

# Klärschlamm: Die Qualität ist laufend besser geworden

Toni CANDINAS, Georges M. CHASSOT und Jean-Marc BESSON, Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, CH-3003 Bern  
 Auskunft: Toni Candinas, e-mail: anton.candinas@iul.admin.ch, Fax +041 (0)31 323 84 15,  
 Tel. +41 (0)31 323 83 81

**Klärschlamm wird seit 20 Jahren intensiv untersucht. Die Nährstoffgehalte haben nur geringe Änderungen erfahren. Die Nährstofffrachten hingegen sind mit der zunehmenden Schlammmenge gestiegen. Die Fracht der meisten Schwermetalle hat dagegen stark abgenommen, da fast alle Schwermetallgehalte beträchtlich gesunken sind. Noch wenig bekannt ist über Gehalte und Frachten an organischen Schadstoffen im Schlamm.**

Klärschlamm (KS) ist vom Düngerwert her mit Abstand der wichtigste landwirtschaftlich verwendbare Abfalldünger (Lötscher *et al.* 1999). Er unterliegt im Vergleich zu andern Düngern einer intensiven und umfassenden Gehaltskontrolle. Zusätzlich werden die anfallenden Mengen erhoben. So ist im Laufe der Jahre eine umfangreiche Datensammlung entstanden, welche die Entwicklung der Gehalte und Frachten einer Reihe von Nutz- und Schadstoffen im Klärschlamm über die Zeit aufzeigt.

Seit 1984 werden alle fünf Jahre vertiefte Auswertungen der gesammelten Daten durchgeführt. Im vorliegenden Teil der Arbeit werden Daten über Gehalte und Frachten für 1984, 1989 und 1994 vorgestellt. Zur Ergänzung werden ausgewählte Ergebnisse aus früheren Jahren aufgeführt. In einem folgenden zweiten Teil veröffentlichen wir eine Beurteilung der ökologischen Bedeutung von Klärschlamm im Vergleich mit andern Düngern.

## Vorgehen

Für die Berechnung von mittleren Gehalten und Frachten an Nutz- und Schadstoffen im Klärschlamm wurde die gleiche Methode wie bei früheren Arbeiten (Candinas *et al.* 1989 und 1991) angewandt. Damit ist gewährleistet, dass die Angaben der Jahre 1984, 1989 und 1994 direkt vergleichbar sind.

Das Produkt aus KS-Menge x Gehalt des Stoffes S (im KS) einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) ergibt die Jahresfracht an S dieser ARA. Die Summe der Frachten aller ARA ergibt die Jahresfracht an S im KS der Schweiz. Die Division der Jahresfracht durch die gesamte KS-Menge ergibt das gewichtete Mittel des Ge-

halts an S. Ist der Nutzstoffgehalt (25 % der Fälle) oder der Schwermetallgehalt (15 %) nicht bekannt, wird das gewichtete Mittel des Gehalts zur Berechnung der Jahresfracht verwendet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Anzahl aller in Betrieb stehenden ARA sowie die KS-Menge.

Zum Vergleich werden wo möglich auch Daten von 1975 und 1980 (teilweise auch

weitere) aufgeführt. Diese beruhen auf älteren eigenen Untersuchungen, die aber nur eingeschränkt mit den späteren Ergebnissen verglichen werden dürfen, denn sie beruhen auf einer viel einfacheren Methode: Es wurden arithmetische Mittelwerte aller zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnisse (164 - 226 Einzelwerte) gebildet.

## Klärschlamm ist nährstoffreich

Der Gehalt an Stickstoff (N) im KS ist im Laufe der Jahre angestiegen, der Gehalt an Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) zurückgegangen (Tab. 2). Interessant



**Eine sorgfältige Probenahme ist die Voraussetzung, um zuverlässige Kontrolldaten zu erhalten.**

**Tab. 1. Anzahl Abwasserreinigungsanlagen (ARA), angeschlossene Wohnbevölkerung, Klärschlamm (KS)-Produktion und landwirtschaftlich verwendete Menge an Trockensubstanz (TS)**

	Einheit	1974	1980	1984	1989	1994
Anzahl kommunale ARA		430	710	855	930	977
Angeschlossene Wohnbevölkerung	%	46	70	81	88	91
KS-Produktion total	1000 t	90	170	176	213	211
Landwirtschaftlich verwendet*	1000 t	72	110	88	107	116

