

	Vorwort	5
1	Einleitung	17
2	Derzeitiger Stand der Klärschlammentsorgung	21
2.1	Die Entsorgungssituation in Europa	22
2.2	Die Entsorgungssituation in Deutschland	23
2.3	Die Entsorgungssituation in Nordrhein-Westfalen	26
2.3.1	Überblick über die Entsorgungswege	26
2.3.2	Die Entsorgung der Klärschlämme durch die sondergesetzlichen Wasserverbände in Nordrhein-Westfalen	29
2.3.3	Die Entsorgung der Klärschlämme durch verbandsfreie Kläranlagen	39
3	Schadstoffbelastung im Klärschlamm	45
3.1	Organische Schadstoffe	46
3.1.1	Untersuchungsparameter	46
3.1.2	Untersuchungsprogramm	48
3.1.3	Schwankungen einzelner Schadstoffkonzentrationen	51
3.1.4	Stoff- und gruppenspezifische Betrachtungen	53
3.1.4.1	Adsorbierte organische Halogenverbindungen (AOX)	54
3.1.4.2	Extrahierbare organische Halogenverbindungen (EOX)	56
3.1.4.3	Aromaten	58
3.1.4.4	Chlorbenzole	60
3.1.4.5	Chlorierte Kohlenwasserstoffe	62
3.1.4.6	Chlorpestizide	64
3.1.4.7	Chlorphenole	66
3.1.4.8	Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	68
3.1.4.9	Moschusverbindungen	70
3.1.4.10	Organozinnverbindungen	74
3.1.4.11	Östrogene	78
3.1.4.12	Phenole	79
3.1.4.13	Polybromierte Diphenylether	80
3.1.4.14	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	82
3.1.4.15	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	86
3.1.4.16	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	88
3.1.4.17	Phthalate	90
3.1.4.18	Tenside	92
3.1.5	Statistische Auswertungen	95
3.1.5.1	Mögliche Einflüsse auf die Konzentrationen organischer Schadstoffe	95
3.1.5.2	Regressionsanalysen	98
3.1.6	Stoff- und gruppenbezogene Auswertungen	102
3.1.6.1	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX)	102
3.1.6.2	Aromaten	102
3.1.6.3	Chlorbenzole	102
3.1.6.4	Chlorierte Kohlenwasserstoffe	103
3.1.6.5	Chlorpestizide	103

3.1.6.6	Chlorphenole	103
3.1.6.7	Extrahierbare organische Halogenverbindungen (EOX)	103
3.1.6.8	Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	103
3.1.6.9	Moschusverbindungen	104
3.1.6.10	Polybromierte Diphenylether	104
3.1.6.11	Organozinnverbindungen	105
3.1.6.12	Östrogene	106
3.1.6.13	Phenole	106
3.1.6.14	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	106
3.1.6.15	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	107
3.1.6.16	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	107
3.1.6.17	Phthalate	108
3.1.6.18	Tenside	108
3.1.7	Einflussgrößenbezogene Auswertungen	110
3.1.7.1	Charakteristik des Einzugsgebiets	110
3.1.7.2	Abwasserbehandlungstechnik	113
3.1.7.3	Verfahren der Schlammstabilisierung	116
3.1.8	Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten	118
3.1.8.1	Korrelationen organischer mit anorganischen Stoffen	118
3.1.8.2	Korrelationen zwischen organischen Stoffen	120
3.2	Bewertung der Schadstoffbelastung kommunaler Klärschlämme im Vergleich zu anderen Düngemitteln	122
3.2.1	Ermittlung der Schadstofffrachten in Abhängigkeit der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte der einzelnen Düngemittel	123
3.2.2	Datenstand zur relativen Schadstoffbelastung der Düngemittel	125
3.2.3	Mit der Stickstoffzufuhr verbundene Schadstofffrachten	126
3.2.4	Mit der Zufuhr von Phosphor verbundene Schadstofffrachten	128
3.2.5	Mit der Zufuhr von organischer Masse verbundene Schadstofffrachten	130
3.2.6	Belastung mit organischen Schadstoffen	130
3.3	Fazit	133
4	Verfahren der Klärschlammensorgung und Phosphorrückgewinnung	137
4.1	Einsatz von Klärschlamm auf Böden	138
4.1.1	Landwirtschaftliche Verwertung	138
4.1.2	Entsorgung im Landschaftsbau	141
4.2	Thermische Verfahren der Klärschlammensorgung	144
4.2.1	Monoverbrennung	146
4.2.2	Mitverbrennung in Restabfallverbrennungsanlagen (MVA)	149
4.2.3	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken	152
4.2.4	Mitverbrennung in Zementwerken	156
4.3	Weitere Verfahren	159

