von Gießereialtsanden auf Pflanzen

4.1. Überblick

Es ist ein Ziel der gemischten Schadstoffdeponie (Tauchnitz u. a. 1979), die Abschlußschicht des Deponiekörpers, das sind die oberen 2–3 m (Gehlker 1976 a, b), so zu gestalten, daß möglichst kein zusätzlicher Aufwand für eine Kultivierung notwendig ist. Aus diesem Grund wurden o. g. reine Gießereialtsande auf ihre phytotoxische Wirkung untersucht.

Abb. 1 und Tab. 8 zeigen, daß Gießereialtsande das Wachstum von *Avena sativa ssp. sativa* L. z. T. erheblich beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigung ist aber auch auf Nährstoffmangel zurückzuführen. Wird das berücksichtigt, so bleiben als ausgesprochene Schadstoffe die Sande GS 1, GS 2 und mit wesentlich geringerer Schadwirkung GS 8 übrig.

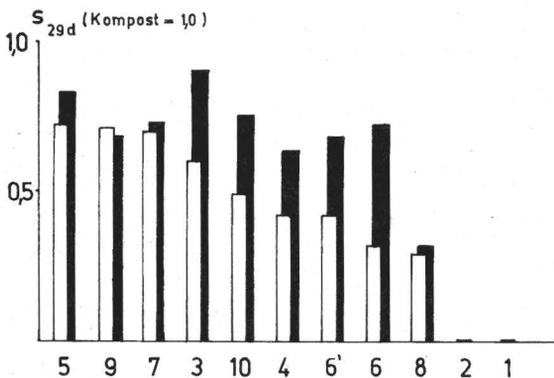


Abb. 1. Beeinträchtigung der Wuchshöhe s von *Avena sativa ssp. sativa* L. durch verschiedene Gießereialtsande ohne und mit Zugabe von Wopildünger (Bezeichnung: siehe Tab. 1)

Tabelle 8. Keimung g (%) und Wuchshöhe s (mm) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. auf verschiedenen Gießereialsanden mit und ohne Düngung

Boden	g 29 d		s 29 d	
	ohne Düngung	mit Düngung	ohne Düngung	mit Düngung
Kompost	100	100	223 \pm 14	—
GS 1	0	0	0	0
GS 2	0	0	0	0
GS 3	280	200	135 \pm 19	201 \pm 29
GS 4	150	180	94 \pm 5	140 \pm 13
GS 5	120	80	159 \pm 16	184 \pm 10
GS 6	160	190	93 \pm 6	152 \pm 31
GS 6	230	240	71 \pm 11	160 \pm 15
GS 7	110	90	156 \pm 11	162 \pm 14
GS 8	110	60	66 \pm 5	71 \pm 19
GS 9	100	150	158 \pm 15	151 \pm 8
GS 10	240	120	109 \pm 10	167 \pm 7

GS 10: unbenutzter, nicht verunreinigter Rohsand

Außer bei den Sanden GS 1 und GS 2 kommt es zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung der Keimung (s. Tab. 8).

Alle anderen Gießereialsande sind zwar nicht für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung geeignet, wie Abb. 1 zeigt, lassen sie sich aber mit herkömmlichen bodenverbessernden Mitteln (z. B. Nährstoffzufuhr) unmittelbar begrünen.

Abb. 2 zeigt das Ergebnis der Übersichtung verschiedener Gießereialsande mit Kompost und der anschließenden Aussaat von *Beta vulgaris* ssp. *rapacea* (Koch) Döll. Die Wurzeln dringen nicht durch die Grenzschicht in den Gießereialsand vor. Insbesondere die Wurzeln G (GS 2) und I (GS 1) zeigen das merkbare Zurückweichen vor den „Schadkörpern“ GS 1 und GS 2.

4.2. Schadwirkung der Gießereialsande GS 1 und GS 2

Mit den beiden extrem schädigend wirkenden Gießereialsanden GS 1 und GS 2 wurden Übersichtungen mit Kompost angesetzt. Damit sollte nachgewiesen werden, ob die Wurzeln von verschiedenen Pflanzen in der Lage sind, bei Bereitstellung eines bestimmten Wurzelraumes in den Schadstoff einzudringen und so durch biologische Stoffproduktion sorptionsfähige Substanzen in den „Schadstoff“ Sand einzulagern. Derartige Substanzen verringern die toxische Wirkung des Schadstoffes und verschieben so bei zunehmender Eindringtiefe den Horizont der Schadwirkung in tiefere Schichten. Es wurde festgestellt, daß alle verwendeten Pflanzen (*Avena sativa* ssp. *sativa* L., *Capsella bursapastoris* (L.) Med., *Stellaria media* (L.) Cyr., *Urtica urens* L. und *Senecio vulgaris* (L.) den angebotenen Wurzelraum (Kompost) voll nutzen, die Wurzeln aber unmittelbar auf (beim Sand GS 1) bzw. 5–10 mm vor (beim Sand GS 2) der Grenzfläche absterben. Ein Eindringen wurde in keinem Fall beobachtet. Das stimmt mit den Beobachtungen auf der Deponie Schädigrube (Tauchnitz, Schnabel u. a. 1979) überein.

5. Möglichkeiten der Gestaltung einer Abschlußschicht

Am Beispiel der Gießereialsande GS 1 und GS 2 wurde auf Grund ihrer extremen Schädwirkungen untersucht, wie die Abschlußschichten von gemischten Schadstoffdeponien dieser Gießereialsande beschaffen sein müssen. Für die Kultivierung wird dabei von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

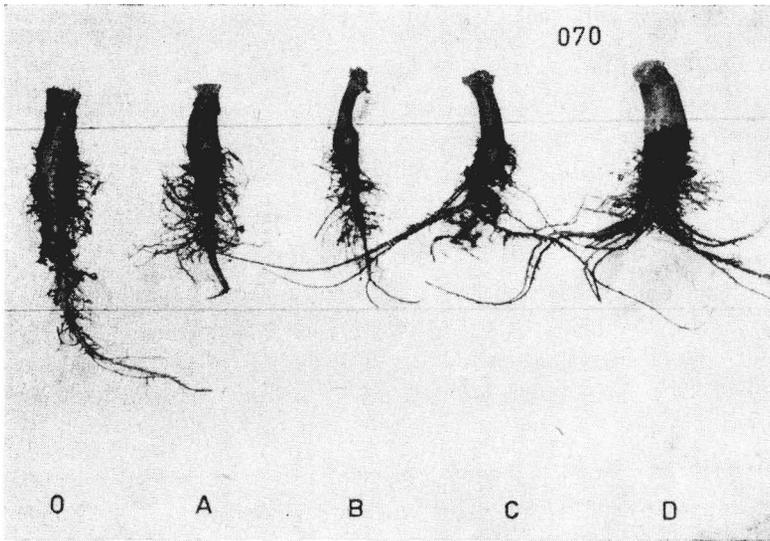
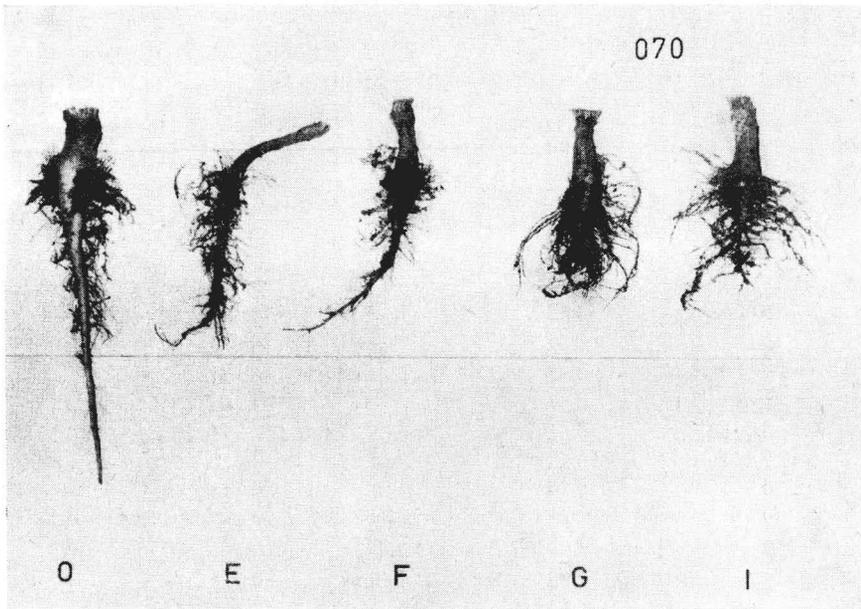


Abb. 2. Wachstumsversuch mit *Beta vulgaris* ssp. *rapacea* (Koch) Döll mit den überschichteten Gießereialsanden. Kompostschicht: 5 cm. 0: Kompostversuch; A: GS 3; B: GS 4; C: GS 8; D: GS 5; E: GS 7; F: GS 6; G: GS 2; I: GS 1



– Bestimmende Größe für die Ermittlung der Schädwirkung ist die Wuchshöhe der oberirdischen Pflanzenteile (S). Diese darf im Vergleich zum Kontrollversuch mit reinem Kompost 90 % im Durchschnitt nicht unterschreiten (D_{10}) bzw. sollte an den bei der Art der Vermischungstechnologie auf der Deponie zu erwartenden Inhomogenitäten des Substrates $\geq 50\%$ (D_{50}) sein.

