

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
|            | <b>Vorwort</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1</b>   | <b>Einleitung</b>  | <b>17</b> |
| <b>2</b>   | <b>Derzeitiger Stand der Klärschlammentsorgung</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Die Entsorgungssituation in Europa</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Die Entsorgungssituation in Deutschland</b>   | <b>23</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Die Entsorgungssituation in Nordrhein-Westfalen</b>   | <b>26</b> |
| 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        |
| <b>3</b>   | <b>Schadstoffbelastung im Klärschlamm</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Organische Schadstoffe</b>  | <b>46</b> |
| 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        |
| <b>3.2</b> | <b>Bewertung der Schadstoffbelastung kommunaler Klärschlämme im Vergleich zu anderen Düngemitteln</b>                | <b>122</b> |
| 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        |
| <b>3.3</b> | <b>Fazit</b>   | <b>133</b> |
| <b>4</b>   | <b>Verfahren der Klärschlammensorgung und Phosphorrückgewinnung</b>  | <b>137</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Einsatz von Klärschlamm auf Böden</b>   | <b>138</b> |
| 4.1.1      | Landwirtschaftliche Verwertung   | 138        |
| 4.1.2      | Entsorgung im Landschaftsbau   | 141        |
| <b>4.2</b> | <b>Thermische Verfahren der Klärschlammensorgung</b>   | <b>144</b> |
| 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        |
| <b>4.3</b> | <b>Weitere Verfahren</b>   | <b>159</b> |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>4.4</b> | <b>Verfahren der Phosphorrückgewinnung</b>                                     | <b>161</b> |
| 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        |
| <b>4.5</b> | <b>Fazit</b>   | <b>170</b> |
| <b>5</b>   | <b>Ökologische Bewertung der Klärschlamm Entsorgung</b>                        | <b>171</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Ziel</b>  | <b>172</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Untersuchungsrahmen</b>   | <b>172</b> |
| 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        |
| <b>5.3</b> | <b>Vergleichsszenarien</b>   | <b>182</b> |
| 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        |
| <b>5.4</b> | <b>Ergebnisse der Wirkungsabschätzung</b>                                      | <b>214</b> |
| 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        |
| <b>5.5</b> | <b>Normierung und Rangbildung</b>  | <b>235</b> |
| 5.5.1      | Allgemeine Rückschlüsse  | 235        |
| 5.5.2      | Bewertung der Optionen   | 238        |
| <b>5.6</b> | <b>Signifikante und sensitive Einflussfaktoren</b>                             | <b>240</b> |
| <b>5.7</b> | <b>Abschließende Bewertung und Ausblick</b>                                    | <b>242</b> |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| <b>6</b>   | <b>Grenzwertvorschläge für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen</b>         | <b>245</b> |
| <b>6.1</b>   | <b>Konzeptioneller Ansatz der Bewertung und Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe</b> | <b>246</b> |
| <b>6.2</b>   | <b>Abschätzung von Stoffgehalten im Boden und im Bodenwasser</b>                            | <b>250</b> |
| <b>6.3</b>   | <b>Ermittlung von Klärschlamminhaltsstoffen</b>   | <b>255</b> |
| 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        |
| <b>6.4</b>   | <b>Grenzwertbereiche und Grenzwertvorschläge für Stoffe mit besonderer Relevanz</b>         | <b>274</b> |
| 6.4.1  | Ubiquitär in Böden verbreitete Substanzen   | 277        |
| 6.4.1.1  | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe  | 278        |
| 6.4.1.2  | Polychlorierte Biphenyle (PCB <sub>6</sub> )  | 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        |
| <b>6.5</b>   | <b>Fazit</b>  | <b>292</b> |
| <b>7</b>   | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>295</b> |
| <b>8</b>   | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>299</b> |
| <b>Anhang</b>  |   | <b>317</b> |
| <b>Anhang 1</b>  | <b>Untersuchungsprogramm</b>  | <b>318</b> |
| <b>Anhang 2</b>  | <b>Regressionsanalyse</b>   | <b>322</b> |
| <b>Anhang 3</b>  | <b>Korrelationskoeffizienten</b>  | <b>325</b> |
| <b>Anhang 4</b>  | <b>Korrelationsmatrix</b>   | <b>327</b> |
| <b>Tagungsband zum Symposium „Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme“ am 27. und 28. April 2006 im Eurogress Aachen</b> |   | <b>331</b> |