4.4	Verfahren der Phosphorrückgewinnung	161
4.4.1	Phosphorrückgewinnung aus der wässrigen Phase	161
4.4.2	Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche	163
4.4.2.1	Klärschlamm	164
4.4.2.2	Klärschlammasche	169
4.5	Fazit	170
5	Ökologische Bewertung der Klärschlamm Entsorgung	171
5.1	Ziel	172
5.2	Untersuchungsrahmen	172
5.2.1	Bezugsgröße und funktionale Einheit	172
5.2.2	Systemgrenzen	173
5.2.3	Klärschlammqualität	174
5.2.4	Optionen	176
5.2.5	Vorgehen bei Wirkungsabschätzung und Bewertung	178
5.3	Vergleichsszenarien	182
5.3.1	Landwirtschaftliche Verwertung (Szenario L1)	182
5.3.2	Landschaftsbauliche Verwertung (Szenario L2 und L3)	186
5.3.3	Monoverbrennung (Szenarien MoV1, MoV2, MoV3)	190
5.3.4	Mitverbrennung in einer MVA (Szenario MiV1)	196
5.3.5	Mitverbrennung in einem Braunkohlekraftwerk (Szenarien MiV2, MiV3, MiV4, MiV5)	198
5.3.6	Mitverbrennung in einem Steinkohlekraftwerk (Szenarien MiV6, MiV7)	206
5.3.7	Mitverbrennung in einem Zementwerk (Szenario MiV8)	210
5.3.8	Mitbehandlung in einer MBA (Szenario MBA)	212
5.4	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	214
5.4.1	Ressourcenbeanspruchung	217
5.4.1.1	Fossile Ressourcen	217
5.4.1.2	Phosphorerz	220
5.4.2	Treibhauseffekt	220
5.4.3	Versauerung	223
5.4.4	Terrestrische Eutrophierung	223
5.4.5	Aquatische Eutrophierung	226
5.4.6	Humantoxizität	226
5.4.6.1	Krebsrisikopotenzial	226
5.4.6.2	Quecksilber	229
5.4.6.3	Feinstaub (PM10)	229
5.4.7	Schadstoffeintrag in den Boden	232
5.4.7.1	Blei	232
5.4.7.2	Cadmium	232
5.5	Normierung und Rangbildung	235
5.5.1	Allgemeine Rückschlüsse	235
5.5.2	Bewertung der Optionen	238
5.6	Signifikante und sensitive Einflussfaktoren	240
5.7	Abschließende Bewertung und Ausblick	242

6	Grenzwertvorschläge für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen	245
6.1	Konzeptioneller Ansatz der Bewertung und Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe	246
6.2	Abschätzung von Stoffgehalten im Boden und im Bodenwasser	250
6.3	Ermittlung von Klärschlamminhaltsstoffen	255
6.3.1	Schutzgut Bodenleben	256
6.3.2	Schutzgut Nahrungs- und Futtermittel	260
6.3.3	Schutzgut Grundwasser	268
6.3.4	Ergebnisse	271
6.3.5	Gesamtresultat	274
6.4	Grenzwertbereiche und Grenzwertvorschläge für Stoffe mit besonderer Relevanz	274
6.4.1	Ubiquitär in Böden verbreitete Substanzen	277
6.4.1.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	278
6.4.1.2	Polychlorierte Biphenyle (PCB ₆)	280
6.4.1.3	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	280
6.4.2	Bodenfremde Substanzen	282
6.4.2.1	Triclosan	282
6.4.2.2	Moschusverbindungen	282
6.4.2.3	Organozinnverbindungen	284
6.4.2.4	Polybromierte Diphenylether	287
6.4.2.5	Decabromdiphenylether (DBDE)	288
6.4.2.6	Di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP)	289
6.4.2.7	Tenside	290
6.5	Fazit	292
7	Zusammenfassung	295
8	Literaturverzeichnis	299
Anhang		317
Anhang 1	Untersuchungsprogramm	318
Anhang 2	Regressionsanalyse	322
Anhang 3	Korrelationskoeffizienten	325
Anhang 4	Korrelationsmatrix	327
Tagungsband zum Symposium „Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme“ am 27. und 28. April 2006 im Eurogress Aachen		331