- Der Verringerung der Keimfähigkeit (K_{90} , K_{50}) kann durch eine Erhöhung der Saatgutmenge leicht begegnet werden. Diese sollte sich jedoch in ökonomisch vertretbaren Grenzen (max. 10 %) halten.
- Es ist eine Mischung aus Abprodukten mit einem möglichst geringen Kulturbodenanteil anzustreben.
- Die ermittelten Angaben dienen einer landeskulturell effektiven Begrünung. Landwirtschaftlich produktive Nutzungen müssen unter dem Gesichtspunkt der Rückstandsproblematik in der Pflanze gesondert untersucht werden.

5.1. Mischungen des Gießereialsandes GS 1 mit anderen Abprodukten

Ein Verfahren zur Gestaltung der Abschlußschicht einer gemischten Schadstoffdeponie beruht auf der Verwendung von kulturfreundlicheren (schadstofffreien bzw. -armen) Abprodukten bei der Verkipfung. Diese Methode ist aus zwei Gründen vorteilhaft:

- Abprodukte fallen technologisch bedingt an und können so deponiert werden, daß keinerlei zusätzliche Aufwendungen notwendig sind.
- Kulturbodensubstrate werden in anderen Bereichen der Volkswirtschaft dringend benötigt.

Aus diesen Gründen wurden verschiedene Abprodukte bzw. deren Mischungen mit dem Gießereialsand GS 1 untersucht. Die Eigenschaften ausgewählter Mischungen zeigt Tab. 9. Die Ergebnisse der Gefäßversuche sind in Tab. 10 und 11 und den Abb. 3 bis 7 entnehmbar.

Tabelle 9. pH-Werte der Gießereialsand-Substrat-Mischungen

Gießereialsand (Substrat)	M_0	pH(KCl)	Gießereialsand (Substrat)	M_0	pH(KCl)
GS 1 + Ton	0	5,86	GS 1 + Bauschutt	0	7,20
	1,786	4,06		0,875	7,00
	3,1	—		1,083	7,68
	6,667	3,98		2,469	7,29
	7,667	3,59		4,143	6,88
	13,333	4,72		7,692	6,90
	49,000	3,69		10,4	—
	∞	3,95		26	—
GS 1 + Brikettabrieb	0	5,66	GS 1 + Löß	0	—
	1,889	5,57		1,083	6,78
	3,091	5,61		2,857	6,38
	4,444	5,19		2,917	—
	6,383	5,16		4,625	—
	10,5	—		20,4	4,79
	46	4,62	GS 1 + Auelehm	0	5,71
GS 1 + Koksstaub	0	7,86		0,977	4,78
	3,455	4,98		2,8	4,18
	5,429	—		4,1	3,88
	10,375	4,53		18,333	—
18,000	4,61	GS 1 und GS 2	1,146	7,14	
			2,379	5,71	
			5,429	4,95	
			8,2	4,75	

Tabelle 10. Einfluß des Gießereialsandes GS 1 auf die Keimung g ($\%$) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. bei Mischungen mit anderen Abprodukten ($g_{\text{Kompost}} = 100$)

M_0	Bauschutt (18 bzw. 22 d)	Wasser- glas- schlamm (23 d)	Braun- kohle (23 d)	GS 2 (18 d)	Koks- staub (18 d)	Brikett- abrieb (18 d)	BFA (29 d)
0	105/116	0	—	—	100	84	—
0,88	100	—	—	—	—	—	—
1,03	—	—	—	—	—	—	74
1,08	84	—	—	—	—	—	—
1,15	—	—	—	10	—	—	—
1,89	—	—	—	—	—	58	—
2,08	—	0	—	—	—	—	—
2,38	—	—	—	37	—	—	—
2,47	79	—	—	—	—	—	—
3,46	—	—	—	—	63	—	—
3,69	—	0	—	—	—	—	—
4,14	47	—	—	—	—	—	—
4,21	36	—	—	—	—	—	—
4,30	—	—	58	—	—	—	—
4,44	—	—	—	—	—	74	—
4,95	—	—	67	—	—	—	—
5,43	—	—	—	79	32	—	—
7,36	—	—	50	—	—	—	—
7,69	37	—	—	—	—	—	—
7,80	41	—	—	—	—	—	—
8,20	—	—	—	10	—	—	—
9,56	55	—	—	—	—	—	—
9,62	—	0	—	—	—	—	—
9,67	—	0	—	—	—	—	—
10,38	—	—	—	—	32	—	—
10,50	—	—	—	—	—	68	—
11,50	—	—	—	—	—	—	84
14,61	50	—	—	—	—	—	—
18,00	—	—	—	—	21	—	—
20,28	—	—	46	—	—	—	—
22,50	—	—	—	—	—	—	79
22,55	45	—	—	—	—	—	—
24,50	—	—	—	—	—	—	47
29,33	—	8	—	—	—	—	—
46,00	—	—	—	—	—	47	—
55,00	—	—	—	—	—	—	26
132,42	18	—	—	—	—	—	—
∞	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 11. Einfluß des Giefereialsandes GS 1 auf das Wachstum s (mm) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. bei Mischungen mit anderen Abprodukten

M_0	Bauschutt		Wasser- glas- schlamm (23 d)	Braun- kohle (23 d)	GS 2 (18 d)	Koks- staub (18 d)	Brikett- abrieb (18 d)	BFA (29 d)
	(18 d)	(22 d)						
0	110±20	233±30	0	—	—	127±12	108±9	—
0,62	—	211±42	—	—	—	—	—	—
0,88	136±24	—	—	—	—	—	—	—
1,03	—	—	—	—	—	—	—	53±16
1,08	127±15	—	—	—	—	—	—	—
1,15	—	—	—	—	27±8	—	—	—
1,63	—	189±47	—	—	—	—	—	—
1,89	—	—	—	—	—	—	167±26	—
2,08	—	—	0	—	—	—	—	—
2,38	—	—	—	—	18±11	—	—	—
2,47	73±15	—	—	—	—	—	—	—
3,46	—	—	—	—	—	66±8	—	—
3,69	—	—	0	—	—	—	—	—
4,14	84±22	—	—	—	—	—	—	—
4,21	—	177±45	—	—	—	—	—	—
4,30	—	—	—	158±35	—	—	—	—
4,44	—	—	—	—	—	—	97±33	—
4,95	—	—	—	271±14	—	—	—	—
5,43	—	—	—	—	27±10	51±10	—	—
6,38	—	—	—	—	—	—	84±15	—
7,36	—	—	—	181±44	—	—	—	—
7,80	—	188±47	—	—	—	—	—	—
8,20	—	—	—	—	26±4	—	—	—
9,62	—	—	0	—	—	—	—	—
9,67	—	—	0	—	—	—	—	—
10,38	—	—	—	—	—	20±3	—	—
10,50	—	—	—	—	—	—	78±17	—
11,50	—	—	—	—	—	—	—	80±18
14,61	—	63±10	—	—	—	—	—	—
18,00	—	—	—	—	—	15±8	—	—
20,28	—	—	—	48±21	—	—	—	—
22,50	—	—	—	—	—	—	—	77±36
24,50	—	—	—	—	—	—	—	88±18
29,33	—	—	20±16	—	—	—	—	—
46,00	—	—	—	—	—	—	18±3	—
55,00	—	—	—	—	—	—	—	56±17
132,42	—	49±21	—	—	—	—	—	—
∞	0	0	0	0	0	0	0	0
Kontroll- versuch (Kompost)	179±28	321±49	304±18	304±18	179±28	179±28	179±28	223±14