\*1974 und 1980: Spiess (pers. Mitteilung)

**Tab. 2. Gewichtete mittlere Gehalte an Nährstoffen (kg/t TS) im Klärschlamm der Abwasserreinigungsanlagen (ARA)**

Inhaltsstoffe	1975	1980	1984	1989	1994
Gesamtstickstoff	38	36	40	45	42,6
Ammonium-N	10	11	13	15	17,0
Phosphor (P), alle ARA	16,1	21,7	32	23	23,6
- ARA mit Flockungsfiltration	nb*	29	40	27	29,3
- ARA mit chemischer P-Fällung	nb*	35	38	25	23,7
- ARA ohne chemische P-Fällung	nb*	20	20	16	19,5
Kalium (K)	nb*	nb*	nb*	nb*	3,6
Kalzium (nicht gekalkter KS)	85	68	73	64	69,0
Magnesium	6,0	6,8	5,7	5,1	5,1

\*nb: nicht bekannt

**Tab. 3. Frachten an Trockensubstanz und Nährstoffen im Klärschlamm in Tonnen**

Inhaltsstoff	1975	1980	1984	1989	1994	Landwirtschaft <sup>1</sup>
Trockensubstanz	95000	170000	176000	213000	211000	116000
Gesamtstickstoff	3600	6100	7000	9500	9000	4750
Phosphor	1530	3690	5560	4900	4980	2940
Kalzium	8100	1160	1290	1350	1470	7625
Magnesium	570	1160	1000	1090	1070	620

<sup>1</sup>Fracht, welche 1994 in der Landwirtschaft verwendet wurde.

sind die Werte für Phosphor (P). Der mittlere P-Gehalt aller ARA hat von 1971 bis 1984 (Daten von 1971 und 1975 stammen von Furrer 1977) stetig zugenommen. Dies hing vor allem mit der zunehmenden Einführung von ARA mit chemischer P-Fällung zusammen. Mit der Einführung des P-Verbots in Waschmitteln 1986 hat der mittlere P-Gehalt dann abgenommen. In ARA ohne P-Fällung wirkte sich diese Massnahme nur vorübergehend aus. Nach einem Rückgang des P-Gehalts von 1984 bis 1989 um 20 % war er 1994 wieder so hoch wie vor der Einführung des P-Verbots in Waschmitteln. Der P-Gehalt im KS von ARA mit chemischer P-Fällung sank nach der Einführung des P-Verbots in Waschmitteln sehr stark, um 34 %, und hat seitdem nicht wieder zugenommen. In ARA mit Flockungsfiltration (4. Reinigungsstufe) hat der P-Gehalt nach einem massiven Rückgang bis 1989 wieder leicht zugenommen (Abb. 1).

Anhand einer P-Bilanz im System Siedlungsentwässerung wurde der Wirkungsgrad der P-Abscheidung aus dem Rohabwasser untersucht (Candinas und Chassot 1997). Der Wirkungsgrad der P-Abschei-

dung hat über die Jahre zugenommen. Die markanteste Verbesserung des Wirkungsgrades wurde durch die Verbannung des Phosphors in Waschmitteln erzielt. In ARA ohne P-Fällung stieg der Wirkungsgrad von 1984 bis 1994 von 28 % auf 53 %. Die Mikroorganismen entzogen dem Abwasser, das nach dem P-Verbot viel weniger P enthielt, gleich viel Phosphor wie vorher. In ARA mit chemischer P-Fällung war die Verbesserung des Wirkungsgrades im gleichen Zeitraum bescheidener. Sie stieg von 68 % auf 83 %.

Der Eisengehalt in ARA mit P-Fällung (64 kg Fe/t TS) war 1994 viel höher als in ARA ohne P-Fällung (15,5 kg Fe/t TS). Der Aluminiumgehalt betrug im Mittel aller Anlagen, mit nur geringen Schwankungen, 19,2 kg Al/t TS. Dies zeigt, dass Eisensalze im Unterschied zu Aluminiumsalzen eine grosse Bedeutung bei der P-Fällung in ARA haben.

Die Nährstofffrachten haben im Laufe der Jahre, entsprechend der wachsenden Schlammmenge, deutlich zugenommen (Tab. 3). Eine Ausnahme bildet die P-Fracht. Nach einem starken Anstieg bis 1984 hat diese bis 1989 deutlich ab- und dann wieder leicht zugenommen.

