

Die chemische Zusammensetzung von Gewächsen auf mit Klärschlamm behandelten Böden

Von S. DE HAAN*)

Einführung

In den Niederlanden waren am 1. 1. 1974 nach Angaben des „Rijksinstituut voor de Zuivering van Afvalwater“ 513 öffentliche und 100 private Abwasserreinigungsanlagen in Betrieb, die das Abwasser von 11.667.550 bzw. 1.026.370 Einwohnergleichwerten (EGW) reinigten. Die Zahl der Anlagen und Einwohnergleichwerte hat in den letzten Jahren stark zugenommen, wie aus Tabelle 1 hervorgeht.

Tab. 1

*Zahl der in verschiedenen Zeitabschnitten in den Niederlanden in Betrieb genommenen
Abwasserreinigungsanlagen mit der gereinigten Abwassermenge,
ausgedrückt in Einwohnergleichwerten
(EWG)*

Tab. 1

*Number of sewage purification plants that came into operation in the periods shown,
and the amounts of sewage treated, expressed as population equivalents (PE)*

Periode der Inbetriebnahme <i>start of operation</i>	öffentliche Anlagen <i>public installations</i>		private Anlagen <i>private installations</i>	
	Anzahl <i>number</i>	EWG × 1000 <i>PE × 1000</i>	Anzahl <i>number</i>	EWG × 1000 <i>PE × 1000</i>
bis 1949	15	167	15	27
1949 — 1953	28	321	21	38
1954 — 1958	66	847	14	22
1959 — 1963	108	767	11	27
1964 — 1968	135	2719	14	39
1969 — 1973	161	6847	25	873

Mit der Zahl der Anlagen und Einwohnergleichwerte ist auch die Klärschlammproduktion angestiegen und damit auch das Bestreben seitens der wasserreinigenden Instanzen den Schlamm in die Landwirtschaft abzusetzen. In den meisten Fällen ist das die weitaus billigste Weise ihn loszuwerden. Auf Wunsch und auch mit finanzieller Unterstützung wasserreinigender Instanzen sind in den letzten Jahren an unserem Institut etwa 40 Klärschlämme verschiedener Herkunft mittels Gefäßversuchen auf ihren landwirtschaftlichen Wert untersucht worden, wobei in einer Anzahl von Fällen auch Gewächsanalysen durchgeführt wurden. Von den Ergebnissen dieser Analysen wird im nachfolgenden berichtet. Auf den Effekt des Klärschlammes auf den Ertrag wird hier nicht eingegangen. Im allgemeinen ist dieser positiv, soweit der Stickstoffgehalt des Schlammes umgerechnet auf organische Substanz größer ist als 2% (DE HAAN, 1).

*) Ir. S. DE HAAN, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Oosterweg 92, Haren (Gr.), Niederlande.

Durchführung der Untersuchungen

In Zusammenhang mit der Voluminosität des Schlammes und seinem geringen und oft sogar negativen Handelswert besteht das Bestreben ihn in möglichst großen Mengen oder/und so oft wie möglich auf Grundstücken in der direkten Umgebung der Kläranlagen anzuwenden. Die an unserem Institut durchgeführte Testmethode für Klärschlamm und ähnliche Substanzen versieht in jeder mengenmäßig möglichen Art der Anwendung indem ein leichter Sandboden zu 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Volumenprozent durch Klärschlamm ersetzt wird, der zu diesem Zweck, wenn nötig zuvor getrocknet, gemahlen und dann wieder auf einen für Pflanzenwachstum erforderlichen Feuchtegehalt gebracht wird.

Mit diesen Boden/Klärschlammgemischen werden Plastikgefäße zu 1 Liter gefüllt und darin drei Gewächse (Hafer, Tomaten oder Senf und wieder Hafer) nacheinander angebaut. Die Gefäße stehen in einem Glashaus mit Möglichkeit zusätzlicher Beleuchtung und Heizung im Winter. Die Gewächse haben eine Vegetationszeit von 4 bis 8 Wochen. Jedes Gewächs erhält eine normale Phosphor- und Kaliumdüngung, jedoch nur die Hälfte einer normalen Stickstoffgabe um sowohl einen positiven als einen negativen Stickstoffeffekt des Schlammes feststellen zu können. Bei einem normalen Stickstoffgehalt des Schlammes kann bei den höchsten Schlammgaben soviel Stickstoff freikommen, daß das erste Gewächs schon aus diesem Grunde im Keimstadium durch Verbrennung zugrunde gehen kann. Deshalb wird nach jedem Gewächs das Boden/Schlammgemisch mit 2 Liter destilliertem Wasser/Gefäß durchgespült um ein Übermaß an Stickstoff und eventuell auch anderen leichtlöslichen Salzen, die meistens nicht in schädlichen Konzentrationen vorhanden sind weil sie im Effluent verbleiben, zu entfernen. Etwaige Schäden durch zu hohe Gehalte an Schwermetallen, die auch nur bei den höchsten Schlammgaben auftreten, können dann bei den nachfolgenden Gewächsen in Erscheinung treten. Es kommt auch dann noch Stickstoff frei, aber auch bei den höchsten Schlammgaben nicht mehr in einem das Pflanzenwachstum unmöglich machenden Maße.

Ein Versuch mit 15 Schlammarten wird längere Zeit weitergeführt um festzustellen, ob Schwermetallschäden im Laufe der Zeit zu- oder abnehmen. Inzwischen sind von diesem Versuch schon 12 Gewächse geerntet worden, von denen die Gewächse 1 (*Brassica napá*) und 2 (Hafer) analysiert wurden auf N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Pb, Cr und Cu und die Gewächse 5 (Hafer) und 11 (Hafer) außerdem auf Na, Cl, Cd und Ni. N wurde bestimmt nach KJELDAHL (mit „Auto-Analyzer“), P spektrofotometrisch, K und Na flammenfotometrisch (Eppendorf), Ca, Mg und die Schwermetalle mittels Atomabsorption (Perkin Ellmer 306; für Einzelheiten s. VIERVEIJZER und DE HAAN, 2) und Cl mit dem Chlor-O-Counter (Marius). Mit einigen Schlammarten sind ergänzende Untersuchungen durchgeführt worden. Soweit dabei abgewichen wurde von der obengenannten Versuchsmethodik werden Einzelheiten dazu in den betreffenden Abschnitten gegeben.