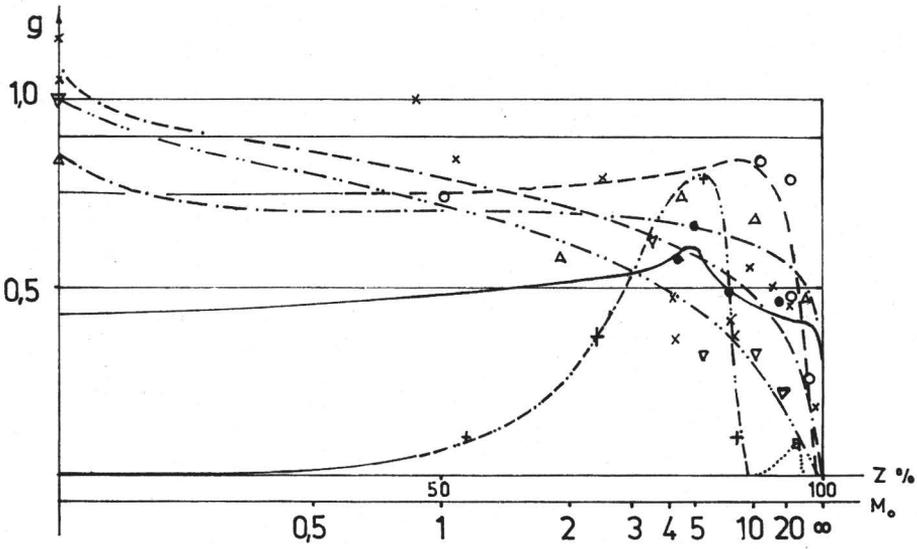


Abb. 3. Keimung g von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis M_0 des GS 1 mit anderen Abprodukten. ○ ---: Braunkohlenfilterasche; △ - - - - : Brikettabrieb; ▽ - - - - : Koksstaub; × - - - - : Bauschutt; + - - - - : GS 2; ● ———: Braunkohle; □ ·····: Wasserglasschlamm

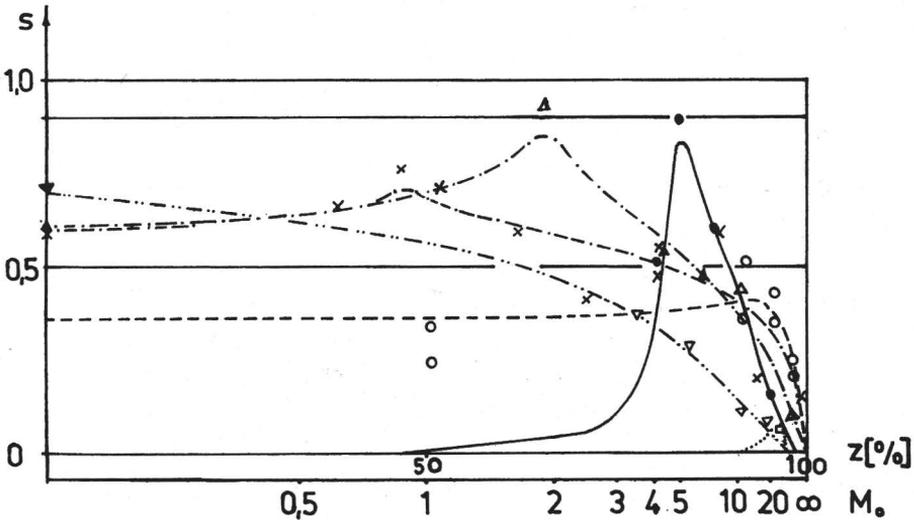


Abb. 4. Relative Wuchshöhe von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis M_0 des GS 1 mit anderen Abprodukten (Bezeichnung: siehe Legende zur Abb. 3)

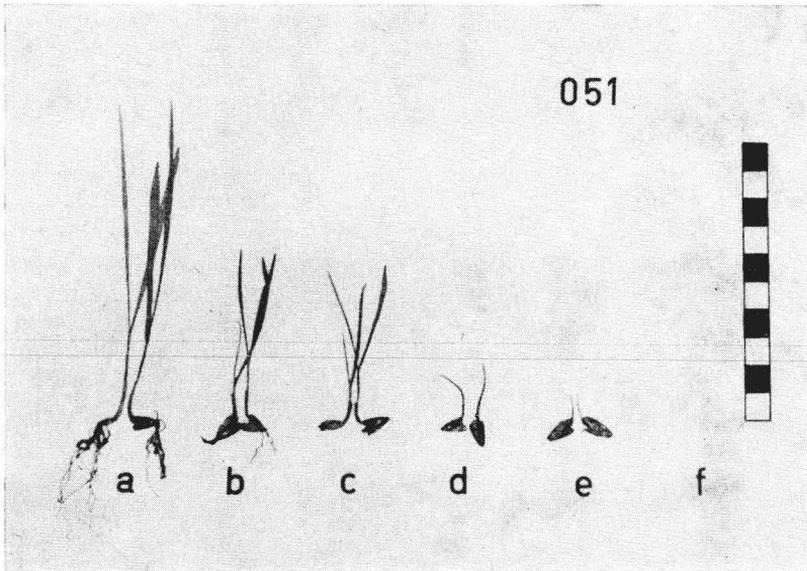


Abb. 5. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch verschiedene Mischungen von GS 1 mit Koksstaub

Nr.	a	b	c	d	e	f
M_0	0,00	3,46	5,43	10,38	18,00	∞

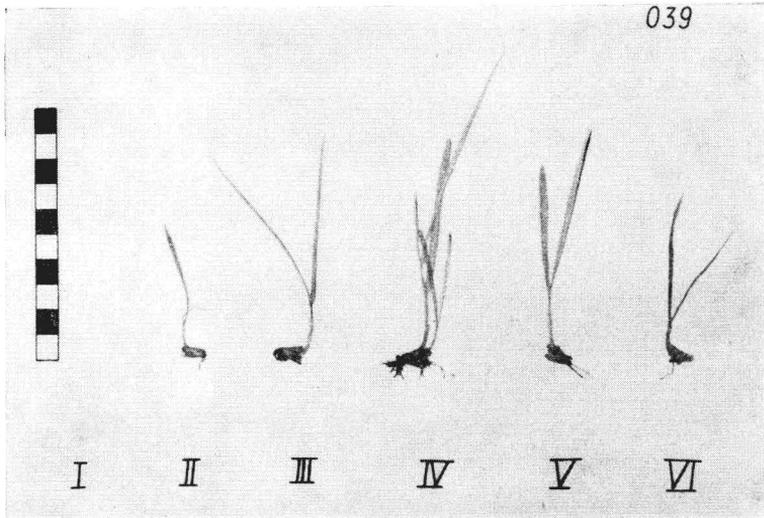


Abb. 6. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 1 mit Braunkohlenelektrofilterasche. Reihenfolge v. l. n. r. für M_0 : ∞ - 1,03 - 11,50 - 22,50 - 24,50 - 55,00

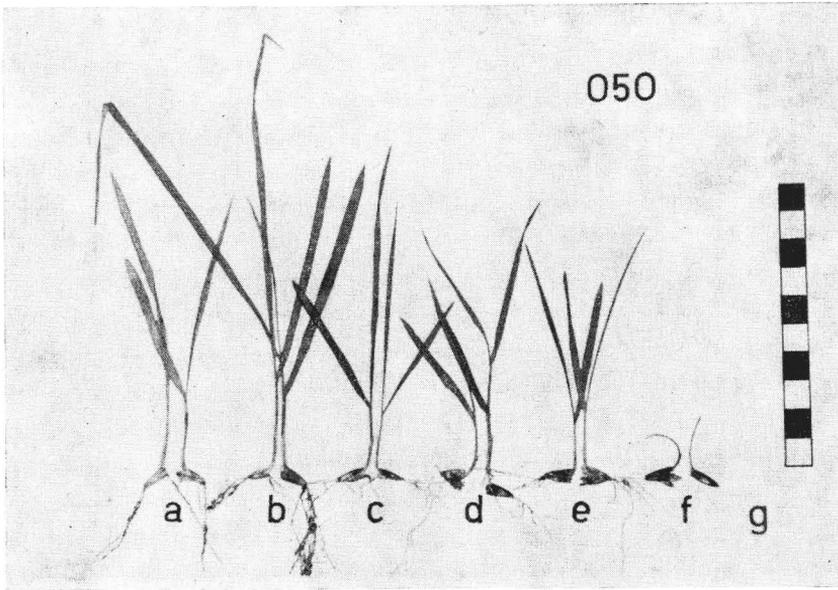


Abb. 7. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 1 mit Brikettabrieb

Nr.	a	b	c	d	e	f	g
M_0	0,00	1,89	4,44	6,38	10,50	46,00	∞

Die abgebildeten Kurven wurden berechnet. Sie gehorchen folgenden Gleichungen:

(g: Keimung; s: Wachstum)