Über die effektiv in die Landwirtschaft ausgebrachten Nährstofffrachten kann nur für 1994 relativ zuverlässig Auskunft gegeben werden. Sie betragen gut die Hälfte der gesamten Nährstofffracht. Die Kaliumfracht im KS liegt nur für 1994 vor und betrug 760 t K, davon gingen 415 t in die Landwirtschaft.

## Schwermetallgehalte im Klärschlamm sinken

Die Schwermetallgehalte des Klärschlammes haben über 20 Jahre hinweg stark abgenommen (Abb. 2). 1994 betragen sie im Mittel noch 38 % der seit 1992 geltenden Grenzwerte. Nur bei Zink (mit 55 %) und vor allem Kupfer (mit 65 %) liegen die mittleren Gehalte noch über dem halben Grenzwert. 1984 betrug der Cadmiumgehalt noch 114 % (1975, in Abb. 2 nicht aufgeführt, gar 500 %), der Nickel- und Zinkgehalt 97 % beziehungsweise 93 % dieses Grenzwertes. Die absoluten Gehalte sowie die geltenden Grenzwerte nach Stoffverordnung (StoV, Änderung 1992) sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Qualität von Klärschlamm wird in verschiedenen Kantonen anhand des Schwermetall-Phosphat-Wertes (SMP) beurteilt. Damit kann die KS-Kundschaft unter verschiedenen Angeboten den Klärschlamm der besten Qualität auswählen. Der SMP wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$SMP = \sqrt{\frac{SM_1^2 + SM_2^2 + \dots + SM_8^2 + SM_9^2}{9 \cdot P_2O_5}}$$

wobei:  $SM_x$  = Gehalt des Schwermetalls X in % des zugehörigen Grenzwerts  
9 = Anzahl berücksichtigte Schwermetalle  $P_2O_5$  in kg/t TS

Es werden alle neun Schwermetalle, für welche Grenzwerte in der Stoffverordnung festgelegt wurden, berücksichtigt; die AOX-Werte (ein Summenwert für adsorbierbare halogenorganische Verbindungen) hingegen nicht. Ein  $SMP < 0,75$  wird als gut, ein  $SMP > 1$  als ungenügend bezeichnet (GSA 1994). Erst seit 1989 genügt die KS-Qualität dieser Forderung.

Die Schwermetallfracht im Klärschlamm (Tab. 5) hat bis 1980 massiv zugenommen. Seither jedoch hat sie um über 40 % abgenommen, obwohl die KS-Produktion in der gleichen Zeitspanne um 20 % anstieg. Eine sehr starke Abnahme ist bei Cadmium (-82 %), Blei (-73 %) sowie Chrom (-66 %) zu verzeichnen. Nur die Kupferfracht ist seit 1980 etwa gleich geblieben.

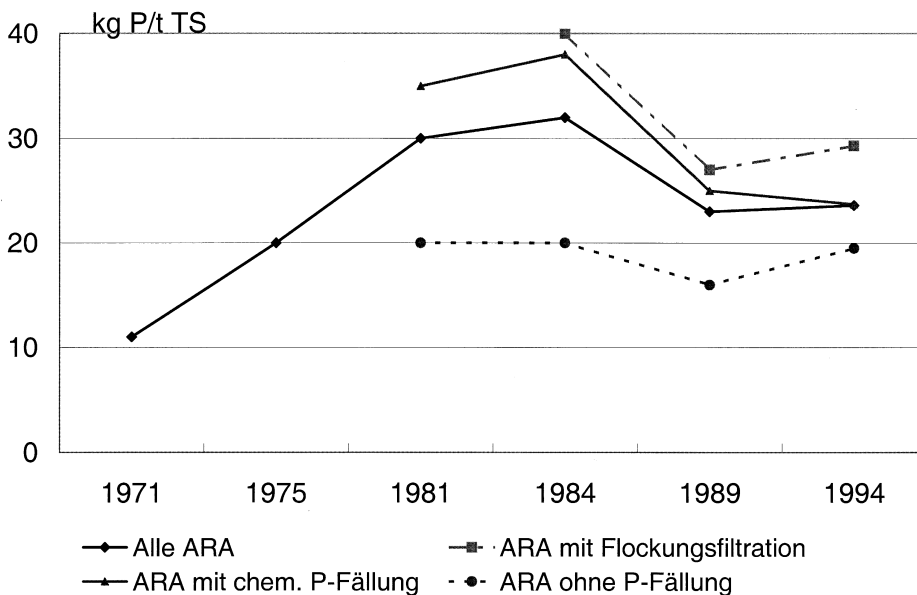


Abb. 1. Phosphorgehalt im Klärschlamm von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit verschiedenen P-Eliminationsverfahren, 1971-1994.