Ergebnisse aus den Versuchen

Der langlaufende Versuch mit 15 Schlammarten

Tabelle 2 gibt für die 15 Schlammarten die Durchschnittswerte der Gehalte in den Gewächsen samt ihren Variationsbreiten ($P = 5\%$) für die Objekte mit maximalem Wachstum. Es wurde nur von diesen Objekten das Gewächs analysiert, erstens wegen der Zahl der Analysen und zweitens weil von den anderen Objekten nicht immer genügend Material geerntet wurde für eine vollständige Analyse. Die Objekte waren nicht für jede Schlammart und jedes Gewächs die gleichen. Bei Schlämmen, die in gut ausgereiftem Zustand erhalten wurden und keine schädlichen Substanzen in zu hohen Konzentrationen enthielten lag das Ertragsmaximum am Anfang bei 50 oder 100 Volumenprozent, bei nicht ausgereiften Schlämmen bei 2 oder 5%. Im Laufe der Zeit verschoben die Maxima sich immer mehr nach den höheren Schlammgaben hin wenn die Gehalte an Schwermetallen in den Schlämmen nicht zu hoch waren. Die Gehalte im Gewächs sind in Tabelle 2 ausgedrückt in Prozenten der Gehalte des Objektes ohne Schlamm. Für dieses Objekt waren die absoluten Gehalte im Durchschnitt für die vier Gewächse: N 1,45%,

Tab. 2

Gehalte im Gewächs bei optimaler Klärschlammgabe in v. H. der Gehalte ohne Klärschlamm
Mittelwerte für 15 Schlammarten mit Variationsbreiten ($P = 5\%$)

Tab. 2

Contents of crop with optimal sewage sludge application in % of contents without sludge.
Mean values for 15 species of sludge with confidence limits ($P = 5\%$)

Gewächs crop	1 (<i>Brassica napa</i>)	2 (Hafer) oats	5 (Hafer) oats	11 (Hafer) oats
Mittlere Klärschlammgabe (Volumenprozent) mean sewage sludge application (vol. %)	14	28	48	59
N	196 ± 131	245 ± 197	167 ± 151	171 ± 85
P	147 ± 42	201 ± 137	233 ± 155	119 ± 58
K	104 ± 22	131 ± 121	203 ± 159	122 ± 37
Ca	121 ± 68	286 ± 224	213 ± 110	224 ± 74
Mg	104 ± 31	148 ± 62	102 ± 36	153 ± 66
Na			1790 ± 2712	257 ± 616
Cl			948 ± 2043	172 ± 156
Fe	47 ± 36	139 ± 68	200 ± 629	108 ± 47
Mn	69 ± 58	28 ± 150	79 ± 104	90 ± 126
Zn	240 ± 274	450 ± 436	537 ± 803	574 ± 634
Pb	75 ± 184	88 ± 52	100 ± 92	125 ± 43
Cr	> 100 *)	100 ± 22	70 ± 135	97 ± 106
Cu	175 ± 156	300 ± 238	258 ± 193	261 ± 136
Cd			1000 ± 3130	919 ± 2777
Ni			1028 ± 2027	750 ± 1772

*) Gehalt 0-Objekt = 0 (content check = 0).

P_2O_5 1,20 %, K_2O 3,13 %, CaO 0,98 %, MgO 0,40 %, Na_2O 0,03 % (2), Cl 0,09 % (2),
Fe 129 ppm, Mn 261 ppm, Zn 55 ppm, Pb 1,6 ppm, Cr 1,2 ppm, Cu 6,2 ppm, Cd
0,47 ppm (2), Ni 1,8 ppm (2).

Aus Tabelle 2 geht hervor, daß im Durchschnitt von den Makroelementen alle Gehalte gestiegen sind. Am meisten Na, Cl, Ca, N und P und weniger Mg und K. Von den Mikroelementen sind stark und teilweise sogar sehr stark gestiegen die Gehalte an Ni, Cd, Zn und Cu. Nicht oder nur wenig angestiegen sind die Gehalte an Fe, Pb und Cr während der Mn-Gehalt deutlich abgesunken ist.

Aus der Tabelle geht auch hervor, daß die Variationsbreite der Mittelwerte außerordentlich groß ist, insbesondere bei den Schwermetallen, aber auch bei Na und Cl. Es sei hier noch bemerkt, daß das Durchspülen der Boden/Schlammgemische in diesem Versuch erst am Ende des zweiten Versuchsjahres, nach dem neunten Gewächs, begonnen hat.

Teilweise findet die Größe der Variationsbreite ihre Erklärung in den unterschiedlichen Gehalten der Schlämme an den verschiedenen Elementen (s. DE HAAN, 3, Tabelle 5). Tabelle 3 gibt die Korrelationskoeffizienten als Maß für den Zusammenhang zwischen den Mengen (nicht: Gehalte) der verschiedenen Elemente in den Boden/Schlammgemischen und in den Gewächsen.

Danach war der Zusammenhang zwischen Angebot im Substrat und Aufnahme durch das Gewächs manchmal recht gut, aber auch manchmal sehr schlecht. Jedenfalls kann man schließen, daß im allgemeinen Mittelwerte aus verschiedenen Schlammarten wenig Aus-

Tab. 3

Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen den Mengen an den verschiedenen Elementen in den Boden|Schlammgemischen und den Gewächsen

Tab. 3

Correlation coefficients for the relation between the amounts of elements in soil|sludge mixtures and in crops

Gewächs crop	1	2	5	11
N	0,77 ***)	0,86 ***)	0,68 **)	0,84 ***)
P	0,57 *)	0,54 *)	0,40	0,41
K	0,37	0,81 *)	0,59 *)	0,81 ***)
Ca	0,69 **)	0,51	0,48	0,56 *)
Mg	0,68 **)	0,31	0,14	0,59 *)
Na			0,50	0,69 **)
Cl			0,26	0,09
Fe	0,45	0,26	0,12	0,52 *)
Mn	0,33	0,30	0,38	0,60 *)
Zn	0,62	0,32	0,78 ***)	0,12
Pb	0,20	0,67 **)	0,86 ***)	0,38
Cr	0,19	-0,02	0,13	0,15
Cu	0,78 ***)	0,62 *)	0,68 **)	0,71 **)
Cd			0,61 *)	0,84 ***)
Ni			0,68 **)	0,67 **)

), **), ***) P > 95 bzw. 99 bzw. 99,9 %; P > 95 resp. 99 resp. 99,9 %.

sagekraft haben. Jede Schlammart, für die eine Aussage gemacht werden soll, muß einzeln geprüft werden.