Braunkohlenfilterasche GS 1:

$$g = 0,84 e^{-0,00776 (8,1 - M_0)^{1,3}} \quad 0 \leq M_0 \leq 8,1$$

$$g = 0,84 e^{-0,00776 (M_0 - 8,1)^{1,3}} \quad M_0 \geq 8,1$$

M_0	1,034	11,5	22,5	24,5	55,0
$g_{exp.}$	0,74	0,84	0,79	0,47	0,26
g_{th}	0,76	0,81	0,66	0,63	0,26

$$s = 0,41 e^{-0,004 (14,4 - M_0)^{1,3}} \quad 0 \leq M_0 \leq 14,4$$

$$s = 0,41 e^{-0,004 (M_0 - 14,4)^{1,3}} \quad M_0 \geq 14,4$$

M_0	1,034	11,5	22,5	24,5	55,0
$s_{exp.}$	$0,34 \pm 0,14$	$0,51 \pm 0,16$	$0,43 \pm 0,19$	$0,47 \pm 0,29$	$0,21 \pm 0,18$
	$0,24 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,08$	$0,35 \pm 0,16$	$0,59 \pm 0,09$	$0,36 \pm 0,08$
s_{th}	0,36	0,40	0,39	0,38	0,25

Bauschutt / GS 1

$$g = 1,1 \cdot e^{-0,327 M_0^{0,4}}$$

M_0	0,0	0,875	1,083	2,469	4,143	4,206	7,692
$g_{exp.}$	1,16/1,05	1,00	0,84	0,79	0,47	0,36	0,37
g_{th}	1,10	0,81	0,78	0,69	0,62	0,62	0,53
M_0	7,802	9,557	14,612	22,551	132,418		
$g_{exp.}$	0,41	0,55	0,50	0,45	0,18		
g_{th}	0,52	0,49	0,42	0,35	0,11		

$$s = 0,75 e^{-0,238 (0,9 - M_0)^{0,4}} \quad 0 \leq M_0 \leq 0,9$$

$$s = 0,75 e^{-0,238 (M_0 - 0,9)^{0,4}} \quad M_0 \geq 0,9$$

M_0	0,0	0,621	0,875	1,083	1,634		
$s_{exp.}$	0,61±0,12	0,66±0,13	0,76±0,13	0,71±0,08	0,59±0,15		
s_{th}	0,60	0,65	0,71	0,66	0,61		
M_0	2,469	4,143	4,206	7,802	14,612	132,418	
$s_{exp.}$	0,41±0,08	0,47±0,12	0,55±0,14	0,59±0,14	0,20±0,03	0,15±0,07	
s_{th}	0,56	0,51	0,51	0,45	0,38	0,14	

Brikettabrieb / GS 1

$$g = 0,85 e^{-0,1655 M_0^{0,3}}$$

M_0	0,0	1,889	4,444	10,5	46,0		
$g_{exp.}$	0,84	0,58	0,74	0,68	0,47		
g_{th}	0,85	0,70	0,66	0,61	0,50		

$$s = 0,95 e^{-0,33 (1,9 - M_0)^{0,48}} \quad 0 \leq M_0 \leq 1,9$$

$$s = 0,95 e^{-0,33 (M_0 - 1,9)^{0,48}} \quad M_0 \geq 1,9$$

M_0	0,0	1,889	4,444	6,383	10,5	46,0	
$s_{exp.}$	0,60±0,05	0,93±0,15	0,54±0,19	0,47±0,08	0,44±0,09	0,10±0,02	
s_{th}	0,61	0,91	0,57	0,48	0,38	0,12	

Koksstaub / GS 1

$$g = e^{-0,3282 M_0^{0,55}}$$

$$s = 0,7 e^{-0,22 M_0^{0,85}}$$

M_0	0,0	3,455	5,429	10,375	18,0		
$g_{exp.}$	1,00	0,63	0,32	0,32	0,21		
g_{th}	1,00	0,52	0,44	0,30	0,20		
$s_{exp.}$	0,71±0,07	0,37±0,05	0,28±0,06	0,11±0,02	0,08±0,05		
s_{th}	0,70	0,37	0,28	0,14	0,05		

GS 2/ GS 1

$$g = 0,8 e^{-0,0265 (5,5 - M_0)^3} \quad 0 \leq M_0 \leq 5,5$$

$$g = 0,8 e^{-0,106 (M_0 - 5,5)^3} \quad M_0 \geq 5,5$$

M_0	1,146	2,379	5,426	8,2
$g_{exp.}$	0,10	0,37	0,79	0,10
g_{th}	0,09	0,36	0,80	0,10

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen, daß alle verwendeten Abprodukte (Ausnahme: Koksstaub) bei bestimmten Mischungsverhältnissen mit dem Gießereialsand GS 1 ein Optimum des Pflanzenwachses hervorrufen. Bei solchen Maxima herrschen die für die Pflanze durch Mischung der jeweiligen Substrate erreichbaren besten Bedingungen. Eine Zusammenfassung der Maxima ($S_{Opt.}$, $G_{Opt.}$) und der weiteren charakteristischen Werte (D_{10} , D_{50} , K_{90} , K_{50}) gibt Tab. 12.

Tabelle 12. Charakteristische Werte von Mischungen des Gießereialsandes GS 1 mit anderen Abprodukten

Abprodukt	$S_{Opt.}^*$	Wachstum			Keimung	
		D_{10}	D_{50}	$G_{Opt.}^*$	K_{90}	K_{50}
BFA	14,4 (0,41)	—	—	8,1 (0,84)	—	25,35
Brikettabrieb	1,9 (0,95)	1,92	5,90	0,0 (0,85)	—	48,60
Koksstaub	0,0 (0,70)	—	1,65	0,0 (1,00)	0,13	3,89
Braunkohle	5,0 (0,90)	5,00	8,81	5,0 (0,70)	—	7,33
Bauschutt	0,9 (0,75)	—	4,69	0,0 (1,10)	0,30	9,03
GS 2	5,5 (0,20)	—	—	5,5 (0,80)	—	7,14
Wasserglasschlamm	29,0 (0,07)	—	—	29,0 (0,08)	—	—

* Zahlen in Klammern: zum jeweiligen Mischungsverhältnis gehöriges s bzw. g

Die Ergebnisse der Tab. 12 indizieren, daß nur bei Mischungen des Gießereialsandes GS 1 mit Brikettabrieb und Braunkohle Wachstumsdepressionen $\leq 10\%$ erreicht werden. Ursache dafür ist die höhere Sorptionskapazität beider Substrate. Da die Mischungsbereiche sehr schmal sind (Abb. 4) und daher eine relativ genaue Einhaltung des Mischungsverhältnisses notwendig ist, erscheinen solche binären Mischungen zwar theoretisch möglich, sind aber praktisch kaum zu verwirklichen. Im Bereich zwischen $S_{Opt.}$ und D_{50} liegende Mischungsverhältnisse sind für die Kultivierung geeignet. Es ist günstiger, ein derartiges Mischsubstrat mit Wuchsdepressionen $10\% < S < 50\%$ noch mit einem geringen Kulturbodenanteil zu versetzen.

Für die Herstellung von Mischsubstraten sind die in Tab. 13 genannten Mischungsverhältnisse des Gießereialsandes GS 1 mit Abprodukten einzuhalten.

Tabelle 13. Mischungsverhältnisse

Abprodukt	M_0 (Min.)	M_0 (Max.)
Brikettabrieb	1,9	5,9
Koksstaub	—	1,6
Braunkohle	5,0	8,8
Bauschutt	0,9	4,6

Aus Gründen des Angebotes bzw. der Ökonomie ist besonders der Wert für Bauschutt von 4,6 interessant. Er entspricht etwa einem Anteil von 20% Bauschutt im Substrat, der ausreicht, eine Kultivierung in die Wege zu leiten. Wenig geeignet für binäre Mischung erscheint Braunkohlenfilterasche, die bei $M_0 = 14,4$ ein Optimum

des Pflanzenwuchses zeigt (\triangle etwa 7% Braunkohlenfilterasche im Substrat). Diese könnte in ternären Mischungen in Verbindung mit sorptionsfähigen Substraten Verwendung finden.

5.2. Mischungen des Gießereisandes GS 1 mit natürlichen Bodensubstraten

Da die untersuchten Mischungen mit anderen Abprodukten eine optimale Kultivierung nicht ermöglichen, wurden natürliche Substrate und ihre Mischungen mit diesem Gießereisand untersucht. Zielstellung der Untersuchung war es, mit geringen Mengen derartiger Substrate eine optimale Kultivierung zu ermöglichen. Die Eigenschaften dieser Mischungen zeigt Tab. 9.