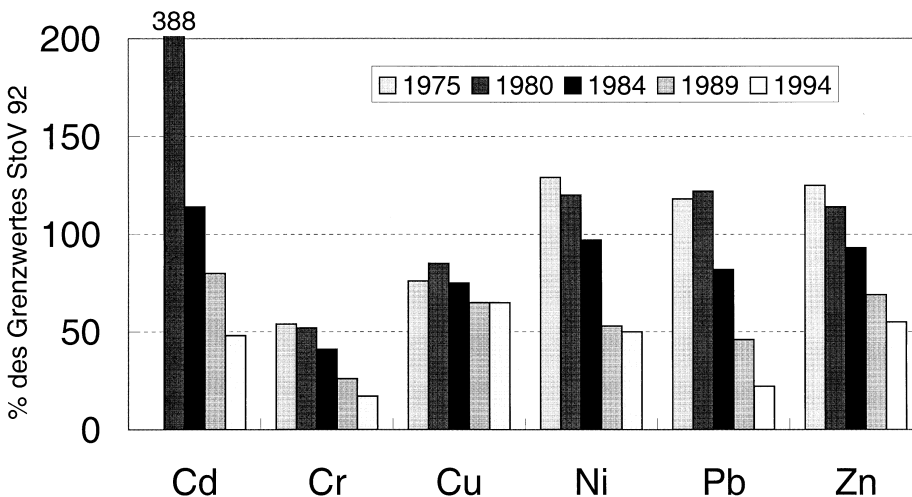


Abb. 2. Mittlere Auslastung des seit 1992 geltenden Grenzwertes der Stoffverordnung (= 100 %). Absolute Gehalte und Grenzwerte in Tabelle 4.

Tab. 4. Gewichtete mittlere Schwermetallgehalte (g/t TS) im Klärschlamm 1975 bis 1994, sowie AOX-Gehalte 1994 und geltende Grenzwerte (für AOX, adsorbierbare halogen-organische Verbindungen: Richtwert; nb: nicht bekannt)

Schadstoff	1975	1980	1984	1989	1994	GW <sup>1</sup>
Cadmium (Cd)	25,2	16,9	5,7	4,0	2,4	5
Kobalt (Co)	26,9	15,6	10,4	10,2	7,9	60
Chrom (Cr)	268	311	207	129	84,0	500
Kupfer (Cu)	453	510	447	388	388	600
Quecksilber (Hg)	n.b.	n.b.	3,6	2,6	1,9	5
Molybdän (Mo)	8,0	10,6	11,3	7,0	5,6	20
Nickel (Ni)	103	96	77,7	42,6	40,3	80
Blei (Pb)	590	610	409	232	133	500
Zink (Zn)	2505	2273	1858	1378	1110	2000
AOX	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	263	500
<sup>2</sup> SMP	5,32	2,92	1,05	1,00	0,76	-

<sup>1</sup>GW: Grenzwert nach StoV, Änderung 1992

n.b.: nicht bekannt

<sup>2</sup>SMP: Schwermetallphosphat-Wert (GSA 1994)

Candinas *et al.* (1989) forderten, dass nur die qualitativ bessere Hälfte der Schlamm landwirtschaftlich verwendet werden solle. In dieser Hälfte wären etwa 40 % der Gesamt-Metall-Fracht enthalten. Ob die-

ses Ziel in der Praxis erreicht wurde, zeigt sich im Vergleich: Anteil der Schlammproduktion, die 1994 landwirtschaftlich verwendet wurde (55 %) mit Anteil der Metallfracht, die in die Landwirtschaft

gelangte. Dazu haben wir folgende Resultate erhalten: Landwirtschaftlich verwendet wurden vorwiegend Cd-arme Schlämme. Nur 43 % der Cd-Fracht im KS gelangten auf den Boden. Bei Nickel betrug der Frachtanteil, der auf den Boden ausgebracht wurde 44 %, bei Chrom waren es 49 %, bei Kupfer und Quecksilber je 50 %. Die Blei- und Zinkfracht der landwirtschaftlich verwendeten Schlämme war jedoch mit 57 % beziehungsweise 56 % sogar leicht überproportional zur verwendeten KS-Menge von 55 %. Die Gesamtfracht aller Metalle, welche in die Landwirtschaft gelangte, entsprach mit 54 % ungefähr dem Anteil der gesamthaft verwendeten KS-Menge. Dieses Ergebnis zeigt, dass die lokalen politischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten beim Entscheid, KS zu entsorgen oder zu verwerten, meist mehr Gewicht haben als die Schlammqualität.