Ergänzende Untersuchungen mit Klärschlämmen aus Eindhoven und Leiden

Um einen Einblick zu bekommen in den Verlauf der Gehalte im Gewächs bei zunehmender Schlammgabe, wurde mit den Schlämmen aus den Städten Eindhoven und Leiden eine ergänzende Untersuchung durchgeführt in Mitscherlichgefäßen mit 5 Wiederholungen. Beide Schlämme hatten hohe Gehalte an Schwermetallen (in Tabelle 5, DE HAAN, 3, sind sie angedeutet mit den Buchstaben E = Eindhoven und K = Leiden), unterschieden sich aber darin, daß das Gewächs mit dem Schlamm aus Eindhoven keine und mit dem Schlamm aus Leiden bei den höchsten Gaben deutliche Symptome von Schwermetallschäden aufwies. Die Schlämme waren in diesem Fall mehr oder weniger in ausgereiftem Zustand indem sie etwa 1 Jahr in einer Schicht von etwa 50 cm im Freien auf dem Instituts Gelände gelagert gewesen waren.

Das Versuchsgewächs war Gras, wovon 7 Schnitte geerntet wurden. Zu jedem Schnitt wurde eine normale NPK-Düngung gegeben. Die summierten Trockensubstanzerträge in g/Gefäß waren wie folgt

Vol. %

Klärschlamm	0	1	2	5	10	20	50	100
Eindhoven	80,0	85,1	84,9	89,4	98,8	105,7	104,5	89,0
Leiden	80,0	87,2	88,9	94,0	98,5	100,9	90,4	4,2

Vom Objekt 100 % Klärschlamm aus Leiden wurde zu wenig Material geerntet für die Analysen. Was geerntet wurde stammt vom 1. Schnitt. Nachher ging das Gewächs ein.

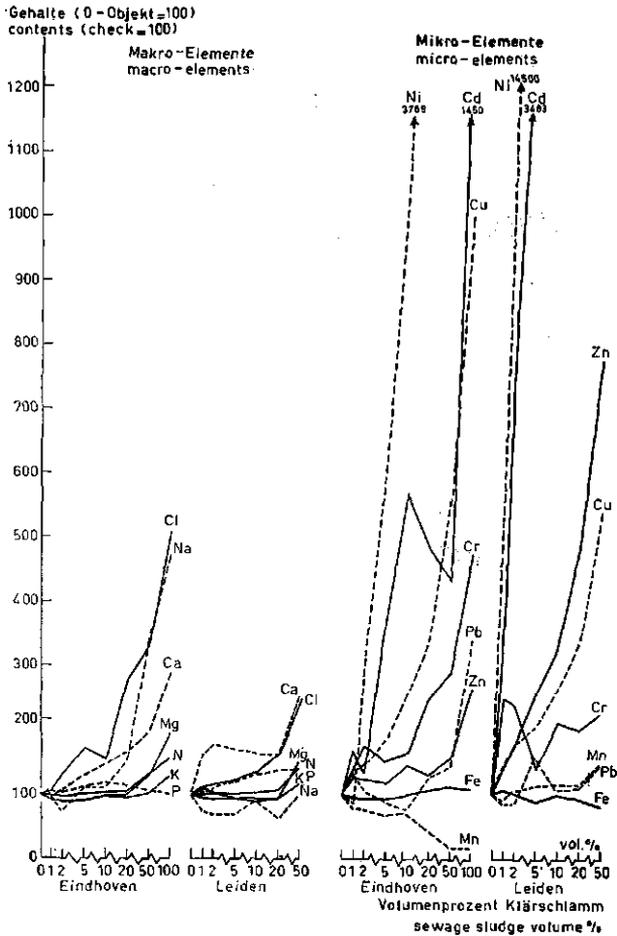


Abb. 1

Gehalte im Gras (Mittelwerte der Schnitte 1 und 6; 0-Objekt = 100) bei Ersatz eines Sandbodens durch Klärschlamm aus Eindhoven und Leiden

Fig. 1

Contents of grass (mean value of cuts 1 and 6; check = 100) with sewage sludge from Eindhoven and Leiden in substitution for a sandy soil

Schon beim 1. Schnitt zeigte es eine sehr helle Farbe. Auch auf dem Objekt 50 % Klärschlamm Leiden war das Gewächs etwas weißlich und gegen Ende der Versuchsperiode auch auf dem Objekt 100 % Klärschlamm Eindhoven.

Abbildung 1 zeigt den Einfluß der Schlammgaben auf die Gehalte an Makro- und Mikroelementen. Die Gehalte sind Mittelwerte für die Schnitte 1 und 6 und ausgedrückt in v. H. der Gehalte des 0-Objektes. Die Mikroelemente sind inzwischen in allen Schnitten bestimmt worden, aber das Bild für die 7 Schnitte unterscheidet sich nicht wesentlich von dem für die 2. Die Gehalte des 0-Objektes waren für die 2 Schnitte: N 3,12 %, P_2O_5 1,22 %, K_2O 4,32 %, CaO 0,68 %, MgO 0,30 %, Na_2O 0,10 %, Cl 0,06 %, Fe 108 ppm, Mn 134 ppm, Zn 76 ppm, Pb 3,0 ppm, Cr 0,4 ppm, Cu 4,6 ppm, Cd 0,3 ppm, Ni 1,3 ppm.

Aus der Abbildung geht hervor, daß beim Schlamm aus Eindhoven von den Makroelementen insbesondere die Gehalte an Na und Cl angestiegen sind. Beim Schlamm aus Leiden war das in geringerem Maße der Fall. Von den Mikroelementen stiegen insbesondere die Gehalte an Ni und Cd stark an. Der Ni-Gehalt beim Schlamm aus Leiden sogar auf das 145fache und der Cd-Gehalt auf das 35fache. Beim Schlamm aus Eindhoven stieg auch der Cu-Gehalt stark an (auf das 10fache) und beim Schlamm aus Leiden

der Zn-Gehalt (auf das 8fache). Auch der Cr- und Pb-Gehalt stieg beim Schlamm aus Eindhoven ziemlich stark an. Der Fe-Gehalt war ziemlich stabil mit einer Tendenz zum Absinken beim Schlamm aus Leiden. Beim Schlamm aus Eindhoven lief der Mn-Gehalt stark zurück (auf 15 % des Wertes für das 0-Objekt). Dieses Absinken läßt sich aus dem Mangangehalt des Schlammes nicht erklären. Dieser war für Eindhoven 1290 und für Leiden 844 ppm (in Tabelle 5, DE HAAN, 3, sind die Mn-Gehalte nicht erwähnt, weil sie damals noch nicht bestimmt worden waren).