Tabelle 14. Einfluß des GS 1 auf die Keimung g (%) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. bei Mischungen mit natürlich vorkommenden Substraten

M_0	Kompost (29 d)	Ton (18 d)	Löß (18 d)	Auelehm (18 d)	Torfmoß (23 d)
0	100	111	32	158	75
0,98	—	—	—	95	—
1,08	—	—	26	—	—
1,74	132	—	—	—	—
2,80	—	—	—	42	—
2,86	—	—	16	—	—
2,92	—	—	32	—	—
3,10	—	63	—	—	—
4,10	—	—	—	26	—
4,63	—	—	26	—	—
5,58	90	—	—	—	—
7,67	—	21	—	—	—
8,25	—	—	—	—	79
13,33	—	16	—	—	—
13,60	—	—	—	—	75
18,33	—	—	—	26	—
20,00	42	—	—	—	—
28,67	—	—	—	—	50
49,00	—	5	—	—	—
64,00	11	—	—	—	—
∞	0	0	0	0	0

Tabelle 15. Einfluß des GS 1 auf die Wuchshöhe *s* (mm) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. bei Mischungen mit natürlich vorkommenden Substraten

<i>M</i> ₀	Kompost (29 d)	Ton (18 d)	Löß (18 d)	Auelehm (18 d)	Torfmulle (23 d)
0	223±14	105±9	122±19	156±28	86±11
0,98	—	—	—	182±22	—
1,08	—	—	144±34	—	—
1,74	220±9	—	—	—	—
2,33	137±28	—	—	—	—
2,80	—	—	—	26±6	—
2,86	—	—	84±44	—	—
2,92	—	—	79±33	—	—
3,10	—	48±5	—	—	—
4,10	—	—	—	30±7	—
4,63	—	—	105±27	—	—
5,58	162±26	—	—	—	—
6,67	—	21±4	—	—	—
8,25	—	—	—	—	33±10
13,33	—	34±14	—	—	—
13,60	—	—	—	—	51±5
18,33	—	—	—	14±3	—
20,00	62±13	—	—	—	—
20,40	—	—	18±9	—	—
28,67	—	—	—	—	31±5
49,00	—	12±5	—	—	—
64,00	23±4	—	—	—	—
∞	0	0	0	0	0
Kompost	—	179±28	179±28	179±28	304±18

Tabelle 16. Charakteristische Werte der Mischungen von GS 1 mit natürlichen Substraten

Substrat	<i>S</i> _{Opt.*}	Wachstum		<i>G</i> _{Opt.*}	Keimung	
		<i>D</i> ₁₀	<i>D</i> ₅₀		<i>K</i> ₉₀	<i>K</i> ₅₀
Kompost	0,0 (1,00)	1,03	10,84	1,8 (1,30)	5,58	16,58
Ton	0,0 (0,60)	—	0,01	0,0 (1,10)	0,951	4,35
Löß	0,0 (0,70)	—	4,52	0,0 (0,32)	—	—
Auelehm	0,0 (0,95)	0,94	2,53	0,0 (1,60)	0,77	3,14
Torfmulle	0,0 (0,28)	—	—	8,0 (0,80)	—	29,00

* Zahlen in Klammern: zum jeweiligen Mischungsverhältnis gehöriges *s* bzw. *g*

Die Ergebnisse der Gefäßversuche sind den Tab. 14 und 15 und Abb. 8 bis 12 zu entnehmen. Die daraus ermittelten charakteristischen Werte sind in Tab. 16 enthalten.

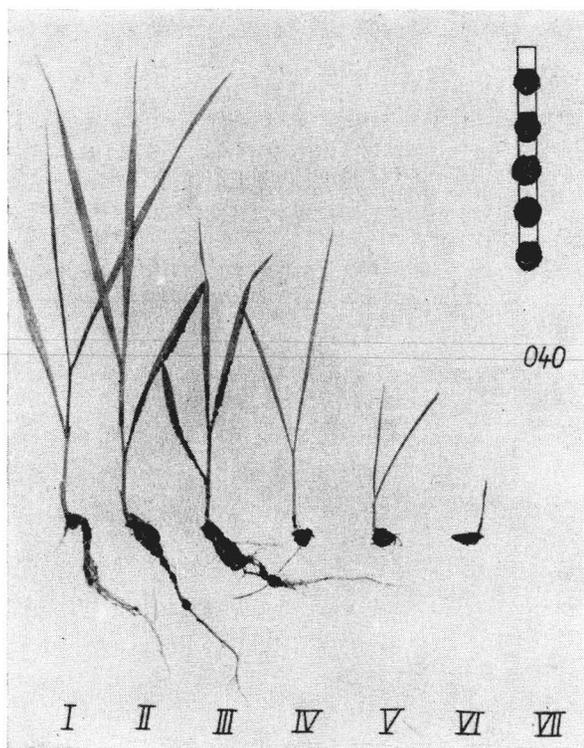


Abb. 8. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 1 mit Kompost

Nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII
M_0	0,00	1,74	2,33	5,58	20,00	64,00	∞

Im folgenden sind die berechneten Kurven angegeben.

Löß / GS 1

$$g = 0,32 e^{-0,19 M_0^{0,3}}$$

M_0	0,0	1,083	2,857	2,917	4,625
$g_{exp.}$	0,32	0,26	0,16	0,32	0,26
g_{th}	0,32	0,26	0,25	0,25	0,24

$$s = 0,7 e^{-0,055 M_0^{1,2}}$$

M_0	0,0	1,083	2,857	2,917	4,625	20,4
$s_{exp.}$	$0,68 \pm 0,11$	$0,80 \pm 0,19$	$0,47 \pm 0,25$	$0,44 \pm 0,19$	$0,59 \pm 0,15$	$0,10 \pm 0,05$
s_{th}	0,70	0,66	0,58	0,57	0,50	0,09