### Wenige Daten zu organischen Schadstoffen

In der Stoffverordnung wurde für AOX (ein Summenwert für adsorbierbare halogenorganische Verbindungen) ein Richtwert verankert. Deshalb gibt es nur für AOX umfangreiche Untersuchungen zum Gehalt im Klärschlamm. In verschiedenen Untersuchungen wurden auch andere organische Schadstoffe bestimmt, meist aber nur eine kleine Auswahl von ARA beprobt. Im Folgenden werden für diejenigen organischen Schadstoffe, für welche in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö 1998) Richt-, Prüf- und Sanierungswerte festgelegt wurden, Untersuchungsergebnisse für die Schweiz wiedergegeben (Tab. 6).

Frachtberechnungen für organische Schadstoffe im Klärschlamm lassen sich nur für AOX relativ zuverlässig durchführen. Die Auswertung sämtlicher Daten für 1994 kommt zum Ergebnis, dass die AOX-Fracht 55,6 t betrug, wovon 31,2 t in die Landwirtschaft gelangten. Für Dioxine und Furane kommt Ferrari (1998) auf eine Gesamtfracht im KS von rund 6,4 g Internationale Toxizitäts-Äquivalente (I-TEQ), wovon rund 3,5 g (55 %) in die Landwirtschaft gelangten. Die Gesamtfracht an Polychlorierten Biphenylen im KS wird auf 84 kg geschätzt, 46 kg (55 %) gelangten in die Landwirtschaft. Für Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe liegt die Schätzung der Gesamtfracht im KS bei rund 1200 kg, für den Anteil im landwirtschaftlich verwendeten KS bei rund 690 kg

**Tab. 5. Schwermetallfrachten im Klärschlamm (t/Jahr)**

Metall	1975	1980	1984	1989	1994	Landw. <sup>1</sup>	% Landw. <sup>2</sup>
Cd	2,4	2,9	1,00	0,86	0,51	0,22	43
Co	2,5	2,7	1,84	2,17	1,68	0,91	54
Cr	25,5	52,9	36,4	27,4	17,8	8,74	49
Cu	43,0	86,7	79,0	82,9	82,0	41,1	50
Hg	–	–	0,64	0,55	0,41	0,21	51
Mo	0,8	1,8	1,99	1,50	1,18	0,62	53
Ni	9,8	16,3	13,7	9,08	8,52	3,76	44
Pb	56,1	103,7	72,0	49,5	28,0	15,9	57
Zn	238	386	327	293	234	132	56
Alle Metalle	378	653	534	467	375	204	54

<sup>1</sup>Metallfracht, welche 1994 in die Landwirtschaft gelangte.

<sup>2</sup>Anteil der Fracht, die 1994 in die Landwirtschaft gelangte, in % der Gesamtfracht.

**Tab. 6. Einige Untersuchungsergebnisse zum Gehalt an ausgewählten organischen Schadstoffen im Klärschlamm**

Verbindung	Einheit	Mittlerer Gehalt	Häufiger Bereich	Untersuchung
Adsorbierbare halogenorganische Verbindungen (AOX)	g/t TS	263	150-350	Diese Studie
Dioxine und Furane (PCDD/PCDF)	ng I-TEQ/kg TS	30	10-50	Amt für Umweltschutz und Energie 1993
Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, 16 Leitsubstanzen)	mg/kg TS	6	2-15	Berset und Holzer 1995
Davon: Benzo(a)pyren	mg/t TS	19	nd*-150	Berset und Holzer 1995, Frost <i>et al.</i> 1994
Polychlorierte Biphenyle (PCB, 7 Leitsubstanzen)	mg/t TS	410	290-540	Berset und Holzer 1995
Coplanare PCB (3 Leitsubstanzen)	ng I-TEQ/kg TS	26	4-150	Berset und Holzer 1996

\*nd: nicht nachweisbar

(55 %), wobei Ferrari (1998) einen grossen Unsicherheitsbereich angibt.