Ergebnisse aus einem Versuch mit Klärschlamm aus häuslichem Abwasser (Leeuwarden) als Meliorationsmittel für einen leichten Sandboden und einen schweren Tonboden

Ziel dieser Untersuchung war zu erforschen inwieweit dieser Schlamm, der damals zu Kosten von Hfl 15,—/Tonne auf Trockenbeeten vorgetrockneten Materials zusammen mit Hausmüll vergraben wurde, verwendet werden könnte zur Verbesserung einmal eines leichten Sandbodens (3 % Humus) und zum anderen eines schweren Tonbodens (70 % abschlämmbare Teile < 16 µm). Die Böden wurden hier zu 0, 5, 10, 20, 40, 70 und 100 Volumenprozent von Klärschlamm ersetzt. Der Versuch wurde im Freien durchgeführt in Eternitgefäßen mit einem Inhalt von 140 Liter und mit Möglichkeit zum Auffangen von Dränwasser zwecks Analyse. Im ersten Versuchsjahr (1972) wurde Senf angebaut. Die chemische Zusammensetzung von Klärschlamm, Böden und Gewächs ohne Klärschlamm gibt die Tabelle 4. Unter Gewächs ist hier zu verstehen das ausge-reifte Gewächs ohne Korn. Das Korn wurde bis jetzt nicht analysiert.

Den Einfluß des Ersatzes von Boden durch Klärschlamm auf die Gehalte im Gewächs zeigt Abbildung 2, wo die Gehalte wiederum ausgedrückt sind in v. H. der Gehalte für

Tab. 4

Die chemische Zusammensetzung von Klärschlamm (Leeuwarden), Böden ohne Klärschlamm (Sand und Ton) und Gewächs dieser Böden

Tab. 4

Chemical composition of sewage sludge (Leeuwarden), soils without sludge (sand and clay) and crop (mustard) from these soils

Bestandteil component		Klärschlamm sewage sludge	Sandboden sandy soil	Tonboden clay soil	Gewächs/crop	
					Sandboden sandy soil	Tonboden clay soil
N	%	1,98	0,09	0,19	0,59	0,73
P ₂ O ₅	%	5,75	0,10	0,16	0,29	0,59
K ₂ O	%	0,34	0,06	0,94	1,37	2,32
CaO	%	3,56	0,07	0,48	1,94	3,11
MgO	%	0,66	0,04	0,92	0,17	0,22
Na ₂ O	%	0,12	0,02	0,08	0,67	0,40
Cl	%	0,04	0,01	0,10	0,78	1,30
Fe	ppm	26000	2300	34800	97	657
Mn	ppm	1084	67	1280	16	37
Zn	ppm	2394	14	136	124	124
Pb	ppm	538	17	51	3,2	5,3
Cr	ppm	195	19	88	1,1	1,9
Cu	ppm	933	2	58	3,1	5,1
Cd	ppm	3	0,3	1,1	0,6	1,1
Ni	ppm	46	2	46	0,5	1,9

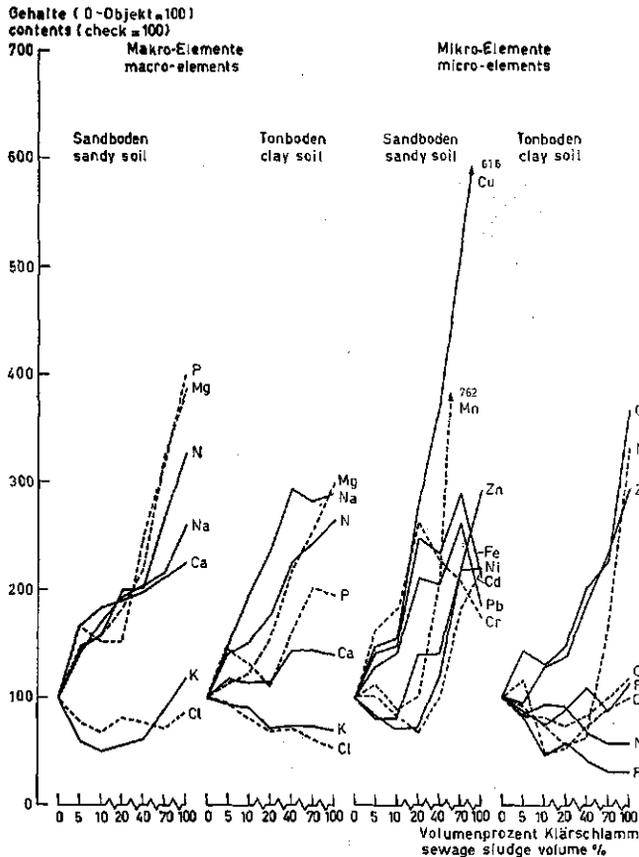


Abb. 2
Gehalte im Gewächs (Senf ohne Korn) bei Ersatz eines Sand- und eines Tonbodens durch Klärschlamm aus Leewarden
0-Objekt = 100

Fig. 2
Contents of crop (mustard without grain) with sewage sludge from Leewarden in substitution for a sandy and a clay soil. Check = 100

die Böden ohne Schlamm. Wie aus der Tabelle hervorgeht waren diese Gehalte nicht für beide Böden gleich.

Aus Abbildung 2 geht hervor, daß besonders bei dem Sandboden die Gehalte an N, P, Ca, Mg und Na vom Schlamm positiv beeinflusst wurden und die Gehalte an K und Cl negativ. Von den Mikroelementen wurden bei dem Sandboden alle Gehalte positiv beeinflusst, insbesondere die Gehalte an Zn, Cu und Mn. Auch beim Tonboden wurden die Gehalte an diesen drei Elementen deutlich positiv beeinflusst, die Gehalte an den anderen Mikroelementen hingegen nicht oder sogar negativ (Fe, Ni). Zu bemerken ist hierzu noch, daß der Tonboden dem Rhein-Maas-Stromgebiet entstammt und von sich aus schon einen recht hohen Schwermetallgehalt hat, obwohl er abgesetzt wurde zu einer Zeit wo es noch keine Industrie gab.