Auelehm / GS 1

$$g = 1,6 e^{-0,656 M_0^{0,5}}$$

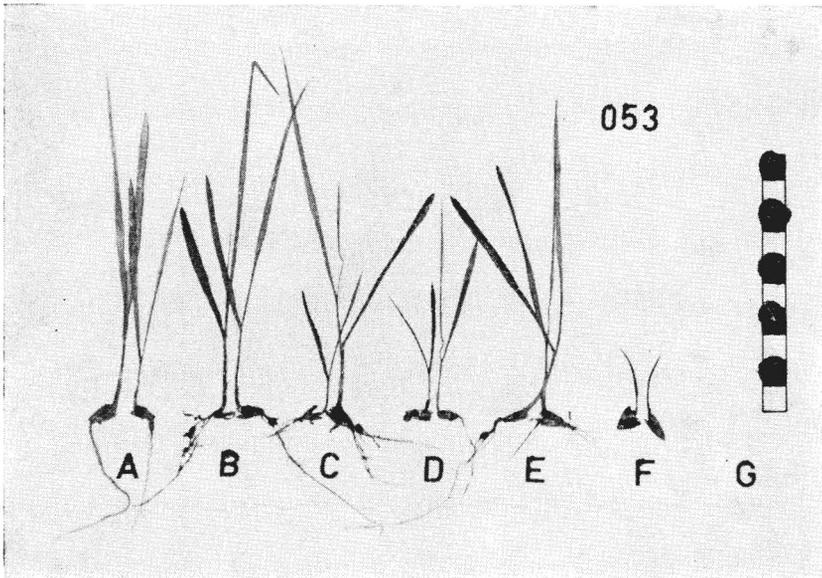


Abb. 9. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 1 mit Löß

Nr.	A	B	C	D	E	F	G
M_0	0,00	1,08	2,86	2,92	4,63	20,40	∞

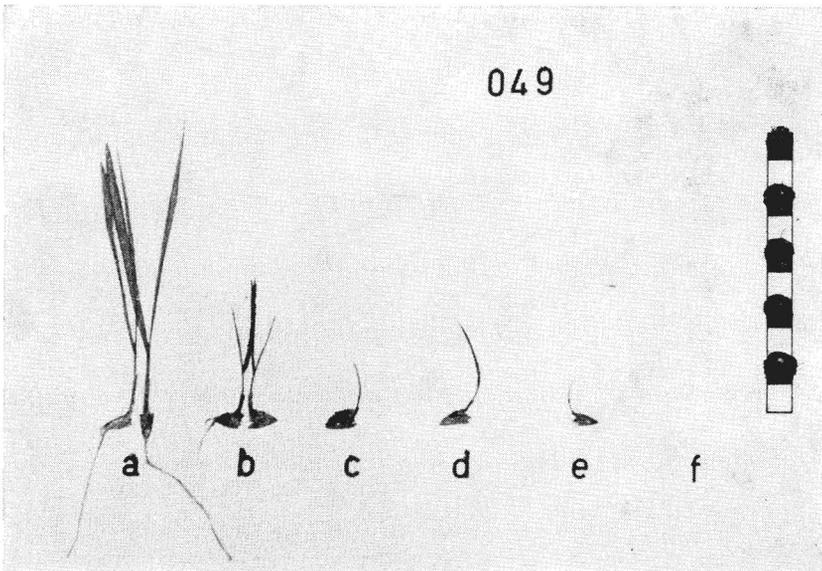


Abb. 10. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 1 mit Ton

Nr.	a	b	c	d	e	f
M_0	0,00	3,10	6,67	13,33	49,00	∞

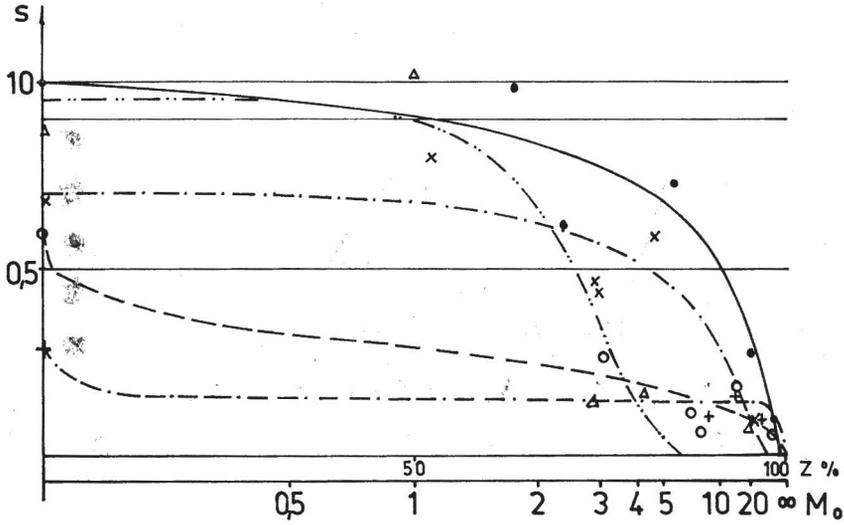


Abb. 11. Relative Wuchshöhe s von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. in Abhängigkeit von dem Mischungsverhältnis M_0 des GS 1 mit natürlichen Bodensubstraten
 ● — : Kompost; ○ - - - : Ton; × - · - · : Löß; △ · · · · : Auelehm; + - - - : Torfmüll

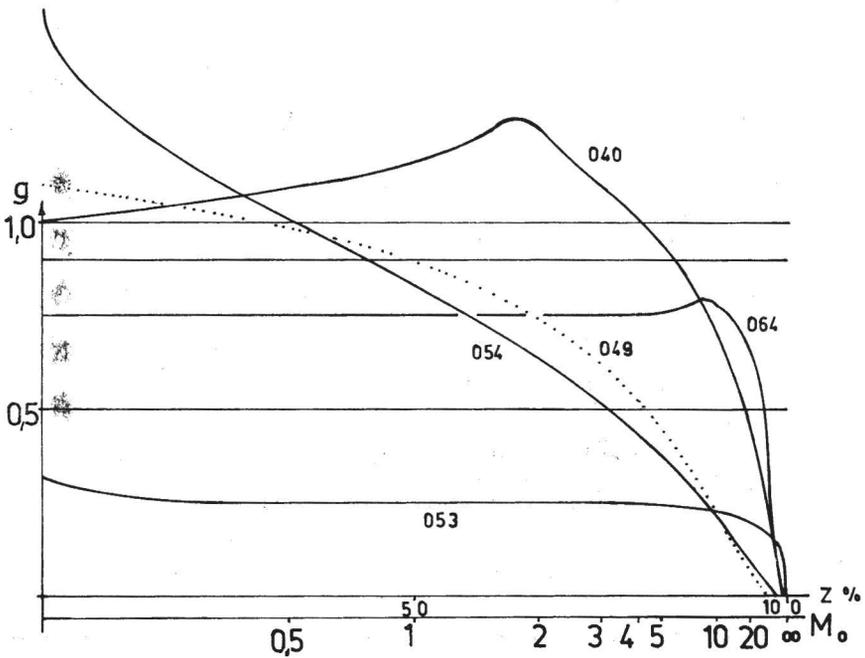


Abb. 12. Keimung g von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis M_0 des GS 1 mit natürlichen Bodensubstraten
 040: Kompost; 049: Ton; 053: Löß; 054: Auelehm; 064: Torfmüll

M_0	0,0	0,977	2,8	4,1	18,333
$g_{exp.}$	1,58	0,95	0,42	0,26	0,26
g_{th}	1,60	0,84	0,53	0,42	0,10
$s = 0,95 e^{-0,0632 M_0^{2,5}}$					
M_0	0,0	0,977	2,8	4,1	18,333
$s_{exp.}$	$0,87 \pm 0,16$	$1,02 \pm 0,12$	$0,15 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,02$
s_{th}	0,95	0,90	0,41	0,11	$\ll 0,01$

Kompost / GS 1

$g = 1,3 e^{-0,145 (1,8 - M_0)^{0,7}} \quad 0 \leq M_0 \leq 1,8$
 $g = 1,3 e^{-0,145 (M_0 - 1,8)^{0,7}} \quad M_0 \geq 1,8$

M_0	0,0	1,739	5,583	20,0	64,0	
$g_{exp.}$	1,00	1,32	0,90	0,42	0,11	
g_{th}	1,04	1,27	0,90	0,43	0,10	
$s = e^{-0,103 M_0^{0,8}}$						
M_0	0,0	1,739	2,333	5,583	20,0	64,0
$s_{exp.}$	$1,00 \pm 0,06$	$0,99 \pm 0,04$	$0,62 \pm 0,12$	$0,73 \pm 0,12$	$0,28 \pm 0,06$	$0,10 \pm 0,02$
s_{th}	1,00	0,85	0,82	0,67	0,32	0,06

Ton / GS 1

$g = 1,1 e^{-0,21 M_0^{0,9}}$

M_0	0,0	3,1	7,667	13,333	49,0
$g_{exp.}$	1,11	0,63	0,21	0,16	0,05
g_{th}	1,10	0,62	0,23	0,13	$< 0,01$

$s = 0,6 e^{-0,7308 M_0^{0,3}}$						
M_0	0,0	3,1	6,667	7,667	13,333	49,0
$s_{exp.}$	$0,59 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,13$	$0,07 \pm 0,03$
s_{th}	0,60	0,22	0,16	0,16	0,12	0,06

Braunkohle / GS 1

$g = 0,7 e^{-0,22 (5 - M_0)^{0,5}} \quad 0 \leq M_0 \leq 5$
 $g = 0,7 e^{-0,304 (M_0 - 5)^{0,12}} \quad M_0 \geq 5$

M_0	4,302	4,953	7,358	20,283
$g_{exp.}$	0,58	0,67	0,50	0,46
g_{th}	0,58	0,67	0,50	0,46

$s = 0,9 e^{-0,94 (5 - M_0)^{1,2}} \quad 0 \leq M_0 \leq 5$
 $s = 0,9 e^{-0,21 (M_0 - 5)^{0,77}} \quad M_0 \geq 5$

M_0	4,302	4,953	7,358	20,283
$s_{exp.}$	$0,52 \pm 0,12$	$0,89 \pm 0,05$	$0,60 \pm 0,15$	$0,16 \pm 0,07$
s_{th}	0,49	0,88	0,60	0,16

Torfmulle / GS 1

$$g = 0,8 e^{-0,0043 (8-M_0)^{1,3}}$$

$$0 \leq M_0 \leq 8$$

$$g = 0,8 e^{-0,009 (M_0-8)^{1,3}}$$

$$M_0 \geq 8$$

M_0	0,0	8,25	13,6	28,667
$g_{exp.}$	0,75	0,79	0,75	0,50
g_{th}	0,75	0,80	0,74	0,50

$$s = 0,28 e^{-0,535 M_0^{0,15}}$$

M_0	0,0	8,25	13,6	28,667
$s_{exp.}$	$0,28 \pm 0,04$	$0,11 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,02$
s_{th}	0,28	0,13	0,13	0,12

Für die optimale Kultivierung geeignetste Substrate sind Kompost und Auelehm. In binären Mischungen sichern sie bis zu Mischungsverhältnissen von 1,03 bzw. 0,94 eine optimale Kultivierung. Das bedeutet, daß etwa gleiche Mengen GS 1 und Kompost bzw. Auelehm vermischt werden müssen. Diese Mengen an natürlichen Boden-substraten können wesentlich verringert werden, indem Abprodukte beigemischt werden, die die Grundtoxizität des Schadstoffes bereits um $\geq 50\%$ mindern.

Wird davon ausgegangen, daß durch Mischungen des Schadstoffes mit einem anderen Substrat ein neues Schadmaterial entsteht, dessen Toxizität analog der des reinen Schadstoffes, allerdings um 50% geringer ist, und setzt man weiterhin voraus, daß der Kurvenverlauf entsprechend Abb. 11 erhalten bleibt, aber entlang der s -Achse zwischen $s = 1,0$ und $s = 0,5$ gestaucht wird, so ergeben sich folgende D_{10} -Werte ternäre Mischungen von Kompost = 4,71 bzw. Auelehm = 1,50.