## Hygienische Beschaffenheit ist gut

Die Klärschlamm-Verordnung von 1981 (KS-Vo) verlangte die Hygienisierung von KS, wenn dieser auf Gemüse- oder Futterflächen ausgebracht oder in Güllegruben eingefüllt wurde. Ein KS galt als hygienisiert, wenn er weniger als 100 Enterobacteriaceen pro Gramm aufwies. Dieser Wert wurde in der Stoffverordnung (Änderung 1992) übernommen. Seit 1992 (StoV) darf unhygienisierter KS nicht mehr in Güllegruben eingefüllt werden. Zum Düngen von Gemüse- und Futterflächen durfte unhygienisierter KS aus kleinen ARA mit einer KS-Produktion unter 100 t TS noch bis 30. September 1997 abgegeben werden.

Die Ergebnisse der Kontrolle des Enterobacteriaceengehalts von hygienisiertem KS zeigten, dass dessen Beschaffenheit im Laufe der Jahre viel besser geworden ist. 98 % aller kontrollierten KS entsprechen heute den Hygieneanforderungen. Dem war in früheren Jahren nicht so. 1984

mussten noch über 70 % der Proben beanstandet werden.

## Die Hälfte wird landwirtschaftlich verwendet

Eine Umfrage bei allen kantonalen Gewässerschutzämtern sowie bei den Fachstellen für die kantonale oder regionale KS-Beratung hat gezeigt, dass 1994 insgesamt 55 % des gesamten KS landwirtschaftlich verwendet wurde. Nur gerade drei Kantone entsorgten 100 % ihres KS ausserhalb der Landwirtschaft. Andere setzten immer noch voll auf die landwirtschaftliche Verwendung.

Gemäss Kupper (1993) wurden 1991 73 % des landwirtschaftlich verwendeten Klärschlammes in flüssiger Form abgegeben, rund die Hälfte davon als hygienisierter Faulschlamm. Im Übrigen gelangten 22 % als entwässertes KS, 3 % als kompostierter KS und 2 % als getrockneter KS in die Landwirtschaft.

Seit 1993 sind grosse Umwälzungen in der Landwirtschaftspolitik im Gange. Die Bestrebungen, die Landwirtschaft zu ökologisieren, beginnen sich stärker auszuwirken. Die Bereitschaft der Landwirt-

schaft, KS als Dünger zu verwenden, nimmt ab. Dazu kommt, dass die Kosten der landwirtschaftlichen Verwendung stark angestiegen, die Kosten der Entsorgung durch Verbrennung jedoch gesunken sind.

## Wie weiter?

Die Kostenentwicklung verstärkt die Tendenz, dass sich in Zukunft die landwirtschaftliche Verwendung von Klärschlamm nur noch dort behaupten wird, wo dies aus ökologischen Gründen unbedenklich ist. Die Klärschlamm-Qualität kann auch in Zukunft noch besser werden. In verschiedenen nordeuropäischen Ländern werden bereits heute deutlich tiefere Schwermetallgehalte im Klärschlamm festgestellt. Zum Teil wurden bereits deutlich tiefere Schwermetallgrenzwerte festgelegt. Zudem muss auch der Frage der Belastung von Klärschlamm mit organischen Schadstoffen, ihrer Toxizität und den Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit in Zukunft vermehrt Beachtung geschenkt werden.

## LITERATUR

Das vollständige Literaturverzeichnis ist beim Ersteller erhältlich.

## RÉSUMÉ

### Boues d'épuration: la qualité s'est améliorée

Des composants importants des boues d'épuration sont analysés intensément depuis 20 ans. Les teneurs en éléments nutritifs ont peu varié. En revanche, les quantités d'éléments nutritifs ont augmenté avec la quantité croissante de boues d'épuration. Les teneurs en métaux lourds ont fortement diminué. Les quantités ont également diminué pour la plupart des polluants métalliques. Les connaissances sur les teneurs et les quantités de polluants organiques sont encore relativement médiocres.

## SUMMARY

### Swiss sewage sludge quality has improved

The sewage sludge quality is intensively monitored since 20 years in Switzerland. The nutrient content did not change much. However, nutrient loads increased with increasing sewage sludge production. The content of heavy metals decreased considerably. For most metals the load decreased too. The knowledge about content and loads of organic pollutants is still inadequate.

**KEY WORDS:** sewage sludge, biosolids, quality, heavy metals, nutrients, content, load, organic pollutants