Ergebnisse aus einem Versuch mit Verwendung von flüssigem Klärschlamm als Düngemittel

Die üblichste Weise der Klärschlammverwendung in der Landwirtschaft ist der Absatz in flüssiger Form. 1972 wurde mit einem Versuch begonnen, in dem jährlich 2 Schlammarten (Almelo und Alkmaar) in flüssiger Form in Mengen von 0, 75, 150 und 225 dz/ha Trockensubstanz gleich ungefähr 0, 150, 300 und 450 m³/ha Flüssigschlamm einem Sandboden zugefügt werden. Auch dieser Versuch wird durchgeführt in Eternitgefäßen mit

einem Inhalt von 140 Liter und mit 6 Wiederholungen, von denen drei als Ackerland und drei als Grasland genutzt werden. Hier werden die Grasanalysen des zweiten Versuchsjahres behandelt (im ersten Jahr fanden keine Analysen statt). Der Schlamm wurde im ersten Versuchsjahr durch die Krume bis 20 cm Tiefe gemischt und im zweiten in Portionen von ca. 75 m³/ha mit Zwischenpausen von einem Tag im Frühjahr auf die Narbe gegeben. Es wurden im zweiten Versuchsjahr 6 Schnitte geerntet und analysiert. Alle Schnitte erhielten eine normale NPK-Düngung in mineralischer Form (umgerechnet in kg/ha Schnitt 60 N, 60 P₂O₅ und 120 K₂O).

Die mittlere chemische Zusammensetzung der Schlammarten sowie der 6 Grasschnitte des 0-Objektes gibt Tabelle 5. Der Boden war der gleiche als der Sandboden aus dem vorigen Versuch.

Tab. 5

Die chemische Zusammensetzung von Klärschlamm aus Almelo und Alkmaar und von Gras des Versuchsbodens ohne Klärschlamm

Tab. 5

Chemical composition of sewage sludge from Almelo and Alkmaar and grass from the experimental soil (sand) without sludge

Bestandteil component		Klärschlamm/sewage sludge		Gras grass
		Almelo	Alkmaar	
N	%	4,75	3,30	2,40
P ₂ O ₅	%	6,85	4,90	0,76
K ₂ O	%	0,12	0,08	3,46
CaO	%	4,10	4,85	0,64
MgO	%	0,40	0,41	0,29
Na ₂ O	%	Sp (traces)	0,28	0,12
Cl	%	Sp (traces)	0,94	0,43
Fe	ppm	37200	8900	109
Mn	ppm	1010	274	160
Zn	ppm	2053	1696	62
Pb	ppm	316	412	7,4
Cr	ppm	1706	85	2,6
Cu	ppm	1580	402	6,3
Cd	ppm	123	8	0,3
Ni	ppm	286	32	1,5

Der Einfluß der Schlammgaben auf die chemische Zusammensetzung des Grases ist wiedergegeben in Abbildung 3. Die Gehalte sind Mittelwerte für die Schnitte und ausgedrückt in v. H. der Gehalte des 0-Objektes. Aus der Abbildung geht hervor, daß von den Makroelementen besonders der Natriumgehalt erhöht wurde und beim Schlamm aus Alkmaar auch der Chlorgehalt. Die Kaliumgehalte sind bei beiden Schlämmen zurückgegangen. Die Gehalte der übrigen Hauptelemente haben zugenommen, aber nicht in spektakulärer Weise.

Von den Mikroelementen haben beim Schlamm aus Almelo in Übereinstimmung mit den relativ hohen Gehalten an diesen Elementen im Schlamm besonders die Gehalte an Ni und Cd stark zugenommen. Die Gehalte an Cr, Cu und Zn wurden durch die höchste Gabe dieses Schlammes verdoppelt. Bei dem Schlamm aus Alkmaar waren die Gehaltserhöhungen bei den Mikroelementen weniger stark. Relativ am stärksten waren auch hier trotz niedriger Gehalte im Schlamm wieder die Erhöhungen bei Cd und Ni. Der Mangangehalt ging hier unter Einfluß der Schlammdüngung etwas zurück.

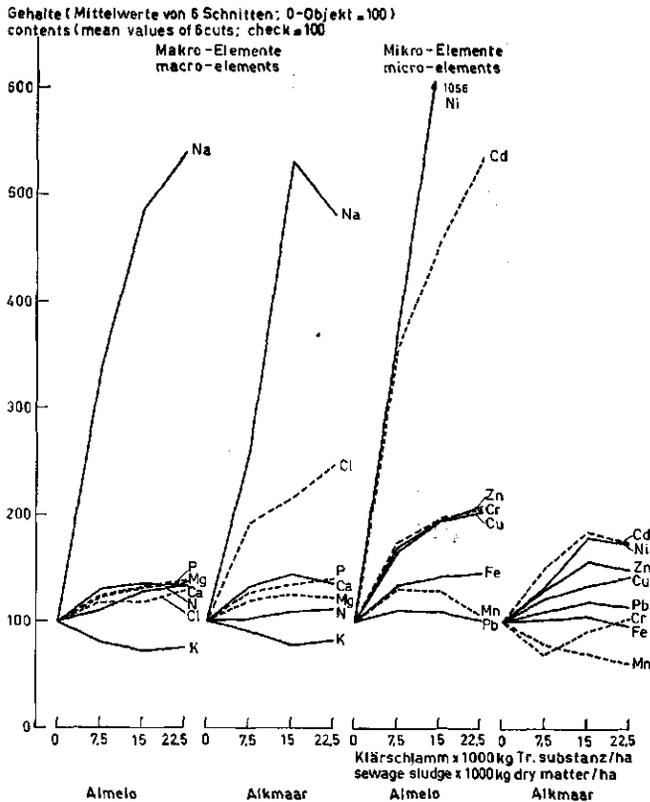


Abb. 3
Gehalte im Gras (Mittelwerte von 6 Schnitten; 0-Objekt = 100) bei verschiedenen Gaben von Klärschlamm aus Almelo und Alkmaar

Fig. 3
Contents of grass (mean values of 6 cuts; check = 100) with different applications of sewage sludge from Almelo and Alkmaar

Abbildung 4 zeigt den Einfluß der Schlämme auf die Gehalte bei den verschiedenen Schnitten um einen Eindruck zu geben über den Verlauf der Effekte mit der Zeit. In Abbildung 4 sind Mittelwerte für die 3 Schlämstufen ausgedrückt in v. H. der Werte für das 0-Objekt. Aus der Abbildung geht hervor, daß bei den Makroelementen der Schlämmeinfluß im allgemeinen am stärksten war bei dem ersten Schnitt. Nur für Calcium traf das nicht zu. Bei den Mikroelementen war die vorherrschende Tendenz eine Zunahme im Laufe der Zeit. Besonders deutlich war das bei den Elementen Cd und Ni für den Schlamm aus Almelo.