5.3. Mischungen des Gießereialsandes GS 2 mit Kompost

Analog zu den Gefäßversuchen mit dem GS 1 wurden Versuche mit dem GS 2 durchgeführt. In Tab. 17 und den Abb. 13 und 14 sind die Ergebnisse enthalten.

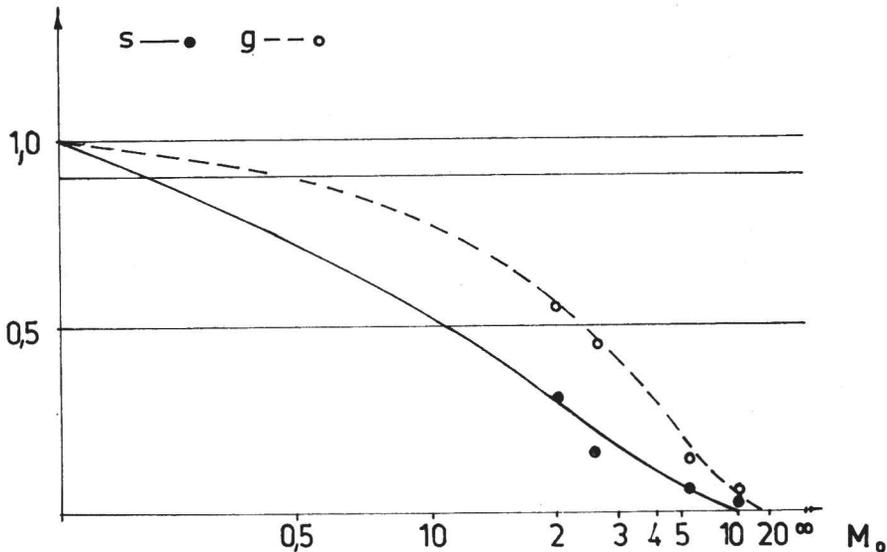


Abb. 13. Wachstumsdepression s und Keimhemmung g in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis des GS 2 mit Kompost

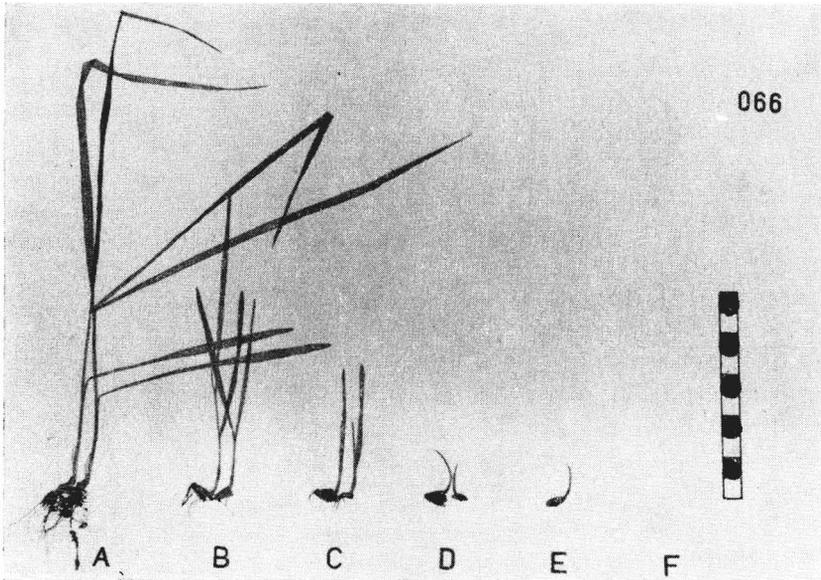


Abb. 14. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Mischungen von GS 2 mit Kompost

Nr.	A	B	C	D	E	F
M_0	0,00	2,02	2,61	5,58	10,80	60,00

Tabelle 17. Einfluß von GS 2 auf Keimung g (%) und Wachstum s (mm) von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. bei Mischungen mit Kompost

M_0	g_{22d}	s_{22d}
0	100	321 ± 49
2,016	55	100 ± 39
2,607	45	52 ± 18
5,576	14	18 ± 3
10,797	5	11 ± 4
60,00	0	0
∞	0	0

Daraus ergeben sich folgende charakterische Werte:

$$D_{10} = 0,13 \quad D_{50} = 1,08 \quad K_{90} = 0,43 \quad K_{50} = 2,41$$

Für ternäre Mischungen (siehe 5.2.) ergibt sich analog zu GS 1 folgender charakteristischer Wert: $D_{10} = 0,31$.

Kompost / GS 2

$$g = e^{-0,2635 M_0^{1,1}}$$

M_0	0,0	2,016	2,607	5,576	10,797	60,00
$g_{exp.}$	1,00	0,55	0,45	0,14	0,05	0,00
g_{th}	1,00	0,57	0,47	0,17	0,03	$\ll 0,01$

$$s = e^{-0,649 M_0^{0,9}}$$

M_0	0,0	2,016	2,607	5,576	10,797	60,00
$s_{exp.}$	$1,00 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,12$	$0,16 \pm 0,06$	$0,06 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,01$	0,00
s_{th}	1,00	0,30	0,21	0,05	< 0,01	$\ll 0,01$

Im Vergleich zum GS 1 zeigt der GS 2 gegenüber den verwendeten Pflanzen eine wesentlich stärkere Schädigung.

6. Nachweis der Ursache der Schädigung der Gießereialsande

Die Tab. 1 bis 7 enthalten die Charakteristika der in dieser Arbeit verwendeten Altsande. Die Kontaminanten der Gießereialsande lassen sich einteilen in verschiedene Kohlenwasserstoffe und anorganische Bestandteile.

Damit bezüglich der Verminderung der Schädigung der Gießereialsande gezielte Deponietechnologien erarbeitet werden können, ist die Ursache der Schädigung zu ermitteln. Eine Methode ist die Anwendung von Ionenaustauschern beim Gefäßversuch. Je nach der Art der verwendeten Ionenaustauscher lassen sich die schädigenden Komponentengruppen feststellen. Ionenaustauscher wurden angewendet zur Verminderung der Konzentration von toxischen Schwermetallionen in Böden (van Assche 1977). An Ionenaustauscher gebundene Schwermetall- und andere Ionen sind nicht unmittelbar pflanzenverfügbar.

In vorliegender Arbeit werden die Gießereialsande GS 1 und GS 2 mit den in Tab. 18 angegebenen verschiedenen Formen der Ionenaustauscher KPS und SBK vermischt. In Tab. 18 und der Abb. 15 sind Erscheinungsformen und die Ergebnisse enthalten. Aus der Tab. 18 wird ersichtlich, daß die Anionen, die auf der Quarzmatrix des GS 1 haften, die entscheidenden schädigend wirkenden Bestandteile des GS 1 sind, wobei allerdings berücksichtigt werden muß, daß durch den Anionenaustausch OH^- -Ionen freigesetzt werden, die das saure Verhalten des GS 1 vermindern.

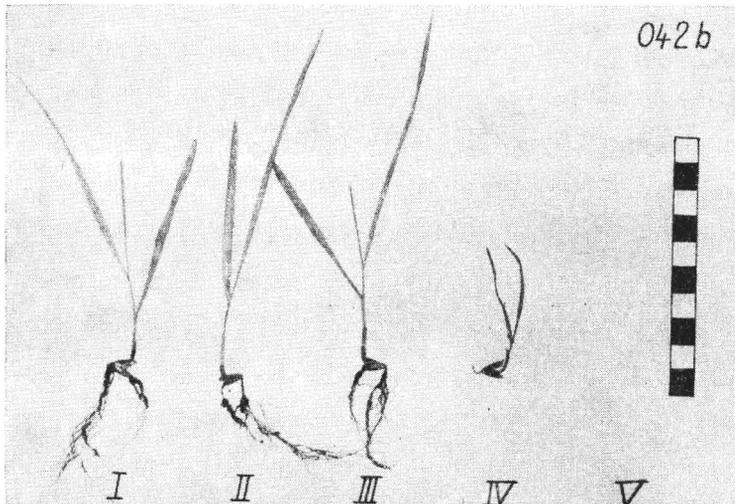


Abb. 15. Beeinflussung des Wachstums von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. durch Zugabe von SBK - OH^- zu GS 1

Nr.	I	II	III	IV	V
M_0	6,55	11,61	14,97	51,72	∞

Tabelle. 18. Die Schadwirkung von den Gießereialtsanden 1 und 2 auf den Wuchs *s* (mm) *Avena sativa* ssp. *sativa* L. in Abhängigkeit von der Zugabe von Ionenaustauschern