Schwermetallgehalte von Gras unter praktischen Umständen

In den Niederlanden wird der Flüssigschlamm meistens in Tanks mit einem Fassungsvermögen von etwa 5 m³ auf das Feld gefahren. Zu Grünland wird dann auf einmal etwa 25 m³/ha gegeben, und das kann sich einige Male im Jahr wiederholen. Der Schlamm wird in der Regel kurz nach der Beweidung oder der Heu- oder Grasernte ausgefahren. Der dann noch oder schon wieder vorhandene Grasbestand wird in dieser Weise beschmutzt, und das kann eine bedeutsame zusätzliche Erhöhung der Schwermetallgehalte des Grases zufolge haben, wie aus Untersuchungen von VAN DRIEL (4) hervorgegangen ist.

Im Anschluß an seine Untersuchungen in den niederländischen Flußniederungen, wo die Böden und das darauf wachsende Gras bei Hochwasser durch Flußschlamm kontaminiert werden, wurden von VAN DRIEL auch zahlreiche Grasproben von mit Klärschlamm behandelten Grundstücken analysiert. Dabei wurde Unterschied gemacht zwischen Klär-

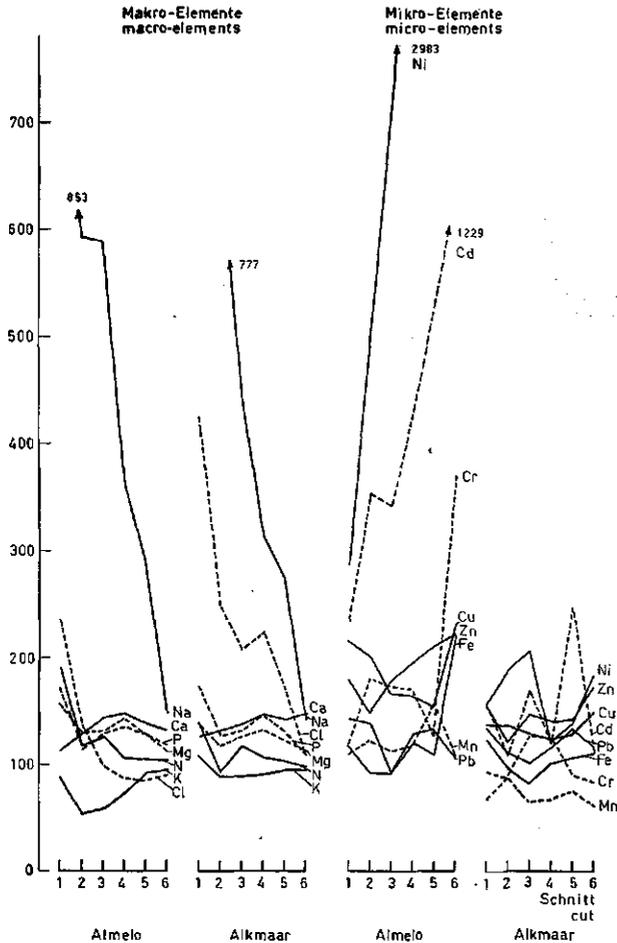


Abb. 4

Gehalte im Gras mit Klärschlamm (Mittelwerte für 3 verschiedene Gaben) in % der Gehalte ohne Klärschlamm in den aufeinanderfolgenden Schnitten

Fig. 4

Contents of grass with sewage sludge (mean values for 3 different applications) in % of contents without sewage sludge in successive cuts

schlamm aus häuslichem und solchem aus gemischtem häuslichem und industriellem Abwasser. Von jeder Probe wurde jeweils die eine Hälfte gewaschen mit einem Detergenten und die andere nicht. Zum Vergleich wurden auch Grasproben von unbehandelten Grundstücken untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung gibt die Tabelle 6. Die Gehalte an Hg, As und Sb wurden bestimmt vom Interuniversitären Reaktorinstitut in Delft mittels Neutronenaktivierungsanalyse.

Aus der Tabelle geht hervor, daß die Schwermetallgehalte in den gewaschenen Proben bedeutend niedriger waren als in den ungewaschenen. Mit letzteren hat man selbstverständlich in der Praxis zu tun, obwohl nicht bekannt ist, ob die äußerlich anhaftenden Schwermetalle ernährungsphysiologisch von gleicher Bedeutung sind als die vom Gras aufgenommenen. Es besteht keine Gewähr dafür, daß durch das Waschen alle anhaftenden Schlamnteilchen entfernt worden sind. Der Wascheffekt war nicht bei allen Elementen gleich. Auch auf den nicht mit Klärschlamm behandelten Grundstücken war das Waschen von Einfluß auf den Schwermetallgehalt des Grases. Aus der Tabelle geht auch eindeutig hervor, daß die Schwermetallgehalte mit industriell kontaminiertem Schlamm höher waren als mit Schlamm rein häuslicher Herkunft.

Tab. 6

Schwermetallgehalte in gewaschenen und nicht gewaschenen Grasproben von mit Klärschlamm aus häuslichem bzw. häuslichem + industriellem Abwasser behandelten Grundstücken in v. H. der Gehalte auf unbehandelten Grundstücken
(nach VAN DRIEL, 4)

Tab. 6

Heavy-metal contents in washed and unwashed grass samples from fields treated with sludge from domestic and domestic + industrial sewage in % of contents of untreated fields
(after VAN DRIEL, 4)

Schlamm sludge Proben samples	häuslich domestic		häuslich + industriell domestic + industrial	
	gewaschen washed	nicht gewaschen unwashed	gewaschen washed	nicht gewaschen unwashed
Zn	129	185	221	316
Pb	150	243	175	314
Cu	155	255	445	1273
Cd	100	167	533	1033
Ni	143	200	1428	1400
Hg	100	175	867	5000
As	100	250	100	400
Sb	80	95	1000	3150

Diskussion

Aus den Versuchsergebnissen ging hervor, daß eine Behandlung des Bodens mit Klärschlamm eine deutliche Änderung der chemischen Zusammensetzung der Gewächse zufolge haben kann. Im allgemeinen findet eine Erhöhung der Gehalte statt. Bei den Makroelementen können insbesondere die Gehalte an Na und Cl stark erhöht werden obwohl die Gehalte an diesen Elementen in den Schlämmen wegen ihrer Leichtlöslichkeit recht gering sind. Was noch im Schlamm drin ist, wird offenbar von den Pflanzen gut aufgenommen und auch leicht ausgewaschen, wie aus Dränwasseranalysen hervorgegangen ist. Dasselbe gilt auch für Kalium. Der durch den Stickstoffgehalt bedingte meistens deutlich positive Effekt des Klärschlammes auf den Ertrag kann aber eine Erniedrigung des Kaliumgehaltes in der Pflanze zufolge haben, was dann womöglich wegen der Elektroneutralität des Systems mit einer Erniedrigung des Chlorgehaltes zusammengehen kann.

Bei den Mikroelementen können insbesondere die Gehalte an Zn, Cu, Cd und Ni stark bzw. sehr stark ansteigen. Extreme Erhöhungen findet man jedoch nur bei deutlich industriell kontaminierten Schlämmen und bei sehr hohen Gaben. Unter praktischen Verhältnissen können bei Verwendung von Flüssigschlamm insbesondere bei Gras die Schwermetallgehalte zusätzlich erhöht werden durch äußerlich dem Gewächs anhaftende Schlammteilchen. Der Mangangehalt der Gewächse wird durch Klärschlamm das eine Mal erhöht und das andere Mal erniedrigt, ohne daß dafür bis jetzt eine Erklärung gegeben werden kann. Im allgemeinen sind die Unterschiede zwischen Schlämmen verschiedener Herkunft so groß, daß Mittelwerte so gut wie nichts besagen. Weiter findet eine Verschiebung der Gehaltsänderungen im Laufe der Zeit statt. Aus den Versuchsergebnissen ging hervor, daß bei den Makroelementen die Gehaltsänderungen im Laufe der Zeit im allgemeinen abnehmen, bei den Mikroelementen hingegen zunehmen. Wahrscheinlich nimmt die Mobilität der Schwermetalle mit der Zeit zu in Zusammenhang

mit einer Versäuerung des Milieus. Aus Dränwasseranalysen ist hervorgegangen, daß die meistens recht großen Kalkmengen im Klärschlamm relativ schnell ausgewaschen werden.

Die von uns erhaltenen Ergebnisse stimmen überein mit Ergebnissen aus der Literatur (SCHÄFER, 5; LE RICHE, 6; PLATZEN, 7; WARNUSS, 8). Im allgemeinen sind die in der Literatur erwähnten Gehaltserhöhungen geringer als die von uns gefundenen, was wohl damit zusammenhängen wird, daß meistens geringere Klärschlammengen verwendet wurden. Allerdings verwendeten auch KICK und POLETSCHNY (9) reine Klärschlämme als Kulturböden ohne jedoch extreme Gehaltserhöhungen zu finden. Nur PATTERSON (10) fand für Nickel ähnliche Erhöhungen als wir.

Über die praktische Bedeutung der Gehaltsänderungen im Gewächs durch Klärschlamm ist noch wenig bekannt. Für das Pflanzenwachstum sind sie nur in Extremfällen von Bedeutung. Die Pflanze wächst noch normal bei Schwermetallgehalten, die 10 bis 100 mal so hoch sein können als normal, soweit man im Augenblick überhaupt weiß, was normal ist. Noch schwieriger ist es, etwas auszusagen über den Einfluß der Gehaltsänderungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier bei Verwendung der Pflanze oder Teile davon als Nahrungs- oder Futtermittel. In den Niederlanden sind Schafe eingegangen bei Verzehr von Gras mit mehr als 20 ppm Cu in der Trockensubstanz. Das Schweinefutter aber wird künstlich mit ca. 250 ppm Kupfer angereichert weil diese Tiere dann besser gedeihen, jedenfalls schneller wachsen. Von den anderen Elementen weiß man mit Sicherheit noch weniger. Nur glaubt man, daß für Cadmium das Maß des Zulässigen in der menschlichen Nahrung schon erreicht ist.

Aufgrund der Erhöhung der Schwermetallgehalte im Gewächs bei Verwendung von Klärschlamm wird empfohlen, davon auf Ackerland im Durchschnitt nicht mehr als 20 und auf Grünland nicht mehr als 10 dz/ha Jahr auf Trockensubstanzbasis zu geben und auch nur dann, wenn die Gehalte im Trockenschlamm nicht höher sind als 2000 ppm Zn, 500 ppm Cu, 50 ppm Ni, 10 ppm Cd und 10 ppm Hg. Für die anderen Metalle sind noch keine Grenzwerte festgestellt, weil diese im Augenblick für weniger gefährlich gehalten werden. Wenn die Gehalte im Klärschlamm höher sind als die obengenannten, wird empfohlen die Gaben dementsprechend herabzusetzen. Bei deutlich industriell kontaminierten Schlämmen ist eine landwirtschaftliche Verwertung dann meistens nicht mehr lohnend. Für den Gartenbau wird der Gebrauch von Klärschlamm abgelehnt, weil mit der Möglichkeit gerechnet wird, daß in Zukunft Anforderungen an die Schwermetallgehalte der Gewächse gestellt werden, denen man auf mit Klärschlamm behandelten Böden nicht genügen könnte.

Zusammenfassung

Anhand von Ergebnissen aus Versuchen wobei der Boden zu einem bestimmten Teil (0 - 100 %) von vorgetrocknetem Klärschlamm ersetzt oder dieser in flüssiger Form verabreicht wurde, wurde der Einfluß dieses Materials auf die Gehalte an Makro- (N, P, K, Ca, Mg, Na, Cl) und Mikroelementen (Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Cu, Cd, Ni, Hg, As, Sb) behandelt. Bei Anwendung hoher Gaben industriell kontaminierter Schlämme können insbesondere die Gehalte an Ni, Cd, Cu und Zn stark ansteigen und der Mangangehalt zurückgehen. Von den Makroelementen können insbesondere die Gehalte an Na und Cl stark ansteigen und der Kaliumgehalt zurückgehen und dann mitunter auch der Chlorgehalt. Bei den Makroelementen sind die Effekte am stärksten bei oder kurz nach der Anwendung. Bei den Mikroelementen ist die Tendenz einer Aktivitätszunahme mit Verlauf der Zeit vorhanden. Die Unterschiede zwischen Schlämmen verschiedener Herkunft sind groß.

Bei Verwendung von Klärschlamm als Düngemittel in normalen Gaben sind die Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der Gewächse nicht groß, aber meistens doch wohl feststellbar. Insbesondere bei Verwendung von Flüssigschlamm auf Grasland können die Schwermetallgehalte des Gewächses zusätzlich erhöht werden durch anhaftende Schlammteilchen.