M_0 [g/ml]	GS 1 (29 d)			GS 2 (22 d)		
	KPS-K ⁺	SBK-OH ⁻	SBK-OH ⁻ + KPS-K ⁺	KPS-K ⁺	KPS-H ⁺	SBK-OH ⁻
2,7	—	—	81±10	—	—	—
5,167	59±6	—	—	—	—	—
6,552	—	128±11	—	—	—	—
7,436	—	—	—	—	—	15±7
7,5	—	—	118±13	—	—	—
8,3	—	—	—	—	62±7	—
9,147	—	—	—	15±3	—	—
9,853	—	—	—	—	42±17	—
9,887	—	—	—	—	—	8±2
11,611	—	138±9	—	—	—	—
14,97	—	156±10	—	—	—	—
15	37±5	—	—	—	—	—
16,158	—	—	—	37±6	—	—
17,436	—	—	—	—	—	0
20,114	—	—	—	—	0	—
21,333	40±11	—	—	—	—	—
24,727	—	—	—	—	—	38±9
32,3	35±11	—	—	—	—	—
33,885	—	—	—	—	0	—
36,091	—	—	—	0	—	—
39,294	—	—	—	0	—	—
51,724	—	46±7	—	—	—	—
55,4	33±5	—	—	—	—	—
70,6	—	—	—	—	—	0
∞	0	0	0	0	0	0
Kontroll- versuch (Kompost)	223±14	223±14	223±14	321±49	321±49	321±49

Ein ähnlicher Versuch beim GS 2 zeigt kompliziertere Verhältnisse an. Die Verminderung der Schadwirkung ist bei der Anwendung des Ionenaustauscher KPS-H⁺ am größten. Die Anwendung von KPS-K⁺ und SBK-OH⁻ zeigt nicht die gleiche Effektivität. Die Schadwirkung des GS 2 wird sowohl von Kationen und Anionen als auch vom pH-Wert der Auslaugungen hervorgerufen.

7. Schlussfolgerungen

Hinweise für die Ursachen der Schadwirkung der Gießereialtsande geben die Versuche mit den Ionenaustauschern. Wesentliche Schadkomponenten des GS 1 sind die Anionen und die Säuren [siehe Gehalt an SO₄²⁻-Ionen und pH-Wert (Tab. 2 und 3)]. Nach Entzug der Anionen durch den Ionenaustauscher SBK-OH⁻ und der durch den Anionenaustausch nachfolgenden Neutralisation der sauren Reaktion des Altsandes GS 1 ist das Wachstum von *Avena sativa* ssp. *sativa* L. vergleichbar mit dem Wachstum im nicht verunreinigten Rohsand (Tab. 8, 18; Abb. 1). Nicht so eindeutig sind die Verhältnisse bei GS 2. Bei diesem Sand sind sowohl die An- als auch die Kationen an der Schadwirkung beteiligt.

Aus den Versuchen kann der Schluß gezogen werden, daß die organischen Verunreinigungen der Altsande keinen wesentlichen phytotoxischen Einfluß haben.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß die Mischung des Gießereialsandes GS 1 mit anderen Abprodukten nicht zu einem optimal kultivierbaren Substrat führt. Es können aber Substratmischungen hergestellt werden, die die Toxizität des Schadstoffes um $\geq 50\%$ mindern.

Für eine optimale Kultivierung ist es notwendig, sorptionsfähige natürliche Substrate beizumischen, so daß ternäre Mischungen entstehen. Besonders geeignet sind humus- und lehmreiche Substrate (Kompost, Auelehm). Dabei sind folgende Mischungen besonders zu empfehlen:

GS 1: Kompost : Bauschutt – 4,7 : 1 : 1,

GS 1: Auelehm : Bauschutt – 4,7 : 3,1 : 1,

wobei der humusreichen Komponente wegen der geringeren notwendigen Mengen an Kulturboden der Vorrang zu geben ist.

Unter gleichen Voraussetzungen kann man für GS 2 folgende Mischung empfehlen:

GS 2: Kompost : Bauschutt – 5 : 17 : 1.

In diesem Falle erweist sich eine derartige ternäre Abschlußschicht infolge der wesentlich stärkeren Toxizität des GS 2 als nicht sinnvoll, da sie einem Kulturbodenüberzug nahe kommt. Es ist daher zu empfehlen, eine Übergangs- oder Zwischenschicht mit einem sehr großen Anteil ($\geq 80\%$) an anderen Abprodukten zu schaffen und diese dann mit einer kulturfähigen Abschlußschicht zu versehen.

Alle anderen untersuchten Gießereialsande sind keine derart extremen Schadstoffe und können mit geringen (etwa 20–25 %) Beimischungen von Kulturboden – Bauschutt (oder evtl. Asche) Mischungen und anschließender Düngung optimal kultiviert werden.

8. Experimenteller Teil

8.1. Agrochemische Parameter (Tab. 2)

Die agrotechnischen Parameter wurden nach den gleichen Methoden wie von Tauchnitz, Schnabel u. a. (1980) beschrieben von der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Institut für Pflanzenernährung Jena, Bereich agrochemische Untersuchung und Beratung, Dr. Witter, ermittelt.

8.2. Wassergehalt und maximale Wasserkapazität

Die Bestimmung dieser Größen wurde von Tauchnitz, Schnabel u. a. (1980) beschrieben.

8.3. Inhaltsstoffe der wäßrigen Auszüge (Tab. 3)

Diese wurden nach der gleichen Methode, wie von Tauchnitz u. a. (1980) beschrieben, bestimmt.

8.3.1. Wks (dest.) und wks (undest.)

Aus den nach 8.3. gewonnenen wäßrigen Auszügen wurden die wks direkt in diesem und nach Destillation bestimmt.

8.4. Ausgewählte Inhaltsstoffe – direkt von den Altsanden (Tab. 4)

8.4.1. GP und wks

Die Extraktion und die Bestimmung wurde von Tauchnitz u. a. (1980) beschrieben.

8.4.2. CHCl_3 -lösliche Bestandteile

10 g Altsand wurde 16 h mit 50 ml CHCl_3 in einer Soxhletapparatur extrahiert. Das CHCl_3 wird abgedampft bei 60 °C und die Menge des Rückstandes bestimmt.

8.5. Schwermetallionengehalte ausgewählter Altsande (Tab. 7)

Die aufgeführten Schwermetallionen wurden mit der Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt (siehe Tauchnitz u. a. 1980).

S c h r i f t t u m

- Gehlker, H.: Untergrund und Bodendeckschicht bei Rekultivierung für landwirtschaftliche Nutzung am Beispiel der Mülldeponien. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* **17** (1967 a) 229–236.
- Gehlker, H.: Die optimale Mächtigkeit einer Bodendeckschicht über schwer durchwurzelbaren Untergrund. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* **17** (1976 b) 106–116.
- Richter, K.-H.: Veränderung technologischer Prozesse und einige Aspekte ihrer arbeitsbiologischen Wirkungen auf den werktätigen Menschen im Betrieb und seine Wohnumwelt. *Freiberger Forschungshefte B* **187** (1976) 23–39.
- Tauchnitz, J., R. Schnabel u. a.: Zur Ablagerung der industriellen Abprodukte. 1. Mitt.: Untersuchung über die Kultivierungsmöglichkeit von Deponien industrieller Abprodukte, *Hercynia N. F. Leipzig* **15** (1978) 58–65.
- Tauchnitz, J., u. a.: Zur Ablagerung der industriellen Abprodukte. 2. Mitt.: Abgrenzung reiner Schadstoffdeponien von gemischten Schadstoffdeponien, *Hercynia N. F. Leipzig* **16** (1979) 81–93.
- Tauchnitz, J., u. a.: Zur Ablagerung der Abprodukte. 6. Mitt.: Deponieverhalten eines Gießereialtsandes, *Hercynia, N. F.* **17** (1980) 60–75.
- Tauchnitz, J., R. Schnabel u. a.: Zur Ablagerung der industriellen Abprodukte. 7. Mitt., Beitrag zur Kultivierung einer Gießereialtsanddeponie. *Hercynia, N. F.* **17** (1980) 178–212.
- Van Assche, C., und G. Jansen: Anwendung von selektiv wirkenden Kationenaustauschern auf mit Schwermetallen kontaminierten Böden. *Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 34/II* (1977) 215–228.

Dr. rer. nat. J. Tauchnitz
Dipl.-Chem. R. Schnabel
Dr. rer. nat. J. Rittig
Dipl.-Chem. W. Pihan
Prof. Dr. R. Mahrwald
Prof. Dr. sc. H. Hennig

Karl-Marx-Universität Leipzig
Sektion Chemie
DDR - 7010 Leipzig
Liebigstraße 18