Aufgrund der Erhöhung der Schwermetallgehalte der Gewächse durch Klärschlamm wird den niederländischen Landwirten empfohlen davon durchschnittlich auf Ackerland nicht mehr als 20 und auf Grünland nicht mehr als 10 dz/ha pro Jahr auf Trockensubstanzbasis zu geben und auch nur dann wenn der Schlamm in der Trockensubstanz nicht mehr enthält als 2000 ppm Zn, 500 ppm Cu, 50 ppm Ni, 10 ppm Cd und auch 10 ppm Hg. Bei höheren Gehalten sind die Gaben dementsprechend herabzusetzen. Für andere als die erwähnten Metalle wurden bis jetzt keine Grenzwerte festgestellt. Für den Gemüsebau wird der Gebrauch von Klärschlamm im allgemeinen abgelehnt.

Summary

DE HAAN, S.: *Die chemische Zusammensetzung von Gewächsen auf mit Klärschlamm behandelten Böden (The chemical composition of crops grown on soils treated with sewage sludge).*

Landwirtsch. Forsch., Sonderh. 31, Kongreßband 1974.

Data are presented on the influence of application of liquid and dried sewage sludges to soils on the crop contents of macro- (N, P, K, Ca, Mg, Na, Cl) and microelements (Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Cu, Cd, Ni, Hg, As, Sb). High application rates of industrially contaminated sludges may greatly increase especially the contents of Ni, Cd, Cu and Zn, and reduce the content of Mn. Of the macroelements, especially the contents of Na and Cl may rise, and K may decline, and then with it sometimes also the Cl content is decreased. With macroelements, effects are strongest at the time of application or shortly thereafter. With the microelements, effects tend to become stronger in the course of time. Differences among sludges of different origin are large.

At normal rates of application of sewage sludge as a fertilizer changes in chemical composition of crops are not large, though mostly they are discernible. Especially with applications of liquid sludge to grassland there may be an additional effect on the heavy-metal content of the grass as a result of attached sludge particles.

On account of the rise in heavy-metal content of crops the farmers in the Netherlands are advised to apply on the average no more than 2000 kg of sewage sludge per ha per year on a dry-matter basis to arable land and 1000 kg to grassland, and then only if the sludge, on a dry-matter basis, does not contain more than 2000 ppm Zn, 500 ppm Cu, 50 ppm Ni, 10 ppm Cd and 10 ppm Hg. If these contents are higher, then the rates of application should be proportionally lowered. For vegetables, the use of sewage sludge in general is advised against.

Résumé

DE HAAN, S.: *Die chemische Zusammensetzung von Gewächsen auf mit Klärschlamm behandelten Böden (La composition chimique des végétaux cultivés sur des sols traités avec des boues d'épuration).*

Landwirtsch. Forsch., Sonderh. 31, Kongreßband 1974.

L'influence d'amendements avec des boues d'épuration séchées et liquides sur la composition chimique (macro-éléments N, P, K, Ca, Mg, Na, Cl et micro-éléments Fe, Mn,

Zn, Pb, Cr, Cu, Cd, Ni, Hg, As, Sb) fut étudiée. Les fortes doses de boues contaminées par les effluents industriels peuvent faire augmenter fortement les teneurs en Ni, Cd, Cu et Zn et réduire le teneur en Mn. Des éléments majeurs surtout les teneurs en Na et Cl peuvent augmenter et celle en K abaisser. Dans ce dernier cas la teneur en Cl peut être également réduite. L'influence des éléments majeurs est la plus forte au moment de l'application ou peu après. Celle des micro-éléments tend à augmenter à mesure de la croissance.

Les différences entre les boues sont très grandes. A doses normales de boues d'épuration comme amendement les différences dans la composition chimique des végétaux ne sont pas très grandes, quoique souvent perceptibles. Spécialement l'utilisation de boues liquides sur herbages peut entraîner un effet additionnel sur la teneur en métaux lourds à la suite de l'adhésion de particules de boues aux feuilles.

En vue de l'augmentation de la teneur en métaux-lourds des végétaux les paysans Hollandais sont conseillés de limiter l'utilisation des boues d'épuration à 2000 kg par ha par an de matières sèche sur les terres arables et 1000 kg par ha sur herbages et encore seulement lorsque celle-ci ne contienne plus de 2000 p.p.m. Zn, 500 p.p.m. Cu, 50 p.p.m. Ni, 10 p.p.m. Cd et 10 p.p.m. Hg. Si les teneurs sont plus élevées, les doses d'application doivent être réduites proportionnellement. L'utilisation des boues dans la culture maraîchère est généralement déconseillée.

Schriftum

1. HAAN, S. DE: De waarde van zuiveringslib als meststof of grondverbeteringsmiddel. Bedrijfsontwikkeling 3, 1037 - 1041, 1972
2. VIERVEIJZER, H. C. en S. DE HAAN: Bepaling van de gehalten aan voor het gewas beschikbare en uitspoelbare zware metalen in zuiveringslib. H₂O 6, 546 - 549, 1973
3. HAAN, S. DE: Ergebnisse aus Versuchen mit Abwasserklärslamm. Landwirtsch. Forsch., Sonderh. 27/I, 102 - 108, 1972
4. DRIEL, W. VAN: Onderzoek naar de invloed van jarenlange intensieve bemesting met zuiveringslib op de zware-metaalsamenstelling van grond en gewas van landbouwpercelen van het Trappistenklooster De Koningshoeve te Tilburg. Inst. Bodemvruchtbaarheid, Nota 10, 1974
5. SCHÄFER, K.: Feld- und Gefäßversuche zur landwirtschaftlichen Verwertung von schwermetallhaltigen flüssigen Faulschlamm. Diss. Bonn 1967
6. RICHE, H. H. LE: Metal contamination of soil in the Woburn market-garden experiment resulting from the application of sewage sludge. J. Agric. Sci., Camb. 71, 205 - 208, 1968
7. PLATZEN, H.: Gefäß- und Lysimeterversuche zur Verwertung hoher Gaben an Faulschlamm- und Müllklärslammkompost für die Verbesserung nährstoffarmer Löß- und Sandrohböden. Diss. Bonn 1970
8. WARNUSS, J.: Feldversuche zur Nachwirkung von blei-, chrom-, kupfer- und zinkhaltigen Abwasserklärslamm bei Gras und Getreide sowie Gefäßversuche zur Aufnahme von Cadmium und Zink. Diss. Bonn 1973
9. KICK, H. u. H. POLETSCHNY: Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen auf entwässertem Abwasserklärslamm. Landwirtsch. Forsch., Sonderh. 27/I, 67 - 72, 1972
10. PATTERSON, J. B. E.: Metal toxicities arising from industry. In: Trace elements in soils and crops. Min. Agric. Fish. Food, Tech. Bull. 21, 193 - 207, 1971